21-22 NOVEMBER

# UNITECH'24

WWW.UNITECH.TUGAB.BG

# International Scientific Conference

## VOLUME 1

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

# INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

# UNITECH 2024 GABROVO

## VOLUME I

**21-22 NOVEMBER 2024**

**GABROVO**

*The Conference is organized with the financial support of:*

- **ARSENAL JSCO**
- **ADTECH LTD**
- **AMK MOTION GMBH + CO KG**
- **BULGARIAN NATIONAL TELEVISION**
- **BULGARIAN NEWS AGENCY**
- **EUROBULPROJECT LTD**
- **EXTRAPACK JSCO**
- **ELECTRIC MOTOR COMPANY JSCO**
- **IDEAL STANDARD VIDIMA JSCO**
- **IMPULS JSCO**
- **MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE BULGARIA**
- **GABROVO MUNICIPALITY**
- **GABROVO REGIONAL ADMINISTRATION**
- **PANDA PEN LTD**
- **PODEMCRANE JSCO**
- **POLIKOM LTD**
- **PROEKTSTROY - PETAR PETROV**
- **P3 BULGARIA LTD**
- **RAIS LTD**
- **REGIONAL INNOVATION CENTER „AMBITIOUS GABROVO"**
- **FANUC BULGARIA LTD**
- **HAMBERGER BULGARIA LTD**
- **CERATIZIT BULGARIA AG**
- **METROHM AG**

*The Proceedings is included in the National Reference List of modern Bulgarian scientific publications with scientific peer review by National Centre for Information and Documentation.*

*The papers have been reviewed.*

**© TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 2024**
**© UNIVERSITY PUBLISHING HOUSE "VASIL APRILOV" – GABROVO, 2024**

***Print ISSN: 1313-230X***
***Online ISSN: 3033-1404***

# ORGANIZING COMMITTEE

**Chairman:** Assoc. Prof. Dragomir Vassilev, PhD
*Vice Rector 'Science & Scientific Research'*

**Members**:
Assoc. Prof. Plamen Tsankov, PhD
Assoc. Prof. Hristo Hristov, PhD
Assoc. Prof. Goran Goranov, PhD
Assoc. Prof. Vladimir Dunchev, PhD
Assoc. Prof. Svetla Panayotova, PhD

**Technical Assistant:**
Petya Peneva, MA

# PROGRAM COMMITTEE

**Chairman**: Prof. Iliya Zhelezarov, PhD
*Rector of Technical University of Gabrovo, Bulgaria*

**Members:**

| | |
|---|---|
| Acad. Prof. D.Sc. Chavdar Rumenin | Bulgaria |
| Corr. Mem. Prof. D.Sc. Tony Spassov | Bulgaria |
| Acad. Prof. Dragoljub Mirjanic | Republika Srpska Bosnia and Herzegovina |
| Prof. DHC Helmut Hopp | Germany |
| Prof. D.Sc. DHC Yuriy Kuznetsov | Ukraine |
| Acad. Prof. Tomislav Pavlovic | Serbia |
| Prof. D.Sc. Ivan Yachev | Bulgaria |
| Acad. Prof. Dimitar Dimitrov | Bulgaria |
| Prof. D.Sc. Jordan Maximov | Bulgaria |
| Prof. D.Sc. Raycho Ilarionov, PhD | Bulgaria |
| Prof. Nikolaj Ganev | Czech Republic |
| Prof. Dr. rer. oec. DHC Volker Tolkmitt | Germany |
| Prof. Dr. Phil. Ludwig Hilmer | Germany |
| Prof. Lotar Otto | Germany |
| Prof. Emil Kolev | Germany |
| Prof. D.Sc. Pylyp Hovorov | Ukraine |
| Prof. Elena Kovalenko | Ukraine |
| Prof. D.Sc. Yurii Yaremchuk | Ukraine |
| Prof. D.Sc. Mihail Prokofiev | Ukraine |
| Prof. D.Sc. Igor Sazonov | Belarus |
| Prof. Hilmi Kuscu | Turkey |
| Prof. D.Sc. Rumen Daskalov | Bulgaria |
| Prof. Dr.Sc. Vasil Kavardjikov | Bulgaria |
| Prof. D.Sc. Galya Duncheva | Bulgaria |
| Prof. D.Sc. Dimitar Dichev | Bulgaria |
| Prof. Irina Aleksandrova, PhD | Bulgaria |
| Prof. Zvezditsa Nenova, PhD | Bulgaria |
| Prof. Nikolay Madzharov, PhD | Bulgaria |
| Prof. Angel Anchev, PhD | Bulgaria |
| Prof. Stanimir Sadinov, PhD | Bulgaria |
| Prof. Toshko Nenov, PhD | Bulgaria |
| Prof. Todor Todorov, PhD | Bulgaria |
| Assoc. Prof. Rosen Ivanov, PhD | Bulgaria |

# THEMATIC SESSIONS

- **Electrical Engineering**
- **Electronics and Sensors Technics**
- **Communication Engineering and Technologies**
- **Computer Systems and Technologies**
- **Automation and Robotics**
- **Technologies in Textile Productions**
- **Mechanical engineering technologies, Machines & Instruments design**
- **Hydraulics, Pneumatics and Heat Engineering**
- **Social Sciences, Economy and Management**
- **Educational Technologies**
- **Mathematics and Informatics**
- **Chemistry, Physics and Ecology**
- **Quality management, metrology, standardization, certification, accreditation**

# C O N T E N S

# VOLUME I

## ELECTRICAL ENGINEERING

**INVESTIGATION OF THE CIRCADIAN EFFICIENCY OF LIGHTING IN AN EDUCATIONAL LABORATORY** ..... 17
**Iva Petrinska, Dilyan Ivanov**
*Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria*

**SOME NEW ASPECTS IN THE LIGHTNING PROTECTION OF PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL POWER PLANTS** ..... 23
**Georgi Velev, Krasimir Ivanov, Petar Petrov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**PHOTOBIOLOGICAL IMPACT OF LED LIGHTING ON HUMANS** ..... 30
**Veselina Stefanova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ANALYSIS OF ELECTRICAL QUANTITIES DURING OPERATION OF INDUCTION MOTORS WITH FREQUENCY CONTROL** ..... 36
**Lyubomir Dimitrov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**STUDY OF THE PHOTOMETRIC AND COLORIMETRIC CHARACTERISTICS OF LED FLOODLIGHTS DURING THE WARM-UP PROCESS** ..... 41
**Plamen Tsankov, Milko Yovchev, Hristo Ibrishimov, Ivaylo Stoyanov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**STUDYING THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE CAPACITY UTILIZATION FACTOR OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH CIGS MODULES** ..... 46
**Ivaylo Lazarov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ENERGY EFFICIENCY OF MINING PUMP UNITS** ..... 52
**Dimitrina Koeva, Valentin Georgiev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ELECTRICITY EFFICIENCY OF FLOTATION FACILITIES** ..... 57
**Nikolay Lakov**
*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Bulgaria*

**TRENDS AND FORECASTS FOR BULGARIA'S ENERGY TRANSITION BALANCING MARKET** ..... 62
**Dimitrina Koeva[1], Ralena Kutkarska[2]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*
*[2]Municipality of Sliven, Sliven, Bulgaria*

## ELECTRONICS AND SENSORS TECHNICS

**ONE POSSIBILITY FOR OBTAINING NUCLEAR ENERGY** ..... 73
**S.V. Lozanova, M.L. Ralchev, A.J. Ivanov, C. S. Roumenin**
*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

**VERTICAL HALL MICROSENSOR** ..... 79
**S.V. Lozanova, M.L. Ralchev, A.J. Ivanov, C. S. Roumenin**
*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

**PIEZOELECTRIC TECHNOLOGIES EVOLUTION AT THE DEPARTAMENT OF ELECTRONICS IN TU–GABROVO** ..... 85
**Stefan Milchev, Velimira Todorova, Nikolay Madjarov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATER WITH MULTI-COIL OSCILLATING CIRCUIT** ..... 91
**Dobroslav Dankov, Petko Marinov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**SYSTEM AND TECHNOLOGY FOR LASER HARDENING OF COMPLEX 3D SURFACES** ..... 98
**Borislav Stoyanov, Ivan Barzev, Prodan Prodanov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**DESIGN OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM AND RESEARCH OF ITS EFFICIENCY AT DIFFERENT LOADS** ..... 104
**Nikolay Madzharov, Desislav Iliev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**INVESTIGATION OF ENERGY FLOWS FOR CONNECTING CHARGING STATIONS** ..... 110
**Gergana Vacheva[1], Plamen Stanchev[2], Nikolay Hinov[1]**
*[1]Technical University of Sofia, Department of Power electronics, Sofia, Bulgaria*
*[2]Technical University of Sofia, Department of Information technology in industry, Sofia, Bulgaria*

**REGULATORS FOR AUTOMATIC CONTROL OF INDUSTRIAL ELECTRICAL DRIVES** ..... 116
**Todor Nedelchev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING ELECTRICAL PARAMETERS ON SEMICONDUCTOR MATERIALS** ..... 122
**Gergana Mironova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**SYSTEM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR LASER SURFACE HARDENING** ..... 127
**Prodan Prodanov, Borislav Stoyanov, Ivajlo Radev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**RESEARCH OF INVERTER CURRENT SOURCE FOR ELECTROPOLISHING WITH SIC TRANSISTORS** ..... 133
**Dobroslav Dankov, Petko Marinov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**STEREOSCOPIC PROCESSING FROM USB CAMERAS FOR MEASUREMENT IN AUTOMATED SYSTEMS** ..... 140
**Petar Panayotov, Goran Goranov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**HYBRID BATTERIES FOR ELECTRIC CARS** ..... 144
**Strahil Sabev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## COMMUNICATION ENGINEERING AND TECHNOLOGIES

**ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PERFORMABCE INDICES FORECASTIING OF COMMUNICATION CHANNELS** ..... 151
**Ivelina Balabanova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**REMOTE MONITORING OF BACKUP POWER SYSTEMS** ..... 157
**Todor Todorov, Emil Iontchev, Georgi Bozhev**
*"Todor Kableshkov" University of Transport, Sofia, Bulgaria*

**SERVICE DEMAND FORECASTING IN COMMUNICATIONS BY REGRESSION ANALYSIS AND NEURAL NETWORKS** ..... 163
**Ivelina Balabanova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**FINGERPRINT IDENTIFICATION BY DISCRETE WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORKS WITH SCG LEARNING ALGORITHM** ..... 169
**Ivelina Balabanova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**PRECISED MEASUREMENT OF INDUCTANCE AND CAPACITANCE IN RADIO FREQUENCY CIRCUITS** ..... 174
**M. Tomov[1], P. Kogias[2], B. Arsov[3], S. Sadinov[1]**
*[1]Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*
*[2]Democritus University of Thrace, Department of Physics, Kavala, Greece*
*[3]International Slavic University, North Macedonia*

**DOUBLE CHAOTIC SWITCHING BASED ON HYBRID SYNCHRONIZATION SCHEME BETWEEN TWO IDENTICAL CHAOTIC SYSTEMS** ..... 179
**Hristina Stoycheva**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**CONSTRUCTION AND CONFIGURING HYBRID NETWORK CONNECTIVITY FOR VIDEO SURVEILLANCE BETWEEN BUILDINGS** ..... 185
**Stanimir Sadinov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## COMPUTER SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

**USER SEGMENTATION USING SOCIAL MEDIA PROFILES** ..... 197
**Victoria Velkova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**MOBILE APP FOR CONTENT DELIVERY FOR MUSEUM EXHIBITS USING NFC TECHNOLOGY** ..... 202
**Victoria Velkova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**SOFTWARE DEFINED NETWORKING APPLICATIONS AND APPROACHES** ..... 207
**Miroslav Slavov, Delyan Genkov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**EXPERIMENTAL SETUP FOR TESTING OF SOFTWARE DEFINED NETWORKS CONTROLLER** ..... 213
**Tsvetan Raykov, Delyan Genkov, Miroslav Slavov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**TWO-CYCLE LOGARITHMIC ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (LADC)** ..... 219
**Borislav Nedev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**DEVELOPMENT OF AN ENERGY EFFICIENT SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF A HOT WATER BOILER** ..... 224
**Hristo Kilifarev, Borislav Nedev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## AUTOMATION AND ROBOTICS

**DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL PCB BOARD FOR IO-LINK INTERFACE** ..... 233
**Dimitar Dimitrov, Stefan Ivanov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ANTI-WINDUP TECHNIQUES IN STATE-SPACE FORM OF PID CONTROLER** ..... 237
**Georgi Mihalev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**DESIGN OF SYNCHRONIZATION SYSTEM WITH ANTI-SYNCHRONIZATION BETWEEN TWO CHAOTIC SYSTEMS WITH ONE NONLINEARITY** ..... 244
**Dragomir Chantov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ELECTROMECHANICAL MODEL OF A HUMIDITY SENSOR BASED ON A PIEZO TRANSFORMER WITH AN APPLIED MOISTUREABSORBING COATING** ..... 250
**Nedyu Nedev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**MODELING AND IDENTIFICATION OF THE DM S2006MD SERVO DRIVE** ..... 254
**Stanimir Yordanov, Georgi Mihalev, Hristina Stoycheva, Elena Monova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

# VOLUME II

## MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGIES, MASHINES & INSTRUMENTS DESIGN

**INFLUENCE OF DEEP ROLLING PROCESS PARAMETERS ON SURFACE INTEGRITY CHARACTERISTICS OF HEAT-TREATED 42CrMo4 STEEL SPEICMENS** ..... 17
**Marieta Ivanova, Vladimir Dunchev, Petia Daskalova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**INVESTIGATING AND MODELING THE DURABILITY AND PERFORMANCE OF METAL CUTTING TOOLS WHEN MACHINING ROTARY WORKPIECES ON ROBOTICALLY POWERED CNC LATHES** ..... 24
**Nikolay Kolev, Irina Alexandrova, Hristo Metev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**TECHNOLOGICAL CAPABILITIES AND APPLICATION OF ROBOTS FOR FEEDING CNC MACHINES** ..... 31
**Nikolay Kolev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS AROUND HOLES IN ALUMINUM ALLOY 2024-T3 SUBJECTED TO COLD EXPANSION BY MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD** ..... 36
**Petya Daskalova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**STUDY OF THE RELIABILITY OF RAILWAY INTERLOCKING SYSTEMS** ..... 47
**Emiliya Dimitrova, Vasil Dimitrov**
*"Todor Kableshkov" University of Transport, Sofia, Bulgaria*

**ANALYSIS OF FIRE DETECTION SYSTEMS** ..... 53
**Vasil Dimitrov, Emiliya Dimitrova, Emil Borisov**
*"Todor Kableshkov" University of Transport, Sofia, Bulgaria*

**EFFECT OF COOLING CONDITION AND TURNING GOVERNING FACTORS ON THE ROUGHNESS OF HEAT-TREATED 42CRMO4 STEEL SPECIMENS** ..... 59
**Kalin Anastasov**
*Technical University of Gabrovo, Department of Mechanical Engineering and Technologies, Gabrovo, Bulgaria*

## TECHNOLOGIES IN TEXTILE PRODUCTIONS

**EXPLORATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS OF A FABRIC AFTER SANFORIZING** ..... 71
**Borislav Stoyanov, Sonya Ilieva**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## HYDRAULICS, PNEUMATICS AND HEAT ENGINEERING

**ELECTROPNEUMATIC TEST STAND FOR WEAR RESISTANCE** ..... 81
**Georgi Iliev, Hristo Hristov, Angel Anchev, Docho Dimitrov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## SOCIAL SCIENCES, ECONOMY AND MANAGEMENT

**THE RELATIONSHIP OF EXTEROCEPTIVE AND INTEROCEPTIVE ATTENTION TO THE LEVEL OF SPORTS ACHIEVEMENT** ..... 89
**Nina Dyakova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**AUTOMATIC, CONTROLLED AND VISUAL SELECTIVE ATTENTION IN ATHLETES AND THEIR ROLE IN SPORTS PERFORMANCE** ..... 95
**Nina Dyakova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**THE CHALLENGES AT THE ENTERPRENEURSHIP IN THE CONTEMPORARY MARKET ENVIRONMENT** ..... 99
**Dobrin Ganchev, Rumyana Stoyanova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**THE WAY OF THE SPIRIT: COSMIC BALANCE AND OPPOSITIONS. THE INTERACTION OF GOOD AND EVIL IN NATIVE AMERICAN COSMOGONIES** ..... 105
**Desislava Dencheva Mincheva**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**RESEARCH OF STUDENT'S READINESS TO ENTER THE LABOR MARKET** ..... 111
**Veryana Boeva**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**SOCIAL SUPPORT IN ANCIENT EASTERN SOCIETIES** ..... 117
**Emil Indzhov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ACCIDENTS AT WORK – CONDITION AND TRENDS** ..... 122
**Ivanka Stoyanova-Todorova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**THE PUBLIC DEFINITION OF THE CONCEPT OF 'PARENTING CAPACITY', KEY QUALITIES, AND BEHAVIORAL MODELS DISTINGUISHING PARENTS WITH HIGH PARENTING CAPACITY** ..... 131
**Plamena Kerekovska**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**VARIETY IN UNDERSTANDING AND ATTITUDES TOWARDS PARENTING CAPACITY** ..... 137
**Plamena Kerekovska**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**COUNSELING OF CHILDREN WITH DEVIANT BEHAVIOR AND THEIR FAMILIES** ..... 142
**Plamena Markova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**PREREQUISITES FOR THE FORMATION OF A DEVIANT PERSONALITY IN CHILDREN RAISED IN A RESIDENTAL TYPE OF SOCIAL SERVICES** ..... 148
**Plamena Markova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**BULGARIAN ORGANIZATIONS ABROAD AND THEIR INITIATIVES TO PRESERVE THE NATIONAL IDENTITY OF THE BULGARIAN EMIGRANTS. (BY THE EXAMPLE OF ASSOCIAZIONE ITALO-BUGARA IN ABRUZZO IN PESCARA, ITALY)** ..... 153
**Sirma Kazakova, Irina Todorova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**THE ROLE OF BULGARIAN SCHOOLS IN THE DEVELOPMENT OF THE NATIONAL IDENTITY OF BULGARIAN CHILDREN ABROAD (BY THE EXAMPLE OF BULGARIAN SUNDAY SCHOOL "BULGARINA" IN PESCARA, ITALY)** ..... 158
**Sirma Kazakova, Irina Todorova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**MODELING OF THE LIFE CYCLE OF AN INSTITUTION** ..... 164
**Daniela Dimova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**THE NEED OF PSYCHOACTIVE SUBSTANCES USE AS A SPIRITUAL PROBLEM CONSIDERED THROUGH THE PRISM OF ORTHODOX TEACHING** ..... 170
**Ivelina Doicheva**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**NEW CONCEPTS FOR THE RECOVERY OF PSYCHOACTIVE SUBSTANCE ADDICTS THROUGH THE PRISM OF THE TEACHINGS OF THE ORTHODOX CHURCH, THE HOLY FATHERS AND ORTHODOX THEOLOGIANS** ..... 176
**Ivelina Doicheva**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**KEY INDICATORS TO MEASURE SUCCESS, PERFORMANCE AND EFFECTIVENESS** ..... 182
**Tsanka Zlateva-Petkova**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**LIFE ABROAD - THE CHALLENGES OF IDENTITY DEVELOPMENT OF "VOLUNTARY" AND "INVOLUNTARY" IMMIGRANT CHILDREN** ..... 188
**Irina Todorova**
*Technical University of Varna, Studentska str.1, Bulgaria*

## CHEMISTRY, PHYSICS AND ECOLOGY

**AQUATIC MACROPHYTES AND MACROALGAE: ECOLOGICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATIONS** ..... 195
**Diana Syulekchieva, Georgi Gyuzelev, Blagovesta Midyurova**
*University "Prof. D-r Asen Zlatarov", Burgas, Bulgaria*

**APPLICATION OF THE SONOCHEMISTRY IN THE SYNTHESIS OF HETEROCYCLIC COMPOUNDS – A BRIEF REVIEW** ..... 203
**Dragomir Vassilev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**WATER CONSUMPTION WITHIN THE REGION OF BLACK SEA BASIN DIRECTORATE- BULGARIA (2010-2022)** ..... 209
**Daniela Toneva, Desislava Dimitrova**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**MEASUREMENTS OF BACKGROUND RADIATION IN THE AREA OF PROGLED VILLAGE, WESTERN RHODOPES MOUNTAIN** ..... 217
**Nina Arhangelova[1], Seniha Salim[1], Georgi Todorov[2], Lyubomira Veleva[1]**
*[1]Konstantin Preslavsky University of Shumen, Shumen, Bulgaria*
*[2]Vocational School of Economics – Shumen, Shumen, Bulgaria*

**EVALUATION OF NATURAL RADIOACTIVITY IN THE LEAVES OF THE MEDICINAL PLANT HEDERA HELIX (L.)** ..... 223
**N. Arhangelova[1], S. Salim[1], D. Nedeva[2], R. Velizarova[1], L. Veleva[1]**
*[1]Konstantin Preslavsky University of Shumen, Shumen, Bulgaria*
*[2]Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**ENVIRONMENTAL GOALS AND PLANNING THE ACTIVITIES FOR THEIR ACHIEVEMENT IN "ZAGORKA" BREWERY** ..... 228
**Dobromira Yaneva, Sonya Velkova-Racheva, Dragomir Vassilev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**NITROGEN AND PHOSPHORUS LOADING CHARACTERISTICS OF SURFACE WATERS** ..... 231
**Diana Syulekchieva, Blagovesta Midyurova**
*University Prof. D-r Asen Zlatarov, Burgas, Bulgaria*

**LIMITING THE DISTRIBUTION OF MARINE AND RIVERINE LITTER - CHALLENGES AND OPPORTUNITIES** ..... 236
**Daniela Toneva, Miroslava Robinson**
*Technical University of Varna, Varna, Bulgaria*

**ANALYSIS OF THE DATA FROM THE RADIATION MONITORING OF THE ENVIRONMENT OF THE "KOZLODUY" NPP IN NATURAL AND DRINKING WATERS** ..... 244
**Dragomir Vassilev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

## QUALITY MANAGEMENT, METROLOGY, STANDARDIZATION, CERTIFICATION, ACCREDITATION

**MODELING AND SIMULATING A KALMAN FILTER USING MATLAB** ..... 255
**Borislav Georgiev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**DIMENSIONAL PRECISION IN 3D PRINTING** ..... 261
**Borislav Georgiev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**USING STFT TO ANALYZE TIME-VARYING SIGNALS** ..... 267
**Borislav Georgiev, Hristofor Kovachev**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**RESEARCH OF PROSPECTS FOR APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC AND STEREOPHOTOGRAMMETRIC METHODS OF MEASUREMENT IN MECHANICAL ENGINEERING AND INDUSTRIAL ENGINEERING** ..... 272
**Miroslav Kokalarov, Nikolay Angelov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

**CHALLENGES AND ADVANTAGES IN IMPLEMENTING QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CREATIVE INDUSTRIES** ..... 280
**Zdravko Saraliev**
*University of Ruse "Angel Kanchev", Ruse, Bulgaria*

**IMPACT OF THE TECHNOLOGICAL ERRORS ON THE CHARACTERISTICS OF GONIOMETRIC ELASTIC MODULE** ..... 286
**Dobri Komarski**
*Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria*

НАПРАВЛЕНИЕ

# ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

SESSION

# ELECTRICAL ENGINEERING

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИРКАДИАЛНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО В УЧЕБНА ЛАБОРАТОРИЯ

**Ива Петринска*, Дилян Иванов**

*Технически Университет - София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София, България*

**кореспондиращ автор: ipetrinska@tu-sofia.bg*

# INVESTIGATION OF THE CIRCADIAN EFFICIENCY OF LIGHTING IN AN EDUCATIONAL LABORATORY

**Iva Petrinska*, Dilyan Ivanov**

*[1]Technical University of Sofia, Kl. Ohridski 8 Blvd., Sofia, Bulgaria*

**Corresponding author: ipetrinska@tu-sofia.bg*

**Abstract**

*The circadian efficiency of indoor lighting is a very important problem nowadays, interconnected with the fast transition from conventional to LED lighting. The paper presents an investigation of the influence of the light conditions on people estimated by means of equivalent melanopic lux (EML) for different possible scenarios for lighting in an educational laboratory: daylighting; daylighting plus artificial lighting with different correlated color temperature (CCT) and viewing directions, as well as only artificial lighting with different CCT and viewing directions at different positions of the viewers within the laboratory. To estimate the circadian efficiency of lighting in the scenarios considered radiometric measurements of the spectral power distribution of light are taken. The results confirm that daylight conditions are the best for entrainment of the human circadian rhythms, but artificial lighting can also contribute for such an effect.*

**Keywords:** circadian efficiency of lighting; equivalent melanopic lux; integrated lighting.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Светлината играе основна роля в човешкия живот, не само защото е свързана с осъществяването на зрителния процес, но и поради невизуалното ѝ влияние върху цикличните процеси в организма и в частност на т.нар. циркадни ритми. С изобретяването и развитието на електрическите светлинни източници, все повече хора прекарват значително време на закрито и работят продължително в условия на изкуствено или интегрално осветление, или в случаите, когато има достатъчно налична естествена светлина, тя най-често навлиза в помещенията през страничо разположени светлинни отвори, които често биват засенчвани, за да се ограничат преките слънчеви лъчи и прекомерното количество инфрачервено лъчение, особено през лятото. Човекът, обаче е еволюирал, изложен на естествената смяна на деня и нощта, което е довело до формирането на циркадните ритми и ендогенните цикли, които се влияят от ганглиевите фоторецептори, разположени в човешото око и са отговорни за адекватно продължаващите периоди на будност и сън през денонощието т.е. имат пряко влияние върху човешкото здраве. В действителност един пълен циркаден цикличен процес в човешкото тяло отнема малко повече от едно денонощие (приблизително 24,3 часа), поради което синхронизацията им става с т.нар. „таймери“, основните от които са ганглиевите клетки (ipRGC). Светлината не влияе на тези клетки по същия начин, по който определя зрителния процес. Докато колбичките, отговорни за виждането през деня имат максимална чувствителност към средно дългите светлинни вълни, ганглиевите клетки, влияещи

циркадните ритми имат максимум на чувствителността в синята част на спектъра на светлината или към по-късовълновото лъчение. Поради тази причина и методите за оценка на визуалния процес и невизуалните такива са различни т.е. не може да се каже, че ако едно помещение е добре осветено т.е. за него са удовлетворени количествения и качествените показатели, предписани в БДС EN 12464-1 [1], то ще има и висока ефективност за естественото протичане на циркадните ритми на обитателите в него. В ганглиевите клетки се генерира фотопигмент, наречен меланопсин. За осъществяване на фототрансдукция, или напасване на продължителността на циркадните ритми, участие вземат и чувствителните към късите светлинни вълни колбички [2].

Като цяло факторите, които оказват влияние върху невизуалния ефект на светлината върху хората могат да бъдат класифицирани в три групи:

[1] Светлинни фактори:

- Спектър на светлината;
- Количество светлина;
- Пространствено разпределение на светлината (насоченост);
- Продължителност на светлинното влияние;
- История на светлинното влияние.

[2] Човешки фактори:

- Подтискане на секрецията на мелатонин;
- Обективна/субективна бодрост или бдителност;
- Реакция на ретината/генергиране на фототокови сигнали;
- Телесна температура;
- Пулс;
- Мелатонинов цикъл;
- Цикъл на промяна на телесната температура.

[3] Архитектурни особености на помещението:

- Големина на светлинните отвори;
- Географско изложение на светлинните отвори;
- Вид остъкление;
- Наличие на засенчващи устройства;
- Вътрешно оформление на помещението;
- Изглед навън.

Всички гореспоменати фактори оказват влияние върху невизуалните ефекти, които светлината оказва върху човека, но не всички съвкупно могат да бъдат оценени с единен показател [3].

## ИЗЛОЖЕНИЕ

За оценка на невизуалното влияние на светлината съществуват различни методи, като три от тях са се наложили. Първият метод е предложената от международната комисия по осветление (CIE) в CIE S 026/E:2018 [4] претеглена спрямо чувствителността на всички фоторецептори в човешкото око (α-опична) облъченост Ee, α. Тази величина се определя по формула 1:

$$E_{e,\alpha} = \int E_{e,\lambda}(\lambda) S_{\alpha}(\lambda) d\lambda \qquad (1)$$

където Ee, α е α-опичната облъченост, Ee, λ(λ) е спектралната облъченост, и Sα(λ) е α-опичния спектър, който оказва максимално влияние върху човешкото око.

На базата на α-опичната облъченост, са дефинирани и меланопично ефективните величини меланопична екквивалентна естествена осветеност mEDI (осветеността от стандартен източник D65, който има меланопична ефективност, равна на тази на изследвания светлинен източник за дадена осветеност, получена от него) и меланопично отношение на ефективността на дневната светлина mDER (отношението на осветеността от стандартен източник D65 (mEDI) и осветеността от изследвания източник $E_v$,lx, при равенство на абсолютната меланопична ефективност на двата източника).

$$mEDI = \frac{\int_{380}^{780} S_{mel}(\lambda) E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{K_{mel,V}^{D65}} \quad (2)$$

Където $K_{mel,V}^{D65}$= 1.3262mW/lm, а $S_{mel}(\lambda)$ е кривата на спектралната чувствителност на ганглиевите клетки (ipRGC), $E_{e,\lambda}(\lambda)$ е спектрална облъченост, определена от формула 1.

Съответно:

$$mEDI = \frac{1}{K_{mel,V}^{D65}} \frac{\int_{380}^{780} S_{mel}(\lambda) E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{E_V} \quad (3)$$

Вторият метод за оценка на невизуалното действие на светлината е циркадния стимул (CS) [5]

$$CS = 0.7 - \frac{0.7}{1 + (\frac{CL_A}{355.7})^{1.1026}} \quad (4)$$

където $CL_A$ е циркадно активната светлина, която зависи от спектралното разпределение на облъчеността, меланопсиновата чувствителност според коефициента на пропускане на лещата на окото; чувствителността на чувствителните към късовълново лъчение колбички, коефициента на пропускане на макуларния пигмент, кривите на чувствителност на окото при скотопично и фотопично зрение и определени константи [5].

Третият метод, който се използва и в настоящия доклад е посредством оценка на величината еквивалентна меланопична осветеност (EML – equivalent melanopic lux), характеризираща влиянието на светлината върху циркадните ритми, определено в меланопични луксове. При наличие на информация за спектралното разпределение на облъчеността от даден източник на светлина, тази величина се изчислява с помощта на уравнение 3:

EML = R . E,

където R = 1.218 (Меланопична облъченост/фотопична облъченост), E е осветеност. Константата 1.218 се нарича още равноенергийна константа [6].

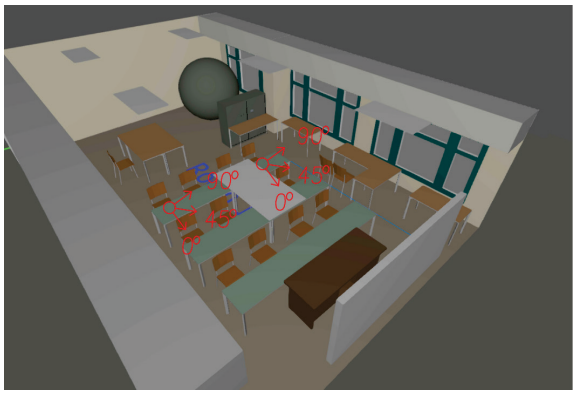
В настоящия доклад, за определяне на невизуалното влияние на светлината върху човека са направени измервания на спектралното разпределение на облъчеността. За целта е използван радиометър Stellar BLACK-Comet, който има възможност за измерване на лъчения с дължина на вълната от 200 nm до 1100 nm. Експерименталните данни са заснети за учебна лаборатория по „Осветителна техника“, намираща се в Технически университет - София. Симулационен модел на помещението е даден на фиг. 1.

Помещението е с дължина 7м, ширина 7м и височина 3м. Прозорците се състоят от 2 крила, всяко от които с дължина 3,2м и височина 2м, като започват от 0,8м от земята.



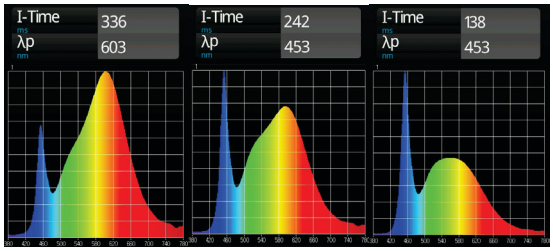
***Фиг. 1.*** *Симулационен модел на експерименталната зала*

В тази зала осветителната уредба е биодинамична и позволява промяна на цветната температура от 2800K до 6500K. На фигура 2 са показани контролните точки, в които е извършено измерването на облъчеността и които са както следва: – за седнал наблюдател са измерени облъчености на височна 120см от пода на помещението при насочване на зрителната ос успоредно на прозорците или под условен ъгъл на навлюдение 0 градуса – наблюдателят гледа право напред; при посока на наблюдение на 45 градуса към прозореца и в случай на наблюдател, обърнат към прозореца, изли разположен на 90 градуса спрамо първоначалната му нулева позиция. Измерването е направено за наблюдател, седящ на последното работно място откъм вътрешната стена на помещението и за такъв, разположен на работното място, разположено най-близо до прозорците.



***Фиг. 2.*** *Контролни точки и посоки на наблюдение, за които е измерена облъченост*

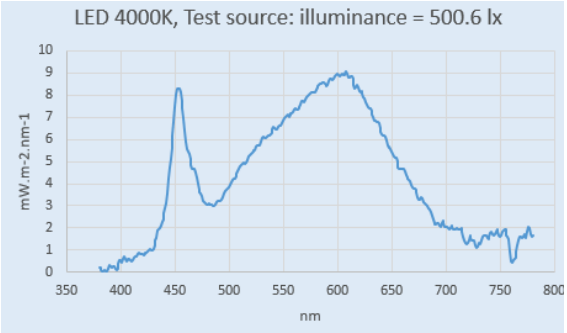
Направени са две серии от измервания на облъчеността от интегрално осветление – естествено и изкуствено, при промяна на цветната температура на осветителите в помещението съответно на 3000К, 4000К и 6500К фиг.3, при облачен ден – 04.10.2024г. и при ясен ден – 08.04.2024г с продължителност от 10ч. до 11ч. преди обяд.



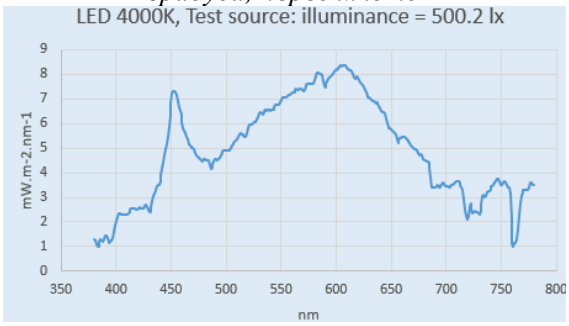

***Фиг. 3.*** *Спектрално разпределение на излъчването на осветителната уредба за цветни температури 3000К, 4000К и 6500К*

Като показатели за оценка на невизуалното въздействие на светлината са използвани величините mEDI и $E_{e,\alpha}$.

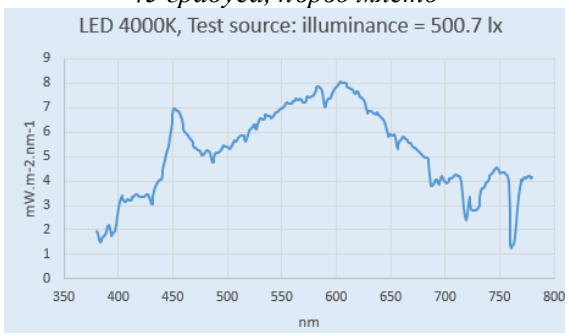
Резултантното спектрално разпределение на облъчеността за разгледаните посоки на наблюдение при ясен и мрачен ден за цветна температура 4000К са дадени на фиг. 4 до 6 За еднаквост на резултатите, всички спектри са дадени за условна осветеност от 500lx, която е минималната допустима осветеност за помещения от този тип според европейските норми и стандарти [1]. За нагледност на резултатите, последните са представени в табличен вид в таблици 1 - 8.




**Фиг. 4.** *Спектрално разпределение при 0 градуса, първо място*




**Фиг. 5.** *Спектрално разпределение при 45 градуса, първо място*




**Фиг. 6.** *Спектрално разпределение при 90 градуса, първо място*

***Таблица 1.*** Данни за алфа опичното въздействие за първо място mDER, измерени на 4.10.24г.

| | *S-cone-opic* | *M-cone-opic* | *L-cone-opic* | *Rhodopic* | *Melanopic* |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 0,372 | 0,815 | 1,013 | 0,568 | 0,492 |
| 3000K 45º | 0,534 | 0,868 | 1,008 | 0,689 | 0,633 |
| 3000K 90º | 0,614 | 0,893 | 1,006 | 0,746 | 0,699 |
| 4000K 0º | 0,521 | 0,862 | 1,004 | 0,662 | 0,598 |
| 4000K 45º | 0,615 | 0,894 | 1,003 | 0,740 | 0,690 |
| 4000K 90º | 0,672 | 0,911 | 1,003 | 0,782 | 0,740 |
| 6500K 0º | 0,722 | 0,925 | 0,991 | 0,784 | 0,735 |
| 6500K 45º | 0,725 | 0,929 | 0,996 | 0,809 | 0,768 |
| 6500K 90º | 0,752 | 0,934 | 0,997 | 0,826 | 0,789 |

***Таблица 2.*** Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за първо място измерени на 4.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 187 | 410 | 509 | 286 | 248 |
| 3000K 45º | 266 | 433 | 503 | 344 | 316 |
| 3000K 90º | 306 | 445 | 502 | 372 | 349 |
| 4000K 0º | 260 | 431 | 501 | 330 | 299 |
| 4000K 45º | 310 | 450 | 505 | 372 | 347 |
| 4000K 90º | 336 | 455 | 501 | 391 | 370 |
| 6500K 0º | 359 | 460 | 493 | 390 | 365 |
| 6500K 45º | 361 | 463 | 496 | 403 | 383 |
| 6500K 90º | 377 | 468 | 500 | 414 | 395 |

***Таблица 3.*** Данни за алфа опичното въздействие за последно място mDER, измерени на 4.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 0,268 | 0,762 | 1,018 | 0,444 | 0,370 |
| 3000K 45º | 0,395 | 0,823 | 1,012 | 0,586 | 0,513 |
| 3000K 90º | 0,417 | 0,831 | 1,011 | 0,603 | 0,533 |
| 4000K 0º | 0,422 | 0,809 | 1,008 | 0,536 | 0,454 |
| 4000K 45º | 0,525 | 0,864 | 1,004 | 0,667 | 0,605 |
| 4000K 90º | 0,540 | 0,869 | 1,004 | 0,679 | 0,618 |
| 6500K 0º | 0,748 | 0,920 | 0,987 | 0,762 | 0,708 |
| 6500K 45º | 0,721 | 0,925 | 0,992 | 0,787 | 0,739 |
| 6500K 90º | 0,724 | 0,925 | 0,993 | 0,792 | 0,746 |

***Таблица 4.*** Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за последно място измерени на 4.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 134 | 351 | 509 | 222 | 185 |
| 3000K 45º | 197 | 411 | 505 | 293 | 256 |
| 3000K 90º | 209 | 415 | 506 | 302 | 266 |
| 4000K 0º | 211 | 404 | 504 | 268 | 227 |
| 4000K 45º | 264 | 434 | 505 | 335 | 304 |
| 4000K 90º | 269 | 433 | 500 | 338 | 308 |
| 6500K 0º | 371 | 456 | 490 | 378 | 351 |
| 6500K 45º | 361 | 464 | 498 | 395 | 371 |
| 6500K 90º | 360 | 460 | 494 | 394 | 371 |

***Таблица 5.*** Данни за алфа опичното въздействие за първо място mDER, измерени на 8.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 0,602 | 0,885 | 1,008 | 0,730 | 0,683 |
| 3000K 45º | 0,678 | 0,906 | 1,008 | 0,784 | 0,747 |
| 3000K 90º | 0,663 | 0,901 | 1,008 | 0,774 | 0,735 |
| 4000K 0º | 0,667 | 0,904 | 1,004 | 0,767 | 0,725 |
| 4000K 45º | 0,704 | 0,915 | 1,005 | 0,799 | 0,763 |
| 4000K 90º | 0,712 | 0,915 | 1,006 | 0,802 | 0,767 |
| 6500K 0º | 0,772 | 0,937 | 0,997 | 0,833 | 0,798 |
| 6500K 45º | 0,749 | 0,928 | 1,003 | 0,827 | 0,794 |
| 6500K 90º | 0,754 | 0,927 | 1,003 | 0,826 | 0,794 |

***Таблица 6.*** Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за първо място измерени на 8.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 301 | 442 | 504 | 365 | 341 |
| 3000K 45º | 339 | 453 | 503 | 392 | 373 |
| 3000K 90º | 331 | 451 | 504 | 387 | 367 |
| 4000K 0º | 332 | 449 | 499 | 381 | 360 |
| 4000K 45º | 352 | 457 | 503 | 400 | 382 |
| 4000K 90º | 356 | 457 | 503 | 401 | 383 |
| 6500K 0º | 386 | 469 | 498 | 417 | 399 |
| 6500K 45º | 374 | 464 | 501 | 413 | 397 |
| 6500K 90º | 377 | 464 | 502 | 413 | 397 |

***Таблица 7.*** Данни за алфа опичното въздействие за последно място mDER, измерени на 8.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 0,449 | 0,844 | 1,011 | 0,637 | 0,572 |
| 3000K 45º | 0,453 | 0,845 | 1,011 | 0,638 | 0,574 |
| 3000K 90º | 0,453 | 0,845 | 1,011 | 0,638 | 0,574 |
| 4000K 0º | 0,540 | 0,869 | 1,006 | 0,686 | 0,628 |
| 4000K 45º | 0,569 | 0,881 | 1,007 | 0,720 | 0,668 |
| 4000K 90º | 0,580 | 0,885 | 1,007 | 0,729 | 0,678 |
| 6500K 0º | 0,685 | 0,913 | 0,997 | 0,772 | 0,725 |
| 6500K 45º | 0,646 | 0,905 | 1,002 | 0,767 | 0,722 |
| 6500K 90º | 0,645 | 0,904 | 1,003 | 0,767 | 0,722 |

***Таблица 8.*** Данни за алфа опичното въздействие приравнени към 500lx mEDI, за последно място измерени на 8.10.24г.

| | S-cone-opic | M-cone-opic | L-cone-opic | Rhodopic | Melanopic |
|---|---|---|---|---|---|
| 3000K 0º | 224 | 422 | 505 | 318 | 286 |
| 3000K 45º | 226 | 422 | 505 | 319 | 287 |
| 3000K 90º | 226 | 422 | 505 | 319 | 287 |
| 4000K 0º | 270 | 434 | 503 | 343 | 314 |
| 4000K 45º | 285 | 441 | 503 | 360 | 334 |
| 4000K 90º | 290 | 442 | 503 | 364 | 339 |
| 6500K 0º | 343 | 457 | 499 | 386 | 363 |
| 6500K 45º | 323 | 452 | 501 | 384 | 361 |
| 6500K 90º | 322 | 452 | 501 | 384 | 361 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на получените експериментални данни могат да бъдат направени следните изводи:

Когато осветителната уредба в помещението е настроена на корелирана цветна температура на осветителите 6500К, влиянието на естествената светлина върху производството на меланопсин в ганглиевите клетки в зрителния анализатор е максимално, независимо от облачността навън, позицията и ъгъла на наблюдение на обитателите.

При корелирана цветна температура на осветителите в помещението от 3000К меланопичното въздействие на светлината за първото работно място е средно с 20% по-значително при слънчев ден спрямо мрачен такъв, като този процент зависи от ъгъла на наблюдение – при ъгъл 0 градуса, разликата е най-голяма. За последното работно място, което е разположено най-близо до вътрешната стена на помещението, най-малко меланопично въздействие ще има светлината при ъгъл на наблюдение 0 градуса, при мрачно време.

Резултатите за корелирана цветна температура на осветителите от 4000К са междинни.

На базата на направените изводи става ясно, че колкото по-висока е корелираната цветна температура на осветителите, толкова по-голямо ще бъде и невизуалното им въздействие върху наблюдателите. Когато се прави оценка за интегрално осветление – при слънчев ден положителното въздействие на осветлението върху цикличните процеси в организма е значително, докато при мрачен ден, то е осезаемо по-малко.

Въпреки, че осветление с по-висока цветна температура би имало по-значително невизуално въздействие върху хората, такова трябва да се проектира и изпълнява, като се съблюдава и възможността за фотобиологичен риск от синя светлина. При продължително пребиваване на хора при подобни светлинни условия, те могат да доведат до неблагоприятни ефекти.

*Благодарности: Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от вътрешния конкурс на ТУ- София № 231ИП0027-01.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] EN 12464-1:2021 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.

[2] M. T. Aguilar-Carrasco, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta, and J. J. Sendra, "Indoor lighting design for healthier workplaces: natural and electric light assessment for suitable circadian stimulus," Opt. Express 29, 29899-29917 (2021)

[3] Khademagha, Parisa & Aries, Myriam & Rosemann, A.L.P. & van Loenen, Evert. (2016). Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need. Building and Environment. 180. 263-272. 10.1016/j.buildenv.2016.08.035.

[4] CIE CIE S 026/E:2018; CIE System for Metrology of Optical Radiation for IpRGC-Influenced Responses to Light; International Commission on Illumination (CIE), CIE Central Bureau: Vienna, Austria, 2018.

[5] Rea, M.; Figueiro, M.; Bierman, A.; Hamner, R. Modelling the Spectral Sensitivity of the Human Circadian System. Lighting Res.Technol. 2012, 44, 386–396.

[6] Lucas, R.J.; Peirson, S.N.; Berson, D.M.; Brown, T.M.; Cooper, H.M.; Czeisler, C.A.; Figueiro, M.G.; Gamlin, P.D.; Lockley, S.W.; O'Hagan, J.B.; et al. Measuring and Using Light in the Melanopsin Age. Trends Neurosci. 2014, 37, 1–9.

# SOME NEW ASPECTS IN THE LIGHTNING PROTECTION OF PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL POWER PLANTS

**Георги Велев*, Красимир Иванов, Петър Петров**

*ТУ – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: g_velev@tugab.bg*

# НЯКОИ НОВИ МОМЕНТИ ПРИ МЪЛНИЕЗАЩИТАТА НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

**Georgi Velev*, Krasimir Ivanov, Petar Petrov**

*TU – Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author:* g_velev@tugab.bg

**Abstract**

*In the recent years, the design, construction and operation of photovoltaic power plants have seen significant growth. In addition, the issue of the effectiveness of external lightning protection of strings with photovoltaic panels becomes relevant. The paper inhere aims to summarize the existing techniques for the design and construction of conventional lightning protection of photovoltaic panels, to propose some new solutions and to give examples of their application.*

**Keywords:** lightning protection; lightning protection zone (LPZ); lightning rod; photovoltaic (PV) modules; string.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Секторът на възобновяемата енергия у нас се развива изключително бързо в последните години. Към момента у нас има инсталирани 6757 MW ВЕИ мощности, от които 3612 MW (53,4%) са фотоволтаични. Всъщност основната част от фотоволтаичните електрически централи (ФЕЦ) у нас бива инсталирана в два времеви периода. Първият е 2010-2012 г., когато нови мощности се инсталират ударно в следствие на понижени инвестиционни разходи и държавни политики за преференциални цени и дългосрочни договори за изкупуване на енергията. Вторият започва около 2021 г., когато цените на енергията у нас достигат рекордни нива и фотоволтаичните централи генерират огромни печалби, заради ниските си производствени разходи, което ги прави и атрактивна инвестиция.

Фотоволтаичните мощности са сравнително равномерно разпределени из страната. Слънчевото електропроизводство е най-силно застъпено в Горнотракийската низина и средната част на Дунавската равнина, като равният релеф и продължителното слънчево греене през годината правят тези територии изключително подхо-дящи за този тип централи. Най-много инсталирани ФЕЦ мощности има в община Пазарджик (304 MW), където се намира и най-големият соларен парк у нас – ФЕЦ „Риал Стейтс“ в село Априлци (251,2 MW). След нея се нареждат общините Сливен (295,5 MW), Гълъбово (204,5 MW) и Калояново (201,5 MW).

След 2023 г. започва ударно изграждане на ФЕЦ в цели 226 от 265 общини, като териториално те са концентрирани най-вече в централните части на страната. Най-много нови фотоволтаични мощности са въведени в общините Сливен (220,4 MW), Гълъбово (203,4 MW),

Севлиево (150 MW) и Ловеч (117,5 MW), като в Гълъбово и Ловеч новият фотоволтаичен капацитет е структуриран като един мащабен ФЕЦ на територията на общината [1, 2].

Директните и индиректни удари на мълнии върху елементи от фотоволтаична система могат да индуктират атмосферни и комутационни пренапрежения, които да предизвикат сериозни повреди на PV модулите, инверторните групи и другите електрически и електронни компоненти във фотоволтаичните електроцентрали.

В представения доклад се акцентира върху ефективността на външна мълниезащита на стринговете с фотоволтаични панели. Направен е опит да бъдат обобщи съществуващите техники за проектиране и изграждане на конвенционална външна мълниезащита на фотоволтаичните панели, да се предложат някои нови решения и да се дадат примери за тяхното приложение.

## АКТУАЛНО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. НОРМАТИВНА РАМКА

При съвременният ръст на изграждане на фотоволтаични електроцентрали с големи инсталирани мощности става актуален въпросът за тяхната ефективна външна мълниезащита.

В страната външната мълниезащита на открити пространства с инсталирани стрингове от фотоволтаични панели се реализира по два начина – чрез системи с активни мълниеприемници и със системи с конвенционални мълниеприемници тип вертикален прът.

Активната мълниезащита в някои държави от ЕС, като Германия например е напълно забранено [3].

В Р България активните мълниеприемници са забранени за мълниезащита на разпределителни уредби и прилежащите към тях сгради в подстанции и електроцентрали [4]. Масово се използват те обаче за мълниезащита на сгради и открити пространства в съответствие с Наредба 4/2010 г. [5], както и по изключение за някои съществуващи фотоволтаични електроцентрали в страната.

Въпреки, че на теория активните мълниеприемници имат многократно по-голяма мълниезащитна зона, което улеснява значително проектантите като същевременно намалява разходите за материали и монтаж, тяхното приложение за мълниезащита на фотоволтаични паркове трябва да се избягва.

За фотоволтаични електроцентрали с мощност по-голяма от 10 kWp се изисква мълниезащитна система от клас III и вътрешна защита от пренапрежения по препоръка на VDS (европейски стандарт за противопожарна защита и сигурност).

Системата на мълниезащита от клас III отговаря на обичайните изисквания за фотоволтаични системи съгласно БДС EN 62305-3:2011 [6].

Препоръчително е обаче винаги да се прави анализ на риска от попадение на мълнии там, където се планира инсталирането на фотоволтаична централа, тъй като ако тя се намира в зона с висока интензивност на мълниезащитната дейност, вероятно ще се наложи изграждането на система от първо или второ ниво на мълниезащита.

Измервателните сензори за скоростта на вятъра и температурата на модула също се инсталират в защитната зона на мълниеприемниците. По този начин се предотвратява постъпването на тока на мълнията и опасни пренапрежения в измервателните линии [7].

## ПРИЛАГАНИ В ПРАКТИКАТА МЕТОДИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МЪЛНИЕЗАЩИТНАТА ЗОНА НА СТРИНГОВЕ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

- **Най-често използвани конструкции на стринговете с ФВ панели**

За реализация на големи проекти на ФЕЦ, стринговете от ФВ панели се проектират и изграждат по две конструкции:

- ✓ ***Едноскатна конструкция***

При едноскатната конструкция стринговете от фотоволтаични панели се монтират върху наклонена метална конструкция с южна ориентация и оптимален фиксиран ъгъл спрямо хоризонта средно за страната около 32 градуса (за летния сезон) и около 57 градуса (за зимния сезон), като точната фиксирана стойност се избира по критерия максимален годишен добив (фиг. 1)



***Фиг. 1**. Едноскатен монтаж на ФВ панели*

✓ ***Двускатна конструкция***

При тази конструкция стринговете от фотоволтаични панели се монтират върху наклонена метална конструкция от двускатен тип с ориентация изток-запад и оптимален фиксиран ъгъл спрямо хоризонта около 10 - 15 градуса.

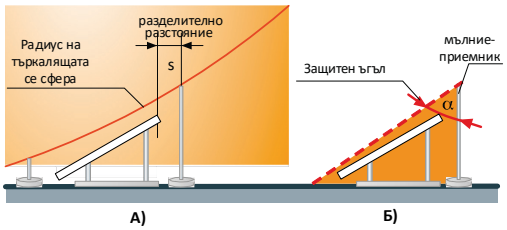


***Фиг. 2**. Двускатен монтаж на ФВ панели*

В настоящата публикация са разгледани основни моменти от проектирането на мълниезащитната зона при едноскатно и двускатно разполагане на стринговете от фотоволтаични панели.

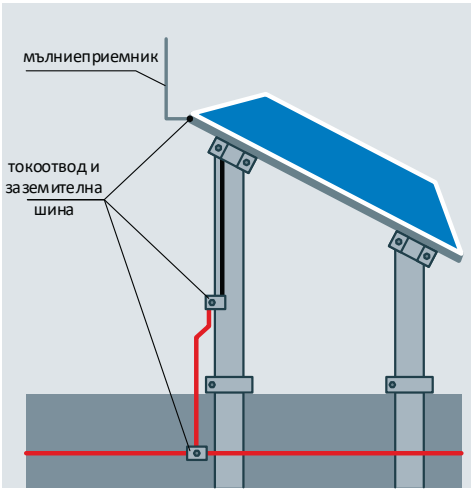
- **Изисквания към монтажът на мълниеприемниците**

Конвенционалните вертикални мълниеприемници могат да се разположат като отделно-стоящи (фиг. 3) или директно-монтирани върху металната конструкция на стринга (фиг. 4).




***Фиг. 3**. Конвенционална мълниезащита на ФВ панели с отделностоящи мълниеприемници: А) при използване на методът на въртящата сфера; Б) при използване на методът на защитният ъгъл*

При използване на конструкцията от фиг. 3 е необходимо гарантирането на разделителни разстояния от конструкцията на ФВ стринг от 0,5 до 1 m.




***Фиг. 4**. Конвенционална мълниезащита на ФВ панели с директен монтаж върху носещата метална конструкция.*

При мълниеприемници монтирани директно върху конструкцията на ФВ стринг металната конструкция, носеща панелите представлява съставна част от токоотводите, свързващи мълниеприемниците със заземителното устройство [3].

Задължително е носещите конструкции на панелите да се свързват със заземителната система на всеки 10 m разстояние по дължината на стринга.

Заземителната система на фотоволтаични електроцентрали, разположени в

открити пространства, се проектира като затворен контур с размери 20 x 20 m до 40 x 40 m.

Отделните заземители в контура се разполагат на дълбочина в почвата най-малко 0,5 m. Съпротивлението на заземяване е необходимо да бъде не повече от 10 Ω [7].

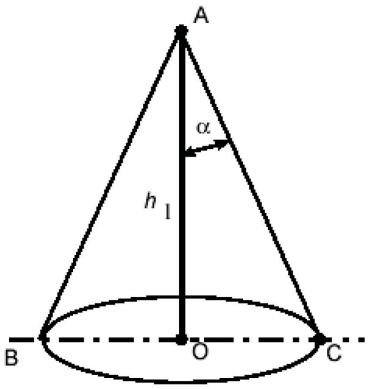
- **Методи за проектиране на мълниезащитната зона на ФВ стрингове**

Необходимото ниво на мълниезащита за конкретна ФВ електроцентрала се определя от резултатите получени при оценката на риска за поражения от мълниеносна дейност, в съответствие със стандарта БДС EN IEC 62305-2:2024) [8]. В много от случаите, необходимото ниво на мълниезащита е **първо ниво** ($\eta > 0,98$) или **второ ниво** ($\eta = 0,95 - 0,98$), което отговаря на мълниезащитна зона **тип А** ($\eta \geq 0,995$) или **тип Б** ($\eta \geq 0,95$).

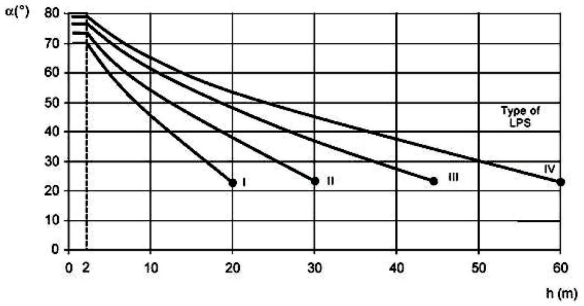
Броят на мълниеприемниците и тяхната височина могат да се определят съгласно [5] или [6]. В практиката често се прилагат методът на въртящата сфера и методът на защитният ъгъл, които обаче изискват проектирането да става чрез графичен софтуер, например Autocad.

Мълниезащитната зона на прътов мълниеприемник, съгласно методът на защитния ъгъл представлява конус, в който трябва да се вписва изцяло защитаваният обект (фиг. 5). Защитният ъгъл α се определя в зависимост от избраното ниво на мълниезащита и от височината на мълниеприемника $h$ (фиг. 6).

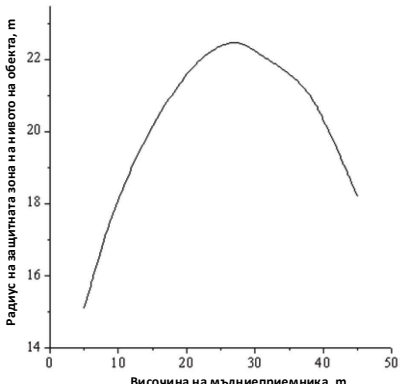
Някои автори оспорват тези два метода, доказвайки, че при височини на монтаж на мълниеприемниците над 20 - 25 m от нивото на земята радиусът на защитна зона на нивото на защитавания обект вместо да нараства започва да намалява, което противоречи на основни закони на физиката (фиг. 7).




**Фиг. 5**. Мълниезащитна зона съгласно методът на защитния ъгъл

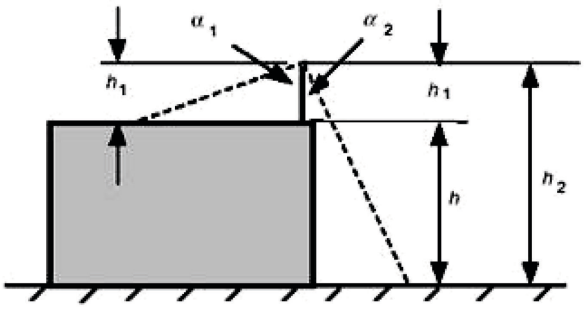



**Фиг. 6**. *Мълниезащитна зона съгласно методът на защитния ъгъл*




***Фиг. 7****. Зависимост на радиусът на мълниезащитната зона на нивото на защитаваният обект от височината на мълниеприемника, съгласно методът на защитния ъгъл.*

Друго голямо несъответствие е значителната разлика в защитния ъгъл $\alpha$ за един и същи обект, но определен за височина на мълниеприемника спрямо най-високата част на обекта $h_1$ и спрямо нивото на земята $h_2$ (фиг. 8).

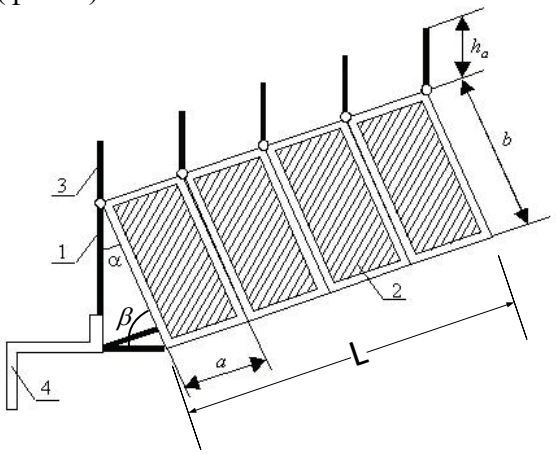



***Фиг. 8**. Несъответствие на защитния ъгъл в зависимост от нивото според, което се определя височината на мълниеприемника*

## ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА БРОЯ И РАЗПОЛОЖЕНИЕТО НА МЪЛНИЕПРИЕМНИЦИТЕ ПРИ ФВ СТРИНГОВЕ С ЕДНОСКАТНА И ДВУСКАТНА КОНСТРУКЦИЯ

### ▪ Едноскатна конструкция на ФВ стрингове

При едноскатна конструкция на ФВ стринг е използван подход описан в [10] и модифициран за конкретният случай (фиг. 9).




***Фиг. 9**. Разположение на ФВ модули и мълниеприемниците върху конструкцията на стринга, където: 1 – конструкция на ФВ стринг; 2 – ФВ модули; 3 – мълниеприемник; 4 - токоотвод.*

Мълниезащитата се реализира посредством вертикални мълниеприемници, заварени директно върху металната конструкция.

При мълниезащитна зона **тип А** (първо ниво на мълниезащита) действителната височина на мълниеприемника над конструкцията $h_a$ при малка височина на конструкцията над земята се определя според зависимостта:

$$h_a = \frac{(r_x - 1,6h_x) + \sqrt{2,56h_x^2 + 9,6h_x r_x + r_x^2}}{3,2} \quad (1)$$

където:

$h_x$ – височина на защитаваният обект;

$r_x$ – радиус на защитната зона със височина $h_x$;

$h_a$ – действителна височина на мълниеприемника;

$$h = h_a + h_x \quad (2)$$

При мълниезащитна зона **тип Б** (второ ниво на мълниезащита) действителната височина на мълниеприемника над конструкцията $h_a$ може да се пресметне от условието за определяна на радиуса на защитната зона [5]:

$$r_x = 1,5\left(h - \frac{h_x}{0,92}\right) \quad (3)$$

Като се замести (2) в (3) получаваме израз за пресмятане на действителната височина на мълниеприемника при защитна зона тип Б:

$$h_a = \frac{r_x + 0,13 \cdot h_x}{1,5} \quad (4)$$

И в двата случая, ако дължината на ФВ стринг е $L$, то радиусът на защитната зона при равномерно разпределение на мълниеприемниците ще бъде половината от тяхната широчина, т.е. $r_x = \frac{a}{2}$.

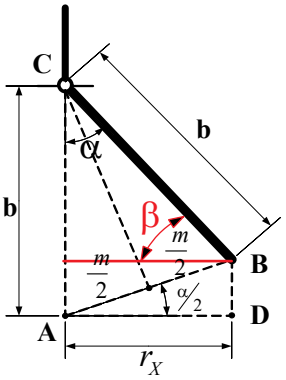
Тъй като PV модулите не са разположени плътно един до друг и за да се осигури припокриване на защитните им зони е необходимо стойността на $r_x$ да бъде завишена. За целта трябва да вземем предвид дължината на хоризонталната част на конструкцията $L$, върху която са разположени модулите и техния брой $n$:

$$r_x = \frac{L}{2 \cdot n} \quad (5)$$

В зависимости (1) и (4) към височината на носещата конструкция над земята, трябва да добавим височината на модула:

$$h'_x = h_b + b \quad (6)$$

Фиг. 10 илюстрира минимално-допустимият ъгъл на наклон на ФВ панели спрямо хоризонта $\beta_{\min}$ за да се гарантира ефективна мълниезащита на модулите, определена със съответното ниво на мълниезащита:




***Фиг. 10**. Принципна схема на ъгъла на наклон на ФВ модули спрямо хоризонта при едноскатна конструкция.*

От триъгълник ABC се определя $m = 2b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, а от триъгълник ABD $r_x = b \cdot \sin(\alpha) = b \cdot \sin(90 - \beta)$.

Минимално-допустимият наклон на модулите спрямо хоризонта се определя по:

$$\beta_{\min} = 90 - \arcsin\left(\frac{2 \cdot r_x}{b}\right) \le \beta_{действ} \qquad (7)$$

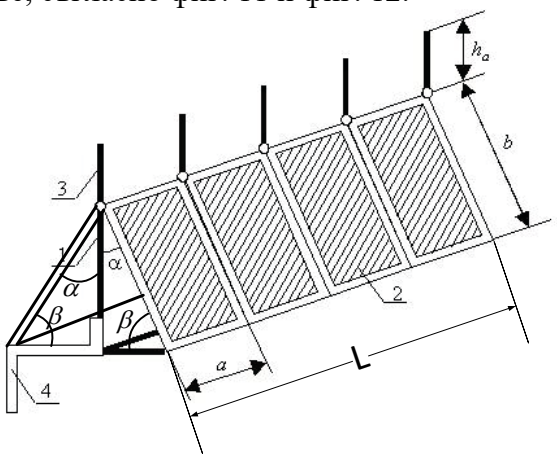
където: $r_x \le b$

Получената зависимост (7) позволява определянето на минимално-допустимия наклон на модулите спрямо хоризонта за предварително зададен радиус на защитната зона (5).

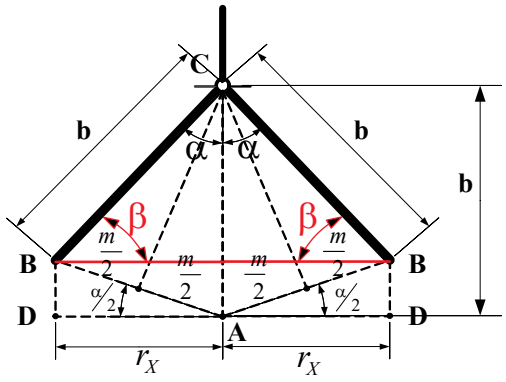
В случай, че изчислената стойност за $\beta_{\min}$ е по-голяма от действителния наклон на модулите $\beta_{действ}$, е необходимо допълнително увеличаване на радиуса за защитната зона $r_x$ и повторение на изчислителната процедура.

- **Двускатна конструкция на ФВ стрингове**

Поради пълната симетрия на геометрията по вертикалната ос, изчислителни зависимости от (1) до (7) могат да се използват за оразмеряване на мълниезащитната зона и при двускатно разполагане на ФВ модули в отделните стрингове, съгласно фиг. 11 и фиг. 12.




***Фиг. 11**. Разположение на ФВ модули и мълниеприемниците при двускатна конструкция на стринга*




***Фиг. 12**. Принципна схема на ъгъла на наклон на ФВ модули спрямо хоризонта при двускатна конструкция.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените зависимости и разсъждения могат да се използват в проектантската практика.

Вертикалните мълниеприемници са подходящи за мълниезащита на стрингове от ФВ панели, при монтажът им директно върху металната носещ конструкция. Това позволява монтирането на мълниеприемниците без допълнително укрепване, най-често чрез заваряване.

Монтираните мълниеприемници не оказват значим засенчващ ефект върху ФВ панели поради малката си височина и диаметър.

Предложената методика се основава на изведени аналитични зависимости,

позволяващи да се определят не само геометричните размери на мълние-приемниците, но и да се оцени влиянието на различните ъгли на наклона на ФВ панели спрямо хоризонта.

*Източник на финансиране: проект № 2213Е на ТУ - Габрово.*
*Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № 2213Е.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Economic.bg, The Overgrowth of Renewable Energy Sources(RES) Continues Throughout the Whole Territory of Bulgaria, *https://www.economic.bg/bg/a/view/svryhrastejyt-na-vei-prodyljava-v-cjala-bylgarija.*
[2] Capital, The New Renewable Energy Sources – the Boom in Solar Parks, May, 2024.
[3] DEHN, Lightning Protection Guide, 3-rd updated edition, 2015.
[4] REGULATION No. 3/2004 for Design of Electrical Power systems and Power lines.
[5] Regulation No. 4/2010 for Lightning Protection of Buildings, Outdoor Facilities and Open Spaces.
[6] BDS EN 62305-3:2011 - Lightning protection - Part 3: Protection of construction equipment and people - Annex 5: Lightning protection and surge protection for photovoltaic systems.
[7] Stefanov, Ern. N., Systems for Protection of PV Parks from Atmospheric and Switching Overvoltages, Energy Review (M), Issue 2, 2012.
[8] BDS EN IEC 62305-2:2024 Protection against lightning - Part 2: Risk management.
[9] "AMNIS" LTD, Lightning protection zones.
Problems Related with Their Use in Lightnig Protection Design, Moscow, 2021// https://www.amnis.ru/staty/zony-zashchity-molnieotvodov/
[10] Petrov, P. K., G. Ts. Velev, K. M. Ivanov., A method for dimensioning the lightning protection of photovoltaic modules, placed on the roofs of buildings, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Journal of Mining and Geological Sciences, Vol. 62, Nr. 3, ISSN 2682-9525 (print), ISSN 2683-0027 (online), 2019, pp. 113 – 116;

# ФОТОБИОЛОГИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА LED ОСВЕТЛЕНИЕТО ВЪРХУ ЧОВЕКА

**Веселина Стефанова**

*Технически университет – Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: veselinka98@abv.bg*

# PHOTOBIOLOGICAL IMPACT OF LED LIGHTING ON HUMANS

**Veselina Stefanova**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: veselinka98@abv.bg*

**Abstract**

*The publication discusses current standards and scientific research regarding the photobiological impact of LED lighting on humans. European and German standards related to photobiological safety and the melanopic effect of light are investigated. Despite its advantages, LED lighting may also cause negative effects, such as headaches and visual fatigue, due to the emission of blue light, which affects the circadian rhythm and melatonin synthesis. Blue light is beneficial for daytime alertness, but excessive exposure can damage photoreceptors and disrupt sleep. It is recommended to use LED lamps with a lower colour temperature to reduce the risk of negative effects. Further research is needed to assess the long-term risks of blue light exposure and to develop strategies for minimizing potential hazards to the eyes.*

**Keywords:** photobiological impact, LED lighting, visual fatigue, blue light, circadian rhythm.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Фотобиологичното въздействие на светлината върху човека е важен фактор за неговото физическо и психическо здраве. Балансът между излагането на светлина през деня и нощта е от съществено значение за поддържане на здравословен биологичен ритъм, настроение и когнитивна функция. В съвременния свят, в който изкуствената светлина е част от ежедневието, е важна осведомеността за нейното влияние и предприемането на мерки за намаляване на негативните ѝ ефекти.

В последните години се задълбочават изследванията на фотобиологичното влияние на светлината върху човека.

Някои от най-съществените въздействия са доказани и включени като нормативни изисквания и препоръки в международни стандарти [1, 2, 3]

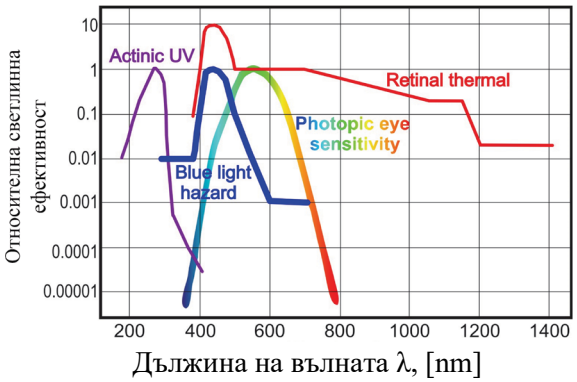
## ИЗЛОЖЕНИЕ

В настоящата публикация се прави проучване на актуални стандарти и научни изследвания за фотобиологичното въздействие на светлината върху човека, като се анализира влиянието на съвременните LED технологии за осветление.

В Европа е въведен стандарт БДС EN 62471 „Фотобиологична безопасност на лампи и системи от лампи“ (табл. 1). [2]

В Германия е въведен DIN/TS 5031-100:2021-11 - Част 100: Меланопичен ефект на светлина върху хора, медииран чрез окото - размери, символи и спектри на ефекта. [3]

Въздействието, което оказва светлината и осветлението върху човешкото тяло е изключително важно за много физиологични и психологически процеси при човека.




***Фиг. 1.*** *Функции Actinic UV, Blue light hazard, Retina thermal и Photopic eye sensitivity, използвани в IEC 62471 . [1]*

***Табл. 1.*** *Вид на опасностите на светлината, посочени в IEC 62471 [1]*

| Опасност (вид на отрицателното въздействие) | Обхват на дължина на вълната, [nm] | Фотобиологично въздействие | |
|---|---|---|---|
| | | Кожа | Очи |
| Actinic UV (предизвика фотохимични реакции) | 200 - 400 | Еритема; Еластоза | Фотокератит на роговицата; Катаракта на лещата |
| UV излъчване, близко до видимия спектър (UV-A) | 315 - 400 | - | Катаракта на лещата |
| Retinal Blue Light (увреждане на ретината със синя светлина) | 300 - 700 | - | Фотокератитна ретината |
| Retinal Thermal (топлинно въздействие на ретината) | 380 - 1400 | - | Изгаряне на ретината |
| IR излъчване | 780 - 3000 | - | Изгаряне на роговицата; Катаракта на лещата |
| Топлинно излъчване | 380 - 3000 | Изгаряне на кожата | - |

Има четири тегловни функции, използвани в IEC 62471 – три, свързани със специфични фотобиологични опасности и четвърта, фотопична реакция на очите, използвана при оценката на светлинната ефективност (светоодването) на определен светлинен източник – фиг. 1. [1]

В зависимост от потенциалните фотобиологични рискове и въз основа на допустимото време на въздействие, светлинните източници се класифицират в четири групи, дадени в табл. 2. [1]

***Табл. 2.*** *Рискови групи на светлинни източници, посочени в IEC 62471, в зависимост от фотобиологичната опасност. [1]*

| Рискова група | Описание |
|---|---|
| Без риск (Exempt) | Няма фотобиологична опасност |
| RG1 | Няма фотобиологична опасност при нормални ограничения на обкръжението |
| RG2 | Не представлява опасност от негативна реакция към ярка светлина или топлинен дискомфорт |
| RG3 | Опасност дори при моментно излагане на светлина |

Специализираните фоторецептори на клетките на ретината, конуси и пръчици, отговорни за част от формирането на изображения, реагират на различни дължини на вълната. [4]

Фоторецепторите, съдържащи меланопсин в човешкото око са особено отзивчиви към синята светлина. Тяхната чувствителност е най-голяма при дължини на вълните около 480 nm.

Излагането на синя светлина провокира фотохимични реакции в повечето очни тъкани, по-специално в роговицата, лещата и ретината. [5]

Проучвания показват, че определени експозиции на синя светлина (в зависимост от дължината на вълната или интензитета) могат да причинят временно или постоянно увреждане на някои структури на окото, особено на ретината. Понастоящем обаче няма доказателства, че използването на екрана и светодиодите при нормална употреба са вредни за човешката ретина. [5]

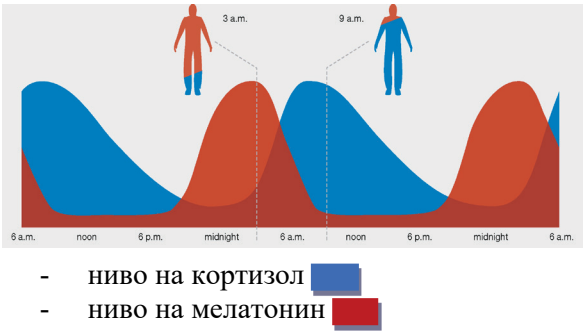
Биологичният ритъм (циркаден ритъм) се контролира от интензитета на

светлината и нейния спектрален състав – особено на синята компонента на светлината.

Без дневна светлина производството на мелатонин и кортизол, хормоните – които основно регулират циркадния ритъм (фиг. 2), се нарушава. [1]

През деня синята светлина е полезна за повишаване на бдителността и концентрацията, защото поддържа мозъка в състояние на бодрост.

Затова естествената слънчева светлина, която съдържа значителен дял синя светлина, играе важна роля за поддържането на циркадния ритъм.




***Фиг. 2.*** *Влияние на дневната светлина върху нивата на хормоните в човешкото тяло. [6]*

Облъчването с къси дължини на вълните, включително синя светлина, отслабва и намалява освобождаването на мелатонин през вечерните часове. [7]

Натрупващите се експериментални доказателства показват, че излагането на синя светлина може да повлияе на много физиологични функции и може да се използва за лечение на циркадни дисфункции и нарушения на съня.

Синята светлина може също да предизвика увреждане на фоторецепторите. Поради това е важно да се вземе предвид спектралният състав на светодиодните източници на светлина, за да се сведе до минимум опасността, която може да бъде свързана с излагането на синя светлина. [8]

Цветната температура на светлината и осветеността имат важни функции при проектирането на биологично въздействащо осветление на закрито. Съдържанието на синя (късовълнова) светлина с цветна температура над 5 000K увеличава значително активността на човек през деня. [1]

Излъчването на синя светлина се счита за потенциал за фотобиологично индуцирано увреждане на ретината в резултат на излагане на радиация при дължини на вълните главно между 400 nm и 500 nm. [9]

Доказано е, че радиацията с къса дължина на вълната (спектър на родопсин) и опасността от синята светлина (пик на възбуждане 440 nm) оказват голямо влияние върху фоторецепторите и функцията на RPE, предизвиквайки фотохимично увреждане и апоптотична клетъчна смърт. [10, 11]

Този механизъм на увреждане доминира в така наречения механизъм на термично увреждане на ретината. [9]

В резултат на това са определени изисквания за стандартизация за оценка на въздействие на синята светлина. [9]

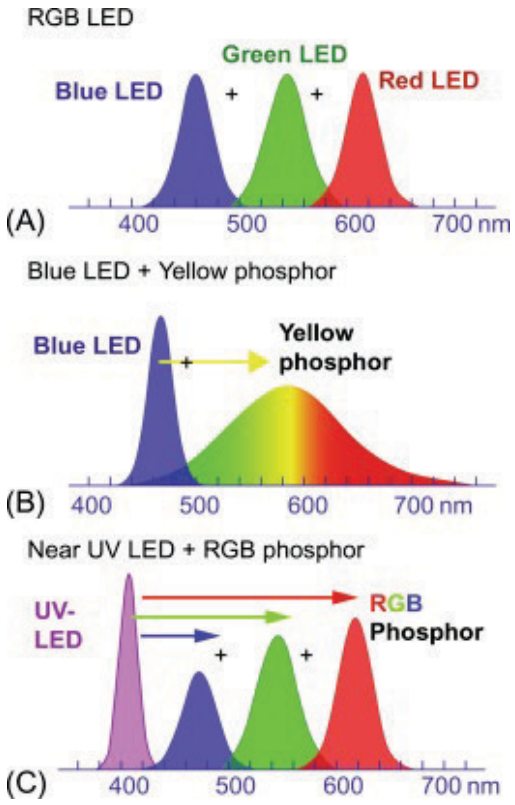
При оценка на фотобиологичното въздействие на опасност, произтичаща от оптично лъчение, се прави разлика между различни диапазони на дължини на вълните (UV, видими и UV лъчение). Основният аспект е дълбочината на проникване в тъканите. Кожата и очите са засегнати по-специално, като оптичното излъчване не прониква дълбоко в тъканта. [11]

Към настоящия момент в практиката се прилагат следните три основни конструктивни решения за получаване на бяла светлина чрез светодиодна технология (фиг. 3):

(A) RGB LED – смесване на светлината от червени, зелени и сини светодиоди;

(B) Blue LED+Yellow phosphor - син LED чип, покрит с жълт луминофор;

(C) UV LED+RGB phosphor - ултравиолетов светодиод покрит с луминофори излъчващи червен зелен и син/жълт цвят. [1]

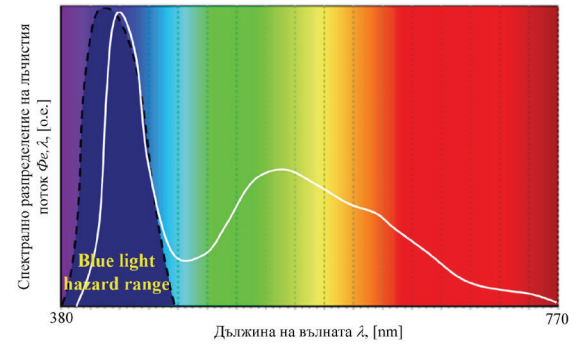



***Фиг. 3.*** *Основни LED технологии. [1]*

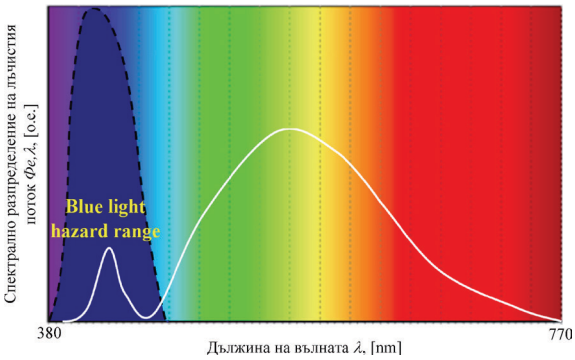
В почти всички съвременни светлинни източници наличието на по-голяма интензивност на излъчване в опасния диапазон на синята синята светлина се характеризира с по-висока цветна температура. Анализът на спектралните разпределения на излъчването на най-широко използваната LED технология от вида син LED + жълт фосфор с различна корелирана цветна температура $T_{cp}$ показва, че светодиодите със студено бяла светлина имат значително по-високи емисии в диапазона на опасната синя светлина в сравнение с тези с топло бяла светлина. [1]

През последните години изключително много се развиLED осветлението, но въпреки напредъка, който е постигнат – дълъг живот, голяма енергийна ефективност, по-добро цветопредаване, то те могат да окажат и отрицателното въздействие върху човека, да причинят главоболие, напрежение в очите и зрителна умора. LED технологиите, използват изкуствено синьо лъчение, което може да бъде потенциално вредно за ретината в човешкото око. Поради близостта на ултравиолетовия спектър, дължините на вълните са с по-висока енергия и висок потенциал за промяна на очните тъкани [12]. Светлината се открива от човешкото око, което изпраща информацията, получена от мозъка през зрителните пътища. [4]

В почти всички съвременни светлинни източници наличието на по-голяма интензивност на излъчване в опасния диапазон на синята светлина се характеризира с по-висока цветна температура. [1]




*а) LED осветител с Tcp = 6 500 K*




*б) LED осветител Tcp = 2 700 K*

***Фиг. 4.*** *Спектрални разпределения на LED осветители със студено бяла и топло бяла светлина с различни емисии на опасната синя светлина. [1]*

Може да се направи препоръка за най-разпространената в днешно време технология от вида син LED + жълт фосфор, за да се намали опасността от синя светлина на вътрешното осветление в помещения с непрекъснато присъствие на хора, трябва да са LED лампи с корелирана цветна температура Tcp ≤ 4 500 K. [1, 13]

Синята светлина, излъчвана от LED светлините, може да попречи на циркадния ритъм на човек. Излагането на синя светлина потиска синтеза на мелатонин, което може да наруши процеса на заспиване и качеството на съня.

Развитието и популяризирането на LED технологията до голяма степен задоволява стремежа на хората към визуални ефекти и енергийна ефективност, но съпътстващото голямо количество светлинно излъчване и неговия спектър предизвика загриженост на хората относно безопасността на светлинната биология. [14]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените проучвания се правят изводи за въздействието на LED осветлението върху човека по конкретни показатели, като наличието на опасна синя светлина, нивото на изменение на хормоните и др.

Синята светлина е от съществено значение за биологичния ни часовник, но контролът върху нейното въздействие е ключов за доброто здраве и качествения сън.

Понастоящем вредата от излъчването на синя светлина е една от най-важните опасности за хората от светлинното излъчване. [14]

Необходими са по-нататъшни проучвания, за да се разберат по-добре механизмите на фотохимичните увреждания, свързани с излагането на синя светлина, и да се определи дали дългосрочното, ниско ниво на излагане на изкуствена синя светлина е рисков фактор за AMD или други очни заболявания. [5, 15, 16, 17]

Междувременно, за да се предотвратят потенциални опасности за очите от синята светлина, може да се препоръча да се ограничи времето на излагане на синя светлина. [5]

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Tsankov, P., M. Yovchev. Textbook on Lighting and installation technology (in Bulgarian). Vasil Aprilov University Publishing House, Gabrovo, 2024, ISBN: 978-954-683-701-1.

[2] BDS EN IEC 62471-7:2023 Photobiological safety of lamps and lamp systems - Part 7: Light sources and luminaires primarily emitting visible radiation.

[3] DIN/TS 5031-100:2021-11 Radiation physics in the optical field and lighting technology - Part 100: Melanopic effect of light on humans mediated through the eye - dimensions, symbols and spectra of the effect.

[4] Vladimiro Hipólito, João M. P. Coelho, 2023, Blue Light and Eye Damage: A Review on the Impact of Digital Device Emissions, Photonics 2023, 10(5), 560, https://www.mdpi.com/2304-6732/10/5/560

[5] Audrey Cougnard-Gregoire, Bénédicte M. J. Merle, Tariq Aslam, Johanna M. Seddon, Isabelle Aknin, Caroline C. W. Klaver, Gerhard Garhöfer, Alfredo Garcia Layana, Angelo Maria Minnella, Rufino Silva & Cécile Delcourt, 2023, Blue Light Exposure: Ocular Hazards and Prevention—A Narrative Review, https://link.springer.com/article/10.1007/s40123-023-00675-3

[6] licht.wissen 19 Impact of Light on Human Beings, https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/1409_LW19_E_Impact-of-Light-on-Human-Beings_web.pdf

[7] Masao Ishizawa, Takuya Uchiumi, Miki Takahata, Michiyasu Yamaki, Toshiaki Sato, 2021, Effects of pre-bedtime blue-light exposure on ratio of deep sleep in healthy young men, Sleep Medicine, Volume 84, August 2021, Pages 303-307, https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.05.046

[8] Gianluca Tosini, Ian Ferguson, Kazuo Tsubota. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology, Mol Vis. 2016

Jan 24;22:61-72. PMID: 26900325; PMCID: PMC4734149. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4734149/

[9] V. Gyurov and T. Dimitrov, Analysis of the Photobiological Impact of LED Light Sources in the Context of Standardization Requirements for Reduction of Blue Light Emission, 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10202372

[10] Peep V. Algvere, John Marshall, Stefan Seregard, 2006, Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard, Acta Ophthalmologica Scandinavica, Volume84, Issue1, February 2006, Pages 4-15 https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2005.00627.x

[11] licht.wissen 17 LEDs: Basics - Applications – Effects, https://www.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/1807_lw17_E_LEDs-Basics-Applications-Effects_web.pdf

[12] Sanchez-Ramos, C.; Bonnin-Arias, C.; Blázquez-Sánchez, V.; Aguirre-Vilacoro, V.; Cobo, T.; García-Suarez, O.; Perez-Carrasco, M.J.; Alvarez-Peregrina, C.; Vega, J.A. Retinal Protection from LED-Backlit Screen Lights by Short Wavelength Absorption Filters. Cells 2021, 10, 3248.

[13] Tsankov, P.T. (2020). Lighting Technologies. In: Pavlovic T. (eds). The Sun and Photovoltaic Technologies. Green Energy and Technology. Springer, Cham, pp 213-270. ISBN 978-3-030-22402-8

[14] XIAO Zhiyu; LIN Kairong; LIU Xiaoke; XIONG Ke; ZHUANG Zhengfei; QIU Xuejun, 2022, A Review on the Current Situation of Research on Biosafety Hazards of Blue Light., Journal of Laser Biology / Acta Laser Biology Sinica, 2022, Vol 31, Issue 5, p385, ISSN 1007-7146 https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A2%3A27401282/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A161333412&crl=c

[15] Behar-Cohen F, Martinsons C, Viénot F, Zissis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? Prog Retin Eye Res. 2011;30(4):239–57.

[16] Hatori M, Gronfier C, Van Gelder RN, Bernstein PS, Carreras J, Panda S, et al. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. NPJ Aging Mech Dis. 2017;3:9.

[17] Tosini G, Ferguson I, Tsubota K. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology. Mol Vis. 2016;22:61–72.

# АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ВЕЛИЧИНИ ПРИ РАБОТА НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ

**Любомир Димитров**

*Технически университет – Габрово, "Хаджи Димитър" 4, Габрово, България*
**Кореспондиращ автор: l.dimitrov@abv.bg*

# ANALYSIS OF ELECTRICAL QUANTITIES DURING OPERATION OF INDUCTION MOTORS WITH FREQUENCY CONTROL

**Lyubomir Dimitrov**

*Technical University – Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*
** Corresponding author: l.dimitrov@abv.bg*

**Abstract**
The paper deals with practical results of studies carried out on the power quality indicators for the joint operation of centrifugal pumps driven by three-phase squirrel-cage induction motors. The control of induction motors is implemented by frequency regulators. A METREL MI 2292 measuring device has been used for the measurements and analysis of the electricity quality. The results obtained are presented in tabular and graphical form and relevant conclusions are drawn.

**Keywords:** induction motor, power quality, power quality analyzer, electricity, frequency control.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Трифазните асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор намират широко приложение при задвижване на редица агрегати и механизми. Техините предимаства, като проста конструкция, лесна поддръжка, възможност за регулиране на честотата на въртене в широки граници и др., ги правят предпочитани при избор на електрически двигател в промишлеността и индустрията.

Широко разпространен метод за регулиране на честотата на въртене на асинхронните двигатели е чрез използването на честотни преобразуватели, които създават възможност за регулиране на честотата на въртене в голям диапазон.

Основен проблем, който създават тези устройства е свързан със способността им да генерират висши хармоници в електрозахранващата мрежа.

В електроснабдителните системи непрекъснато се увеличава броят и мощността на консуматорите с нелинейна волт-амперна характеристика.

Вентилните преобразуватели (токоизправителни уредби, преобразуватели на честота, преобразуватели на броя на фазите, регулатори на напрежение), електродъговите пещи, заваръчните агрегати и газоразрядните светлинни източници са най-разпространените консуматори с нелинейна волт-ампер на характеристика. Тези консуматори независимо от това, че се захранват със синусоидално напрежение, са източници на висши хармоници на тока в електроснабдителните системи. Хармониците на тока причиняват спадове на напрежения в съпротивленията на електрическата верига, които се наслагват със захранващото напрежение с основна честота 50 Hz и изкри□вяват (деформират) синусоидата на напрежението [1].

Хармониците, разпространяващи се в разпределителните мрежи, предизвикват намаляване качеството на електрическата енергия, което може да предизвика редица отрицателни ефекти:

- увеличени загуби и претоварвания в разпределителните мрежи, поради увеличена ефективна стойност на тока;
- претоварвания в нулевите (неутрални) проводници в трифазни мрежи, поради сумиране на токовете с висши хармоници, кратни на три, които се генерират от еднофазни товари;
- претоварвания, вибрации и ускорено стареене на генератори, трансформатори и електродвигатели, както и увеличен шум на трансформаторите;
- претоварвания и ускорено стареене на кондензаторите за повишаване фактора на мощността;
- изкривяване формата на захранващото напрежение, което може да смущава работата на чувствителни потребители;
- смущения в комуникационните мрежи и телефонните линии;
- намаляване на точността на електроизмервателните уреди и влошаване на работата на телемеханичните устройства и релейната защита [1].

Хармониците на тока причиняват спадове на напрежението в съпротивленията на електрическите вериги и деформират синусоидата на захранващото напрежение. Това води до влошаване на качеството на електрическата енергия, доставяна на потребителите, което може да причини проблеми в работата им [2].

По своята същност електроенергията е търговски продукт, който трябва да има необходимото качество. Масово използваното понятие “качество на електроенергията” (*Power Quality*) означава доставяне без прекъсване на електроенергия на потребителите, като параметрите на мрежовото напрежение са в определени граници, позволяващи нормалното функциониране на свързаните към мрежата електрически товари. Идеално електрозахранване означава мрежовото напрежение никога да не се прекъсва, неговата стойност и честота да са в допустимите от действащия стандарт граници и да има чисто синусоидална форма без насложени шумове. На понятието качество на електрическата енергия се обръща сериозно внимание още от самото създаване на електрическите мрежи, но днес то е още по-важно по две основни причини.

Те са свързани с наличието на множество съвременни типове товари, които от една страна се нуждаят от добро качество на електрическата енергия, а от друга го влошават поради естеството на своето действие. Като пример е достатъчно да се спомена импулсните захранвания, използвани в голяма част от компютърните, комуникационните и други електронни устройства, и управляващите блокове на постояннотоковите и променливотоковите електродвигатели с променлива честота на въртене.

Многобройни са областите на човешката дейност, където влошаването на качеството на електрическата енергия е свързано със значителни финансови загуби, най-вече в непрекъснатите производства. Например, краткотрайни прекъсвания на мрежовото напрежение могат да доведат до значителни загуби в стъкларската и стоманодобивната промишленост, в телекомуникациите и в работата на редица електрозадвижвания, като например помпените агрегати [3].

Качеството на електроенергията се определя от стандарти, прилагани в нашата страна – БДС EN 50160:2006, IEC 61000-3-1, IEC 61000-3-4.

Например, европейският EN 50160 се отнася за качеството на електроенергията в мрежи ниско и средно напрежение и задава допустимите граници на всички параметри на напрежението. Според него допустимите бавни промени на напрежението се оценяват чрез средноквадратичната стойност за интервал от 10 min, чиито относителни промени около номиналната стойност трябва да са до ±10% през 95% от седмицата. Честотата се измерва като средна стойност за интервал от 10 s и трябва да е 49.5-50.5 Hz през 99.5% от седмицата и между 47 и 52 Hz през останалото време [4].

Широкото приложение на устройства с нелинеен характер на товара налага необходимостта за установяване на изменението на показателите за качеството

на електрическата енергия в електрическата мрежа на различни присъединени обекти.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Широкото приложение на устройства с нелинеен характер на товара налага необходимостта за установяване на изменението на показателите за качеството на електрическата енергия и измерването на електрическите величини в електроснабдителната система на помпена станция, предназначена за напояване на земеделски земи. Общият брой на помпените агрегати е 5, като мощността на всеки от тях е 73.0 kW.

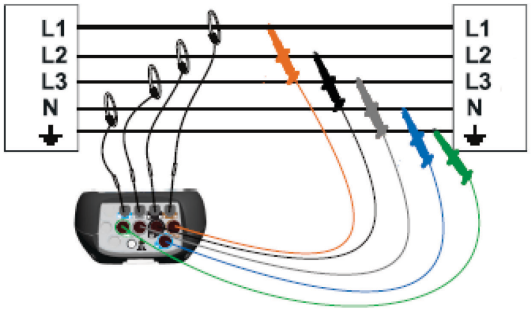
Работата на различни видове електрически устройства съществено се влияе от качеството на електрическата енергия и затова е необходимо да се извършат редица измервания на електрическите величини и да се установи дали тяхното изменение оказва съществено влияние върху работата на тези устройства [5].

За реализиране на измерванията и анализ на качеството на електрическата енергия е използван измервателен уред METREL, модел MI 2892 – фиг. 1. Измервателният уред разполага с редица функционални възможности, като измерване на ефективната стойност на електрическите величини (true RMS) и възможност за анализ на качеството на електрическата енергия (измерване по стандарт 50160). Притежава висок клас на точност, както и графично и таблично представяне на резултатите [6].



***Фиг. 1*** *Анализатор на качеството на електрическата енергия METREL MI 2892*

Измервателният уред е свързан в главното разпределително табло (ГРТ), като по този начин измерването обхваща всички електрически двигатели с честотно управление – фиг. 2.

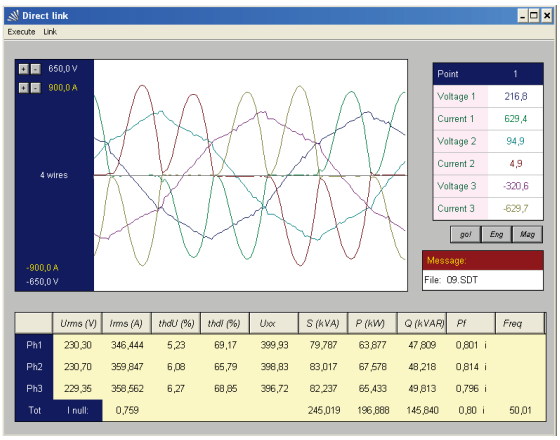



***Фиг. 2*** *Принципна електрическа схема на свързване*

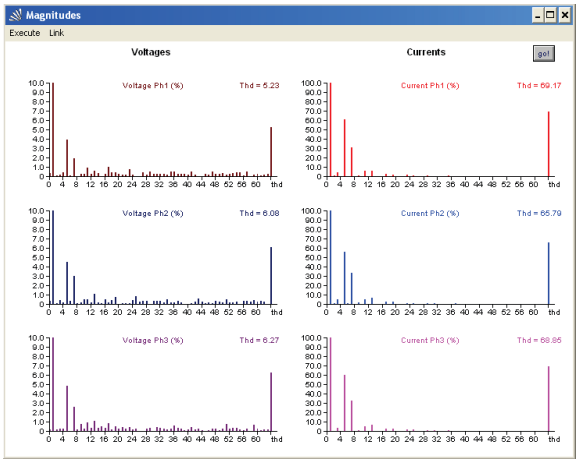
Получените резултати се отнасят до:

- измерване на ефективната стойност на фазовото и линейно напрежение Ph1 $U_{rms}$, Ph2 $U_{rms}$, Ph3 $U_{rms}$ $U_{rms}$, $U_{xx}$;
- измерване на ефективната стойност на фазовите и линейни токове ($I_{rms}$, Ph1 $I_{rms}$, Ph2 $I_{rms}$, Ph3 $I_{rms}$, $I_{xx}$;
- измерване и изчисляване на общото хармонично изкривяване на напрежението (thdU, %) в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване и изчисляване на общо хармонично изкривяване на тока (thdI %) в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване на пълна мощност (S, kVA) в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване на активна мощност (P, kW) в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване на реактивна мощност (Q, kVAr) в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване на коефициента на мощност (фактор на мощността) PF в трите фази: Ph1, Ph2, Ph3;
- измерване на честотата на захранващото напрежение: Freq, [Hz];
- измерване на тока в нулевия проводник: $I_{null}$, [A];
- измерване на мощността (пълна S, активна P и реактивна Q) в трифазната мрежа – Tot;
- измерване на коефициента на мощност (PF ) в трифазната мрежа – Tot;
- графично изобразяване на формите на синосоидите на напрежението и тока;

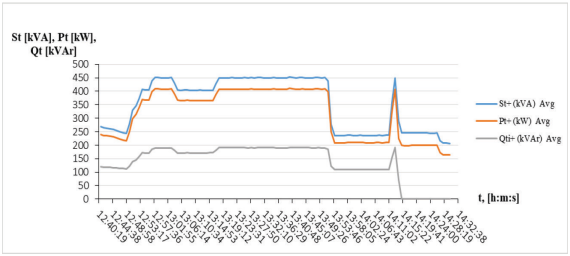
- графично изобразяване на стойностите на висшите хармоници на тока и напрежението: Voltage Ph1 %, Current Ph1 %. Уреда има възможност да измери до 63 хармоник.




***Фиг. 3*** *Графични и таблични резултати на електрическите величини*




***Фиг. 4*** *Нива на висшите хармоници*




***Фиг. 5*** *Товаров график на помпените агрегати*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От извършения анализ на получените резултати, може да се направят следните изводи:

- по отношение на показателите за качество на електрическата енергия, може да се каже, че те са в нормите и стойностите отговарят на заложените в стандартите изисквания. Изключение правят хармоничните съставящи на тока, както и общото хармонично изкривяване на тока. Техните стойности превишават многократно заложените в стандарта БДС IEC 61000-3-4. Измерванията показват, че тези превишени стойности се дължат на работа на асинхронните двигатели.

Причините за тези превишения до голяма степен се дължат честоттното електрозадвижване.

Тези устройства са с така наречената нелинейна волт-амперна характеристика и са предпоставка за влошаване на качеството на електрическата енергия.

Независимо от това, че се захранват със синусоидално напрежение, честотните управления са източници на електромагнитна енергия с периодичен несинусоидален характер и се разглеждат като източници на висши хармоници на тока в електрическата система.

Хармониците на тока причиняват спадове на напрежения в съпротивленията на електрическата верига, които се наслагват със захранващото напрежение с основна честота 50 Hz и изкривяват (деформират) синусоидата на напрежението.

Висшите хармоници на тока предизвикват допълнителни загуби на активна мощност и електрическа енергия в елементите на електрическата система. Увеличават многократно температурата на тоководещите части (кабели, шинопроводи), комутационни и защитни апарати. Нагряват намотките на електрическите машини, което е съпроводено с допълнителни загуби на електрическа енергия в тях. Тяхното ограничаване води до нормализиране на работата на тоководещите части, електрическите машини и комутационните и защитни апарати.

Препоръчва се при работа на такива устройства, (честотни преобразуватели) да се монтира на входа им филтър за висши хармоници.

Относно превишената консумация на реактивна мощност, може да се каже, че ограничаването на реактивните товари и подобряването на фактора на мощността – cosφ е от съществено значение за оптимизиране на режимите на реактивните товари и повишаване на ефективността на електроснабдителната система, което конкретно се изразява в намаляване на загубите на мощност и енергия, намаляване на сечението на проводници, кабели и шинопроводи. В резултат на това се намалява загряването на съоръженията и загубите на напрежение, което трябва да бъде взето предвид тяхното оразмеряване.

*Благодарности: Това изследване е с подкрепата на Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни меха-тронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Tsankov P. Elektrosnabdyavane. Universitetsko izdatelstvo ”Vasil Aprilov” Gabrovo, 2014.

[2] Rachev S., L. Dimitrov, I. D. Ivanov. Harmonic components of electric drives with frequency control for centrifugal mechanisms, machines, technologies, materials, year XII, issue 11/2018, pp. 463-465. ISSN 1313-0226.

[3] Rachev S., G. Ivanova, D. Koeva. Vector Control of Pump Unit Electric Drive with Medium Voltage Induction Motor, XIIth Scientific Conference BulEF 2020, 9-12 September 2020, Varna, Bulgaria, IEEE Xplore(https://ieeexplore.ieee.org/document/9326032). ISBN 978-1-7281-9439-4.

[4] BDS IEC 61000-3-4. Electromagnitna savmestimost, 2021.

[5] Dimitrov L., D. Koeva, D. Slavov. Analysis of the variations of electrical quantities during the operation of an rope electric hoist. International scientific conference UNITECH, Gabrovo 2021, 19-20 November, Gabrovo, vol. I, pp. 25-30.

[6] BDS EN 50160:2003. Harakteristiki na naprezhenieto na elektricheskata energya, dostavyana ot obshtestvenite razpredelitelni sistemi.

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФОТОМЕТРИЧНИ И ЦВЕТОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА LED ПРОЖЕКТОРИ В ПРОЦЕСА НА ЗАГРЯВАНЕ

**Пламен Цанков, Милко Йовчев, Христо Ибришимов, Ивайло Стоянов**

*Технически университет – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, България*

**кореспондиращ автор: myovchev@tugab.bg*

# STUDY OF THE PHOTOMETRIC AND COLORIMETRIC CHARACTERISTICS OF LED FLOODLIGHTS DURING THE WARM-UP PROCESS

**Plamen Tsankov, Milko Yovchev, Hristo Ibrishimov, Ivaylo Stoyanov**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadzi Dimitar, Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: myovchev@tugab.bg*

**Abstract**

*The paper presents the results of measured photometric and colorimetric characteristics of LED floodlights with varying active power during the warm-up process to a steady state. Measurements of the photometric and colorimetric characteristics of LED floodlights were conducted using a CCD spectroradiometer with an integrating sphere system and a thermal camera. A comparative analysis of the relative spectral distribution of radiant flux during the power-up phase and steady state of the LED floodlights is provided. The measured and calculated relative changes in luminous flux, luminous efficacy, correlated color temperature, and color rendering index during warm-up to steady state for the tested LED floodlights are presented.*

**Keywords:** LED floodlight; luminous flux; spectral distribution; correlated colour temperature; spectroradiometer; luminous efficacy.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Повишаването на температурата в p-n прехода на светодиодните (LED) източници води до намаляване на излъчвания от тях светлинен поток, понижаване на светлоотдаването и по-интензивно стареене на елементите им, като ефектът е по-силно изразен при мощните (бели) светодиоди. Тази топлина трябва да се отвежда от LED източниците, за да се ограничи намаляването на техните светлинен поток, ефективност и експлоатационен срок [1,2,3]. Много публикации описват влиянието на температурата на p-n прехода на светодиодите върху изходните светлотехнически показатели и продължителността на живота на LED осветителите [4,5,6,7].

По време на загряване на LED осветителите, използващи най-разпространената технология – син LED чип, покрит с жълт луминофор (blue LED chip + yellow phosphor), фотометричните, енергийните и цветовите характеристики се променят [2]. Промяната на фотометричните характеристики по време на загряването на LED осветителите влияе върху тяхното светлоотдаване, а изменението на спектралните характеристики оказва влияние върху степента на вярното възпроизвеждане на цветовете в околното пространство и на физиологичните процеси при човека, които за някои дейности и условия могат да бъдат от съществено значение [2,4].

Светлинният поток $\Phi$ е основният фотометричен показател на светлинните източници и се определя с израза:

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^{n} V(\lambda_i) \Phi_e(\lambda_i), \text{ [lm]}, \qquad (1)$$

където: $\Phi_e(\lambda_i)$ – спектрално разпределение на лъчистия поток, [W/nm]; $K_m$ = 683 lm/W – максимална спектрална светлинна ефективност за дневно зрение (при излъчване с дължина на вълната $\lambda$ = 555 nm); $V(\lambda_i)$ – относителна спектрална светлинна ефективност за $i$-тата дължина на вълната $\lambda$ (при $\lambda$ = 555 nm $V(\lambda) = 1$).

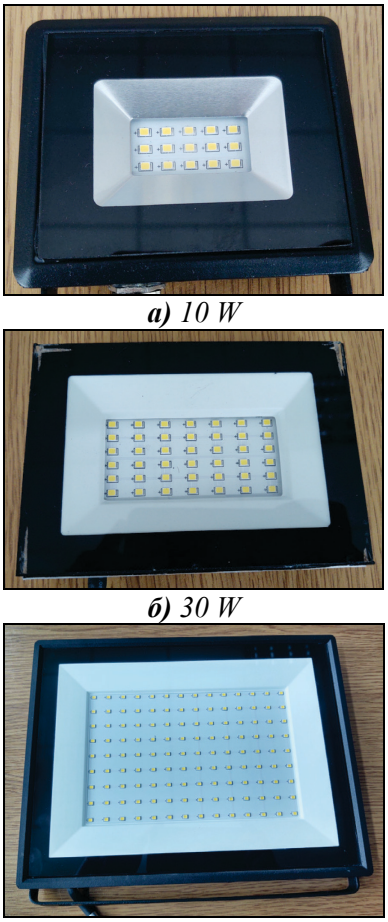
В доклада се представят сравнителни резултати от измерване на фотометрични и цветови характеристики на LED прожектори по време на тяхното загряване, с използване на CCD спектрорадиометър с интегрираща сфера и термовизионна камера, в акредитирана по БДС EN ISO/IEC 17025:218 светлотехническа лаборатория в Технологичния парк на Технически университет – Габрово.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Външният вид на изследваните LED прожектори, които са с различна активна мощност, е показан на фиг. 1.

Измерванията на фотометричните и цветовите характеристики на изследваните LED прожектори по време на загряване до установен температурен режим се извършват със CCD спектрорадиометър LMS-9000B с интегрираща сфера с диаметър 2 m, показана на фиг. 2, в акредитираната светлотехническа лаборатория.

За изключване на грешката от светлотехническите измервания в резултат на изменение на напрежението от електрическата мрежа, изследваните осветители се включват към източник на чисто синусоидално променливотоково електрозахранване с постоянна ефективна стойност на напрежението – 230 V (50 Hz), който е част от измервателния комплект на спектрорадиометъра. Процесът на измерване, изключване, настройката на параметри, интервалът на отчитане и експортирането на светлотехническите данни се осъществява чрез специализиран софтуер LMS-9000 Lisun CCD Spectroradiometer.



***а)*** *10 W*

***б)*** *30 W*

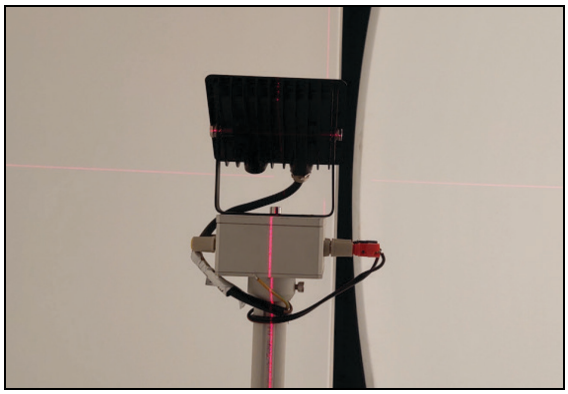
***в)*** *100 W*

***Фиг. 1.*** *Външен вид на изследваните LED прожектори*



***Фиг. 2.*** *Спектрорадиометър LMS-9000B с интегрираща сфера с диаметър 2 m*

С помощта на лазерна система се извършва центриране на изследваните LED прожектори в средата на интегриращата сфера – фиг. 3.

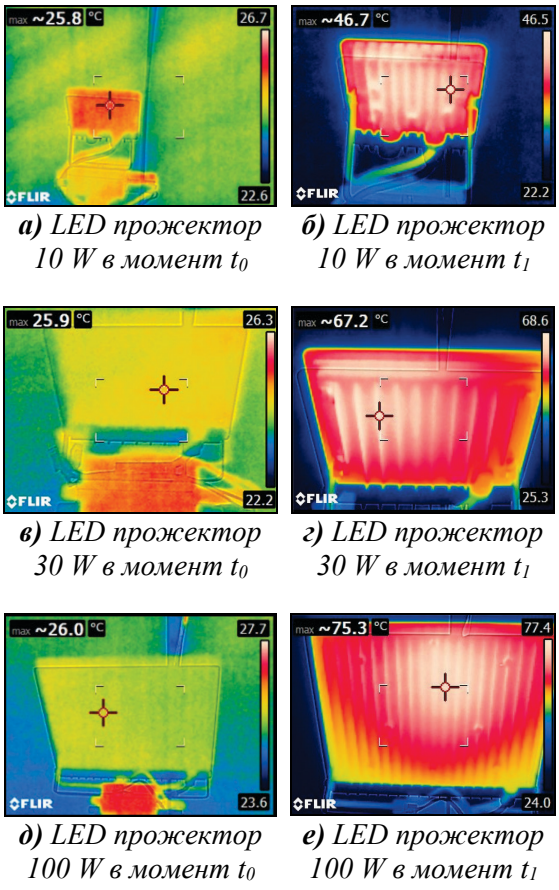


***Фиг. 3.*** *Позициониране на изследваните LED прожектори спрямо центъра на сферата*

За изключване на грешката в следствие на екраниране и поглъщане от LED прожекторите на част от отразения светлинен поток, в сферата е монтирана допълнителна лампа, с която преди измерването се определя коефициента на поглъщане за всеки изследван осветител.

В периода на загряване на изследваните LED прожектори от момента на електрозахранване $t_0$ до момента на настъпване на установен температурен режим $t_1$, в сферата се измерват през интервал от 10 s светлинният поток, светлоотдаването, корелираната цветна температура и общия индекс на цветопредаване.

Сравнителното изменение на температурата $\theta$ на корпуса на LED прожекторите в момента на включване и в момента на достигане на установен температурен режим се отчита с термовизионна камера FLIR E6. Термографските изображения в момента на електрозахранване $t_0$ и в момента на установен температурен режим $t_1$ са показани на фиг. 4. Температурата на околната среда в лабораторията преди измерванията е 25,8 °C при относителна влажност на въздуха 55 % – отчетени с калибриран термохигрометър.




***а)*** *LED прожектор 10 W в момент $t_0$*

***б)*** *LED прожектор 10 W в момент $t_1$*

***в)*** *LED прожектор 30 W в момент $t_0$*

***г)*** *LED прожектор 30 W в момент $t_1$*

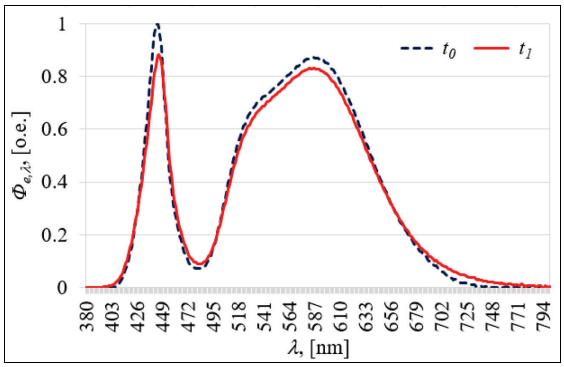
***д)*** *LED прожектор 100 W в момент $t_0$*

***е)*** *LED прожектор 100 W в момент $t_1$*

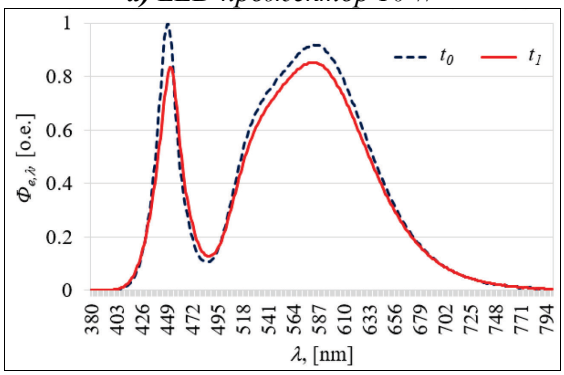
***Фиг. 4.*** *Термографско изображение на изследваните LED прожектори*

Периодът на загряване на изследваните LED прожектори от момента на електрозахранване $t_0$ до достигане на установен температурен режим $t_1$ е 30 min, като при достигане на установената температура осветителите автоматично се изключват от софтуера към спектрорадиометъра.

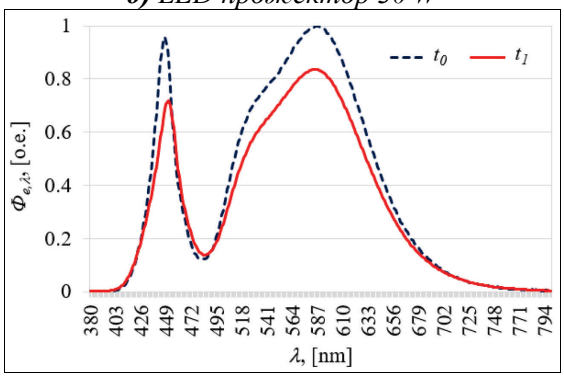
На фиг. 5 е показано за всеки прожектор сравнение на относителното спектрално разпределение на лъчистия поток $\Phi_{e,\lambda}$ във функция от дължината на вълната $\lambda$ във видимата област на електромагнитния спектър (от 380 nm до 800 nm) на изследваните три LED прожектора, измерено със спектрорадиометъра в момента на електрозахранване $t_0$ (тъмносинята прекъсната крива) и в момента на достигане на установен температурен режим $t_1$ (червената непрекъсната крива).




***а)*** *LED прожектор 10 W*




***б)*** *LED прожектор 30 W*




***в)*** *LED прожектор 100 W*

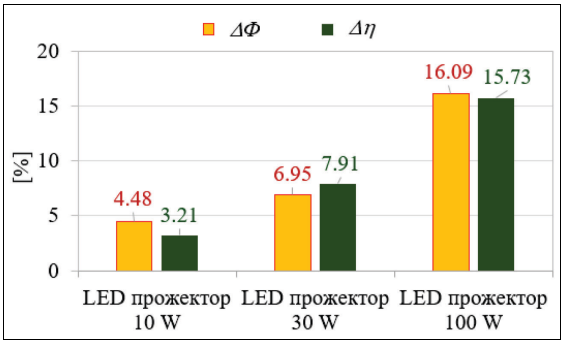
***Фиг. 5.*** *Относително спектрално разпределение на лъчистия поток на изследваните LED прожектори*

В таблица 1 са представени измерените стойности на температурата $\theta$ на корпуса на LED прожекторите с мощности 10 W, 30 W и 100 W и нейното относително изменение $\Delta\theta$ при достигане на установен температурен режим. В момента на електрозахранване $t_0$ и в момента на достигане на установен температурен режим $t_1$ са представени и стойностите на светлинния поток $\Phi$, светлоотдаването $\eta$, корелираната цветна температура $T_{cp}$ и общия индекс на цветопредаване $R_a$, обозначени съответно с индекси „0“ и „1“. В таблицата е показано изчисленото процентното изменение на корелираната цветна температура $\Delta T_{cp}$ и на общия индекс на цветопредаване $\Delta R_a$ в установен температурен режим спрямо момента на електрозахранване на LED осветителите.

***Табл. 1.*** *Фотометрични и цветови характеристики на изследваните LED прожектори в момента на включване и в установен температурен режим*

| Изследван параметър | LED прожектор | | |
|---|---|---|---|
| | 10 W | 30 W | 100 W |
| $\theta_0$, [°C] | 25,8 | 25,9 | 26,0 |
| $\theta_1$, [°C] | 46,7 | 67,2 | 75,3 |
| $\Delta\theta$, [%] | 81,01 | 159,46 | 189,62 |
| $\Phi_0$, [lm] | 1 049,2 | 3 178,8 | 12 055,7 |
| $\Phi_1$, [lm] | 1 002,2 | 2 957,8 | 10 116,4 |
| $\eta_0$, [lm/W] | 99,6 | 107,4 | 123,3 |
| $\eta_1$, [lm/W] | 96,4 | 98,9 | 103,9 |
| $T_{cp0}$, [K] | 3 976 | 3 999 | 3 933 |
| $T_{cp1}$, [K] | 3 994 | 4 034 | 3 983 |
| $\Delta T_{cp}$, [%] | 0,45 | 0,88 | 1,27 |
| $R_{a0}$ | 71,9 | 70,6 | 71,6 |
| $R_{a1}$ | 72,5 | 71,2 | 72,1 |
| $\Delta R_a$ | 0,83 | 0,85 | 0,70 |

Намаляването на относителния светлинен поток $\Delta\Phi$ и на относително светлоотдаване $\Delta\eta$ на изследваните LED прожектори в установен температурен режим спрямо момента на електрозахранване е показано на фиг. 6.




***Фиг. 6.*** *Намаляване на относителния светлинен поток и относителното светлоотдаване на LED прожекторите*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От извършеното изследване на фотометричните и цветовите характери-стики на LED прожектори с различна активна мощност в процеса на загряване могат да се напрявят следните по-съ-ществени заключения:

1. С увеличаване на активната мощност на осветителите се увеличава и относителното изменение на температурата на корпуса в установен температурен режим спрямо момента на включване (фиг. 4).

2. Относителното спектрално разпределение на лъчистия поток се променя при загряване на LED прожекторите, което повлиява и на енергийните характеристики, като намалява светлинния поток и светлоотдаването. Колкото по-голяма е мощността на осветителя, толкова по-голямо е относителното намаление на светлинния поток и на светлоотдаването (фиг. 5 и 6). Намаляването на светлинния поток $\Delta\Phi$ на LED прожектор с мощност 100 W е 4 пъти по-голямо от това на LED прожектор с мощност 10 W (16,09 % при 100 W спрямо 4,48 % при 10 W).

3. Процесът на загряване на изследваните LED прожектори не оказва съществено изменение на корелираната цветна температура и на общия индекс на цветопредаване. Корелираната цветна температура се увеличава с до 1,3 % при загряване. Най-голямо увеличение, с 50 K (1,27 %), се наблюдава при най-мощния LED прожектор с мощност 100 W.

Направените изследвания могат да се използват от производителите на LED осветители за оптимизиране на вида и формата на охлаждащата система (корпуса), както и от проектанти, които да съобразяват експлоатационния фактор на осветителната уредба според степента на намаляване на светлинния поток по време на загряване.

## БЛАГОДАРНОСТ

*Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Lasance, C., A. Poppe (eds.), Thermal Management for LED Applications, Solid State Lighting Technology and Application Series, Springer Science+Business Media NY, 2014, pp. 167.

[2] Tsankov, P.T. (2020). Lighting Technologies. In: Pavlovic T. (eds). The Sun and Photovoltaic Technologies. Green Energy and Technology. Springer, Cham, pp 213-270. ISBN 978-3-030-22402-8.

[3] Ivanov, Z. Lighting Engineering. Sofia, Avangard Prima Press, 2010. pp. 86, ISBN 978-954-323-779-1.

[4] Górecki, K., Ptak, P., Modeling Thermal Properties of Power LEDs Module, IEEE, 30th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Toulouse, France, 2024. pp. 1-6, ISBN 979-8-3503-8782-7.

[5] Anke, S. H., N. J. Ziegeler, P. W. Nolte, S. Schweizer, Thermographic, Electric, and Spectral Measurements for Analysis of High-Power LEDs, IEEE, 29th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Budapest, Hungary, 2023. pp. 1-5, ISBN 979-8-3503-1862-3.

[6] Tsankov, P., M. Yovchev, Thermal Imaging Study of the Process of Heating up to Steady State of LED Luminaires, International Scientific Conference UNITECH 2015, Gabrovo. pp. I 78-83, ISSN 1313-230X.

[7] Ibrishimov, H., P. Tsankov, M. Yovchev, Three-Dimensional Thermal Modeling of Industrial LED Luminaire, Sixth Junior Conference on Lighting (Lighting 2021), IEEE, Gabrovo, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, ISBN 978-1-6654-3792-9.

# ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА КЛИМАТИЧНИТЕ ФАКТОРИ ВЪРХУ КОЕФИЦИЕНТА НА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА СЪС CIGS МОДУЛИ

**Ивайло Лазаров**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“№4, България*
**кореспондиращ автор: iv_lazarov@tugab.bg*

# STUDYING THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE CAPACITY UTILIZATION FACTOR OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH CIGS MODULES

**Ivaylo Lazarov**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*
**Corresponding author: iv_lazarov@tugab.bg*

**Abstract**

*The paper presents the influence of air temperature, wind speed and solar irradiation on the plane of an array of photovoltaic modules on the capacity utilization factor (CUF) of photovoltaic system with CIGS photovoltaic modules. The photovoltaic system is part of the photovoltaic power plant at Gabrovo Tech Park. The AC energy output PV system, ambient temperature wind speed and solar irradiation data from system monitoring were obtained. The monthly values for a photovoltaic system's capacity utilization factor (CUF) are calculated. The correlation coefficients between capacity utilization factor, ambient temperature, wind speed and solar irradiation on the plane of the array of PV modules were obtained. Solar irradiation on the plane of the array of PV modules has the strongest influence on the capacity utilization factor of the photovoltaic system.*

**Keywords:** capacity utilization factor; CIGS modules; coefficient of correlation.

## ВЪВЕДЕНИЕ

За оценка на производителността на фотоволтаичните система се дават някои параметри, като ефективност на фотоволтаичната система ($\eta_{sys}$) и специфично електропроизводство на фотоволтаичната система (final yield $Y_f$). Ефективността на фотоволтаичната система се дава като отношение на електрическата енергия, отдадена от фотоволтаичната система в електрическата мрежа към входящата нетна слънчева енергия към фотоволтаичните модули [1]. Специфичното електропроизводство на фотоволтаичната система се дава като отношение на отдадената от фотоволтаичната система електрическа енергия в електрическата мрежа към нейната номинална мощност [2]. Друг параметър, който се въвежда за оценка на производителността на една фотоволтаична система е коефициентът използване на фотоволтаичната система (capacity utilization factor CUF). Той се дава като отношение на отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система в електрическата мрежа за даден времеви период (един ден, един месец или една година) към потенциалното максимално електропроизводство за същия времеви период. Коефициентът на използване на фотоволтаичната система зависи наличните слънчеви дни и местоположението на фотоволтаичната система [3].

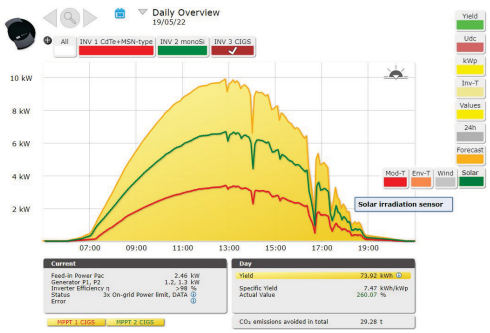
Върху стойностите на коефициента на използване на фотоволтаичната система влияние оказват различни климатични фактори, като слънчева радиация, температура на околната среда, влажност и скорост на вятъра [4]. В [5] е изследван

CUF фотоволтаична електроцентрала при сух климат. Изследването обхваща месеци от есента и зимата като получената най – висока стойност месечна стойност за CUF е 13,5%, а получената най – ниска месечна стойност е 8,1%. За фотоволтаична електроцентрала със модули от поликристален силиций са получени стойности за коефициента на използване между 11,98% и 18,34%, а изчислената средна годишна стойност на коефициента на използване на фотоволтаичната електроцентрала е 14,72% [6].

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследваната фотоволтаична система е с модули от медно-индиево галиев селенид (CIGS) и се намира на покрива на Габрово Тех Парк като част от фотоволтаичната електроцентрала на технологичния парк на Технически университет – Габрово. Модулите са разположени върху метална рамка с наклон от 33° спрямо хоризонта и са ориентирани на 18,4° на изток спрямо чистия юг. Системата се състои от 90 модула, всеки с единична мощност 110Wp, а общата максимална мощност на фотоволтаичната система е 9,9 kWp.

Фотоволтаичната електроцентрала е оборудвана със система за мониторинг, чрез която може да се получават данни и да се следи за изменението на произведената мощност от фотоволтаичните модули, отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната електроцентрала, слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули, температура на околната среда, скорост на вятъра (фиг. 1).

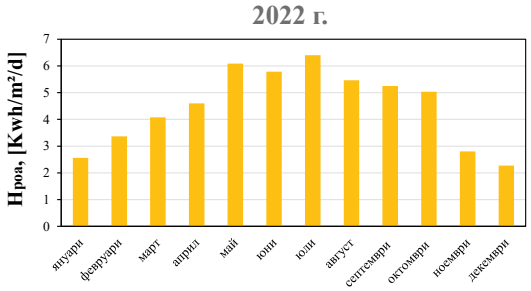



***Фиг. 1**. Софтуер на система за мониторинг Solar – log 300 на фотоволтаичната електроцентрала на Габрово Тех Парк.*

От получените данни от системата за мониторинг могат да се изчислят ефективността на фотоволтаичните модули, ефективност на фотоволтаичната система, специфично електропроизводство на системата и модулите, коефициент на използване на фотоволтаичната система (CUF) и др.

Периодът в който е извършено изследването на фотоволтаичната система обхваща месеците от 2022 г.

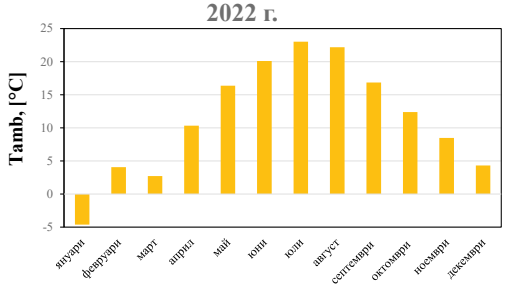
За оценка на производителността на всяка фотоволтаична система е важно да се разполага с информация изменението на климатичните фактори. На фиг. 2. е показано изменението средните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за 2022 г.




***Фиг. 2**. Изменение на средните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за 2022 г.*

Най – високи стойности за енергията на слънчевата радиация са получени за месеците май и юли – 6,09 и 6,40 kWh/m²/d, а най – ниски стойности са получени за типично зимните месеци декември и януари – 2,27 и 2,56 kWh/m²/d.

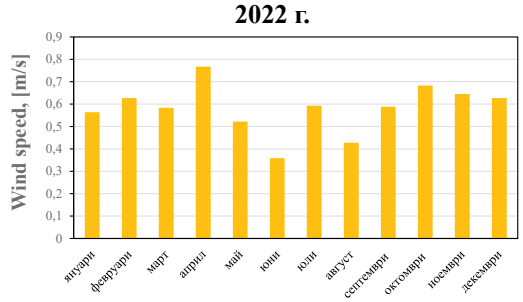
На фиг. 3. е показано изменението на средните месечни стойности на околната температура за 2022 г.




***Фиг. 3**. Изменение на средните месечни стойности на околната температура за 2022 г.*

За януари е получена отрицателна стойност за денонощната средна месечна околна температура $T_{amb}$ = - 4,60°C. Най – високи стойности за средната месечна околна температура са получени за типичните летни месеци Юли и Август – 23°C и 22,17°C.

На фиг. 4. е показано изменението на средните месечни стойности на скоростта на вятъра за 2022 г.




***Фиг. 4**. Изменение на средните месечни стойности на скоростта на вятъра за 2022 г.*

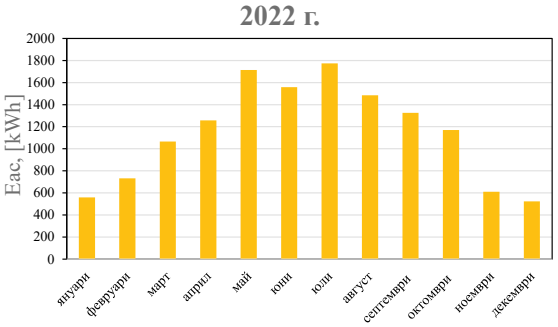
Най – високи денонощни средни месечни стойности за скоростта на вятъра са получени за април и октомври – 0,77 m/s и 0,68 m/s, а най – ниски за юни и август - 0,36 m/s и 0,43 m/s.

В табл. 1. са показани получените средни месечни стойности за енергията на слънчевата радиация, околната температура и скоростта на вятъра за 2022 г.

***Таблица 1.** Средни месечни стойности за енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули, околната температура и скоростта на вятъра за 2022 г.*

| Месец от 2022 г. | $H_{poa}$, [kWh/m$^2$/d] | $T_{amb}$, [°C] | v, [m/s] |
|---|---|---|---|
| януари | 2,56 | -4,60 | 0,56 |
| февруари | 3,37 | 4,07 | 0,63 |
| март | 4,07 | 2,73 | 0,58 |
| април | 4,60 | 10,32 | 0,77 |
| май | 6,10 | 16,38 | 0,52 |
| юни | 5,79 | 20,10 | 0,36 |
| юли | 6,41 | 23,00 | 0,59 |
| август | 5,47 | 22,17 | 0,43 |
| септември | 5,25 | 16,84 | 0,59 |
| октомври | 5,03 | 12,37 | 0,68 |
| ноември | 2,80 | 8,47 | 0,65 |
| декември | 2,27 | 4,31 | 0,63 |

Сумарното месечно изменение на отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа за 2022 г. е показано на фиг.5.




***Фиг. 5**. Изменение на сумарните месечни стойности на електрическата енергия отдадената в електрическата система от фотоволтаичната система за 2022 г.*

През май и юли са получени най – високи стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система в електрическата мрежа. За месец май тази стойност е 1714,10 kWh, а за месец юли е 1773,70 kWh. За същите месеци са получени и най – високите средни месечни стойности за енергията на слънчевата радиация.

Стойностите за получените месечни стойности за коефициента на използване на фотоволтаичната система се получават от следния израз [7]:

$$CUF = \frac{E_{ac,monthly}}{24 \times p_{pvrated} \times N}, [\%] \qquad (1)$$

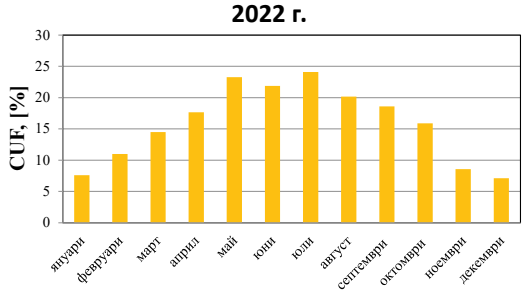
където $E_{ac,monthly}$ е сумарната месечна стойност на отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система в електрическата мрежа за съответния времеви период, [kWh];

$p_{pvrated}$ – инсталираната мощност на фотоволтаичните модули, [kWp];

24 – продължителността на едно денонощие, [h];

N – брой на дните за съответния месец.

На фиг. 6. е показано изменение на получените месечни стойности за коефициента на използване на фотоволтаичната система.




***Фиг. 6**. Изменение на получените месечни стойности за коефициента на използване (CUF) на фотоволтаичната система за 2022 г.*

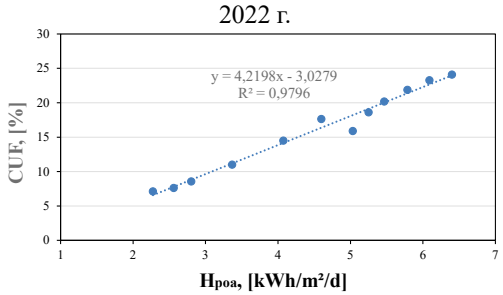
Най – високи стойности за коефициента на използване са получени за май и юли – 23,27% и 24,08%. За същите месеци са отчетени и най -високите сумарни месечни стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа. През януари и декември са получени най-ниските месечни стойности за коефициента на използване на фотоволтаичната система – 7,60% и 7,10%. За същите месеци са получени най – ниските сумарни месечни стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа.

***Таблица 2.** Сумарни месечни стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа и изчислени месечни стойности за CUF за 2022 г.*

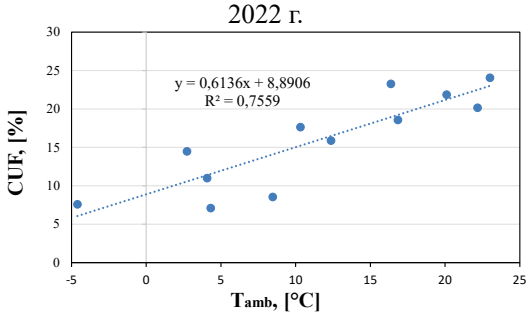
| Месец от 2022 г. | $E_{ac}$, [kWh] | CUF, [%] |
|---|---|---|
| януари | 559,91 | 7,60 |
| февруари | 731,76 | 11,00 |
| март | 1066,35 | 14,48 |
| април | 1257,32 | 17,64 |
| май | 1714,09 | 23,27 |
| юни | 1558,80 | 21,87 |
| юли | 1773,70 | 24,08 |
| август | 1485,49 | 20,17 |
| септември | 1325,19 | 18,59 |
| октомври | 1169,77 | 15,88 |
| ноември | 610,00 | 8,58 |
| декември | 522,75 | 7,10 |

В табл. 2. са дадени месечни стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа и получените месечни стойности за коефициента на използване на фотоволтаичната система (CUF) за 2022 г.

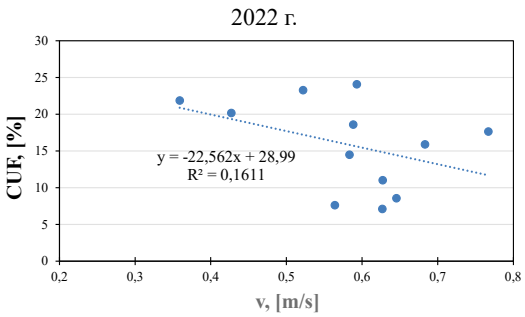
На фиг. 7, 8 и 9 са показани зависимостите на получените месечните стойности за коефициента на използване на фотоволтаичната система от средните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация, околната температура и скоростта на вятъра.




***Фиг. 7**. Зависимост между месечните стойности на коефициента на използване (CUF) на фотоволтаичната система и средните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за 2022 г.*




***Фиг. 8.** Зависимост между месечните стойности на коефициента на използване (CUF) на фотоволтаичната система и средните месечни стойности на околната температура за 2022 г*




***Фиг. 9.** Зависимост между месечните стойности на коефициента на използване (CUF) на фотоволтаичната система и средните месечни стойности на скоростта на вятъра за 2022 г*

В MS Excel е извършен регресионен анализ между коефициента на използване на фотоволтаичната система от енергията на слънчевата радиация, околната температура и скоростта на вятъра и са получени коефициентите на корелация.

Най – висока стойност за коефициента на корелация е получен за зависимостта на коефициента на използване от енергията на слънчевата радиация - $R^2$ = 0,9796. Това показва, че между тези две величини има силна зависимост. За зависимостта на коефициента на използване от околната температура е получена стойност за коефициента на корелация $R^2$ = 0,7559. Това показва, че влиянието на околната температура върху коефициента на използване на фотоволтаичната система е по – слабо спрямо слънчевата радиация. Получените две регресии са положителни. Ниска стойност за коефициента на корелация е получена за зависимостта между коефициента на използване и скоростта вятъра $R^2$ = 0,1611. Тази стойност показва, че влиянието на скоростта на вятъра върху коефициента на използване на фотоволтаичната система е много слабо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада са получени месечните стойности за коефициента на използване (CUF) на фотоволтаична система с модули от медно – индиев галиев селенид (CIGS) с обща инсталирана мощност 9,9 kWp за 2022 г. Най-високи стойности за коефициента на използване са получени за май и юли. За същите месеци са отчетени и най – високите стойности за енергията на слънчевата радиация. От направения регресионен анализ в MS Excel са получени коефициентите на корелация между коефициента на използване и енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули, околната температура и скоростта на вятъра. От получените коефициенти на корелация се установява, че най-голямо влияние върху коефициента на използване на фотоволтаичната система оказва енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули.

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Haffaf A., F. Lakdja, D.O.Abdeslam, R.Meziane, Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2,4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France. Energy for Sustainable Development 62, 2021, pp.44–55.

[2] Baghdadi I., A.E.Yaakoubi, K.Attari, Z. Leemrani, A.Asselman. Performance investigation of a PV system connected to the grid. 11th International Conference Interdisciplinarity Engineering, INTER – ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu-Mures, Romania, Procedia Manufacturing 22, 2018, pp. 667-684.

[3] Aslam A., N.Ahmed, S.A.Qureshi, M.Assadi, N.Ahmed. Advances in solar PV systems; A comprehensive review of PV performance, influencing factors and mitigation techniques. Energies 2022, 15, 7595. https://doi.org/10.3390/en15207595.

[4] Chaudrahari R.H., B.Chaudhari, P.D.Chavda, V.L.Aal. To study the temporal variation of capacity utilization factor of (CUF) of PV based solar power plant with respect to climate condition. Current World Environment, Vol. 11(2), 2016, pp.654-661

[5] Nallapaneni M.K., S.K.Yadav, S.S.Chopra, U.Bajpai, R.P.Cupta, S.Padmanabah, F.Blabjeerg. Operational performance of on -grid solar photovoltaic system integrated into pre-fabricated portable cabin buildings in warm and temperate climates. Energy for Sustainable Development 57, 2020, pp. 109–118.

[6] Premananda P., N.H.Umar, P.Cupta, B.Bora. Performance evolution of 100 kWp roof-top grid-connected PV system installed in Northern India. International Journal of

Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol. 8(3), September 2019, ISSN: 2277-3878.
[7] Agraval M., K.V.S. Rao. Harnessing Solar Energy From Wind Farm: Case Study of Four Wind Farm. Advances in Renewable Energy and Electric Vehicles, Lecture Notes in Electrical Engineering 767, 2022, pp. 209-222, https://doi.org/10.1007/978-981-16-1642-6_17

# ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ПОМПЕН АГРЕГАТ ЗА МИННАТА ПРОМИШЛЕНОСТ

**Димитрина Коева*, Валентин Георгиев**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, Габрово, България*

**Кореспондиращ автор: dkoeva@tugab.bg*

# ENERGY EFFICIENCY OF MINING PUMP UNITS

**Dimitrina Koeva*, Valentin Georgiev**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadgi Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: dkoeva@tugab.bg*

**Abstract**

*Centrifugal pumps, with their ability to efficiently handle large volumes of liquids and abrasive slurries, are widely used in the mining industry. They are particularly suitable for mine dewatering. With the right design, this type of pump can successfully handle fluids with abrasive solids and coarse sand. Often, pumping systems are sized for the maximum predicted flow, but may never be used, or may only be needed for short periods of the production cycle. Pumps operating below capacity are a source of hidden energy waste. As pumps wear or become clogged with various materials, their efficiency deteriorates. Oversizing is common and can result in significant energy losses and damage to plant components. By analyzing loading cycles, determining energy losses and the environmental footprint, it is possible to determine the so-called efficiency index. This paper investigates the energy efficiency index of two pump units driven by high voltage motors. Practical and technological solutions for energy and resource efficiency are proposed.*

**Keywords:** energy efficiency

## ВЪВЕДЕНИЕ

Енергийните разходи, свързани с работата на електродвигателите, представляват значителна част от общите енергийни разходи при експлоатацията на помпените системи. Използването на неефективни двигатели, работа извън условията на оптимално натоварване, както и възникването на механични или електрически проблеми със самия двигател също могат да доведат до загуба на енергия. Решаването на тези проблеми се счита за базово в стремежа за повишаване на енергийната ефективност. По тази причина подмяната на използваните до момента електродвигатели с такива, използващи честотни преобразуватели за регулиране на честотата на въртене, се налага като подход за намаляване на енергийните разходи на помпените агрегати. Често помпените системи се оразмеряват за максимално предвиждания дебит, който обаче може никога да не се използва или е нужен само за много кратки периоди от производствения цикъл. Помпените съоръжения, работещи под капацитета си, са причина за загуба на енергия. Основните начини за намаляване на енергийните разходи при помпените агрегати са: намаляване на мощността на помпената система и работа в режим, близък до оптималния; замяна на помпи, работещи неефективно; избор на по-ефективни двигатели и използването на честотно управление.

## ТЕХНИЧЕСКИ И НОРМАТИВНИ ИЗИСКВАНИЯ

В ЕС се използват около 8 милиарда електродвигателя, които консумират почти 50% от произведената в ЕС електроенергия. Електрическите двигатели представляват около 50% от световното потребление на електроенергия. Това е

главната причина да се насърчава въвеждането на ефективни електродвигатели и задвижвания като важен принос с намаляване на въглеродните емисии. Секторът е много хетерогенен, със значително разнообразие от технологии, приложения и размери, вариращи от малки двигатели, като тези, които задвижват вентилаторите за охлаждане в компютрите, до огромни двигатели в тежката промишленост. Регламент 640/2009 се прилага за трифазни асинхронни двигатели с мощност между 0,75 и 375 kW и захранващо напрежение до 1000 V. През 2020 г. близо 88 милиона са инсталираните двигатели, които консумират 903 TWh/год. електроенергия. Като се вземат предвид допълнителните разходи от 2,5 млрд. евро за въвеждане в експлоатация на двигатели с по-висока ефективност и за VSD, както и по-ниските с 13,5 млрд. евро разходи за електрическа енергия, нетните икономии от общите разходи на ЕС-27 за електродвигатели в обхвата на преразгледания регламент към 2030 г. се очаква да бъдат 11 млрд. евро. С Регламент 2019/1781 на Европейската Комисия обхватът по отношение на мощностите се разширява. Влючват се още 380 милиона двигателя, които през 2020 г. са консумирали 1326 TWh/г. електроенергия. Това е 56 % от крайното потребление на електроенергия в ЕС-27 през 2020 г. в размер на 2384 TWh, [2]. Регламент (ЕС) 2019/1781 дефинира изискванията за екопроектиране на електродвигатели и задвижвания с променлива честота на въртене в съответствие с Директива 2009/125/ЕО на Европейския парламент и на Съвета, за изменение на Регламент (ЕО) № 641/2009 по отношение на изискванията за екопроектиране на самостоятелни циркулационни помпи и циркулационни помпи, интегрирани в други съоръжения. [3], [4]. Регламентът дефинира изисквания за ефективността на задвижванията с променлива скорост. Задвижванията с променлива скорост имат две нива на ефективност (IE1 и IE2) и регламентът изисква всички задвижвания в обхвата да достигнат ниво IE2. Както към двигателите, така и към задвижванията се прилагат специфични изисквания, например ефективност при различни точки на натоварване по отношение на скоростта и въртящия момент. Това е полезно при оптимизиране на ефективността на целите системи.

Съгласно Директива 2012/C 394/06 хармонизираните стандарти в областта са: EN 60034-2-1:2007 Rotating electrical machines — Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), IEC 60034-2-1:2007 and EN 60034-30:2009 Rotating electrical machines — Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code) IEC 60034-30:2008.

## ФОРМУЛИРАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Установено е, че енергийните разходи при помпите могат да се редуцират от 20% до 50%. Разходите по време на целия експлоатационен живот на една помпа се определят на базата на реален товаров профил на помпения агрегат:

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d, \quad (1)$$

където: $C_{ic}$ – разходи по закупуването на помпата, (първоначалната инвестиция); $C_{in}$ - инсталационни разходи, свързани с пускане в експлоатация на помпата; $C_e$ - енергийни разходи за електрическа енергия по време на работата й; $C_o$ - други разходи, свързани с текущата работа на помпата; $C_m$ - разходи по поддръжката на помпата и ремонтните работи; $C_s$ – производствени загуби от спиране на помпата; $C_{env}$ - разходи, свързани с изпълнение на екологични изисквания; $C_d$ - разходи по демонтажа и изхвърлянето на помпата. Посоченият израз на разходите (1.1) е познат като Life Cycle Cost ($LCC$) и се отнася за всяка една помпа, независимо от вида и точното й приложение. Най-голям процентен цял от всички разходи, съпътстващи работата на една помпа - от момента на закупуването до демонтажа и изхвърлянето й, има $C_e$.

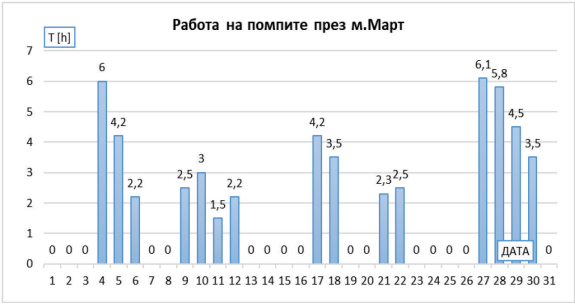
Веднага след разходите за електрическа енергия се нареждат първоначалната инвестиция и разходите по поддръжката й. За да бъде коректно пресмятането, в първоначалните разходи $C_{ic}$ следва да се включат цената на помпата, честотния преобразувател, табло за управление и необходими датчици. Разходите за поддръжка също са важни, независимо от факта, че по време на експлоатационния си живот обикновено една помпа се обслужва сервизно средно два пъти (смяна на уплътнения и/или лагери). Поддръжката на една помпа е функция на използваната преносна среда, спецификите на приложението, конструкцията на помпата и др. Към разходите по поддръжката е коректно да се включат и средствата, необходими за периодична профилактика на машината и евентуално последващата й повторна настройка.

Анализът на работа на една помпа има за цел да понижи в границите на технически възможното стойността на параметъра $C_e$, т.е. сумата, която се заплаща за електрическа енергия по време на целия експлоатационен цикъл на една помпа. За да се определят възможностите за енергийни спестявания, е необходимо да се построи реалният профил на товара на помпата, който показва какво е действителното натоварване на помпения агрегат. Най-целесъобразно е текущото натоварване на помпата да се наблюдава за дълъг период от време. По този начин полученият товаров график ще бъде най-пълен и коректен.

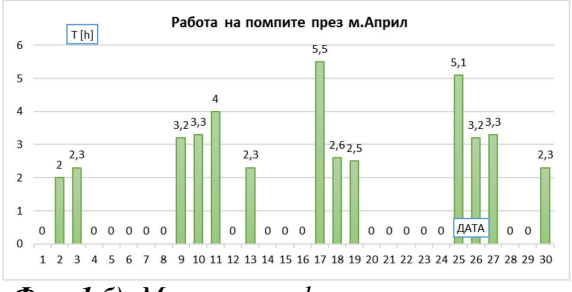
## РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на анализ е работата на помпени агрегати, използвани при разработването и експлоатацията на находища по открит начин. Освен основните разкривни и добивни участъци, се изграждат водоотливни съоръжения, спомагащи за нормалната работа на машини и съоръжения.

В разглеждания случай на водосборен пункт, изграден на първи разкривен хоризонт са монтирани три броя центробежни помпи тип 300Д70 с технически характеристики: $n$=1450$min^{-1}$; Q=300l/s; H=64m; η=85%; NPSH=6,4 m; P=315 kW. Всяка помпа се задвижва от трифазен електродвигател тип АО355Y-4М с технически данни: $P_н = 315\ kW$ – номинална мощност на вала на двигателя; $U_н = 6000\ V$ – номинално захранващо напрежение; $I_н = 38\ A$ – номинален ток; $n$=1450 $min^{-1}$ – номинална честота на въртене; $\cos\varphi$=0,87 – фактор на мощността. Електрозахранването е осъществено от кабелна линия, изпълнена с кабел TSCGEWOU 6/10 kV 3x70+35$mm^2$. Управлението за пускане и спиране на всяка една помпа се извършва чрез Малогабаритна Модулна Комплектна Разпределителна Уредба (ММКРУ) 6 kV. ММКРУ разполага с три модула - вход 6 kV, изход 6 kV, модул защита и управление на електродвигател. Работата на помпите от водосборен пункт за месеците март и месец април 2024 г. може да се проследи в графиките на фиг. 1 а) и 1 б).



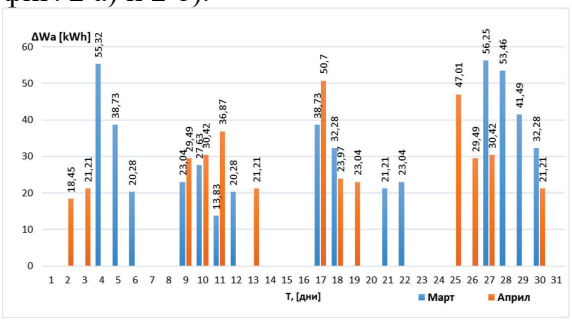

***Фиг. 1 а).*** *Месечен профил на натоварването и работните часове на помпите за месец Март, 2024.*



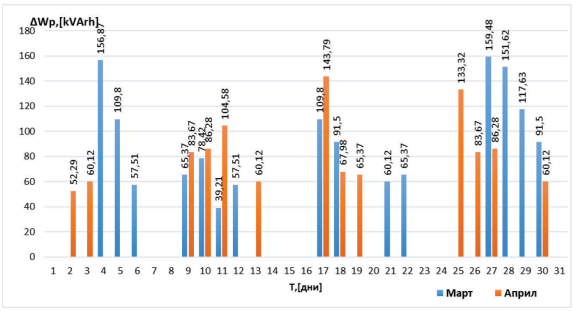

***Фиг. 1 б).*** *Месечен профил на натоварването и работните часове на помпите за месец Април, 2024.*

Характерна е работа с различен интервал на време и продължителност, ко-

ето се дължи на непостоянния приток на вода във водосборника. С оглед правилна оценка на възможностите за енергийни спестявания, аналитично определяме загубите на активна и реактивна енергия, според отработените от помпените агрегати часове. Загубите са представени на фиг. 2 а) и 2 б).




***Фиг. 2 а).*** *Загуби на активна енергия за помпите за месеците Март и Април, 2024.*

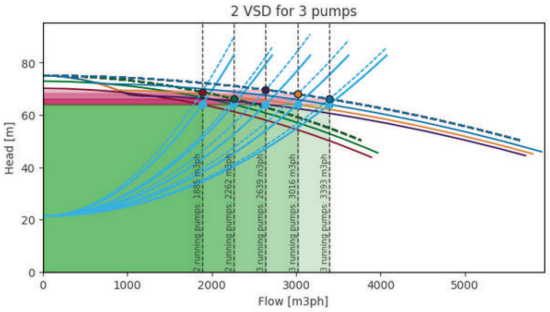



***Фиг. 2 б).*** *Загуби на реактивна енергия за помпите за месеците Март и Април, 2024.*

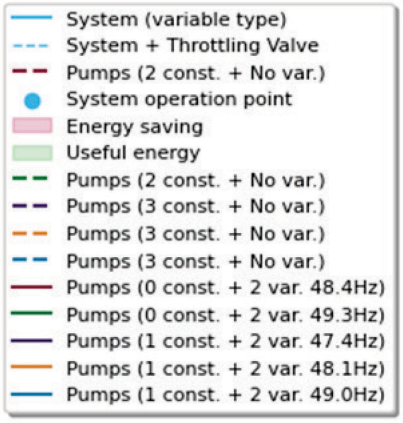
От данните и направените изчисления, се потвърждава непостоянния характер с различна продължителност на интервалите на работа на помпените агрегати, т.е. с различна продължителност на включване. Следователно консумираната електрическа енергия и енергийните загуби за различните месеци също са различни.

Според получените резултати, енергийните разходи биха могли да се намалят с поддръжката на оптималната работа на помпените агрегати, с по-рядкото пускане, но за по-продължително време, а също така и с въвеждане на честотни регулатори. С тези действия ще бъде подобрен пусковия процес на двигателите и честотата на въртене на двигателите ще бъде съобразно необходимия дебит.

Възможните енергийни спестявания и техния екологичен отпечатък проверяваме чрез софтуерен продукт, [5] при въведени действителни работни параметри: номинален напор 64m, максимален напор 75m, номинален дебит 1257m³/h, номинална скорост 1489 $min^{-1}$, номинална мощност на агрегата 251.72kW. Определя се натоварването на отделните двигатели при въвеждане на честотно управление, фиг. 3 и фиг. 4. Определят се спестените въглеродни емисии и енергийни спестявания.




***Фиг. 3*** *Натоварване на отделните двигатели при честотоно управление.*




***Фиг. 4.*** *Цветен код към фиг. 3.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общите енергийни разходи при задвижвания с променлива скорост се редуцират с 4%, извършените инвестиции имат 7.1 години срок на изплащане, реализирани са 30 t спестени въглеродни емисии за 1 година (569 g $CO_2$ eq/kWh). Извършени са проверки за възможни претоварвания при превишена скорост и превишено време на пускане.

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по проект към Тех-*

*нически университет - Габрово 2404С "Приложни математически изследвания за енергийна и икономическа ефективност на електрообзавеждането в условията на енергиен преход".*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] https://www.motioncontroltips.com/what-are-current-and-future-meps-for-electric-motors/

[2] Eurostat Energy Balance, April 2023, https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/electric-motors_en

[3] Document 32019R1781, OJ L 272, 25.10.2019, p. 74–94, http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj

[4] Document 32009R0640, OJ L 191, 23.7.2009, p. 26–34, http://data.europa.eu/eli/reg/2009/640/oj

[5] Schneider Electric software for motor control solutions for processes, machines and buildings, https://ecostruxure-motor-management.se.app/design

# ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ФЛОТАЦИОННИ СЪОРЪЖЕНИЯ

**Николай Лаков**

*Минно геоложки университет „Св. Ив. Рилски, София*

*e-mail: nlakov@mgu.bg*

# ELECTRICITY EFFICIENCY OF FLOTATION FACILITIES

**Nikolay Lakov**

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia;*

*E-mail: nlakov@mgu.bg*

**Abstract**

*The specific features of the technological process flotation and the method of supplying electricity to flotation cells, pumps, compressors and blowers makes it virtually impossible to determine selectively specific energy consumption. A problem is also created by intermediate pulp circulations. The article provides research related to determination of the load on the electric drives involved in the flotation process is related to the produced products.*

**Keywords:** electricity efficiency; specific energy consumption, flotation facilities.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Оценката на енергийната ефективност и специфичния разход на електроенергия често се извършва по частични показатели, или по отделни процеси. Не се отчитат периодите на неработни часове (между работните смени при едно или двусменен режим на работа, през почивните и празнични дни) [1].

Анализирането на потреблението на електрическа енергия в индустриалните обекти позволява да се преценят степента на ефективността на използваните технологии. Тази информация дава възможност за прогнозиране развитието на производството и планирането му така, че да се повишат качеството и конкурентоспособността на продукцията [2, 4].

Отделните агрегати и промишлени предприятия и цехове за потребители с практически постоянен товаров график имат сравнително устойчиви специфични разходи на електрическа енергия, тъй като обикновено произвежданата продукция за единица време е почти постоянна [3, 5, 6].

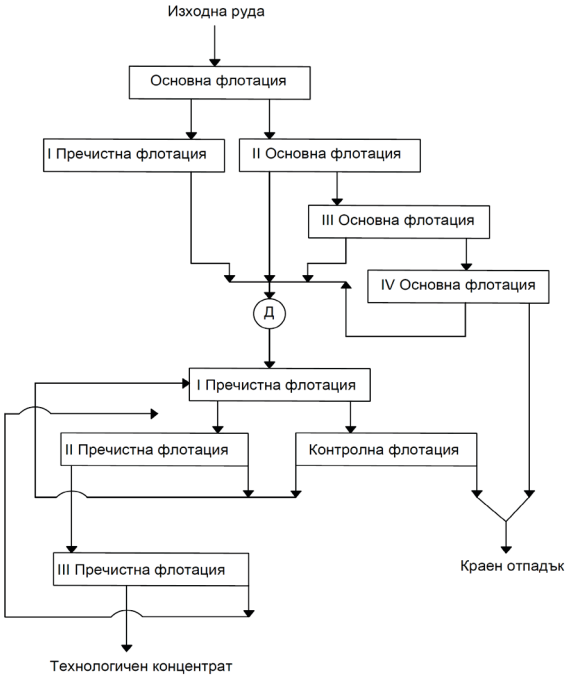
В практиката се използват различни методи за повишаване на енергийната ефективност на задвижванията. В [7] е представено векторно управление на електрозадвижване с оптимална стойност на тока на намагнитване на асинхронен двигател за постигане на максимална ефективност.

От правилния избор на натоварването по руда зависи производителността на процеса на флотация и следователно специфичния разход на електроенергия. При оптимално натоварване може да се допусне повишение на циркулационния товар, снижавайки специфичния разход на електроенергия и подобрявайки технологичните показатели [8].

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Схемата на флотация е класическа за обогатяването на медни руди с ниско съдържание на ценния компонент.

Реализираната схема е открито цикълова, с досмилане на грубия колективен концентрат от първа основна флотация и последователно пречистване в три или четири пречистни операции. Първа пречистна флотация има контролна функция, от която излиза краен отпадък. Линейната схема е показана на фигура 1.




***Фиг. 1**. Линейна схема на флотация*

## 1. Задвижване на флотационните машини

Проведените измервания са свързани с определяне на натоварването на електрическите задвижвания, участващи във флотационния процес. Проведени са измервания на натоварването на консуматорите на електроенергия на флотационен цех на голямо минно предприятие. Обектът на изследването се характеризира с непрекъснат работен процес. Обогатяването се извършва във флотационни клетки, чиито обеми са различни. Те показаха, че двигателите за флотационните клетки са добре (нормално) натоварени. Коефициентът на натоварване варира в границите на 0,76-0,92, като в някои начални клетки, натоварването достига до 97%, а в първата клетка 301 на основна флотация е отчетено дори претоварване (Кн=1.07). Данните от експериментално определените коефициенти на натоварване са дадени на таблица 1, където са въведени и данните от изчисленията.

*Таблица 1*

| Флотационен процес предназначение | № на машините | Обем на клетката $m^3$ | Мощност на двига-теля kW | Коеф. на натовар- | Специфична мощност, kW / $m^3$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | За Рн | За Рраб |
| Основна флотация | 201 | 160 | 200 | 0,82 | 1,25 | 1,025 |
| | 202 | 160 | 200 | 0,78 | 1,25 | 0,975 |
| | 203 | 160 | 200 | 0,83 | 1,25 | 1,037 |
| | 204 | 160 | 200 | 0,78 | 1,25 | 0,975 |
| | 205 | 160 | 200 | 0,80 | 1,25 | 1,000 |
| | 206 | 160 | 200 | 0,76 | 1,25 | 0,950 |
| Средни показатели | **-** | **160** | **200** | **0,795** | **1,25** | **0,993** |
| Колективна флотация | 001 | 40 | 55 | 0,96 | 1,375 | 1,320 |
| | 002 | 40 | 55 | 0,84 | 1,375 | 1,155 |
| | 003 | 40 | 55 | 0,95 | 1,375 | 1,306 |
| | 004 | 40 | 55 | 0,76 | 1,375 | 1,045 |
| | 005 | 40 | 55 | 0,76 | 1,375 | 1,045 |
| | 006 | 40 | 55 | 0,69 | 1,375 | 0,949 |
| | 007 | 40 | 55 | 0,72 | 1,375 | 0,990 |
| | 008 | 40 | 55 | 0,79 | 1,375 | 1,086 |
| Средни показатели | **-** | **40** | **55** | **0,809** | **1,375** | **1,112** |
| Колективна контролна флотация | 009 | 40 | 55 | 0,88 | 1,375 | 1,210 |
| | 010 | 40 | 55 | 0,86 | 1,375 | 1,182 |
| | 011 | 40 | 55 | 0,77 | 1,375 | 1,059 |
| | 012 | 40 | 55 | 0,80 | 1,375 | 1,100 |
| | 013 | 40 | 55 | 0,81 | 1,375 | 1,114 |
| | 014 | 40 | 55 | 0,83 | 1,375 | 1,141 |
| | 015 | 40 | 55 | 0,86 | 1,375 | 1,182 |
| | 016 | 40 | 55 | 0,84 | 1,375 | 1,155 |
| | 017 | 40 | 55 | - | 1,375 | - |
| | 018 | 40 | 55 | - | 1,375 | - |
| Средни показатели | **-** | **40** | **55** | **0,831** | **1,375** | **1,143** |
| Основна медна флотация | 301 | 40 | 55 | 1,07 | 1,375 | 1,471 |
| | 302 | 40 | 55 | 0,92 | 1,375 | 1,265 |
| | 401 | 40 | 55 | 091 | 1,375 | 1,251 |
| | 402 | 40 | 55 | 0,97 | 1,375 | 1,334 |
| | 403 | 40 | 55 | 0,84 | 1,375 | 1,155 |
| | 404 | 40 | 55 | 0,84 | 1,375 | 1,155 |
| Средни показатели | **-** | **40** | **55** | **0,925** | **1,375** | **1,272** |
| Контролна медна флотация | 501 | 40 | 55 | 0,89 | 1,375 | 1,224 |
| | 502 | 40 | 55 | 0,86 | 1,375 | 1,182 |
| | 503 | 40 | 55 | 0,89 | 1,375 | 1,224 |
| | 504 | 40 | 55 | 0,83 | 1,375 | 1,141 |
| | 601 | 40 | 55 | 0,80 | 1,375 | 1,100 |
| | 602 | 40 | 55 | 0,92 | 1,375 | 1,265 |
| Средни показатели | **-** | **40** | **55** | **0,865** | **1,375** | **1,189** |

Специфичните мощности на задвижването, отнесени към номиналните обе-

ми на флотационните клетки, са дадени в таблица 2.

*Таблица 2*

| Зона, ред | Обем на клетката $m^3$ | Мощност на двигателя kW | Специфична мощност, $kW/m^3$ |
|---|---|---|---|
| Основна флотация | 160 | 200 | 1.25 |
| Колективна флотация, основна и контролна медна флотация | 40 | 55 | 1.375 |
| Първа и втора пречистна флотация | 14 | 30 | 2.143 |
| Трета пречистна флотация | 14 | 22 | 1.571 |

От таблицата се вижда, че с повишаване на обема на флотационните клетки, се намалява енергийния показател $kW/m^3$, т.е. обработката на пулпа се извършва по-ефективно, с по-малък специфичен разход на електроенергия kWh/t.

Това заключение се подкрепя и от обстоятелството, че във всички измерени клетки, коефициентите на натоварване на двигателите (таблица 1) са в диапазон почти еднакъв, независимо от техния обем – от 14 до 160$м^3$.

Специфичният разход на енергия, характеризиращ работата на флотационните клетки, се оказа практически невъзможно да бъде определен поради сложния режим на работа от една страна, а от друга от невъзможността да се измери постъпващия пулп в основната и най-вече в колективните основна и контролна медна флотация.

По тази причина, специфичният разход на електроенергия се отнася, както и в другите процеси, към постъпилата за обогатяване руда, като разходът на електроенергия само за флотационните клетки е определен на базата на данните от таблица 1, резултат от измервания с продължителност един месец. Постъпилата за преработка руда в ОФ за същия месец е 963 000t. Резултатите от изчисленията за специфичния разход на електроенергия за флотационните клетки са дадени на таблица 3, като е прието 24 часова непрекъсната работа на флотационните машини.

Таблица 3

| Стадии на флотация | Измерена мощност, kW | Консумирана енергия за месеца, kWh | Спец. разход на ел. енергия за флот. клетки |
|---|---|---|---|
| Основна флотация | 954 | 641 088 | 0,685 |
| Колективна флотация | 356 | 239 131 | 0,259 |
| Колективна контролна флотация | 366 | 245 952 | 0,263 |
| Основна медна флотация | 305 | 205 128 | 0,219 |
| Контролна медна флотация | 285 | 191 822 | 0,205 |
| Общо | 2 266 | 1522 752 | 1,627 |

Измерено е натоварването на помпите към флотацията, което заедно с мощността им, са посочени на таблица 4.

Таблица 4

| Помпи | Ном. мощност kW | Изм. мощност kW | Работни часове в ден-ето | Коеф. на н-не |
|---|---|---|---|---|
| Помпа мет. зумпф | 315 | 140 | 24 | 0,44 |
| Помпа отпадък | 250 | 170 | 24 | 0,68 |
| Помпа отпадък | 250 | 130 | 24 | 0,62 |

Общата мощност на помпите е 440kW, а месечния разход на енергия е 295680kWh. Специфичният разход само за помпите, отнесен към продукта за обогатяване (963000t) е 0,316 kWh/t.

## 2. Задвижвания на въздуходувки и турбокомпресори

Измерените натоварвания същия месец са систематизирани в таблица 5, на базата на което е изчислен и специфичният разход на електрическа енергия за въздух.

Таблица 5

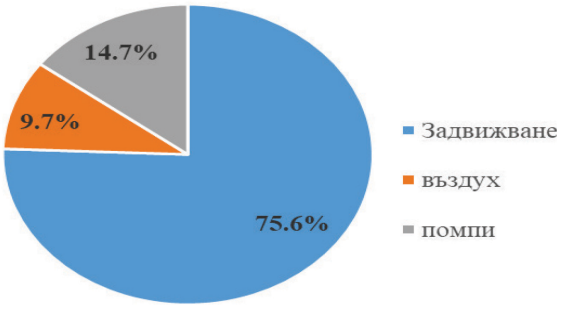
| Помпи | Ном. мощност kW | Изм. мощност kW | Коеф. на н-не |
|---|---|---|---|
| Въздуходувки | 500 | 195 | 0,39 |
| Турбокомпресори | 200 | 95 | 0,48 |

В процеса флотация, отнесен към постъпилата за обогатяване руда (963000t). той е 0,208 kWh/t.

Така общия специфичен разход на електроенергия за флотационния процес е:

$$W_{фл.} = W_{фм} + W_{п.} + W_{в.} = \\ = 1,627 + 0,316 + 0,308 = 2,151 kWh/t \quad (1)$$

Относителното участие на трите компоненти е показано на фигура 2 е съответно: 75,6%; 14,7%; 9,7% за флотационните машини, помпи и въздуха.




***Фиг. 2**. Относително разпределение на електрическите товари при флотация*

### 3. Задвижвания на сгъстители и филтри.

Основните потребители на електроенергия са: вакуум-помпите (6кV, 315kW), въздуходувките (380V, 18,5 kW), филтрите задвижвани от двигатели (380V - 15 kW), помпите за сгъстители (380V, 37 kW) и дренажните помпи (380V, 37 kW). Двигателите са сравнително добре натоварени – от 60% до 78% (таблица 6) по данни от проведените измервания.

Таблица 6

| Машина | Мощ-ност, kW | Изм. мощност, kW | $К_н$ |
|---|---|---|---|
| Вакуум помпа | 315 | 189 | 0,60 |
| Въздуходувка | 18,5 | 14,5 | 0,78 |
| Въздуходувка | 18,5 | 14,2 | 0,77 |
| Помпа сгъстители | 37,0 | 22,5 | 0,61 |
| Помпа сгъстители | 37,0 | 28,5 | 0,77 |
| Филтри | 15,0 | - | - |
| Помпа сливни води | 800 | 760 | 0,95 |

Нормално в работа са: вакуум помпа – 1бр.; филтър 1 бр.; въздуходувки – 2бр.; помпи на сгъстителите и 1 дренажна помпа. Работният цикъл е 24 часа. В режим 12 часа работи помпата за сливни води.

Специфичният разход на електроенергия, изчислен на базата преработена руда средно за 1 час, за процесите сгъстяване и филтрация е и представлява 1,75% от специфичният разход за обогатителната фабрика.

$$W_{с.ф.} = \frac{\sum Pcp_i}{Qcp_i} = \frac{667.8}{14805} = 0.314 kWh/t \quad (2)$$

където:

$P_{ср}$ – средната активна мощност за сгъстяване и флотация;

$Q_{ср}$ – средната реактивна мощност за сгъстяване и флотация.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всяко минодобивно предприятие има свои специфични особености. Те започват от характеристиките на рудата и вместващите скали, технологичните особености и използваната техника, достъпност на източниците за промишлено водоснабдяване, включително за оборотна вода и т.н.

Специфичният разход на електрическа енергия за основните обогатителни процеси смилане, флотация, сгъстяване

и филтрация са почти еднакви с тези на друго минодобивно предприятие [9].

Има основание да се приеме възможността за по-нататъшно намаляване на специфичния разход на електрическа енергия чрез:

• По-добро натоварване на машините и съоръженията, при което относителния дял на постоянните загуби намаляват;

• Ограничаване времето на работа на празен ход;

• Промяна в технологичните условия довели до изключване или намаляване на електрически мощности, както и с преразпределението им.

Тези обстоятелства може да възникнат както поотделно, така и едновременно.

Това са и посоките, в които трябва да се действа и в организационно и в технологично отношение. Това би довело до намаляване на средно-месечните и средногодишните специфични разходи на електроенергия и приближаването към минималните им стойности.

Средномесечните минимални стойности на специфичния разход на електроенергия са показател, който трябва да се постави в основата при нормиране на разхода на електрическа енергия. Това е предпоставка за създаване на научно обосновани прогресивни норми за специфичен разход на електрическа енергия, изпълнението на които да обедини усилията на специалисти и изпълнителски кадри.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] Martev Kr., M. Novakov, Izledvane na spetsifichniya razkhod na elektroenergiyata na proizvodstveno predpriyatie, Nauchni trudove na Rusenskiya Universitet - 2014, tom 53, seriya 3.1, str. 47-52.

[2] Koev K., A. Krasteva, M. Dacheva, I. Grigorov, Izsledvane energopotreblenieto v industrialni obekti, Nauchni trudove na Rusenskiya Universitet - 2008, tom 47, seriya 9

[3] Tsankov Pl., Elektrosnabdyavane, UI „Vasil Aprilov“, Gabrovo, 2014

[4] Prodanov I., Trichkov K., Zabchev A., Aleksandrov R., “Praktiki za vnedryavane na energospestyavashti tekhnologii v minnodobivnata promishlenost”. Spisanie “Minno delo i geologiya” br.1-2/2014, str. 53 - 56.

[5] Zabchev A. Aleksandrov R., Prodanov I., “Analiz na energiinata efektivnost pri preustroistvo na elektrozadvizhvaneto na podemna mashina”. Sbornik s dokladi Natsionalna nauchno-tekhnicheska konferentsiya s mezhdunarodno uchastie “Avtomatizatsiya v minnata industriya i metalurgiyata”, BULKAMK’14, Sofiya, 2014, str. 122 - 127.

[6] Tsvetkov K., Zh. Iliev, Y. Dimitrov, N. Perenovski "Moshtnost na dvigatelya i sili na troshene pri chelyustni troshachki s direktno zadvizhvane na podvizhnata chelyust" str. III-78 - III-81 Unitech 2013 - International Scientific Conference 22-23 November 2013 Gabrovo.

[7] Rachev S, G Ivanova, Achievement of maximum energy efficiency through vector control of induction motor electric drive, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1032, International Scientific Conference of Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES 2020) 26th-29th November 2020, Borovets, Bulgaria

[8] Chetyov St., K. Dzhustrov, Ore load influence on ball mills specific electricity consumption, Journal of mining and geological sciences, volume 63, 2020, p. 138-141

[9] Dzhustrov, K. Influence of the ball load on the specific power consumption of ball mills, Journal of mining and geological sciences, Vol. 62, Part III, Mechanization, electrification and automation in mines, 2019, p. 77-81.

# ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗИ ЗА БАЛАНСИРАЩИЯ ПАЗАР В БЪЛГАРИЯ ПРИ УСЛОВИЯТА НА ЕНЕРГИЕН ПРЕХОД

**Димитрина Коева[1*], Ралена Куткарска[2]**

*[1]Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България, e-mail: dkoeva@tugab.bg*
*[2]Община Сливен, бул. “Цар Освободител“ № 1, Сливен, България, e-mail: ralena.dimitrova@gmail.com*
** dkoeva@tugab.bg*

# TRENDS AND FORECASTS FOR BULGARIA'S ENERGY TRANSITION BALANCING MARKET

**Dimitrina Koeva[1*], Ralena Kutkarska[2]**

*[1]Technical University of Gabrovo, 4 Hadgi Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria;*
*[2]Municipality of Sliven, 1 Tsar Osvoboditel Blvd, 8800 Sliven, Bulgaria;*
*[3]Institution, Address, Town, Country;*
** dkoeva@tugab.bg*

**Abstract**

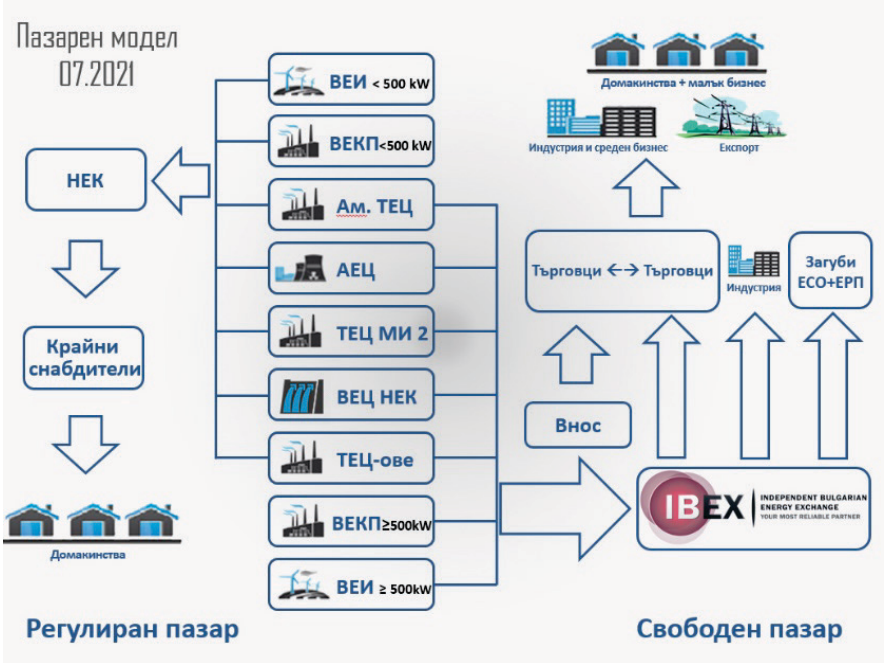
*This study aims to conduct an analysis of the dynamics of the balancing market in the context of the upcoming energy transition. By empirically examining historical data on gross and net electricity production, imports, exports, net domestic consumption and losses in the power system, key trends are identified and reliable forecasts of future market developments are built. The study demonstrates that the energy transition, characterized by an increasing share of renewable energy sources and decentralization of energy production, has a significant impact on the functioning of the balancing market. The volatility of renewable generation, when considered alongside changing consumption patterns, increases the necessity for balancing services and creates new challenges for electricity system operators. By applying various forecasting methods, the potential implications of these trends for the future of the balancing market are assessed. The study underscores the necessity for sustained efforts to adapt the regulatory framework and market mechanisms to the evolving conditions of the energy transition. The results of this study can be useful for the development of policies aimed at ensuring the security, reliability and resilience of electricity systems in the future.*

**Keywords:** forecast, balancing market, energy transition.

## НЯКОИ АСПЕКТИ ПРИ АНАЛИЗА НА ПАЗАРА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В БЪЛГАРИЯ

Пазарът на електроенергия в Република България е в процес на поетапна либерализация, стартирала още през 2004 г. и продължаваща и до днес. Той се състои от два сегмента – сегмент с регулирани цени и сегмент със свободно договорени цени или т. нар. свободен пазар. На регулирания сегмент цените на електроенергията се утвърждават от Комисията за енергийно и водно регулиране (КЕВР), а потребителите се обслужват от крайните снабдители (дъщерни дружества на електроразпределителните компании) разпределени на териториален принцип. Към момента този сегмент включва само битовите потребители (домакинствата). От 1-ви юли 2021 всички стопански потребители излязоха на свободен пазар. По този начин на регулирания пазар останаха само битовите потребители.

На свободния сегмент клиентите могат да сменят своя доставчик на електроенергия без географското им местоположение да влияе на това. Потребителите продължават да заплащат цени за пренос и достъп до мрежата, към която са присъединени (преносна или разпределителна). На свободния пазар КЕВР не определя цената на електроенергията. Комисията има единствено роля на регулатор, който осъществява контрол над пазарните участници. Тя има правомощията да определя Правилата за търговия с електрическа енергия (ПТЕЕ), размера на мрежовите такси и цена „Задължения към обществото“. Енергията за свободен пазар се закупува от търговците, крайните индустриални потребители и мрежовите оператори по свободно договорени цени и/или от платформите на Българска независима енергийна борса (БНЕБ). От 2018 г. влязоха в сила измененията в Закона за енергетиката, задължаващи производителите с инсталирана мощност над 5 MW предлагащи електроенергия на свободен пазар да продават единствено през платформите на БНЕБ. В последствие (с измененията в ЗЕ от 08.05.2018 г.) да продават един-ствено през борсата на свободен пазар бяха задължение и производителите от Високоефективно комбинирано производство (ВЕКП) и от Възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) с инсталирана мощност равна и над 4MW. С по-следните изменения в Закона за енергетиката, всички производители от ВЕИ и ВЕКП с инсталирана мощност по-голяма или равна на 500kW трябва задължително да предлагат електроенергията си на борсата. Тези промени, както и задължението от 01.07.2021 всички стопански потребители да са част от свободния пазар, съществено измениха пазарния модел (Фиг.1).




***Фиг. 1*** *Модел на функциониране на пазара на електроенергия в България от 01.07.2021г.*

В съответствие с процеса на либерализация, вътрешният електроенергиен пазар бе изграден върху модела на двустранни договори и балансиращ пазар. Потребителите сключват договори с търговците за доставка на количества електроенергия, а от своя страна търговците закупуват необходимата електроенергия

за нуждите на своите клиенти от производителите. На дневна база производители, търговци и координатори на балансиращи групи (основно търговци) известяват на Електроенергийния системен оператор (ЕСО) дневните почасови графици за производство и консумация за следващия ден. Когато се появи несъответствие между заявените количества енергия и фактическото потребление или производство, ЕСО като оператор на балансиращия пазар покрива небалансите – разликите между предварително заявените и реално използваните /произведени количества. Произхождащите от това разходи се начисляват на съответните пазарни участници под формата на цени за балансираща енергия.

Дълго време основни участници на свободния пазар бяха големите държавни производители – АЕЦ „Козлодуй“, ТЕЦ „Марица Изток 2“, НЕК ЕАД, големи индустриални енергийни консуматори и търговци на електроенергия. През 2013 година започна активно преминаването на клиенти, присъединени към мрежа средно напрежение (6 – 20 kV) от регулирания на свободния пазарен сегмент. От 1 август 2013 г. клиентите, които не са избрали свой доставчик на електроенергия на свободен пазар са снабдявани от служебен доставчик на географски принцип, т.нар. доставчик от последна инстанция (ДПИ). В началото на 2016 г. стартира Българска независима енергийна борса в резултат от ангажимент поет от Български енергиен холдинг (БЕХ) по дело АТ.39767 на Европейската Комисия. През същата година благодарение на приета от КЕВР „Инструкция за реда и условията за смяна на доставчик на електрическа енергия за клиенти притежаващи обекти, за които се прилагат Стандартизирани товарови профили (СТП)“, се даде възможност на битовите и стопански потребители, които нямат електромери с почасово измерване, да излязат на свободен пазар. Друга съществена промяна на пазара се случи през 2018 година, като в следствие от редица промени в нормативните актове се увели ролята на борсата. Това доведе до централизация на свободния пазар при предлагането и принуди търговци и потребители да закупуват основна част от необходимата им електроенергия от борсата. Излизането на свободния пазар не носи рискове от допълнителни такси или сигурност на снабдяването. Както и до сега съответното електроразпределително дружество ще продължи да отговаря за поддръжката на инфраструктурата и качеството на електрическата енергия, независимо от това кой е избраният доставчик на свободен пазар. От 1 юли 2021 г. клиентите, които не са избрали свой доставчик на електроенергия, са снабдявани от служебен доставчик на географски принцип, т.нар. доставчик от последна инстанция (ДПИ).

## ТЕХНИЧЕСКИ И ИКОНОМИЧЕСКИ СЪОБРАЖЕНИЯ ПРИ ЕНЕРГИЕН ПРЕХОД

В условия на либерализиран (свободен) пазар и енергиен преход, цените се определят от пазара – от търсенето и предлагането. Има фактори, които оказват влияние върху цените, но не можем да говорим за модел на ценообразуване, какъвто е случаят с регулирания пазар. Различните фактори, както и комбинации от тях могат да имат различни ефекти върху пазара. Едни от най-съществените условия, които повлияват българския пазар са свързани с цените на електроенергията на регионалния пазар (Гърция, Румъния, Унгария). Той от своя страна се влияе от нивата на пазарите в Западна Европа. По този начин ценовите нива постигнати на развитите пазари в Западна Европа, оказват влияние и на цените на електроенергията на свободния пазар в България. Фактори пряко отговорни за промяната в цените на електроенергията на световните пазари, които са валидни и за България, са: промени в търсенето и предлагането, промени в цените на основните енергийни ресурси

(нефт, газ, въглища и др.), цени на въглеродни емисии, метеорологични условия, планирани (ремонти) и извънредни събития (аварии, забрани за внос/износ, фалити), политики в сферата на енергетиката и други.

На пазара с регулирани цени централна роля играе обществения доставчик Националната Електрическа Компания (НЕК), който има задължение да поддържа доставките при определените от КЕВР условия, включително балансирайки потреблението и производството. КЕВР определя квотите за производство и цените на производителите към обществения доставчик, както и цените на обществения доставчик към крайните снабдители.

Преносът на електрическа енергия в България се извършва от държавното предприятие Електроенергиен Системен Оператор (ЕСО). Електропреносната мрежа е съставена от три свързани една с друга системи на различни напрежения – 110 kV, 220 kV и 400 kV. Към 2022 година ЕСО оперира далекопроводи на високо напрежение с обща дължина 15 384 km (65% с напрежение 110 kV, 18% на 220 kV и 17% на 400 kV), включително между системните връзки към съседни страни, както и 297 подстанции (включително 261 преходни към средно напрежение). Освен това в страната има няколко десетки подстанции на други оператори, главно на предприятия за производство или разпределение на електроенергия и някои големи консуматори, свързани пряко към мрежата на високо напрежение.

Важна роля на пазара играе и самият ЕСО, който осигурява връзката между регулирания и либерализирания сектори. Той администрира пазара на едро и балансира производството и потреблението, включително при отклонения в прогнозните графици на свободния пазар.

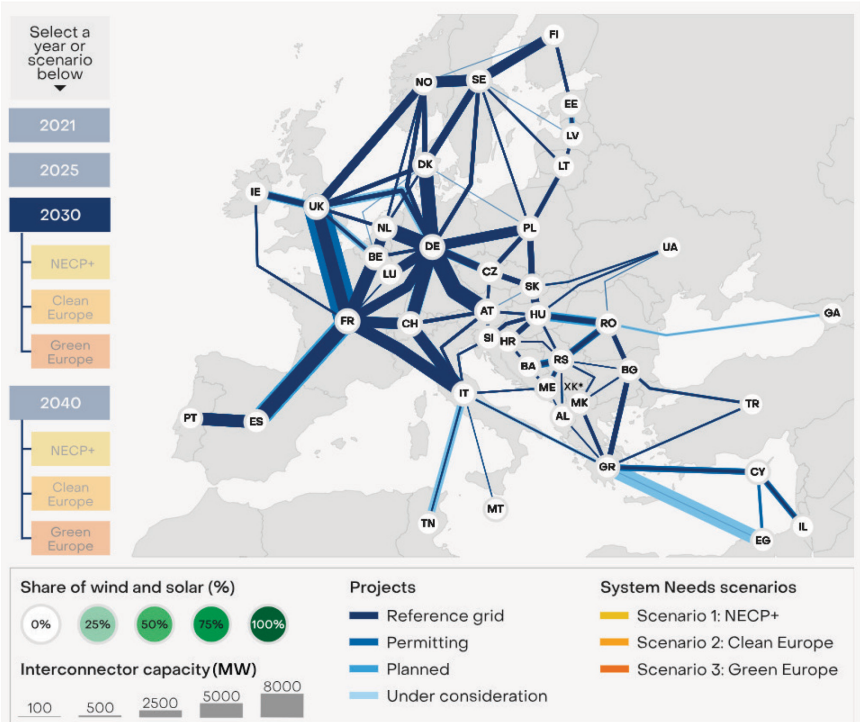
Битовите потребители имат избор на кой пазар да участват – свободен или регулиран. Основната промяна при излизането на свободен пазар е възможността на клиента да избира своя доставчик (търговец). Той от своя страна отговаря за доставките на електроенергия и може да предоставя допълнителни услуги като избор на тарифи, различни срокове и начини на разплащане, балансиращи услуги, енергийни консултации, анализ, прогнозиране и други. Според [1, 2, 3] за условията на енергиен преход България няма действаща утвърдена стратегия за развитие на енергийния сектор, следователно не е изпълнен чл.2 (1) от Закона за енергетиката, а именно създаване на предпоставки за:

- Качествено и сигурно задоволяване на потребностите на обществото от електрическа и топлинна енергия и природен газ.
- Енергийно развитие и енергийна сигурност на страната при ефективно използване на енергията.
- Създаване и развитие на конкурентен и финансово стабилен енергиен пазар.
- Енергийни доставки при минимални разходи.

Голяма част от възобновяемите енергийните структури не са държавна собственост. Самата електроенергийна система има нужда от сериозно реновиране, заради постоянно повишаващите са ВЕИ източници, присъединявани към нея. След като управлението на огромни потоци възобновяема енергия се оказва проблем, а държавното предприятие ЕСО продължава да изпълнява договори за енергийни доставки против ползите на държавата по смисъла на неизгодни договори, остават изключително актуални въпросите: Какъв е енергийният баланс на страната и възможно ли е да се реализират ползи за ВЕИ производители в условията на енергиен преход?

Статията е част от по-мащабно изследване на динамиката на енергийния пазар у нас, прогнозен анализ на брутно и нетно потребление с оглед оценка на

загубите в пренос и разпределение, както и анализ на енергийния обмен на страната според изискванията, заложени в ENTSO-E. България като част от трансевропейски енергиен пръстен участва в обмен на електрическа енергия с регламентирани показатели за качество. В срок до 2030 европейската трансгранична електропреносна мрежа ще съдържа новоизградени линии, съобразно трите сценария за устойчива и зелена енергия за Европа: NECP+, Clean Europe и Green Europe, фиг. 2, [4, 5]. Целта е до 2040 г. да постигне разширение на мрежата при обмен на енергиен микс между европейските държави с участие на възобновяема енергия между 75% и 100%, фиг. 3. По данни на План за развитие на преносната електрическа мрежа на Република България за периода 2022-2030 г. ако към 2031 година проектираните ВяЕЦ и ФЕЦ са нерегулируеми при обща инсталирана мощност над 6500 MW, балансиращата способност на ЕЕС ще бъде намалена, таблица 1.




***Фиг. 2.*** *Текущо състояние и планирани действия до 2030 г. на европейската трансгранична енергийна мрежа за обмен.*

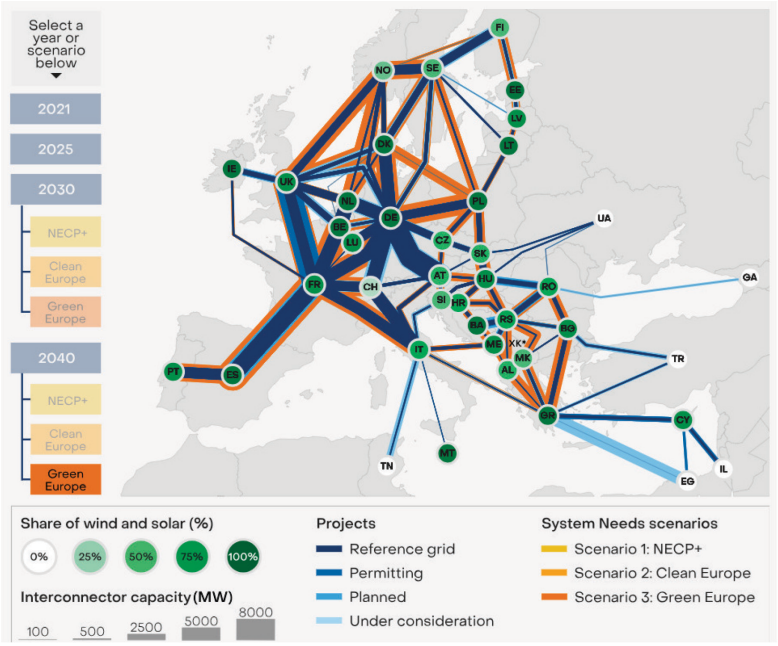
В страната има остатъчна разполагаемост за производство от 7,8 - 9,7 TWh/годишно. Трябва да се има предвид, че това се дължи основно на поетапното въвеждане в експлоатация на заложения прираст на ВЕИ, особено при ФЕЦ. Мощностните баланси показват драстична диспропорция при възможностите за покриване на вътрешното потребление и евентуален износ на електроенергия. Последното не само е невъзможно при зимни условия, но в някои години дори предполага използване на всички налични източници на допълнителни услуги и/или внос на електроенергия. Още по-утежнена се явява ситуацията при съчетанието на продължителни екстремални зимни условия, изчерпан първичен енергиен ресурс във ВЕЦ и КЕЦ и завишена аварийност при електропроизводствените мощности, какъвто бе случая през януари 2017 година.

***Таблица** 1. Прогноза на ЕСО за развитие на брутното енергопроизводство (2023 - 2031), MWh*

| Балансов показател/година | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Общо КЕЦ на въглища | 20 372 000 | 19 296 000 | 19 420 000 | 19 924 000 | 17 718 000 | 17 888 000 | 17 107 000 | 17 107 000 | 17 107 000 |
| Общо КЕЦ на газ | 1 319 000 | 1 323 000 | 1 319 000 | 1 319 000 | 1 319 000 | 1 323 000 | 1 319 000 | 1 319 000 | 1 319 000 |
| АЕЦ 'Козлодуй" | 16 211 000 | 16 261 000 | 16 211 000 | 16211 000 | 16211 000 | 16 261 000 | 16 211 000 | 16 211 000 | 16 211 000 |
| Общо Топлофикационни ЕЦ | 2 735 000 | 2 755 000 | 2 775 000 | 2 795 000 | 2 815 000 | 2 835 000 | 2 855 000 | 2 875 000 | 2 895 000 |
| Общо заводски ЕЦ | 1 400 000 | 1 400 000 | 1 600 000 | 1 600 000 | 1 600 000 | 1 600 000 | 1 600 000 | 1 600 000 | 1 600 000 |
| ВЕЦ на НЕК | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 | 2 200 000 |
| ПАВЕЦ на НЕК | 640 000 | 710 000 | 760 000 | 830 000 | 890 000 | 950 000 | 1 020 000 | 1 060 000 | 1 100 000 |
| ВЕЦ из вън НЕК | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 129 000 | 1 138 000 | 1 146 000 |
| Други ВЕИ, в т.ч.: | 4 979 000 | 5 774 000 | 6 647 000 | 7 185 000 | 7 708 000 | 8 250 000 | 8 772 000 | 9 295 000 | 9 818 000 |
| *ВяЕЦ* | *1 775 000* | *1 783 000* | *1 791 000* | *1 840 000* | *1 890 000* | *1 939 000* | *1 988 000* | *2 038 000* | *2 087000* |
| *ФЕЦ* | *2 865 000* | *3 640 000* | *4 493 000* | *4970000* | *5431 000* | *5 912 000* | *6373 000* | *6834 000* | *7296000* |
| *Биомаса* | *339 000* | *351 000* | *363 000* | *375000* | *387000* | *399 000* | *411 000* | *423 000* | *435 000* |
| **Общо Батерии (разряд)** | 0 | **4 000** | **12 000** | **20 000** | **32 000** | 44 000 | **56 000** | **68 000** | **80 000** |
| **Брутна разполагаемост за производство** | **50 985 000** | **50 852 000** | **52 073 000** | **53 213 000** | **51 622 000** | **52 480 000** | **52 269 000** | **52 873 000** | **53 476 000** |
| **Прогнозирано брутно електропотребле-** | **41 482 000** | **41 802 000** | **42 123 000** | **42 294 000** | **42 465 000** | **42 636 000** | **42 807 000** | **42 978 000** | **43 298 000** |
| **Помпи ПАВЕЦ** | **920 000** | **1 010 000** | **1 090 000** | **1 180 000** | **1270 000** | **1 360 000** | **1 450 000** | **1510 000** | **1 570 000** |
| **Общо Батерии (заряд)** | 0 | **5 000** | **15 000** | **25 000** | **40 000** | 55 000 | 70 000 | **85 000** | **100 000** |
| **Остатъчна брутна разполагаемост за** | **8 583 000** | **8 035 000** | **8 845 000** | **9 714 000** | **7 847 000** | **8 429 000** | **7 942 000** | **8 300 000** | **8 508 000** |

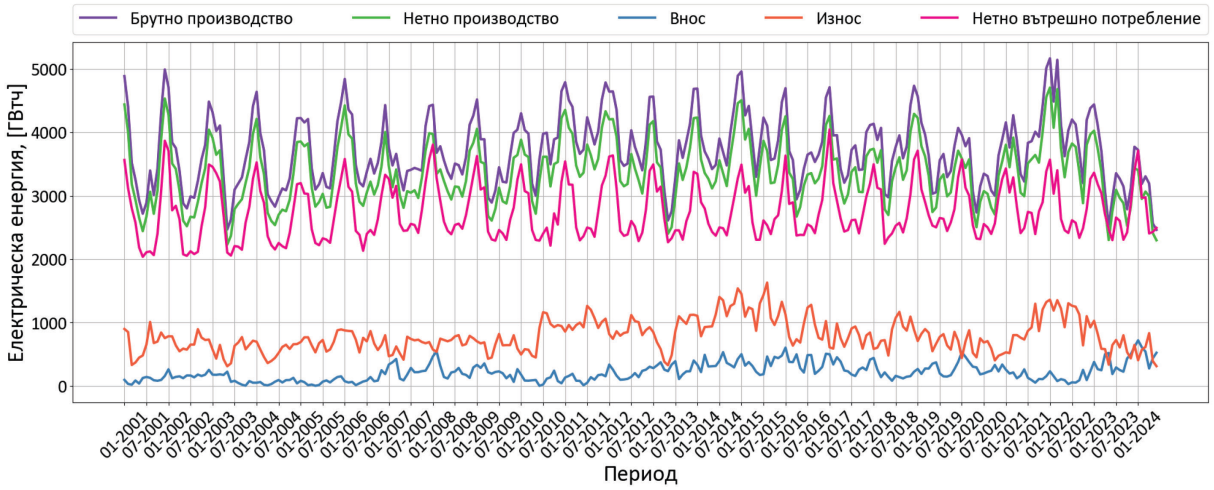
България е голям износител на електроенергия в Европа, с което допринася за повишаване сигурността и гарантиране на доставките с електроенергия в Югоизточна Европа, особено в условията на дефицит и повишено търсене в региона. За изминалата 2022 г. е регистриран рекордно висок нетен износ в размер на близо 12.2 TWh.

С оглед на напрегнатата геополитическа ситуация, стратегическото географско местоположение на страната и акцентът на плана REPowerEU върху енергийната независимост, сред основните стратегически цели към 2053 г., е запазване на енергиен суверенитет чрез максимално използване на местни енергийни ресурси - налични и нови такива.

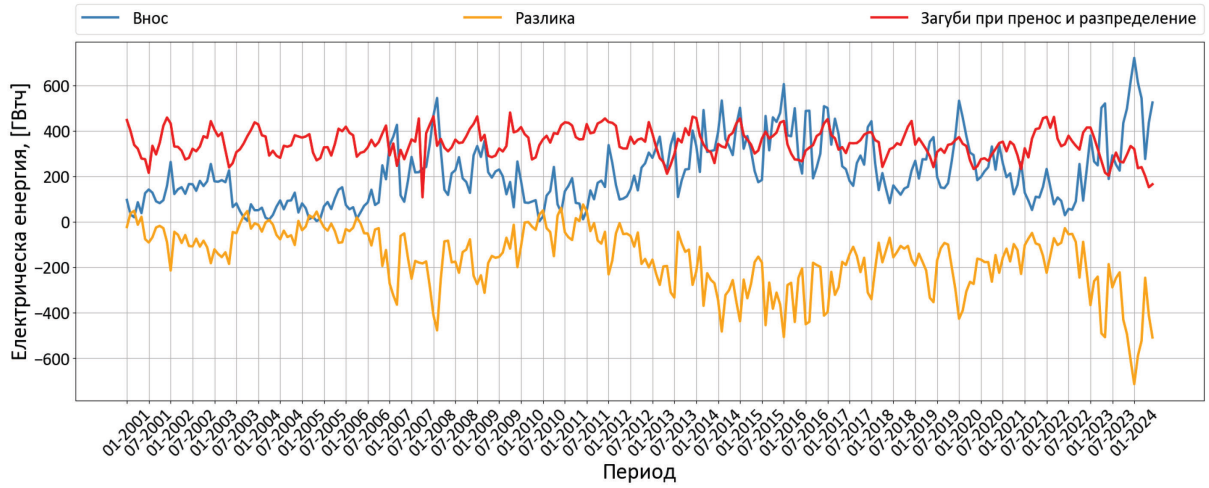



***Фиг. 3.** Развитие и разширение на трансграничната европейска мрежа при изпълнен сценарий Green Europe.*

България разполага с комплексна енергийна инфраструктура и разнообразен електропроизводствен микс, който гарантира сигурността на доставките на електроенергия за страната и региона, но колко успешно страната ще се интегрира в бъдещ енергиен обмен и структура до 2050 г.? Част от отговора се намира в един добър анализ на брутното и нетно производство на електрическа енергия, вноса и износа и нетното вътрешно потребление. Наблюдаваният период за изменението на тези параметри е от януари 2001 до юни 2024, общо 282 стойности. Месечните стойности на наблюдаваните величини се представят на фиг. 4., според данни на Национален Статистичаски Институт и ECO.




***Фиг.4.*** *Брутно производство, нетно производство, нетно вътрешно потребление, внос и износ, по месеци за периода 01.2001-06.2024, [GWh].*




***Фиг. 5.*** *Загуби на електрическа енергия при пренос и разпределение по месеци за периода 01.2001-06.2024, [GWh].*

Към настоящия момент, инсталираните мощности за производство на електрическа енергия в електроенергийната система (ЕЕС) са 13 247 MW, а разполагаемата мощност е 10 771 MW. АЕЦ И ТЕЦ са базови енергийни мощности, които гарантират сигурната работа на ЕЕС, нейното управление и балансиране, както и сигурността на електроенергийните доставки. На практика тези централи са водещият компонент за надеждността на системата, респективно и за жизнеността на електроенергийния пазар. За разлика от централите, участващи в регулирането на честотата и обменните мощности, АЕЦ "Козлодуй" не може да предоставя

допълнителни услуги по технологични съображения, което създава определени трудности при балансирането на ЕЕС (вторичното регулиране на честотата) в периодите на минимално натоварване и при наличие на принудено производство от ВЕЦ и ВяЕЦ през пролетта. С ускореното навлизане на ВЕИ и липса на значителен промишлен товар в страната, необходимостта от принудително ограничаване работната мощност на АЕЦ през определени периоди в годината тепърва ще се увеличава. Загубата на маневреност и възможности за балансиране на ЕЕС следва да бъде компенсирано чрез създаване и въвеждане на иновации при съхранението, включително и развитието на технологии и процеси за преобразуването на енергията във водород и други алтернативни газове, които да позволят съхранението на енергията в моменти на излишъци.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

През последните няколко години износът на електрическа енергия от страната е 7-8 TWh годишно. Преустановяване на износа на електрическа енергия би довело до финансови загуби за държавата и обществото. От друга страна в моменти на по-висока консумация (зимните месеци) ще бъде необходим внос на електрическа енергия в определени часове от съседни страни с оглед сигурността на ЕЕС на България. Това би довело до увеличение на цените на електрическата енергия в страната. България традиционно е нетен износител на електроенергия за целия регион и сред основните стратегически цели към 2053 г. е запазване и надграждане на тази роля. Плановете и прогнозите на съседните държави показват, че трудно може да се разчита на тях за електроенергия в пиковите моменти на потребление. Нещо повече, има индикации, че те самите ще продължават да имат нужда както от електричество, така и от системи за съхранение на такова, произведено от ВЕИ мощности. Основните цели за устойчиво развитие на енергийния сектор са: защита на националната сигурност и икономически интереси; устойчиво използване на местни енергийни ресурси; съгласувани действия при постигане на целите на декарбонизация; повишаване на енергийната ефективност; реализиране на справедлив енергиен преход и защита от енергийна бедност. Като основни мерки се считат изграждане на системи за съхранение на излишните количества възобновяема енергия, електрическа мобилност, модернизиране на преносната мрежа.

## БЛАГОДАРНОСТ

*Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по проект към Технически университет - Габрово 2404С "Приложни математически изследвания за енергийна и икономическа ефективност на електрообзавеждането в условията на енергиен преход", финансиран целево от Министерство на образованието и науката на Република България.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] National Recovery and Resilience plan of the Republic of Bulgaria. Version 1.2. p. 93, 2023, https://www.nextgeneration.bg/upload/71/BG+RRP+EN.pdf

[2] Стратегическа визия за развитие на електроенергийния сектор на Република България 2023-2053. https://www.me.government.bg/uploads/manager/source/NRRP/%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%8F_2023-2053_1.pdf

[3] Integrated Energy And Climate Plan Of The Republic Of Bulgaria 2021–2030.

[4] REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy for Europe: Clean Industry, 2022.

[5] https://ember-climate.org/data/data-tools/europe-power-prices/

НАПРАВЛЕНИЕ

# ЕЛЕКТРОНИКА И СЕНЗОРНА ТЕХНИКА

SESSION

# ELECTRONICS AND SENSORS TECHNICS

# ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ЯДРЕНА ЕНЕРГИЯ

**С.В. Лозанова, М.Л. Ралчев, А.Й. Иванов, Ч.С. Руменин**

*Институт по роботика при Българска Академия на Науките*
*ул. "Акад. Г. Бончев", бл.2, София 1113, България*
*E-mail: lozanovasi@abv.bg*

# ONE POSSIBILITY FOR OBTAINING NUCLEAR ENERGY

**S.V. Lozanova*, M.L. Ralchev, A.J. Ivanov, C. S. Roumenin**

*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences*
*"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*
** Corresponding author: lozanovasi@abv.bg*

**Abstract**
*For the first time, a technology and a device for obtaining nuclear energy by high hydrostatic pressure have been proposed. The device contains a small reactor filled with heavy water and salts of uranium $_{92}U^{235}$ or plutonium $_{94}Pu^{239}$ dissolved in it. The reactor includes a cylindrical thick-walled hydrostatic pressure chamber of beryllium steel with a cylindrical channel along its length, not reaching its bottom. There is also a piston whose diameter is the size of the channel. The piston is pressurized with a high uniaxial stress. The external energy introduced by the press into the chamber results in a controlled chain reaction. As a result, the emission of neutrons and beta rays (electrons) increases. The reactor is placed in a shell with a heat exchanger and a circulating water stream which is converted into steam. This drives a turbine that generates electrical current. Key applications of the new technology and small nuclear device are the long-term power supply of robots and the domestic consumption of energy resources.*

**Keywords:** nuclear energy; chain reaction; hydrostatic pressure; thick-walled chamber with channel; press.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Получаването на ядрена енергия за целите на икономиката се дължи на откритието на О. Хан и Ф. Щрасман през 1938 г. Първопричина за техния ефект е, че заловеният неутрон от ядрото на урана води до неговото деление приблизително на две равни части с отделяне на топлинна енергия. Процесът се мултиплицира, в резултат на което възниква незатихваща верижна реакция. Например, в блок от чист уран $_{92}U^{235}$ или плутоний $_{94}Pu^{239}$ всеки заловен от ядрото неутрон предизвиква вибрации и спонтанното му деление с изпускане на 2 нови неутрона. За икономическо предназначение от първостепенна важност са системите, съдържащи уран или плутоний, в които протича контролирана незатихваща реакция на деленето на радиоактивния материал. Именно такива реактори се използват като източници на електрическа енергия. Съоръженията за получаване на ядрена енергия са със съществени размери, изискващи подходящи геоложки, хидроложки и сеизмични условия. Времевият период от проектирането до завършването и международното узаконяване на тези съоръжения изисква до 25 години. Ето защо характерна тенденция в конструирането на ядрените реактори е редуцирането на техните размери и съкращаването на срока за пускане в експлоатация.

Известни са малки модулни устройства за производство на ядрена енергия. Най-общо те съдържат цилиндричен

стоманен реактор, с разположен от вътрешната му страна отражател на неутрони. В активната зона на реактора има тънкостенни идентични по размери тръби от неръждаема и топлоустойчива стомана. Всяка от тези тръби се състои от друга двойка тръби с фиксирани диаметри – външна и вътрешна, разположени симетрично и на разстояние една в друга. Кухината между всяка двойка тръби е затворена херметично и в нея са пресовани соли на уран $_{92}U^{235}$ или плутоний $_{94}Pu^{239}$. Общото количество на радиоактивните соли в реактора малко надвишава критичната маса - минималното количество уран $_{92}U^{235}$ или $_{94}Pu^{239}$, след което верижната реакция на спонтанно делене на ядрата не затихва. Двойките тръби са разположени в среда от графит или тежка вода, контролирано забавящи отделящите се спонтанно в урана или плутония неутрони. Всички тръби в реактора формират вътрешен контур, разположен в обграждащ ги кожух с циркулиращ охлаждащ воден поток при налягане от 160 atm. Топлината от верижната реакция се извежда от реактора чрез топлообменник във външен паров контур като парата привежда в действие турбина, генерираща електроенергия, [1 - 13].

Някои от ограниченията на това модулно устройство за ядрена енергия е усложнената конструкция поради множеството идентични двойки тръби от неръждаема стомана и херметично пресования там уран $_{92}U^{235}$ или плутоний $_{94}Pu^{239}$. Това изисква във всяка кухина на двойките тръби поставяне с максимално висока точност на едно и също количество радиоактивен материал. Проблем, свързан с надеждността на реактора е възникването понякога на спонтанно неконтролируемо леко ускоряване или забавяне на ядрената реакция с поява в топлообменника на нежелани малки вибрации с променлива амплитуда. Това е все още неизяснен напълно инженерно-физичен процес. При аварийни ситуации е наложително безопасно прекъсване на ядрената реакция. Това се осъществява с екстрено извеждане от реактора на тръбите с уран/плутоний или спускане в реакторната зона на други цилиндрични тела от графит, забавящи ядрената реакция. Тази процедура обаче изисква определено време, което не винаги се постига.

В настоящата статия е описано нов тип модулно устройство за ядрена енергия с опростена конструкция и повишена надежност на реактора. Най-съществения елемент на системата е, че за получаване на ядрената енергия за първи път в световната практика се предлага това да става с високо хидростатично налягане.

## ОПИСАНИЕ НА УСТРОЙСТВОТО И ТЕХНОЛОГИЯТА

### а) Устройство за ядрена енергия

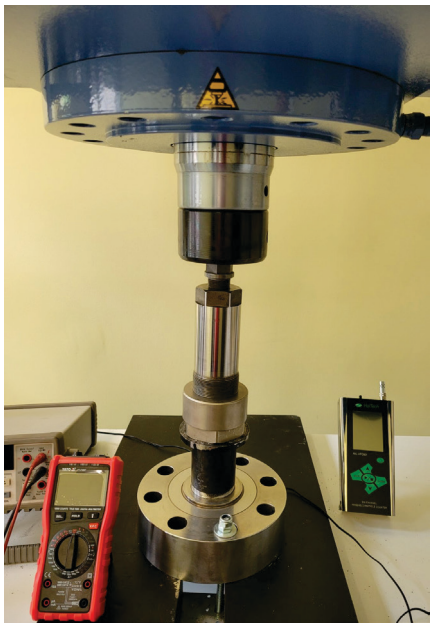
На Фигура 1 е показана основната част на новото ядрено устройство. Модулната конфигурация съдържа реактор с отражател на неутрони, запълнен с тежка вода и разтворени в нея соли на уран $_{92}U^{235}$, плутоний $_{94}Pu^{239}$ или полоний. Реакторът от своя страна включва цилиндрична дебелостенна камера за високо хидростатично налягане до около 700 000 atm,. Има още цилиндричен по дължината й канал. Той не достига до дъното на камерата. Съотношението на външния диаметър $d_{ext}$ към този на камерата $d_{int}$ е $d_{ext}/d_{int} \geq 4.50$. В канала има цилиндрично бутало с диаметъра на канала. То е под деформационен едноосен натиск с преса за високо налягане и мултипликатор, Фигура 2. Каналът е полиран и е отражателят на неутроните.



***Фиг. 1**. Дебелостенната камера и част от съпътстващите я компоненти*

Реакторът е поставен в кожух, обграждащ реактора с циркулиращ в него воден поток при налягане от около 160 atm, преминаващ през топлообменник, превръщайки водата в пара. Тя привежда в действие турбина, генерираща електроенергия, [14]. Материалът, от който са реализирани камерата за високо хидростатично налягане и буталото е берилиева стомана, която след определени процедури за повишаване на якостта е с коефициент над 60 Roq.

В проектираната постановка за изследване на хидростатичното налягане върху процесите на верижната ядрена реакция се изисква специализирани измервателни инструменти и компоненти. Тук ще се спрем обаче върху апаратурата, свързана с новата технология за използване на хидростатично налягане за въздействие и управление на верижната ядрена реакция. Налягането се осъществява със съвременна автоматизирана хидравлична преса модел Bernardo BHP 200 с максимален натиск F ~ 250 t. Налягането F плавно се регулира в режими на нарастване и намаляване, както и поддържане на фиксирана стойност на деформацията F ≈ const. Пресата е екипирана с електронен ма-нометър тип Sika с цифрова индикация и точност 0.1 %. Изходът на манометъра показва едноосното натоварване на буталото и камерата в реактора с хидра-вличната преса. В допълнение се прилага прецизна апаратура с интегрален тензо-датчик тип Laumas до 100 t при точност 0.1%, снабдена с цифров индикатор. Вместо разтворени соли на уран в тежка вода, верификацията на камерата сме осъществили с равни части трансформаторно масло и керосин.



***Фиг. 2**. Тестване с преса Bernardo на камерата за високо хидростатично налягане*

**б) Методология на верижната реакция**

Технологичното действие на малкото модулно устройство за получаване на ядрена енергия включва следните етапи. Състоянието на ядрените реактори се характеризира с коефициент K на размножаване на неутроните, определен с израза P = (K-1)/K. За възможните режими на реактора са характерни следните стойности: а) ако K(t) > 1 – верижната реакция нараства с времето t и реакторът е в надкритично състояние като P > 0; б) ако K(t) < 1 – реакторът затихва и това означава, че той е под критично състояние и е в покой, P < 0; и в) ако K(t) ≈ 1, P ≈ 0 – броят на ядрените деления е постоянен във времето t като реакторът е в стабилно критично състояние и това е т.н. „златно" състояние на реактора за добив на ядрена енергия. Условието за критичност на ядреното устройство е в съответствие с формулата $K = K_0A = 1$, където A е частта от образувалите се в реактора неутрони, които се поглъщат в активната зона т.е. в камерата, а $K_0$ е коефициент на размножаване на неутроните. Установено е, че под действие на неутроните ядрата на уран 235 или плутоний 239 се делят на две, включващи по-

ловината от своята маса и 0.5 от електричния си товар. По-детайлно реакцията протича съгласно следния алгоритъм. Ядрото на урана или плутония залавя един неутрон; ударът на неутрона в ядрото се съпровожда с неговата вибрация при нарастваща амплитуда; след това ядрото се разделя на две части като се испускат два-три неутрона. Тази реакция протича със съществено отделяне на топлинна енергия. Най-съществената част на този размножителен процес е фактът, че неутроните, които се изпускат при деленето предизвикват делене на други нови ядра като това разцепване на атомите е в геометрична прогресия, [9,13]. В резултат се осъществява верижна незатихваща реакция – веднъж възникнала, тя продължава от самосебе си. Предпочитането на уран 235 и плутоний 239 в ядрената енергетика е, че те се делят под действие на бързи и бавни неутрони с произволна енергия. Практиката е доказала, че е по-добре ако собствената енергия на неутроните е по-малка, така те въздействат по-ефективно на ядрата. Освен това реакцията на делене не затихва при условие, че масата на радиоактивния материал е достатъчно голяма. В новото решение, Фиг. 1 и Фиг. 2, неутроните са задържат в активната част на камерата в резултат на подходящо полираната й вътрешна повърхност. Функционирането на реактора с бавни (топлинни) неутрони се постига чрез солите на уран 235 или плутоний 239 в тежка вода, която забавя и контролира верижната реакция. При необходимост могат да се разтворят графитови частици.

**в) Ядрена технология чрез хидростатично налягане**

В предложеното устройство за първи път в ядрената енергетика се използва аналогия между една нова закономерност, констатирана и изследвана в ИР-БАН и НЦК “QUASAR” – генерация на частици в нехомогенни структури - скали, различни консистенции бетон и др. и управлението на верижна реакция чрез хидростатика, [14-17]. При този ефект се осъществява от една страна сближаване на атомите и молекулите, а от друга – разкъсват се електростатичните връзки между атомите. Процесът води до преструктуриране на атомните конфигурации, включително на метали като уран или плутоний. Механичният едноосен натиск на буталото в камерата за хидростатично налягане, Фиг. 2, се съпровожда едновременно с уплътняване на тежката вода и сближаване на атомите на солите (клъстерите) на радиоактивния мате-риал. Така се въздейства върху количе-ството на излитащите неутрони от атомите, съпроводено с поглъщането им от други ядра. Фактически във фракциите на уран 235 или плутоний 239 всеки заловен от ядрата неутрон предизвиква делене с изпускане на 2-3 нови неутрони. В случая за първи път е налице предпоставка верижната реакция да се управлява чрез хидростатично налягане. В случая по-съществени са некомпенсираните електростатични сили, участващи в ядрения процес при структурното разкъсване. Ето защо с нарастване на едноосното налягане F, трансформирано в камерата в хидростатично, повече неутрони участват във верижната реакция. Регулирайки налягането в камерата се достига до „златното” състояние на реактора: $K \approx 1$, $P \approx 0$. Броят на ядрените деления практически е постоянен във времето t и ядрената реакция е в стабилно критично състояние. Ако се продължи уплътняването на тежката вода с радиоактивния материал, най-вероятно настъпва състояние, при което $K > 1$. Верижният процес нараства с времето t и реакторът може да изпадне в опасно надкритично положение, $P > 0$. Обаче ако веднага се изключи пресата и се снеме налягането F върху буталото, се постига бързо състоянието $K < 1$, и реакторът затихва. Следователно той е извън критичен режим, $P < 0$. Използването на тежка вода е за забавяне на лавинния ефект в солите на уран $_{92}U^{235}$ или плуто-

ний $_{94}Pu^{239}$. Описаната технология и прототипът на устройството следва да бъдат реално апробирани.

## ОСОБЕНОСТИ НА ЯДРЕНОТО УСТРОЙСТВО И ТЕХНОЛОГИЯТА

Едно от предимствата на модулното устройство за ядрена енергия е опростената му конструкция. Отпадат множеството идентични двойки тръби, запълнени с уран $_{92}U^{235}$ или плутоний $_{94}Pu^{239}$ и отсъства високотехнологична среда, забавяща отделящите се спонтанно в радиоактивния материал неутрони. Преимущество също е високата надеждност на устройството, тъй като евентуалното възникване на неконтролируемо ускоряване или забавяне на ядрената реакция с поява в парогенератора на вибрации е драстично редуцирано от принципа на действие на технологията. Процесът на делене на урана се инициира с високо хидростатично налягане, което при необходимост винаги може да се елиминира с екстрено разтоварване на пресата. Също така камерата допуска множество цикли на зареждане с уранови $_{92}U^{235}$ соли. В случай на авария или прекъсване на електрозахранването, срещани случаи в ядрената енергетика, верижната реакция ще се прекрати. Управлението на пресата чрез контролери ще разтовари максимално бързо създаденото високо налягане, деленето на радиоактивния материал преминава в състояние $K < 1$ и реакторът затихва.

Конструкцията на новото устройство е значително опростена, отпадна необходимостта от идентични двойки тръби, пресоване на уран или плутоний и използване на специална среда. След отработване на горивото, дебелостенната камера е готова за ново запълване и многократна експлоатация. Силно намалените размери на модулното ядрено устройство и управлението на верижната реакция с хидростатично налягане повишава сигурността на системата. Допълнителна гаранция за сигурността е, че системата може да се разположи в сондаж с диаметър около 0.75 m и дълбочина под водния хоризонт на почвата, около 1500 m или в забои на изоставени мини. При евентуална авария такива локации лесно се капсулират и не замърсяват околното среда.

В предложения реактор получаването на крайния продукт - електроенергията е по обичайния способ. Камерата (реакторът) е поставена в кожух с циркулиращ воден поток при високо налягане (до около 160 atm), преминаващ през топлообменник, отдаващ топлината си на вода, превръщайки я в пара, която чрез турбина генерира електричество, [1,5,9,11,13]. Както при всички ядрени мощности, материалите, от които е изграден малкият реактор следва да са изключително качествени, тъй като те работят при висока температура и в поле от неутрони, алфа, бета и гама лъчи, и фракции от делението. Предложеният в конструкцията берилиев бронз или берилиева стомана от една страна задържа неутроните, а от друга е изключително здрав метален композит. Освен това той е радиационно устойчив. Налични са множество модификации на преси, но основното изискване е да се генерира чрез мултипликатор достатъчен натиск за иницииране на верижната реакция.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Иновативността на предложеното устройство е, че на основата на ново физично явление – генерация на частици при високи едноосни деформации на нехомогенни структури, включително радиоактивни материали – уран, плутоний, полоний, амераций и др., за първи път в ядрената технология верижната реакция стартира и се управлява чрез високо хидростатично налягане. Този процес се лесно контролира и е с повишена сигурност. Освен множеството инженерни предимства, резултатът е екологичен като значително са минимизирани опасностите от ядрено замърсяване. Малките модулни реактори, аналогични на представения по-горе, са съществено по-

евтини, времето за монтаж, изграждане и узаконяване е съкратено. Постигане на мощност от около 300 MW е реализируема за страни като България. До сега експериментално са апробирани камерата, действието й при високи едноосни налягания и контролерите. Съдържанието на активната зона на реактора може да бъде заменено с уран в прахообразно състояние. Подложен на високи едноосни деформации в камерата, атомите на метала в такова състояние също се сближават, въздействайки на верижната реакция. Цялостното тестване на предложената технология и устройството може да се осъществи единствено под контрол на съответни институции. Новите модулни устройства могат да се използват в автономните роботи, въздушните и подводните дронове и др.

*Резултатите са получени в лабораториите на Националния център за компетентност "QUASAR", № BG 16RFPR002-1.014 -0008.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Small nuclear reactor, NuScale Power, https://selectel.ru/blog/nuscale-power; USA. 2021.
[2] Blaser RU. Nuclear power plant. US Patent № US2998363 A1/29.08.1961.
[3] TransAtomic power corp, Wo Patent, № Wo2014039641 A2/13.03.2014.
[4] Meshik AP. The working of an ancient nuclear reactor. Scientific American, Nov: 2005.
[5] Babcock & Wilcox Co. US Patent № US2998363 A1/29.08.1968.
[6] NuScale Power LLC. US Patent № US 2016148709 A1/26.05.2016.
[7] Round K.J. Nuclear power source. US Patent No US3678303A1.
[8] Yacout A, Pellin M, Billone M. Coating of nuclear fuel cladding materials, method for coating nuclear fuel cladding materials. US Patent No US 102 762 68/30.04.2020.
[9] Landsberg GS. Physics, Book 3, Chaps. XXI and XXII, Fourthly Ed. M.: Nauka, 1966.
[10] Greenspan E. Encyclopedia of Nuclear Energy, Ref. work. Elsevier, 2021.
[11] Channcey S. Nuclear reactor. US Patent No US3072553A1/819732-5.1963.
[12] Innovation in Nuclear Energy Technology. Nuclear Energy Agency. OECD 2007. NEA No 6103, 2007.
[13] Saveliyev I.V., Physics, Book 3, Chap. XIV. M: Nauka, 1967.
[14] Lozanova SV, Ralchev ML, Roumenin CS. Small device for nuclear energy. BG Patent № BG 113474 B1/25.01.2022.
[15] Lozanova SV, Ralchev ML, Roumenin CS. Device for physical-mechanical state determination of rocks and concretes deformation BG Patent № BG 67599 B1/15.01.2024.
[16] Lozanova S, Ralchev M, Roumenin C. Generation of microparticles in rock structures. Compt. rendus ABS 2022; 75(12): 1813-1821.
[17] Lozanova S, Ralchev M, Ivanov A, Roumenin C. A novel sensor effect applicable in seismically active regions. In: Proceedings, 97 2024, 102 *https://doi.org/10.3390 proceedings/ 2024097102.* Leche, Italy 2023.

# ВЕРТИКАЛЕН МИКРОСЕНЗОР НА ХОЛ

**С.В. Лозанова*, М.Л. Ралчев, А.Й. Иванов, Ч.С. Руменин**
[1] *Институт по роботика при Българска Академия на Науките*
*ул. "Акад. Г. Бончев", бл.2, София 1113, България*
**Кореспондиращ автор: lozanovasi@abv.bg*

# VERTICAL HALL MICROSENSOR

**S.V. Lozanova*, M.L. Ralchev, A.J. Ivanov, C. S. Roumenin**

*Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences*
*"Acad. G. Bonchev" Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria*

** Corresponding author: lozanovasi@abv.bg*

**Abstract**

*A novel n-type vertical Hall configuration containing a thin n-type silicon wafer is investigated. Five rectangular ohmic contacts are formed consecutively on one of its main side. The areas of the second and fourth contacts are twice as large as those of the others. The electrodes are fully confined with a p-type ring, and the opposite side is covered with a highly conductive layer. The first and fifth contacts are connected as their common point and the third electrode are the differential output of the microsensor. The new Hall element has increased magnetosensitivity, reaching at room temperature $S_I \approx 42$ V/AT, the nonlinearity at $B \leq \pm 0.5$ T is $NL \approx 0.4$ %, but in the range $B \leq \pm 1.0$ T the parameter NL does not exceed $NL \leq 1.3$ %. Significant compensation of the parasitic offset is achieved. The lowest value of the detected magnetic field $B_{min}$ i.e. the metrological resolution with a supply of 2mA reaches about 13μT due to the increased signal-to-noise ratio and the high conductivity layer. For the first time in this class of vertical Hall devices, a solution is used that increases the symmetry of the structure as well as reducing the offset through an additional fifth contact, high-conductivity layer and p-ring.*

**Keywords:** vertical Hall microsensor, galvanomagnetic operation, sensor characteristics, offset compensation, signal-to-noise ratio.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Микросензорите за магнитно поле имат нарастваща роля в изследователската и индустриалната сфера. Автоматизацията на процесите, системите с изкуствен интелект, компютърният сектор, роботиката, автомобилостроенето, контратероризмът и други са основен пазар за този клас елементи. Сред множеството приложения, като по-актуални може да се определят следните: безконтактното измерване на тока без разкъсване на проводника; безколекторните DC двигатели; апаратите за високи енергии – плазмотрони, ускорители на елементарни частици и др.; земният магнитизъм, определяне височината на сателитите, безконтактната автоматика; геофизиката и сеизмологията, електронните компаси и др.; детектиране на линейни и ъглови премествания, сензори за достъп; хибридните превозни средства и електромобилите; навигацията; квантовата комуникация; роботизираната и минимално инвазивната хирургия, включително 3D-телемедицината и лапароскопията; системите за сигурност с елементи на изкуствен интелект; подводните, наземните и въздушните системи за наблюдение и превенция, и др. Всяка от тези групи има своите специфични изисквания, тъй като следва да се измерва раз-

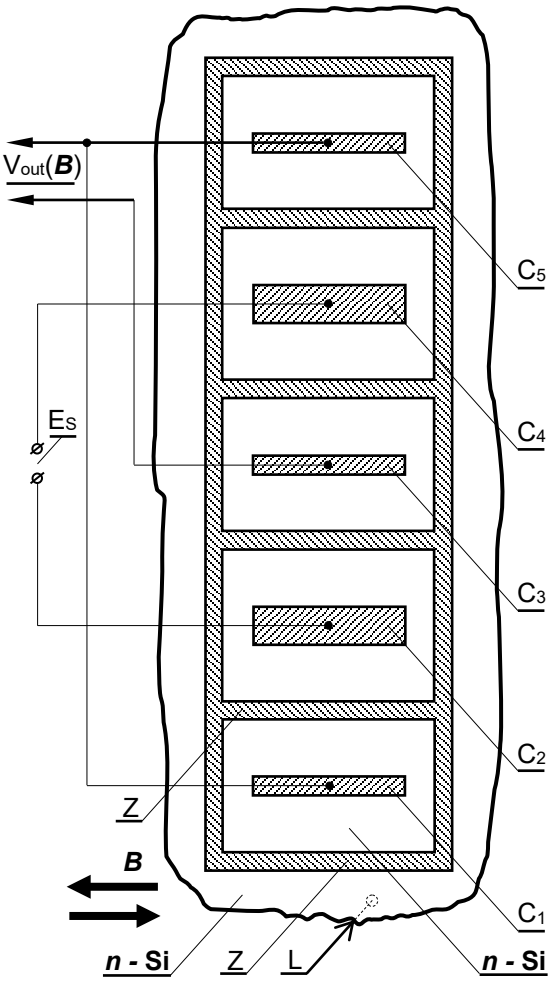
лична по стойност магнитна индукция *B,* [1-4]. Например, при земния магнетизъм характерната стйност е около $B \sim 0.036$ mT (0.36 gauss), вариациите на земното магнитно поле преди земетресения и изригване на вулкани изискват резолюция от $\Delta B \sim 0.5$ nT, при безконтактната автоматика стойности $B \sim 50 - 60$ mT са напълно достатъчни, докато за системите на ядрената енергетика и колайдерът в ЦЕРН типичното магнитно поле е около $B \sim 2.0$ - 4.0 T. Следователно такъв широк обхват $\Delta B$ от стойности на индукцията изисква специализирани сензорни елементи, устройства и инструменти. Практиката показва, че едни от най-универсалните с широк спектър на приложимост са силициевите микросензори на основата на ефекта на Хол. Техният диапазон за детектиране на индукцията $B$ е в обхвата $10^{-8} - 10$ T.

От своето откритие през 1879 г. до 1983 г. конструкцията на тези структури е била непроменена - правоъгълна геометрия с два захранващи на късите страни контакти и два изходни по средите на дългите. Активиращото ги магнитно поле $\boldsymbol{B}$ е перпендикулярно на основната им равнина. Тази топология на сензорите на Хол не е най-подходяща за реализация с планарната микроелектронна технология. През 1983 г. Руменин и Костов създават първите в света вертикални или равнинно-магниточувствителни микросензори на Хол. Първият съдържа само три планарни омични контакти, [5]. Той измерва поле $\boldsymbol{B}$ успоредно на повърхността. Основни предимства на тези необичайни елементи на Хол са пълната им адаптируемост към микроелектронните технологии, възможност за изграждане на интегрални 2D и 3D многомерни векторни магнитометри и др. Максимално опростената конструкция позволява надграждане за конкретните приложения чрез 4, 5, 6 и повече планарни контакти, разширяващи техните модалности и др., [1,2] Напоследък интерес представлява вертикалният микросензор на Хол с 4 контакти (4C). Той съдържа силициева подложка с *n*-тип проводимост, върху едната основна повърхност на която са формирани на разстояния един от друг четири омични контакти, разположени успоредно на дългите си страни. Първият и третият електрод са свързани през токоизточник, а вторият и четвъртият са диференциалният изход на микросензора, [1,2,5].

Ограниченията на този вертикален 4C микросензор е ниската магниточувствителност в резултат на паразитния повърхностен ток, шунтиращ захранването. Така се редуцира изходното напрежение на Хол, намалявайки преобразувателната ефективност. Освен това е понижена измервателната точност поради високата стойност на офсета (паразитното изходно напрежение в отсъствие на магнитно поле) основно в резултат на асиметрията на контактите и технологията – несъвършенства в легирането, несъосност на маските при фотолитографията, механични напрежения от метализацията и корпусирането на чипа, температурни градиенти, дрейф, флуктуации, стареене и др. В настоящата статия е описана нова модификация на вертикален елемент на Хол с повишени сензорни характеристики.

## КОНСТРУКЦИЯ, РЕАЛИЗАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЯ

**а)** Новият вертикален микросензор на Хол е представен на Фиг. 1. Усъвършенстваният 4C елемент съдържа *n*-тип Si пластина. Върху едната основна страна са формирани на разстояния един от друг пет правоъгълни омични контакти $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ и $C_5$, разпо-ложени успоредно на дългите си страни.




***Фиг. 1**. Планиметрия на силициевия вертикален микросензор на Хол и схемата на включване*

Площите на втория $C_2$ и четвъртия $C_4$ контакти са два пъти по-големи от тези на $C_1$, $C_3$ и $C_5$. Всеки един от електродите е изцяло ограничен с *p*-тип ринг Z, проникващ в обема на подложката. Срещуположната страна на тази с електродите съдържа високопроводящ слой L. Контакти $C_2$ и $C_4$ са свързани с токоизточник $E_S$, $C_1$ и $C_5$ са съединени като общата им точка и контакт $C_3$ са диференциалният изход $V_{HC1\text{-}C5,C3}(\boldsymbol{B}) \equiv V_{out}(\boldsymbol{B})$ на микросензора. Измерваното магнитно поле $\boldsymbol{B}$ е успоредно както на равнината на подложката, така и на дългите страни на контактите $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ и $C_5$.

**б**) Прототипът на елемента на Хол е осъществен с процеси от биполярната IC технология. Силициевата *n*-тип подложка е със специфично съпротивление $\rho \approx 7.5\ \Omega.cm$ като концентрацията на донорните атоми $N_D$ и на електроните $n_0$ е $N_D = n_0 \approx 4.3 \times 10^{15}\ cm^{-3}$. Технологичното изпълнение на образците е с четири маски и е описано подробно в [6,7]. Ширината на *p*-ринга Z на повърхността на подложката е 20 μm (по маска). Размерите на отделните части на микросензора (по маска) са както следва: дължината на правоъгълните контакти съставлява 70 μm; разстоянието между който и да е контакт и *p*-тип ринга Z е 5 μm, ширината на контакти $C_1$, $C_3$ и $C_5$ е 10 μm, а на захранващите електроди $C_2$ и $C_4$ е 20 μm. Размерите на ефективния обем (пространствената резолюция) се определя и от проникването на криволинейната траектория на токоносителите $I_{C2,4}$ в *n*-Si подложката. При използваната концентрация на електроните $n_0$ и размерите на контактите проникването е около 25-30 μm. В резултат ефективният преобразувателен обем $V_{eff}$ на конфигурацията от Фиг. 1 съставлява около 240 x 120 x 30 $\mu m^3$ и е подходяща за множество приложения. Микросензорът на Хол може да се реализира също с CMOS, BiCMOS или микромашининг микроелектронни технологии. Високопроводящият слой L се осъществява с метализация или с $n^+$-*n* слой (преход). Изказваме благодарност на проф. О. Паул и екипа му от IMTEK, Фрайбург, Германия за оказаното съдействие.

**в**) Образците са проектирани за електрични и галваномагнитни измервания. Силициевите чипове са асемблирани върху корпуси тип DIL-22 и DIL-4. Използваният електромагнит е с водно охлаждане и индукция до $B \leq 3.0$ T. Той се захранва със стабилизиран източник тип HP 6010A DC. Полето $\boldsymbol{B}$ се калибрира с магнитометър Metrolab – THM 7025. Общата метрологична грешка при тези експерименти е около ±3.0 %. Подробна информация за използваните галваномагнитни методи и инструменти се съдържа в [1].

## ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЯ

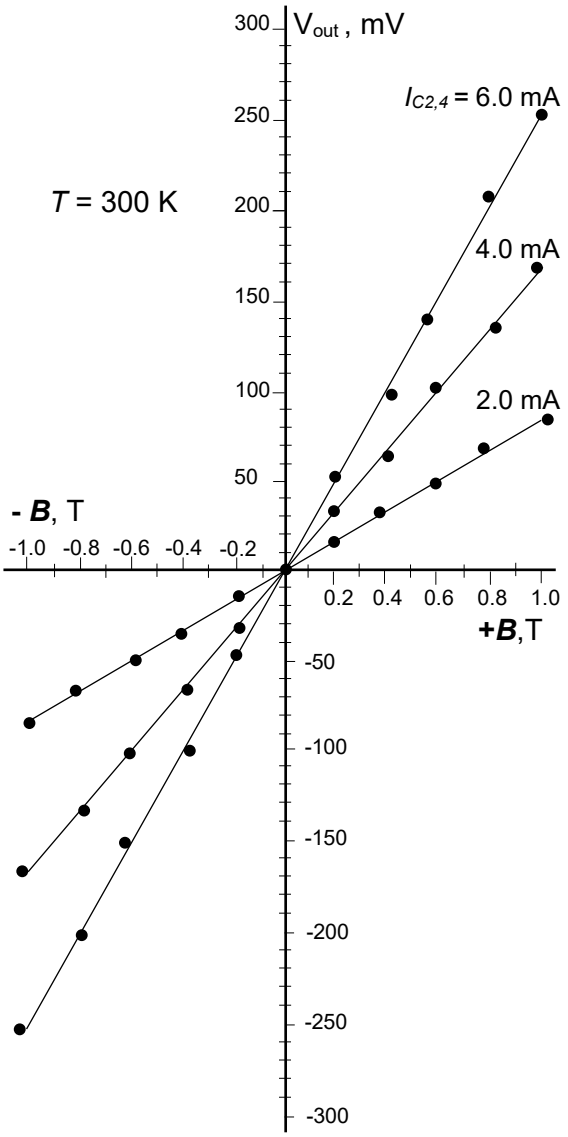
**а)** Функционирането на вертикалния микросензор на Хол се основава на нетрадиционната му конструкция. Чрез *p*-тип ринга Z, целият ток $I_{C2,4}$ пронкива в дълбочина на *n*-Si подложка без разтичане. Рингът не позволява възникването на хоризонтален паразитен компонент от тока $I_{C2,4}$ по повърхността. В предложената конструкция, Фиг. 1, *p*-рингът Z драстично редуцира и флуктуациите на изхода $V_{out}(\boldsymbol{B})$. Степента на проникване на тока $I_{C2,4}$ зависи освен от *p*-ринга, но и от ефективното съпротивление R* на подложката. Стойността на R* се определя както от концентрацията на електроните, но и от високопроводящия слой L. Траекторията на тока $I_{C2,4}$ в обема на структурата е криволинейна, като произходът й подробно е описан в [1,2]. Дълбочината *w* при най-често използваната в микроелектрониката концентрация на легиращи примеси в Si, $N_D \approx 10^{15}$ cm$^{-3}$, и разстояние $l_2 \approx 40$ μm, *w* съставлява около 25-30 μm. Близостта на нисколегираната *p*-зона Z до съответните $n^+$-контакти се определя от използваните интегрални технологии. Допълнителният краен контакт $C_1$ или $C_5$, електрически свързан с другия краен електрод изравнява паразитните потенциали в подложката, компенсирайки офсета на изхода $V_{out}$. Фактически вертикалният елемент от Фиг. 1 е 4C като чрез допълнителния електрод $C_5$ се отстраняват сензорни недостатъци. Кинетиката на електроните се обуславя и от високопроводящия слой L с плаващ потенциал върху срещуположната страна, Фиг. 1. Понеже *p*-тип зоната Z препятства разтичането на захранващия ток по повърхността силно се минимизират и метрологичните грешки и флуктуациите на изхода $V_{out}(\boldsymbol{B})$. Това повишава точността. Предпоставката за по-голямата площ на контакти $C_2$ и $C_4$ по отношение на $C_1$, $C_3$ и $C_5$ е, че при по-значителна повърхност на електродите $C_2$ и $C_4$ Джоуловото нагряване на приповърхностната област от протичащия ток $I_{C2,4}$ е съществено по-ниско. Така се предотвратява евентуалният темепартурен дрейф и флуктуациите.

**б)** При наличие на външно магнитно поле $\boldsymbol{B}$ отделните части на нелинейния ток $I_{C2,4}$ са подложени на отклоняващото действие на силите на Лоренц $\pm\boldsymbol{F}_{L,i} = \pm q\boldsymbol{V}_{dr} \times \boldsymbol{B}$, където *q* е елементарният товар на електрона, а $\boldsymbol{V}_{dr}$ е векторът на средната дрейфова скорост на токоносителите. По тази причина токовите линии $I_{C2,4}$ се деформират. Това поведение се определя от посоките на полето $\pm\boldsymbol{B}$ и на тока $\pm I_{C2,4}$, [1,2,4,8,9]. Например, в областта под контакт $C_2$ силата на Лоренц отклонява електроните в ляво, а в зоната на електрод $C_4$ в дясно. Между тези контакти токовите линии се отклоняват към дъното на подложката и слоя L. Така генерираните от силите $\boldsymbol{F}_{L,i}$ неравновесни токоносители се акумулират в областите на крайните изходни контакти $C_1$ – $C_5$ и на средния електрод $C_3$. Те се задържат там с ринга Z като се предотвратява разтичането им по повърхността на подложката. Тяхната повишена концентрация, определена от отрицателни товари върху контакти $C_1$ и $C_5$, и положителни върху терминал $C_3$, повишава значително изходното напрежение на Хол $V_{out}(\boldsymbol{B})$. Чрез силите $\pm\boldsymbol{F}_{L,i}$ токовите траектории $I_{C2,4}$ се „разширяват" към обема или се „свиват" към горната повърхност на подложката. Фактически вертикалните компоненти $I_{C2}$ и $I_{C4}$ на тока генерират отрицателни потенциали $-V_{C1\text{-}C5,C3}(\boldsymbol{B})$ върху изходните терминали $C_1$ и $C_5$, а върху контакт $C_3$ токът $I_{C2,4}$ формира положителен потенциал + $V_{C3}(\boldsymbol{B})$.

Повишената метрологична резолюция на микросензора при детектиране на минималната индукция $B_{min}$ се постига от нарастналото отношение сигнал/шум в резултат на високата чувствителност, редуцираните офсет и шумови флуктуации чрез дълбоката *p*-тип зона Z, плътно обграждаща контактите, и наличието на високопроводящ слой L.

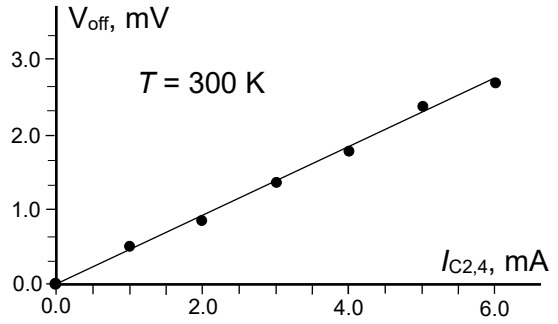
## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Тук са представени някои от основните сензорни характеристики на елемента на Хол.




***Фиг. 2**. Изходни характеристики на вертикалния микросензор на Хол при параметър тока $I_{C2,4.}$ Офсетът е предварително нулиран. Чувствителността съставлява $S_I$ ≈ 42 V/AT.*

Поведението на изходното му напрежение $V_{out}(\boldsymbol{B})$ във функция на полето $\boldsymbol{B}$ е показано на Фиг. 2. Относителната магниточувствителност съставляват $S_I \approx 42$ V/AT и е с около 55 % по-висока от тази на известните 4C елементи. Зависимостите са линейни и нечетни. Нелинейността NL в диапазона $B \leq \pm 0.5$ T достига около NL ≤ 0.4 %, а в интервала $B \leq \pm$ 1.0 T параметърът NL не надвишава NL ≤ 1.3 %. Фигура 3 съдържа зависимостта на офсета $V_{off}$ във функция на захранващия ток $I_{C2,4}$.




***Фиг. 3**. Зависимост на офсета на микросензора във функция на тока $I_{C2,4.}$*

Стойностите му са минимизирани с около 75 % в сравнение с познатия вертикален 4C микросензор. В първо приближение офсетът $V_{off}$ е линейно нарастваща функция от захранването $I_{C2,4}$. При ток 2.0 mA $V_{off}$ съставлява около 0.82 mV, а при 4 mA е $V_{off} \approx 4.0$ mV. Този резултат е подходящ за целите на автоматизацията.

Определена е спектрална плътност на шума в диапазона честоти $f \leq 1000$ Hz. Тя е от тип $1/f$ (фликер шум). С увеличаване на тока $I_{C2,4}$ нивото на $1/f$ шума нараства също. Най-ниската стойност на детектираното магнитно поле, определена с израза $B_{min} = [S_{NV}(f)\Delta f]^{1/2}$ [1,2] за елемента на Хол при ток $I_{C2,4} = 2.0$ mA в честотния диапазон $f \leq 100$ Hz и отношение сигнал/шум S/N = 1, съставлява $B_{min} \approx 13$ μT. Този резултат е подходящ за високоточната магнитометрия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Предимствата на новото решение са в резултат на специфичната конструкция. С *p*-ринга целият постъпващ ток прониква без разтичане дълбоко в обема на подложката и формира високата чувствителност. Офсетът е редуциран с допълнителен краен контакт, високопрово-

дящ слой и *p*-ринг. Наличието на високопроводящ слой намалява ефективното съпротивление на структурата и допринася за проникване в дълбочина на токовите линии. Елементът на Хол е с повишена измервателна точност в резултат на компенсирания офсет и минимизираните паразитни потенциали в подложката. Положителен ефект на конструкцията е, че тя повишава метрологичната резолюция при детектиране на минималната индукция $B_{min}$ поради увеличеното отношение сигнал/шум. За по-ефективна магнитоелектрична конверсия следва да се използват полупроводниците *n*-GaAs и *n*-InSb от групата $A^3B^5$, електронната подвижност $\mu_n$ на които при $T = 300$ K е драстично по-висока съответно 8 и 65 пъти от тази на електроните в *n*-Si. За по-съществена преобразувателна ефективност за целите на слабополевата и високоточната магнитометрия, сеизмологията, контратероризма, навигацията и др., силициевият чип с конфигурацията от Фиг. 1 може да се разположи между два еднакви концентратора на полето $\boldsymbol{B}$ от ферит или μ-метал. Това решение понижава пълтността на магнитния поток върху ефективната площ на микросензора, повишавайки изходния сигнал. Несложната конфигурация на новия вертикален микросензор с ефект на Хол е предпоставка за приложимостта му в роботиката, машиностроенето, енергоразпределителните системи и др.

*Резултатите са получени в лабораториите на Националния център за компетентност "QUASAR", № BG 16RFPR002-1.014 -0008.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Roumenin C. Solid state magnetic sensors. Amsterdam: Elsevier, 1994.

[2] Roumenin C. Microsensors for magnetic field, Chap. 9. In MEMS – a practical guide to design, analysis and applications, ed. by J. Korvink and O. Paul. USA: W. Andrew Publ., 2006.

[3] Foner S. Review of magnetometry. IEEE Trans. Magn. 1981; MAG-17(6): 3358-3363.

[4] Ramsden E. Hall effect sensors – Theory and application. Netherland: Elsevier, 2006

[5] Roumenin C, Kostov P. Planar Hall sensor. BG Patent № BG 37208 B1/26.12.1983; Hall sensor. BG Patent № BG 41974 B1/06.05.1986.

[6] Schott C, Popovic R. Integrated 3D Hall magnetic field sensor. In: Transducers '99, v. 1, 1999, p. 168-171.

[7] Lozanova S, Ivanov A, Ralchev M, Roumenin C., Double-Hall microsensor, Proc. Intern. Scient. Confer. UNITECH 2023", TU - Gabrovo, vol. I, 2023, pp.187-192.

[8] Sander C, Vecchi M.-C, Cornils M, Paul O. From three-contact vertical Hall elements to symmetrized vertical Hall sensors with low offset. Sensors and Actuators A 2016; 240 :92-102.

[9] Lozanova S., Roumenin C. Paralell-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity. IEEE Sensors Journal, 2009; 9(7): 761-766.

# PIEZOELECTRIC TECHNOLOGIES EVOLUTION AT THE DEPARTAMENT OF ELECTRONICS IN TU–GABROVO

**Stefan Milchev, Velimira Todorova*, Nikolay Madjarov**
*Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria;*
** Corresponding author: vili@tugab.bg*

**Abstract**
*The article reviews the development of piezoelectric technologies within more than 50 years in the Department of Electronics from TU-Gabrovo. Results from theoretical and experimental researches that were aggregated in the field of piezoelectrics from the different scientific teams are presented.*

**Keywords:** piezoelectric, technologies; department; development.

## ВЪВЕДЕНИЕ

В средата на 50-те години на миналия век в катедра „Електроника“ на ТУ – Габрово, според учебния план, започна обучение на студентите по специализация „Микро-електроника“. Особено полезотворно, както за учебния, така и за научно-изследователския процес, беше сътрудничеството в тази област с Киевския политехнически институт. Водещи бяха катедрите по Изчислителна техника и Диелектрици и полупроводници. Приоритетна се оказа помощта на член. кор. проф. К.Г. Самофалов, ръководител катедра Изчислителна техника, който предложи сключването на научно-технически договор между катедра ИТ – КПИ - Киев и „Електроника“ на ТУ – Габрово в областта на използването на сегнетопиезо-електричните материали като среда за съхранение на информацията. Тази тематика беше нова за катедра „Електроника“ и за нашата страна и това наложи изграждането на колектив от специалисти, които за кратко време навлязоха в тази област и станаха равностойни партньори с учените от Киев. Част от новосформирания колектив от катедрата премина краткосрочни и дългосрочни специализации в катедрата по Изчислителна техника на КПИ – Киев и създадената необходима материално-техническа лабораторна база за експериментални изследвания. По същество създадената база даваше възможност за направата на хибридни експериментални образци. Това послужи и като основа за обучението на студентите по новата специализация по Микроелектроника.

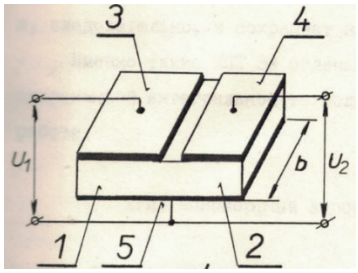
Работата със сегнетопиезоелектрични материали създаде условия за развитие на специфичната и актуална за онова време функционална микроелектроника.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Резултатите от многогодишните изследвания в областта на пиезоелектричните технологии имат най-съществен принос за теорията и практиката в следните направления.

### А. Запомнящи устройства на сегнето-пиезоелектрична основа

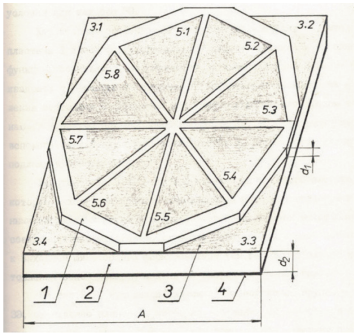
Основният функционален елемент при този тип запомнящи матрици и устройства е базиран на широколентовия пиезоелектричен трансформатор /ШПТ/ от напречно-напречен тип и е с мономорфна конструкция (фиг. 1).




***Фиг. 1.*** *Широколентов пиезоелектричен трансформатор /ШПТ/ от мономорфен тип*

Общата секция на трансформатора служи като подложка на запомнящия елемент, респ. на цялата запомняща матрица. Като правило той е с по-голяма дебелина и е постоянно напречно поляризиран в едната или другата посока.

Една от секциите на пиезотрансформатора е входна 1 и в режим „запис“ на информацията тя се поляризира напречно в едното или другото направление, което съответства на биполярната информационна единица или нула. Изходната секция на пиезотрансформатора 2 е постоянно поляризирана в едно от двете направления и служи за четене на информацията, записана във входната секция. Принципът на четене на информацията от този тип запомняща клетка е основан на правия и обратния пиезоефекти. При подаване на входящ електрически импулс между входната и общата секции електрическата енергия се преобразува в механична, т.е. възникват механични колебания, които в изходната секция се генерира електрически сигнал, чиято амплитуда е ориентирана в положителна или отрицателна посока в зависимост от посоката на поляризация на входната секция,т.е. от записания сигнал [1].




***Фиг. 2**. Конструкция на биморфна запомняща матрица*

Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал.

Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал. Технологично развитие на пиезоелектричните запомнящи елементи и матрици е създаването на биморфна запомняща матрица с цел намаляване за електрическия сигнал в режим „запис“ на информация (фиг. 2).

Хибридните технологии, които бяха разработени в лабораториите на КПИ – Киев и ТУ – Габрово, позволяваха да бъдат изпълнени условията за стандартните нива на логическите сигнали, обработвани по биполярната или MOS технологии.

Основните предимства на този тип запомнящи клетки и устройства е, че те:
1) съхраняват записаната информация при изключено захранване в течение на няколко години (поляризираното състояние на сегнетоелектричните материали е устойчиво);
2) презаписът на информацията се осъществява по чисто електрически път, което за нивото на запомнящата техника в онези години беше уникално по своя характер;
3) горните две предимства даваха възможност за реализацията на EEPROM запомнящи устройства;
4) сегнетопиезоелектричните материали и тяхното използване като запомняща среда Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал. гарантират изключителна надеждност на съхраняваната информация, тъй като тя не се влияе от външни електрически и магнитни полета.

Изброените предимства на този тип запомнящи клетки и матрици създадоха

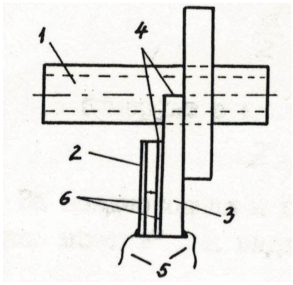
възможност за реализация на устройства и системи, намиращи специализирани предназначения. Разработените сегнетопиезоелектрични запомнящи устройства намериха приложение при реализацията на технически проект „Електронен електромер“, който също беше предмет на съвместна работа между лабораториите на катедра „Електроника на ТУ – Габрово и КПИ – Киев.

**Б. Пиезоелектрични сензори за устройства и системи в текстилната промишленост**

Натрупаният опит в теорията и изучаването на физическите процеси в пиезоелектричните материали даде възможност на научно-изследователския колектив да разработи и други специфични приложения по създаване на специализирани сензори. Пиезоелектричните преобразуватели от генераторен тип, които се отличават с малка енергия на взаимодействие при отлично съчетания на техните експлоатационни и икономически показатели, създадоха възможност за приложение в различни области на текстилната промишленост. Принципът на преобразуване на механичната енергия в електрическа намери своята конкретна реализация със създаването на сензор, който следи непрекъснатостта на полагане на текстилни нишки в различни текстилни механизми и машини. Особено голямо приложение намери пиезоелектричният сензор от генераторен тип за следене непрекъснатото полагане на вътъчната нишка при безсовалковите тъкачни станове. В конструктивно отношение това са биморфни елементи, в които под въздействие на движещата се нишка се появяват трептения на огъване.

На фиг. 3 е показана конструкцията на такъв първичен сензор, състоящ се от нишководач 1, към който е закрепен чувствителен неоднороден биморф, съставен от пиезоелемент 2, изготвен от пиезокерамика тип ПКМ-05, и метал – месингов елемент 3. Биморфът е получен чрез залепване с диелектрично лепило 4.

От двете страни на биморфа са изведени електрически изводи 5. Тази конструкция, чрез демпфер от микропореста гума, използван за намаляване влиянието на вибрациите на текстилната машина, е поместена в алуминиев корпус, който служи като електростатичен екран.




***Фиг. 3.*** *Конструкция на пиезоелектричният сензор за следене полагане на вътъчната нишка при безсовалковите тъкачни станове*

Създаденият пиезоелектричен сензор [2] послужи при разработката на електронно устройство за управление на процесите при полагането на вътъчната нишка. Колективът от специалисти, работещ в това направление, реализира редица проекти и чрез конкретни договори бяха внедрени в редица текстилни предприятия в България и чужбина така наречените устройства „Електронни вътъкоспирачи“. Така например, чрез Центъра по електронизация към леката промишленост бяха произведени и продадени в Русия 250 електронни устройства от този тип.

На базата на различните варианти на това устройство беше предложена и разработена микропроцесорна система за управление на тъкачните станове.

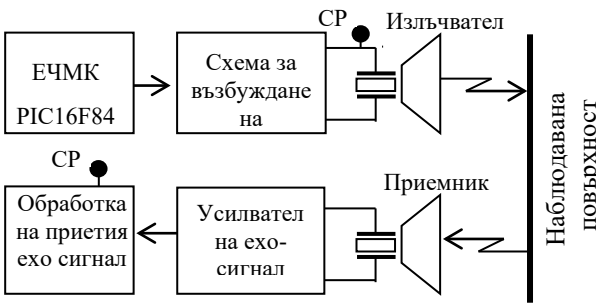
**В. Пиезоелектрични ултразвукови сензори за интелигентни системи при реализирането на класификатори на вещества, материали и процеси**

Един от възможните методи за изследване на вещества и среди се базира на модифициране параметрите на ултразвукова вълна при преминаването ѝ през и отражението ѝ от материална среда (обекта за изследване).

При преминаването през дадена среда ултразвукът намалява своя интензитет, което води до неговото отслабване. Това се дължи на феномени като разсейване,

абсорбция, отражение, пречупване и лъчева дивергенция. Абсорбцията на ултразвуковата енергия от средата, в която ултразвукът се разпространява, зависи от характеристиките на тази среда (еластичност и плътност), както и от честотата на използвания ултразвук. Вследствие на това ултразвуковият сигнал се модифицира и носи информация за характеристиките на средата между излъчвателя и приемника.

На фиг. 4 е представено устройство за приложение на ултразвукови пиезоелектрични сензори, основаващо се на избрания ехолокационен принцип, базиран на ефекта на отражение, разработено от част от работния колектив.



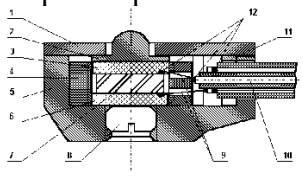

***Фиг. 4**. Блокова схема на устройството за определяне на коефициента на*

С цел избор на отличителни характеристики на различни физични среди и материали за тяхното разпознаване (идентифициране) след анализ на дискретизирания отразен ултразвуков сигнал във времевата и четотната област (СР2-контролна точка 2), също се прилага този принцип. Необходимо е определянето на отличителните характеристики на различни физични среди. Най-често те се получават след анализ във времевата или честотната област на отразения от материала ултразвуков сигнал с честота между 20 kHz и 10 MHz [3].

**Г. Тактилни пиезоелектрични сензори и матрици**

Този актуален раздел на сензорната техника е в основата на средствата за очувствяване на роботи, автоматиката, автомобилостроенето и медицинското оборудване. Тактилното очувстваване като елемент на изкуствения интелект е основа на съвременните информационни технологии. Понятието „тактилно усещане“ според Harmon се дефинира като регистриране и преобразуване на сили в границите (0,5 - 5) N в мястото на контакт на сензора с очувствявания обект.

Преобразувателите на тактилна информация се използват както в системите за поточковото й въвеждане, така и в тези за разпознаване на сложни дву- и тримерни образи в робототехниката.

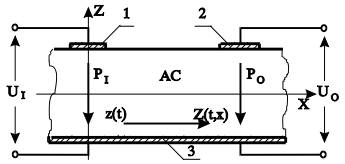


***Фиг. 5**. Конструкция на пиезотактилен дискретен резонансен сензор*

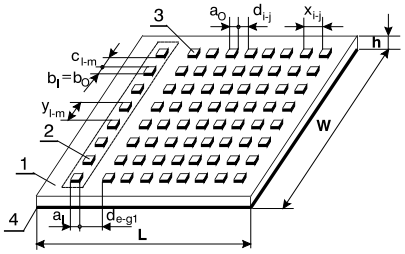
Като сензорни приложения пиезоелектричните среди могат да бъдат използвани както като дискретни (единични) елементи, така и под формата на матрични такива. Работният колектив е участвал в разработката на дискретни пиезоелектрични сензори от резонансен тип за детекция на въздействащ обект или за оценка на приложеното външно усилие [5].

В резултат на тенденциите в развитието на средствата за събиране и обработка на информация чрез тактилно очувствяване и особено за разпознаване на тактилни образи се налага използването на сензори от матричен тип. За реализация на матрична структура са използвани няколко подхода: матрица, формирана на базата на дискретни пиезоелектрични елементи и функционални матрици, елементите на които се формират от проявленията на физични процеси в пиезоелектричната среда. Вторият тип матрици могат да бъдат резонансни и нерезонансни. При нерезонансните матрици активните елементи се обособяват в обща пиезоелектрична подложка с помощта на акустични вълни – повърхностни или обемни. Прототип на такава матрица е създадена от работния колектив на базата на пиезоелектричен трансформатор с бягаща обемна акустична вълна като

информационен носител (фиг. 6), като са създадени различни конструкции на матрици в зависимост от начина на възбуждане на вълната и четенето на информацията (фиг. 7).




***Фиг. 6**. Процеси в ПЕТ с БОАВ като информационен носител*

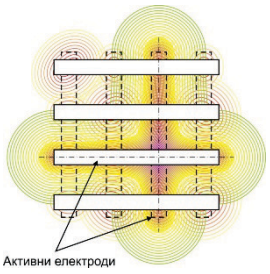



1- пиезоелектрична подложка; 2 – възбудителен електрод; 3 – генераторен електрод; 4 – общ електрод

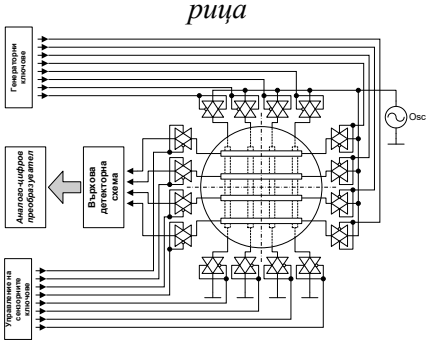
***Фиг. 7.** Тактилна матрица със секциониран възбудителен електрод*

За увеличаване на функционалните възможности бяха създадени матрични полета и съответните интерфейси за възбуждане и четене на информацията [5].

Вторият тип разработени от колектива пиезоелектрични матрици са от резонансен тип, като при тях активните елементи се формират чрез специфична система от електроди върху обща пиезоелектрична подложка. В матриците се създава обемна стояща вълна, като външните въздействия водят до промяна на вълновия профил, което носи информация за формата, големината и усилието от страна на външен обект (Фиг. 8) [6].




***Фиг. 8.** Разпределение на идеална стояща вълна в пиезоелектричния материал за дадена конфигурация резонансна пиезоматрица*




***Фиг. 9.** Интерфейсна схема на резонансна пиезоматрица с използване на амплитуден метод на сканиране*

Един от разработените от работния колектив варианти на резонансна пиезоматрица и интерфейсната й схема с използване на амплитуден метод на сканиране на матрицата е представена на фиг.9 [6].

Разработените и изследвани тактилни сензори и матрици се явиха обект на няколко научно-изследователски проекта, 3 дисертационни труда и много на брой дипломни работи.

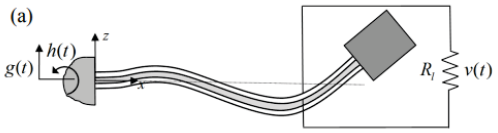
**Д. Маломощни източници на електрическа енергия (Energy Harvesters)**

Нарастващата нужда от ресурси и влошаващата се екологична обстановка определят търсенето на алтернативни технологии и възобновяеми ресурси, особено в сферата на енергодобива, където усилено се разработват методи за откриване и експлоатиране на алтернативни източници на електрическа енергия.

Във връзка с това част от работния колектив създаде прототипи на маломощни източници на електрическа енергия на основата на пиезоелектрични среди. Разработени са енергийни източници от двата типа – вибрационен и компресионен.

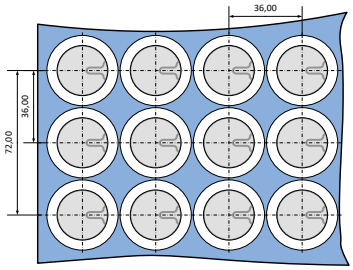
Вибрационните пиезохарвестери са комплексни гредови конструкции с различна степен на свобода в двата края, реализирани с един или няколко пиезоелектрични активни слоя [7]. Те са предназначени за използване на енергията от външни механични въздействия, които имат силно изразена повторяемост във

времето, т.е. имат почти изцяло динамична природа.




***Фиг. 3.10.*** *Биморфна структура, подложена на деформация*

Вибрационните ЕН (фиг. 10) се описват чрез чисто динамични модели по отношение на времевата област, за разлика от другия вид - компресионните, които се представят едновременно със статични и динамични модели. Поради това те нямат обща конструкционна концепция, което води до голямо разнообразие на конструктивни решения. Разработен е плосък матричен компресионен харвестер за събиране на енергия от пешеходци и транспортни средства на базата на дискретни пиезоелектрични елементи. (фиг.11).




***Фиг. 3.11.*** *Разпределение на активните елементи в един от вариантите на компресионния харвестер*

На фиг. 3.13 е представена експерименталната установка за изследване на прототипи компресионни пиезоелектрични харвестери за събиране на енергия от пешеходци.

Работният колектив активно продължава изследванията в областта на пиезоелектричните маломощни източници на електрическа енергия (Energy Harvesters), което се потвърждава от успешната защита на две дисертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всички изследвания през близо 50-годишния период бяха докладвани и защитени успешно с 12 дисертационни работи и повече от 120 научни публикации, докладвани на конференции и публикувани в списания в страната и чужбина. Огромен беше приносът и за учебния процес в катедра „Електроника“ в областта на микроелектрониката и сензориката с успешно защитени и високо оценени дипломни проекти.

Резултатите от развитието на научното направление, свързано с пиезоелектричните технологии, допринесе за издигането на авторитета на ТУ – Габрово като образователен и научнен център.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Hristov S. M. *Specialized Segneto-piezoelectric Memory Devices.* PhD Thesis, Kiev, 1984

[2] Todorov P., S. M. Hristov, V. Todorova. *Electronic Weft Stopper for Textile Looms.* Symposium "Physics and Electronization", Plovdiv, 1979.

[3] Ivanov R. *Digital processing of one-dimensional signals*. Gabrovo, Alma Mater International, 1999, 207 p.

[4] Skopalik E. L., P. Todorov, V. Todorova. *Constructions and research of resonant type tactile piezoelectric transducers*. SACOM, Gabrovo, 1982, p. 125 – 131

[5] Todorova V. *Research and development of tactile ferro-piezoelectric array sensors.* Author abstract for PhD Thesys, Gabrovo, 1998, p. 34

[6] Kolev D. *Development and research of a resonance-type array piezoelectric tactile sensor.* Author abstract for PhD Thesys, Gabrovo, 2018, p. 40.

[7] Stoyanova R., Kolev D., Todorova V., *„Determining the Suitability of Measurement Circuits for Piezoelectric Vibrational Harvesters*“, XXXI International Scientific ConferenceET, Sozopol, 2022., ISBN 978-1-6654-9878-4

[8] Kolev D., S. Kamenovq, V. Todorova. *Possible usage of complex piezoelectric structures in dual purpose mode.* 12th Conference "ELECTRONICA 2021", May 27 - 28, 2021, Sofia.

# ВИСОКОЧЕСТОТЕН ИНДУКЦИОНЕН НАГРЕВАТЕЛ С МНОГОЗВЕНЕН КОЛЕБАТЕЛЕН КРЪГ

**Доброслав Данков*, Петко Маринов**
*Технически университет - Габрово, ул.“Х.Димитър“ 4, Габрово, България,*
**кореспондиращ автор: dankov@tugab.bg*

# HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATER WITH MULTI-COIL OSCILLATING CIRCUIT

**Dobroslav Dankov*, Petko Marinov**
*Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str.,Gabrovo, Bulgaria;*
**Corresponding author: dankov@tugab.bg*

***Abstract***
*Induction heating of flat surfaces is used both in industry and in households in induction hobs. The main problem is the heating of large areas of non-ferromagnetic metals such as copper and aluminum. This paper reports on research done at high frequencies to heat different types of metals using GaN MOSFET power transistors. The performance of a multi-position four-ring induction heater with its characteristics and timing diagrams in terms of voltage and current is presented.*
**Keywords:** GaN MOSFETs; Multi-position induction heater; P-Spice simulation; efficiency.

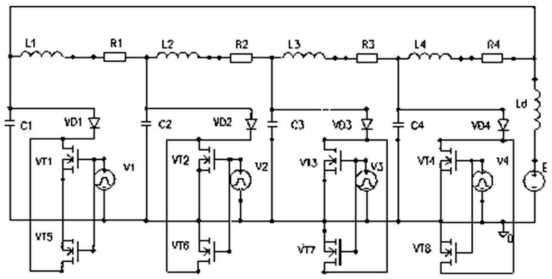
## ВЪВЕДЕНИЕ

Многозвенният резонансен инвертор е разработен въз основа на схемата на кръговите инвертори [1, 2] и допълнителната модификация на трифазен кръгов инвертор за индукционно нагряване [8]. Развитието на електромагнитните процеси в тези схеми е еквивалентно на енергийното състояние на развъртян ротор в машина за променлив ток. Свързаният с това пренос на реактивна енергия балансира натоварването на отделните секции на индуктора. Получава се определена симетрия на товара на комутационните устройства (транзистори), при определена динамика на еквивалентните параметри на индукционния товар.

На тази основа е разработена и изпитана инверторна схема за високочестотно индукционно нагряване на плоски повърхности.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

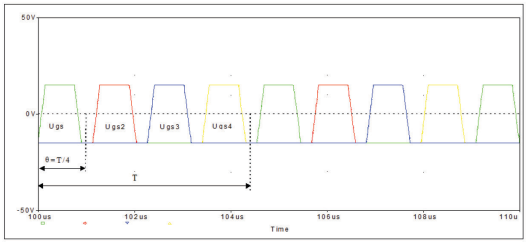
Изследваната схема на инвертор с многозвенен колебателен кръг (ИМКК) има четири звена и е показана на фиг.1. Транзисторите VT1 и VT5 образуват електронен ключ S1, VT2 и VT6 – S2 и т.н.




***Фиг. 1**. Схема на резонансен инвертор с многозвенен колебателен кръг*

Индуктивността $L_{1..4}$ и съпротивлението $R_{1..4}$ са еквивалентни параметри на съответния индуктор, свързан между два възела. Източникът на постоянно напрежение E е свързан към произволно избран възел S (S=1, 2, 3 и 4) чрез входна индуктивна бобина с параметри Ld и R. Ключовите елементи VTs са MOSFET транзистори в последователна комбинация с високочестотни диоди VDs за изолиране на съответните вградени обратни

диоди в MOSFET, тъй като са по-бавни. Кондензаторите Cs имат висока честота за ток с голям капацитет и тяхната стойност, заедно с еквивалентните параметри на намотките (L и r) в осцилиращите системи, еднозначно определя резонансната честота $\omega_o$. Протичането на резонансния процес налага транзисторите да се включват по алгоритъм, като цяло определен от $\omega_o$ на трептящата система и броя на възлите S. Всеки от транзисторите ще бъде включен в определен възел в период To на резонансната честота $\omega_o$ и последователно за период включването ще бъде T/S - фиг. 2.



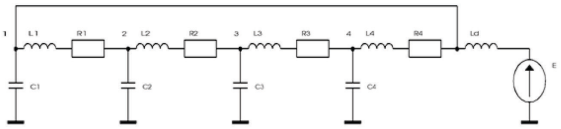

***Фиг. 2**. Управляващи импулси към транзисторите в инвертор с четиризвенен колебателен кръг.*

**1. Принцип на работа и анализ.**

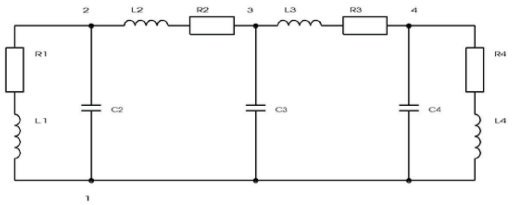
Кръговите инвертори [1, 2] имат един и същ принцип на действие, обусловен от колебателните им системи, които по своята същност са каскадно свързани четириполюсници, образуващи затворен кръг - пръстен. Структурата на четириполюсниците ще определя колебателната система, а следователно вида на описаните кръгови инвертори.

Една теоретична интерпретация на развиващите се електро - магнитни процеси може да се представи с теорията на затворените дълги линии с реални параметри [8].

Конфигурацията на четиризвенния трептящ кръг без включен транзистор е показана на фиг.3. Кондензаторите се зареждат до напрежение E, като C1 се зарежда най-бързо, след това C2 и C4 през една LR група, а най-бавно C3 през две LR групи. При включване на ключ S1, конфигурацията на схемата е показана на фиг.4. Източникът E е шунтиран и се получава обмен на енергията между кондензаторите и LR групите.




***Фиг. 3**. Еквивалентна схема при изключени транзистори.*




***Фиг. 4**. Еквивалентна схема при включен първи транзистор.*

Като се имат в предвид двете състояния на схемата на инвертора с многозвенен колебателен кръг се извеждат изразите за комплексните импеданси на звената на кръга:

$$\frac{1}{\underline{Z}_e} = \frac{1}{j\omega L_1 + R_1} + \frac{1}{Z_2^*} \qquad (1)$$

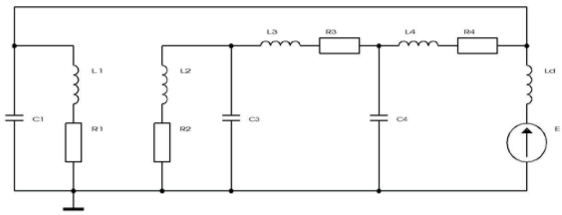
$$Z_2^* = \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{Z_2^{**}};\ Z_2^{**} = j\omega L_2 + R_2 + Z_3^* \qquad (2)$$

$$Z_3^* = j\omega C_3 + \frac{1}{j\omega L_3 + R_3 + Z_4} \qquad (3)$$

$$Z_4 = j\omega L_4 + R_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \qquad (4)$$

$$\underline{Z}_e = \frac{Z_2^* + j\omega L_1 + R_1}{Z_2^*(j\omega L_1 + R_1)} \qquad (5)$$

В следващия момент понеже няма пълно припокриване на управляващите импулси фиг. 4 се свежда до този от фиг. 3, при което кондензаторите се зареждат отново.




***Фиг. 5**. Еквивалентна схема при включен втори транзистор.*

При включване на ключ S2 се получава конфигурацията от фиг. 5. При това кондензаторът C1 се зарежда до E, а на групата C1, L1 се явява паралелно свързаната група $Z_2^*$.

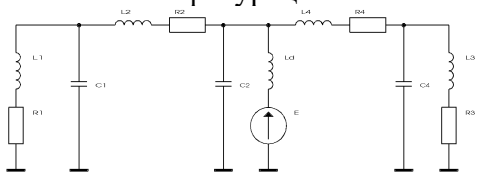
$$Z_4^* = \frac{(j\omega L_4 + R_4)\frac{1}{j\omega C_4}}{j\omega L_4 + R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = \frac{(j\omega L_4 + R_4)}{j\omega C_4(j\omega L_4 + R_4) + 1} \quad (6)$$

$$Z_3^* = j\omega L_3 + R_3 + \frac{(j\omega L_4 + R_4)}{j\omega C_4(j\omega L_4 + R_4) + 1} \quad (7)$$

$$Z_2^* = \frac{j\omega L_2 + R_2}{j\omega C_3(j\omega L_2 + R_2) + 1} + j\omega L_3 + R_3 + \frac{(j\omega L_4 + R_4)}{j\omega C_4(j\omega L_4 + R_4) + 1} \quad (8)$$

$$Z_1^* = \frac{(j\omega L_1 + R_1)\frac{1}{j\omega C_1}}{j\omega L_1 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{j\omega L_1 + R_1}{j\omega C_1(j\omega L_1 + R_1) + 1} \quad (9)$$

При включване на третия транзистор към схемата конфигурацията е:



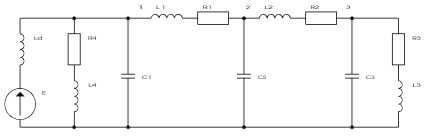
***Фиг. 6**. Еквивалентна схема при включен трети транзистор.*

$$Z_{3e}^* = \frac{Z_1^* . Z_2^*}{Z_1^* + Z_2^*} + j\omega Ld \quad (10)$$

$$Z_1^* = \left[\frac{(j\omega L_1 + R_1)\frac{1}{j\omega C_1}}{\left(j\omega L_1 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right)} + j\omega L_2 + R_2\right]\left(\frac{1}{j\omega C_2}\right) \quad (11)$$

$$Z_2^* = (R_4 + j\omega L_4) + \frac{(j\omega L_3 + R_3)}{j\omega C_4(j\omega L_3 + R_3) + 1} \quad (12)$$

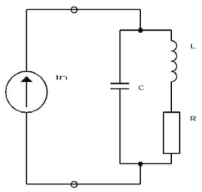
При включване на четвъртия транзистор конфигурацията на схемата е показана на фиг.7.



***Фиг. 7**. Еквивалентна схема при включен четвърти транзистор.*

Схемата е същата както показаната на фиг.4 схема след първата комутация, но се различава по наличието на Ld и източника на напрежение, който тука не е шунтиран. Изразът за еквивалентния импеданс на схемата е:

$$\dot{Z}e^{IV} = \frac{Z_2^* + j\omega L_1 + R_1}{Z_2^*(j\omega L_1 + R_1)} + j\omega Ld \quad (13)$$



***Фиг. 8**. Еквивалентна заместваща схема.*

След уточняване на Lекв. и Cекв. от заместващата паралелна схема на многозвенния инвертор, показана на фиг.8, анализът на инвертора се свежда до анализ на обикновен паралелен инвертор на ток. Подробен анализ на работата на четиризвенния инвертор е направен в [8], като крайните изрази за напрежението и тока на транзисторите са:

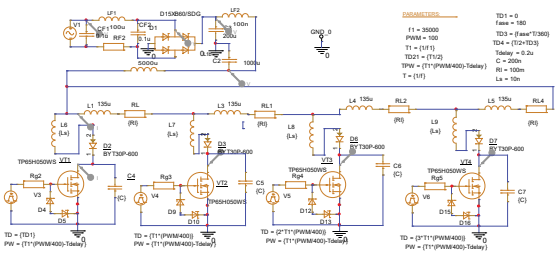
$$u_c(t) = \frac{EL_e}{(Z_R + r_e)}\left[\frac{(Z_R + r_e)r_{on}}{L_e(r_{on} + r_e)} - \frac{\sqrt{\omega_{01}^2 + \left(\alpha_1 - \frac{Z_R + r_e}{L_e}\right)^2}}{\omega_{01}\sqrt{\left(1 + \frac{r_e}{r_{on}}\right)L_e . C}} e^{-\alpha_1 t} . \sin(\omega_{01} t + \chi_1)\right]$$

$$\chi_1 = arctg\frac{\omega_{01}}{\alpha_1} - arctg\left(\frac{\omega_{01}}{\alpha_1 - \frac{Z_R - r_e}{L_e}}\right)$$

$$i_{DS}(t) = \frac{E . L_e}{r_{on}(Z_R + r_e)}\left[\frac{(Z_R + r_e)r_{on}}{L_e(r_{on} + r_e)} - \frac{\sqrt{\omega_{01}^2 + \left(\alpha_1 - \frac{Z_R + r_e}{L_e}\right)^2}}{\omega_{01}\sqrt{\left(1 + \frac{r_e}{r_{on}}\right)L_e C}} . e^{-\alpha_1 t} . \sin(\omega_{01} t + \chi_1)\right]$$

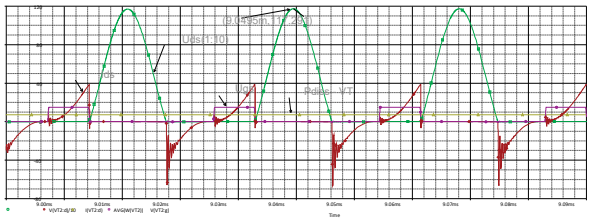
## 2. Симулационни изследвания на индукционния нагревател с четиризвенен колебателен кръг.

Принципната схема на инвертор с четиризвенен колебателен кръг за симулационно изследване е показана на фиг.9. Използвани са модели на GaN MOSFET транзистори от библиотеката на съответната фирма-производител Transphorm Inc. за версия OrCAD PSpice 22.1 [5].



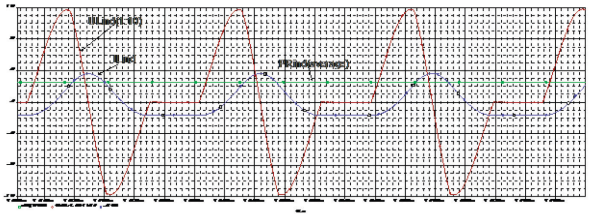
***Фиг. 9**. Силова схема на инвертор с многозвенен колебателен кръг с GaN MOSFET транзистори.*

Използвана е сравнително ниска работна честота от 35 kHz, определена от стойностите на индуктивностите на отделните секции на индуктора и компенсиращите кондензатори с капацитет от 220 nF. Това съответства на възможностите на управляващата схема, изградена на базата на Arduino Due при проведения реален експеримент да генерира управляващи импулси с необходимата честота. Времедиаграмите на работата на един от транзисторите е показана на фиг.10, а изходните ток, напрежение и мощност са показани на фиг.11 при коефициент на запълване η=0,4.T, което представлява максималния процент на коефициента на запълване на управляващите импулси PWM=100%. Еквивалентните стойности на индуктивността и съпротивлението на индуктора са подбрани за работа при празен ход.



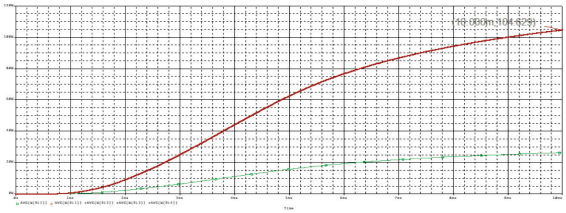
***Фиг. 10**. Времедиаграми от работата на един от транзисторите при PWM=100% - η=0,4.T, f=35 kHz – $U_{GS}$(виолетово), $U_{DE}$ /10 (зелено), $I_D$ (червено), Pdiss(жълто) при работна честота f=35 kHz.*

От времедиаграмите се вижда, че транзисторите работят с комутация при нулево напрежение (ZVS) при включване и изключване и нулев ток (ZCS) при включване.



***Фиг. 11**. Времедиаграми на тока(синьо), напрежението(червено) и мощността(зелено) на един от индукторите при празен ход.*

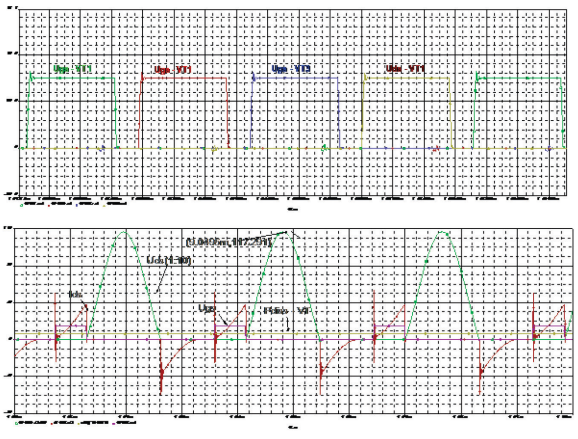
В резултат на това при максимален загубите в GaN MOSFET транзистора (Pdiss) са незначителни – около 8W. Резултатите от симулацията по отношение на една от секциите на индуктора са показани на фиг.11. Вижда се, че при празен ход мощността в една секция на индуктора, която се разсейва като загуби е около 25W.

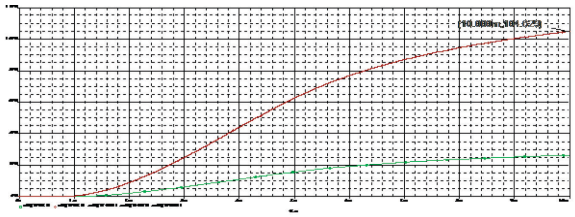


***Фиг. 12**. Времедиаграма на мощността в индуктора(червено) и в една секция(зелено) при празен ход и PWM=100% - η=0,4.T.*

Като цяло загубите в индуктора, както се вижда от фиг.12 при максимален коефициент на запълване на управляващите импулси са около 100 W. На фиг.13 са показани времедиаграми на работата на инвертора с четиризвенен колебателен кръг при коефициент на запълване на управляващите импулси PWM=80%, при което се вижда че почти няма промяна на параметрите.

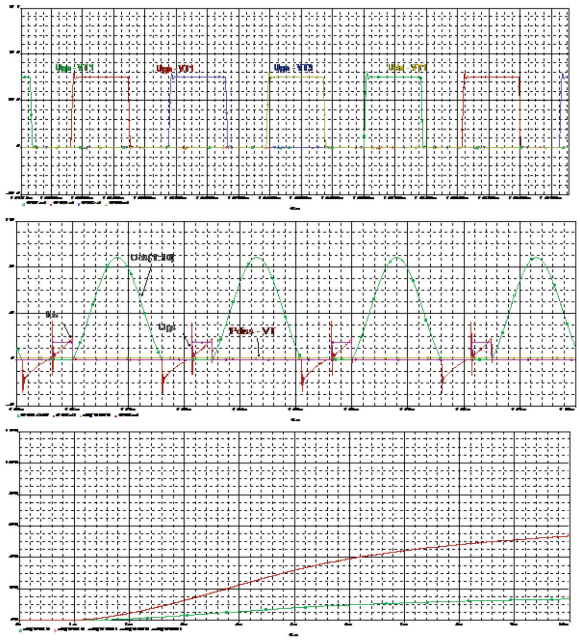
Направено е и изследване при коефициент на запълване PWM=60% при което се вижда промяна на параметрите, като напрежението на транзисторите и на индуктора се запазва, а се променя тока през транзисторите и индуктора и нивата на мощностите.



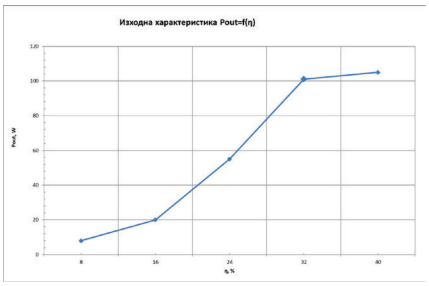


***Фиг. 13**. Времедиаграми от работата при PWM=80% - η=0,32.T*

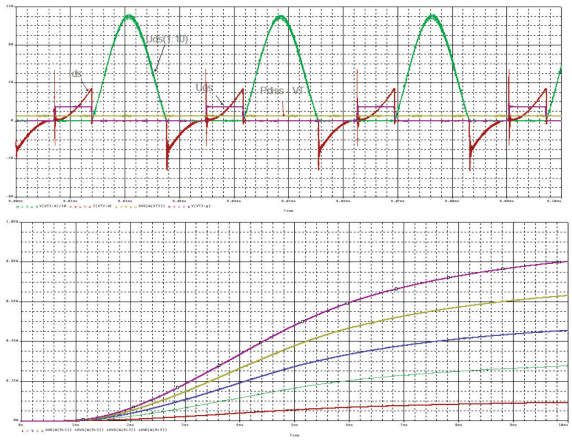
Загубите в транзисторите намаляват повече от 2 пъти – Pdiss=3W, а мощността в индуктора се намалява отново почти двойно до около 55 W, както е показано на фиг.14. На базата на проведените изследвания при различни коефициенти на усилване е построена и регулировъчната крива на инвертора с многозвенен колебателен кръг, показана на фиг.15. Регулирането с изменение на честотата тук не е приложимо с оглед на осигуряване на ZVS комутацията на транзисторите. При наличие на товар на плоския индуктор – например в случай на приложение като индукционен котлон, се представя като изменение на еквивалентното съпротивление в съответната секция на индуктора, тъй като индуктивността е относително висока и товара има малко влияние върху нея.



***Фиг. 14**. Времедиаграми от работата на един от транзисторите при PWM=60% - η=0,24.T, f=38 kHz.*




***Фиг. 15**. Регулировъчна характеристика.*

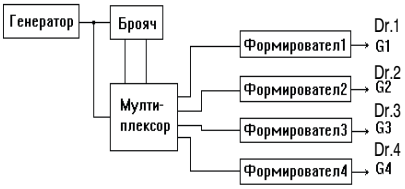


***Фиг. 16**. Изследване на работата на многозвенния инвертор при изменението на товарното съпротивление от 100 до 1000 mΩ със стъпка 200 mΩ при PWM=100%.*

Това се вижда от направеното симулационно изследване за работа с несиметрично товарно съпротивление, представено на фиг.16. Вижда се че режима на работа на транзисторите почти не се изменя, за разлика от изходната мощност, която се изменя от 100 до 800W. Това е главното предимство на инвертора с многозвенен колебателен кръг, който се явява аналог на развъртян електромагнитен генератор, с преразпределение на енергията през отделните звена при несиметричен товар. На базата на предствените симулационни изследвания се синтезират принципни схеми на силовата част и на системата за управление.

**3. Схемно решение.**

Системата за управление трябва да разпредели равномерно управляващите импулси към съответните транзистори, независимо от работната честота, при различен коефициент на запълване, както е показано на фиг.2, 13 и 14.




***Фиг. 17**. Блок - схема на системата за управление на ИМКК.*

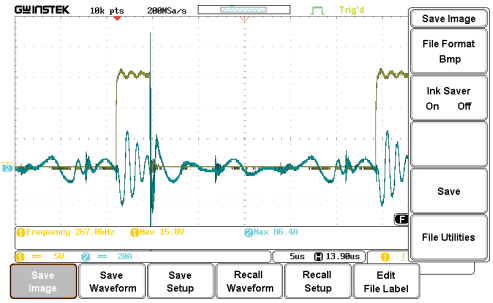


***Фиг. 18**. Общ вид на опитната постановка на ИМКК с товар.*

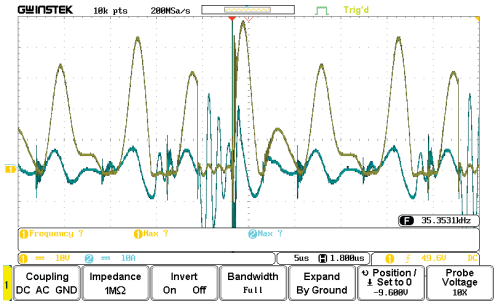
Концепцията за системата за управление е реализирана с Arduino Due, а силовата част на ИМКК е реализирана заедно с драйвера и силовия транзистор като отделни платки за отделните звена [6]. Самия индуктор е реализиран като многопозиционен индукционен нагревател за индукционен котлон, съставен от 24 звена с магнитопроводи P70, свързани по 6, за да образуват четирите звена на индуктора, които са компенсирани с високочестотни кондензатори WIMA тип FKP, подобно на описания в [7].

**4. Експериментални изследвания.**

На фиг.19 са представени осцилограми от работата на един от транзисторите. Вижда се максималната стойност на тока в установен режим около 40А, което съответства на симулационните резултати. Гейтовия импулс е ¼ от периода с пауза между импулсите около 1µS. Осцилограмата от фиг.20 показва напрежението и тока на транзистор в ИМКК. Вижда се резонансната форма на напрежението, с което се реализира ZVS комутация подобно на другите индукционни котлони [3]. Виждат се и импулсите на напрежение на транзистора в резултат на работата на другите транзистори в рамките на 1 период, т.е. имаме умножение на честота на индуктора по 4, колкото са и звената.




***Фиг. 19**. Осцилограми на напрежението $U_{GS}$ и тока $I_D$ (10mV/1A ) на транзистор в ИМКК.*




***Фиг. 20**. Осцилограми на напрежението $U_{DS}$ и тока $I_D$ на транзистор в ИМКК.*

Това води до възможността индукционно да се нагряват не само феромагнитни съдове от стомана и чугун, но и съдове от цветни метали, като алуминий и мед, които изискват честоти в диапазона 100 – 200 kHz [4].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разгледаната схема на индукционен нагревател с четиризвенен колебателен кръг е анализирана, проектирана и верифицирана симулационно и експериментално, което доказва нейната работоспособност. Използваните транзистори се оказаха нисковолтови за напреженията върху тях (1170V при максимално напрежение 650 V) при пълно натоварване и затова в бъдеще те ще бъдат заменени с високоволтови SiC MOSFET транзистори с подобни параметри.

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и диги-*

*тализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Bedfod R.E., Wilas D.N. ”Analysis and Performance of a Three-Phase Ring Inverter.”IEEE Trans Ind. Gen. Appl. vol. IGA-6, ¹5, 1970.

[2] Bedford R.E. Wilas D.Nene “Time domain analysis of a Three-Phase Ring Inverter with reactive load” IEEE Trans. Ind. Gen. Appl. vol.IGA-9, ¹6, 1973.

[3] Dankov D., Investigation of inverter circuits for induction cooktops, Unitech'11 - proceedings, 18 - 19 November, 2011, Gabrovo, pp. I-241 - pp. I-246, ISSN 1313-230X.

[4] Dankov D., Modeling and research of induction hob, Izvestia of Technical University - Gabrovo, vol. 42, pp. 93-98, 2011, ISSN 1310-6686.

[5] https://www.transphormusa.com/en/document-type/spice-models/

[6] Marinov P., Application of driver for GaN & SiC transistors in high-current inverter circuits for induction heating, Student Scientific Session of TU-Gabrovo 2024 (in press).

[7] Ramalingam, S.R. A Single-Coil Multi-Tapped PDM-Based Induction Heating System for Domestic Applications. *Electronics* **2023**, *12*, 404.

[8] Simeonov M., D. Dankov, High Frequency Multi-Unit Inverter for Induction Heating, PCIM’96 Power Conversion Conference Proceedings, 1996 May 21-23, Nurnberg Germany, pp.639-649, ISBN3-928643-12-6.

# СИСТЕМА И ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ЛАЗЕРНО ЗАКАЛЯВАНЕ НА СЛОЖНИ 3Д ПОВЪРХИНИ

**Борислав Стоянов, Иван Барзев, Продан Проданов***

*Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, Габрово, Р. България*
**кореспондиращ автор: pprodanov@tugab.bg*

# SYSTEM AND TECHNOLOGY FOR LASER HARDENING OF COMPLEX 3D SURFACES

**Borislav Stoyanov, Ivan Barzev, Prodan Prodanov***

*Technical University of Gabrovo, Hadji Dimitar str. 4, Gabrovo, Republic of Bulgaria*
**corresponding author: pprodanov@tugab.bg*

**Abstract**
*Modern trends in the development of industrial production systems combine a high-tech positioning mechanism and an eco- and energy-saving executive mechanism or technological tool used as processing tools. This tool can be used in the following possible variants: material removal (CNC machines for selective material removal), material addition (additive technologies - laser welding, 3D printing, etc.), as well as surface treatment (such as quenching, heat treatment, etc. All these processes combine the advantages of positioning systems (based on high-tech servo drive systems) and energy-saving processing heads. Such a production system and technology are presented in this paper – a high-performance positioning system and laser scanner head for surface treatment.*

**Keywords:** laser equipment, laser hardening, servomotor, industrial robot, surface treatment.

## ВЪВЕДЕНИЕ

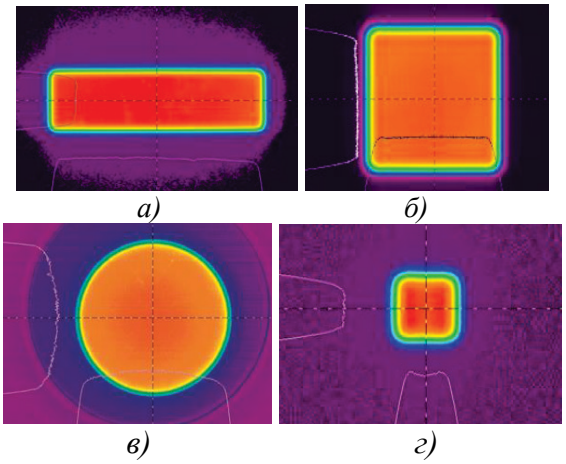
В последното десетилетие се реализира обективно развитие на лазерните технологии, както по отношение на адитивните технологии, така и за повърхностната термична обработка [1, 2 и 3]. Все повече високотехнологични лазерни системи се използват за лазерна обработка (закаляване, рязане, заваряване, 3Д принтиране), предвид следните характерни особености: висока точност и прецизност при насочване на лазерния лъч, малката ширина на лъча и насочването му в точка с минимални размери. Важен аспект от развитието на лазерните технологии е свързан с лазерната термична и технологична обработка[4, 5]. Процеси като закаляване, заваряване, рязане и др. използващи лазерни технологии позволяват висока точност, енергийна ефективност, съсредоточаване на голямо количество мощност в единица обем, едновременно с високо бързодействие и точност. Предлаганите на пазара лазерни глави са с мощност от 500W до 10000 W, с възможност за съсредоточаване на лазерния лъч в точка или петно в регулируеми размери.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Възможността за регулиране ширината на лазерното петно позволява по-ефективно и с по-висока степен на функционалност да се извършва повърхностната обработка на материалите. Приложението на такива лазерни системи, съчетани с високо функционална позициониращa системи позволяват изграж-

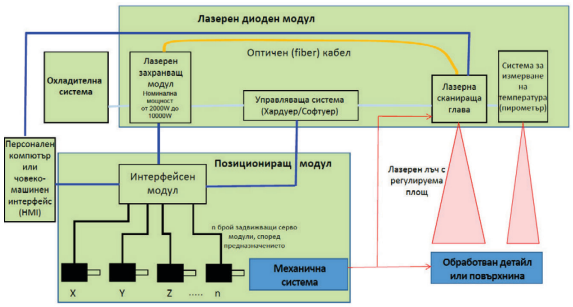
дането на машини и системи, които да се използват за решаването на специфичните технологични задачи, свързани с термична и технологична обработка на сложни геометрични 3D повърхнини, намиращи приложение с широк спектър от индустрии: машиностроене, автомобилостроене и др.

Използването на лазерен лъч в точка се използва при адитивните процеси и лазерното рязане, докато използването на лазерно петно с регулируеми размери се прилага в технологии като закаляване и заваряване – фиг. 1.




***Фиг. 1**. Различни по геометрия и размери петна на лазерния лъч за повърхностна обработка*

В структурно отношение, за реализирането на такава високотехнологична система за лазерна термична обработка на сложни 3Д повърхнини са необходими следните блокове, представени като структурна схема на фиг. 2.

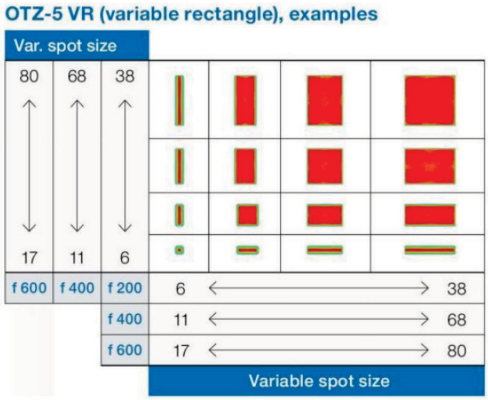



***Фиг. 2**. Блок-схема на система за повърхностна обработка на сложни 3Д повърхнини*

Представената структура съдържа: лазерен диоден модул с необходимата за технологичния процес мощност; позициониращ модул; охладителен модул и персонален компютър (софтуер и/или човеко-машинен интерфейс). Лазерния диоден модул трябва да съдържа следните компоненти: лазерен захранващ модул с номинална мощност в диапазона - (2 – 10) kW; лазерна сканираща глава с възможност за регулируемо лазерно петно посредством варио-оптика, както и система за измерване на температурата на повърхността на детайла по време на технологичния процес.

За позициониращ модул е избран и пуснат в експлоатация индустриален робот тип FANUC M20iD [6] с шест степени на свобода, съответно шест задвижващи оси със серводвигатели, както и в допълнение към него – ротационен едноосен модул[7].

Лазерният източник е тип LDM4000-100 с номинална мощност 4kW[8]. Лазерната обработваща глава е тип OTZ-5 VR [9] снабдена с варио-оптика с възможност за регулиране на размерите на лазерното петно в диапазона (5,5x8) mm до (22x44) mm. На фиг. 3 е показана възможността за регулиране на ширината на петното на лазерния лъч, по данни на фирмата производител [9].

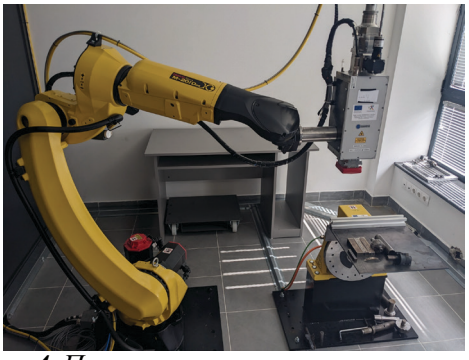



***Фиг. 3**. Възможност за регулиране петното на лазерна глава тип OTZ-5 VR*

Освен това, за прецизното регулиране на температурата, към лазерната глава има вграден пирометър, осъществяващ

прецизно измерване и регулиране на температурата на закалявания слой.

На фиг. 4 е показана изградената система за лазерни термични операции, свързани с повърхностно закаляване на детайли.



***Фиг. 4**. Позициониращa система за повърхностна обработка на сложни 3Д повърхнини*

Допълнителни дейности за превръщането на представената роботизирана система за 3Д позициониране с лазерна глава за закаляване в обособена структурна единица за провеждане на необходимите научни и експериментални изследвания са свързани с обезопасяването и осъществяването на отдалечен достъп и контрол. За осъществяване на това е изградена на обособена „клетка“ в която е поставено това съоръжение с взети всички мерки за осъществяване на безопасност при работа с лазерно оборудване. Изградени са защитни прегради и заграждения, електрически и електронни системи за защита, блокировки, алармиращи системи, както и системи за отдалечен достъп и контрол – фиг. 5а и фиг. 5б.



*а)*



*б)*

***Фиг. 5**. Изглед на изградената защитна „клетка“ на система за лазерно закаляване на сложни 3Д повърхнини*

### *Лазерно закаляване на стомана 45*

За провеждане на експериментални опити е избрана конструкционна стомана 45 като материал за лазерна обработка – табл. 1 и табл. 2.

***Табл. 1.** Химичен състав на стомана 45 спрямо DSTU 7809, %*

| **C** | **Si** | **S** | **P** | **Ni** |
|---|---|---|---|---|
| 0.42-0.5 | 0.17-0.37 | <0.04 | <0.035 | <0.25 |
| **Cr** | **Mn** | **Cu** | **As** | **Fe** |
| <0.25 | 0.5-0.8 | <0.25 | <0.08 | ~97 |

***Табл. 2.** Механични характеристики на стомана 45 след нормализация*

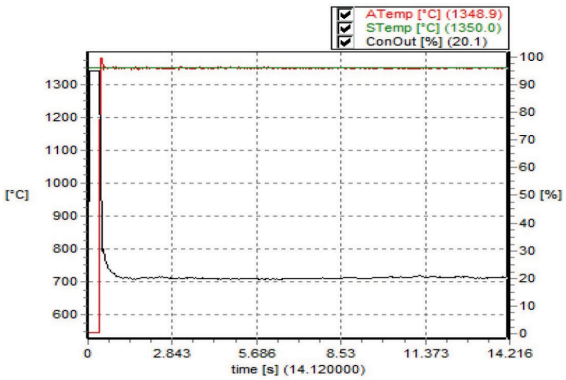
| **Sandard** | **Delivery condition** | **Creep limit, Rm (MPa)** |
|---|---|---|
| DSTU 7809 GOST 1050 | Post-normalization | 355 |
| **Short-term tensile strength ReH (MPa)** | **Minimum elongation ratio σ, %** | **Contraction ratio, %** |
| 600 | 16 | 40 |

Параметрите на лазерната система за закаляване са подбрани при следните стойности – табл. 3.

***Табл.3.*** *Параметри на процеса лазерно закаляване*

| **Параметър** | **Стойност** |
|---|---|
| Мощност на лазерното лъчение, Pmax [kW] | 4,0 |
| Температура, tnom [°C] | 1350 |
| Температура, tmax [°C] | 1400 |
| Скорост, V mm/s | Регулируема: 3, 5 and 7. |
| Фокусно разстояние, Wd [mm] | 400 |

Изпълнението на процеса лазерно закаляване при V = 5mm/s е показан графично на фиг. 6 с видим резултат показан на фиг. 7. На фиг. 6 е показана зададената температура, действителната температура и работната мощност по времетраенето на процеса на закаляване. Вижда се достигането на зададената температура от $1350^0$C за около 0,35-0,4 секунди, което съответства на линейно движение от около 2 mm. Това е приемливо разстояние, предвид използването на петно на лазерно закаляване с размер (5,5x8)mm, което означава, че достигната температура е в диапазона на лазерното петно от самото начало на процеса. При тази скорост, размер на лазерното петно за закаляване и стомана, използваната мощност от 20.1% от номиналната мощност $P_N$ = 4000W, което означава работна мощност от $P_N$ = 804W.




***Фиг. 6.*** *Провеждане на закаляването*

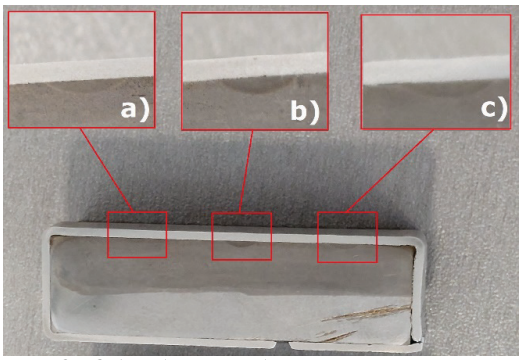
След проведената обработка се пристъпва към металографски анализ. За целта пробата е срязана перпендикулярно спрямо лазерно термо-обработената повърхност, както е показано на фиг. 8 и фиг. 9. Металографската проба е обработена чрез шлифоване във водна среда с корундова шкурка с едрина 150, 400, 600, 800, 1000, 1500 и полирана с паста ( AL2O3 - 3µm) , като при шлифоването е отнет слой с дълбочина 0,3 mm с цел премахване дефектите породени от процеса на рязане. За проявяване на микроструктурата е използван 5% разтвор на азотна киселина (Nital). Изследването на микрошлифа е проведено на оптичен микроскоп Neofot-2 при увеличение X 50 – фиг. 11. Еталон за измерване на едрината на кристалите е представена на фиг. 10.




***Фиг.*** *7. Обработен образец от стомана 45 с дължина 70 mm, размер на лазерното петно (5,5x8) mm и измерена твърдост*



***Фиг. 8.*** *Подготвен опитен образец за металографски анализ.*

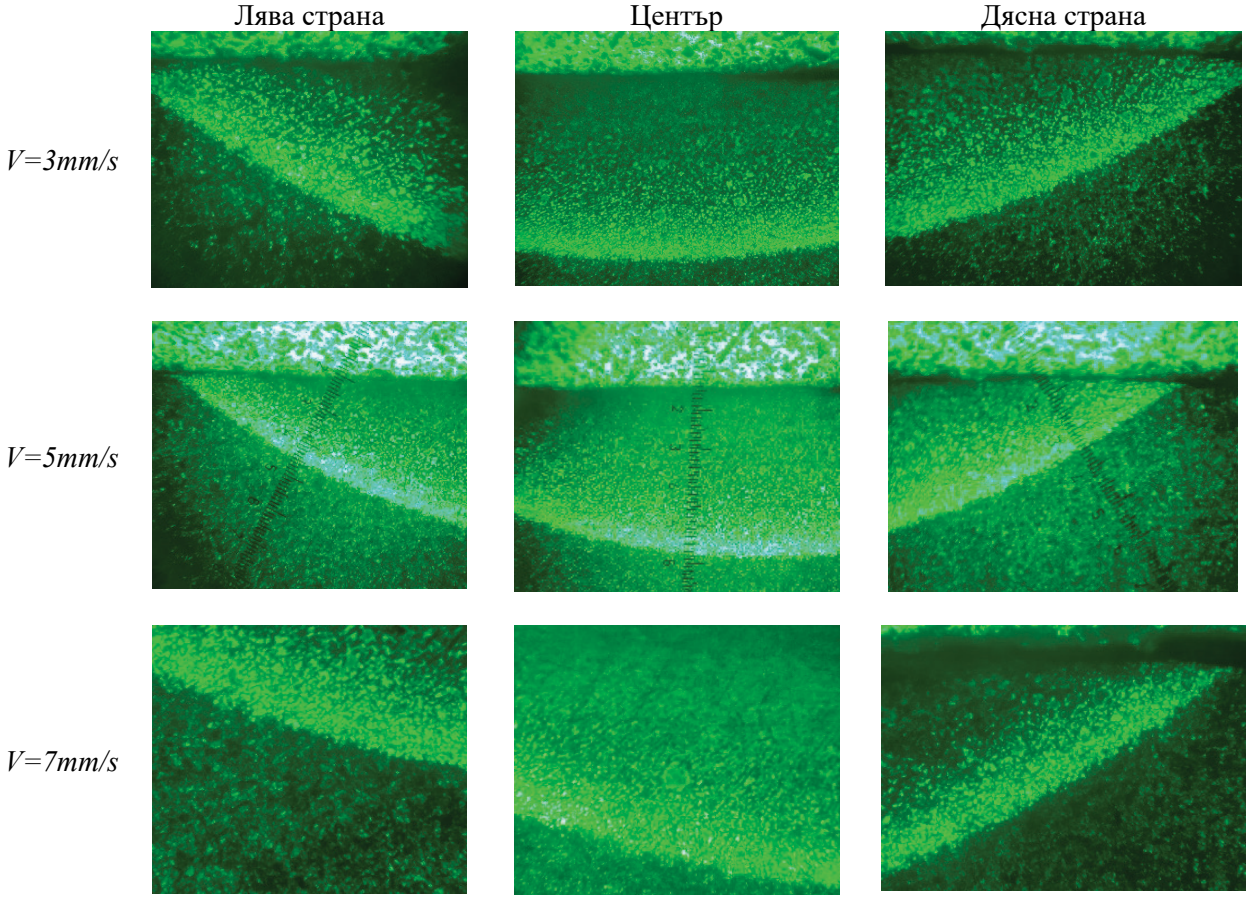



***Фиг. 9.*** *Обработен образец от стомана 45 при различни параметри*

*a) V=7mm/s  b) V=3mm/s  c) V=5mm/s*



***Фиг. 10**. Еталон на оптичната система*




***Фиг. 11.** Микрошлиф в закалените области при различни режими*

Получените експерименти от закаляване с лазер на конструкционна стомана 45 показват задоволителен резултат. На фиг. 9 се забелязват ясно температурно повлияните зони в метала.

При микроскопския анализ - фиг. 11 се забелязва съществено намаляване на едрината на кристалите в строежа на стоманата, в зоната на въздействие, което е предпоставка за правилно провеждане на технологичния процес. Наблюдават се преходи в дълбочина на структури на мартензит, мартензит с феритоперлит и ферит. В последващи експерименти ще бъде проведено металографско изследване на изброените структурни зони за да се докаже функционалността на получения слой. Установяването на микротвърдостта в напречното сечение на слоевете ще охарактеризира положителното температурно въздействие. Последващи SEM анализи ще потвърдят наличието и концентрацията на въглерод. Фазовия строеж в закалената област ще се анализира с помощта на X-ray дифрактометър (XRD).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализирана и изследвана е система за термична повърхностна обработка, свързана с лазерно закаляване на различни по вид и сложност детайли. Представената система съчетава в себе си високоефек-

тивни задвижващи системи, както и обработваща лазерна глава с високо ниво на ефективност и функционалност. Приложението на такива лазерни системи е свързано с решаването на специфичните технологични задачи по отношение на повърхностно закалявана на сложни геометрични 3D повърхнини, намиращи приложение с широк спектър от индустрии, като например: металургия, машиностроене, автомобилостроене и др. Чрез тази технология се позволява термообработката на зони от детайлите, които не могат да бъдат достигнати с друго електротехнологично оборудване, а също така и прецизно регулиране по отношение на твърдост и дълбочина на закаления слой на различни по вид и геометрия детайли в посочените по горе сектори от индустрията.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

*Благодарности: Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] N.S. Bailey, W. Tan, Y.C. Shin, Surface & Coatings Technology 203 (2009) 2003–2012.
[2] J. C. Ion, Surface Engineering 18 (2002) 14-31
[3] A. Roy, I. Manna, Mat. Sci. Eng. A297 (2001) 85-93
[4] S. Němeček, LaRoux Gillespie ed.: Design for Advanced Manufacturing: Technologies and Processes, McGraw-Hill 2017, ISBN-13: 978-1259587450, ISBN-10: 1259587452
[5] C. Soriano, J. Leunda, J. Lambarri, V. García Navas, C. Sanz, Applied Surface Science 257 (2011) 7101–7106
[6]https://www2.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20id-35
[7]https://www.fanuc.eu/il/en/robots/accessories/robot-motion/positioners
[8] https://www.laserline.com/en int/ldmseries/
[9] https://www.laserline.com/en-int/otz-series/
[10]https://www.optoprim.it/wp-content/uploads/2021/09/Laserline_OTZ_Zoom_Optics.pdf

# ПРОЕКТИРАНЕ НА БЕЗКОНТАКТЕН ПРЕДАВАТЕЛ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОССТА МУ ПРИ РАЗЛИЧНИ ТОВАРИ

**Николай Маджаров, Десислав Илиев***

*Технически университет - Габрово, ул. Х. Димитър 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: d.iliev@tugab.bg*

# DESIGN OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM AND RESEARCH OF ITS EFFICIENCY AT DIFFERENT LOADS

**Nikolay Madzharov, Desislav Iliev***

*Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*

** Corresponding author: d.iliev@tugab.bg*

**Abstract**

*Wireless Power Transfer System using electromagnetic resonance are complex devices, where computer-simulated models often fail to accurately reproduce the real electromagnetic and electric processes occurring within them. For this reason, a laboratory prototype of a Wireless Power Transfer System has been developed, aimed at analyzing and visualizing certain processes in electric vehicle charging station. With the introduction of an additional resonant circuit, the technical and operational parameters of contactless charging stations can be expanded. The report presents the design methodology on which the prototype is based, along with a series of experiments demonstrating the system's efficiency under various loads.*

***Keywords:*** *Wireless Power Transfer, Efficiency, Resonance coupling, Inductive coupling.*

## ВЪВЕДЕНИЕ

В днешно време основния проблем е как да ограничим влиянието на човешката дейност върху природната среда. Голяма част от това въздействие се дължи на отделените в атмосферата вредни емисии вследствие на различни дейности, извършвани от човечеството. Не малък процент от тези емисии се дължат на автомобилния транспорт. Двигателите с вътрешно горене (ДВГ), които се вграждат в този вид транспортни средства се усъвършенстват постоянно, като с течение на времето и с въвеждането на различни все по строги екологични стандарти (от Евро 1 до въведеният в момента Евро 6) за вредните емисии отделянето на вредните вещества от ДВГ постоянно намалява [1]. Това обаче според мнозина автори може да се окаже недостатъчно като адекватни мерки в близко бъдеще. Поради тази причина като алтернатива на ДВГ се налагат електрическите автомобили с техните два варианта:

- Хибридни превозни средства - това са автомобили с ДВГ и вграден допълнително спомагателен електродвигател;

- Изцяло електрически превозни средства- които разчитат за предвижването си само на електрически двигател и електрическа батерия.

Хибридните превозни средства могат да се разглеждат като междинно звено между томобилите с ДВГ и автомобилите, използващи изцаяло електрическа енергия за своето предвижване.

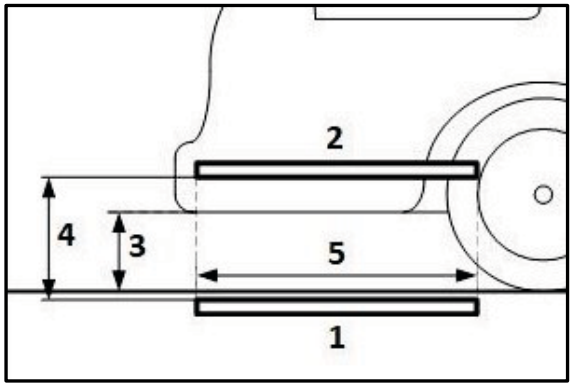
Изцяло електрическите превозни средства заедно с основните им преимущества имат и два основни недостатъка, които към момента влияят върху възможността за по-бързото им налагане на пазара. Това са ограничената им автоном-

ност (изминати километри с едно зареждане на батерията) и продължител-ността на зареждане, което в сравнение с един автомобил с ДВГ е в пъти по-дълга, като продължителността при бърз заряд на електромобил (което не е желателно да се извършва често) може да достигне до 60 минути от напълно разредена до напълн зредена батерия.

Един от начините да се избегне проблема свързан с продължителността на цикъла на зареждане на батериятае е, ако по време на движение или по време на кратък престой на автомобила (на светофар, при престой на паринг за известно време) да се осъществява частичен заряд на електромобила. Това дава възможност за значително удължаване на пробега на електромобила, като може и да се избегне бързият заряд на батериятат по време на по-дълги пътувания и едва след приключване на пътуването да се извърши бавен и пълен заряд на електромобила (примерно в домашни условия през тъмната част на денонощието).

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Използването на съществуващите в момента зарядни станции, при които за зареждане на електромобила трябва да се осъществи галванична връзка между него и зарядната станция, нямат необходимите техникоексплоатационни качества, поради наличие на кабели и съответните силови електрически контакти, механични износвания на отделните компоненти, съществува възможност за поражение от електрически ток и други. Поради тази причина се изпозлват безконтактните системи за зареждане на електромобили. Предавателна намотка (Tx) е вградена в пътната настилка или в настилката на паркинга, а приемната намотка (Rx) е вградена в подовото пространство на електромобили (Фиг.1) [2-3].



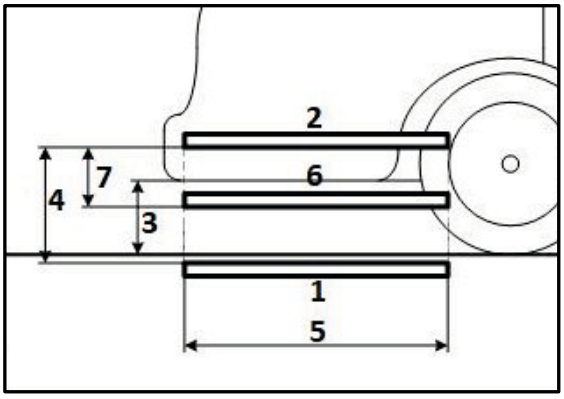

***Фиг. 1*** *Стандартна система за безконтактен заряд на електромобили: 1- предавателна намотка (Tx); 2- приемна намотка (Rx); 3- клиренс на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d) и 5- диаметър на предавателната и приемната намотка (D).*

Два са основните недостатъка на този вид система за безконтактен пренос на енергия. Първият е, че размерите на електромобилите са различни в съответствие с класа им- малки градски автомобили, автомобили от среден клас до автомобили с висока проходимост. Вторият проблем е, че в зависимост от размера на автомобила и предназначението му, разстоянието между пътното платно и неговата най-ниска точка (клирос на автомобила) са различни при отделните марки и модели автомобили. Също така клиренса може да варира в зависимост от натоварването на автомобила и от поддръжката му по време на експлоатация.

Размера на приемната намотка (D), която се монтира в автомобила може да се стандартизира и да се приеме, че намотката с диаметър от 600 mm (D= 600mm) може да се вгради във всеки съществуващ автомобил (с изключение на мини и микро автомобилите). Клиренса на автомобила е постоянно променяща се величина и не подлежи на стандартизация. От Фиг. 1 се вижда също, че реално разстоянието между предавателната и приемната намотка е по-голямо от клироса на автомобила, тъй като над предавателната намотка, монтирана в пътното платно

трябва да се нанесе и допълнителен слой пътна настилка. Това води до проблем, при който след едно известно увеличаване на разстоянието между предавателната и приемната намотка над D/4, ефективността (КПД) на системата за безконтактно предаване на енергия рязко намалява и пада много под 80% (което е целта за този вид системи).

Едно от възможните решения на този проблем е въвеждането на допълнителен резонансен LC кръг (RC) в системата за безконтактен заряд на електромобили, който да се монтира в автомобила под приемната намотка [4-6]. Чрез промяна на неговото разположение по височина може да се компенсира влиянието на клироса на различните електромобили по време на зареждане. (Фиг. 2).




***Фиг. 2*** *Система за безконтактен заряд на електромобили с въведен допълнителен резонансен кръг: 1- предавателна намотка (Tx); 2- приема намотка (Rx); 3- Клиренса на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d); 5- диаметър на предавателната, приемната намотка и резонансния кръг (D);6- резонансен кръг (RC) и 7- разстояние между приемната намотка и резонансния кръг.*

За целите на проучването се разработи макет на система за безконтактно зареждане на електромобили. При проектирането на макета се взеха под внимание два основни вида параметри:

- физически параметри на макета;
- електрически параметри на макета;

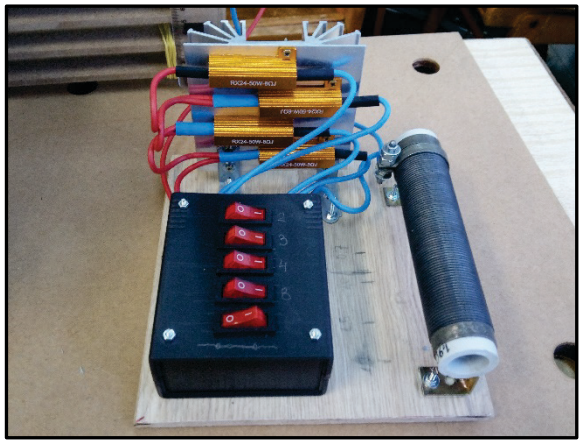
При избора на основните физически параметри на макета се изходи от предпоставката, че той трябва да пресъздава максимално точно отделните физически характеристики на зарядната станция за електромобили. Поради тази причина разстоянието между предавателната намотка, приемната намотка и въведения допълнителен резонансен кръг трябва да могат да се позиционират във височина по такъв начин, че да пресъздават реалните условия на зареждане на различни видове превозни средства (преместване по вертикалната ос Z). Тъй като позиционирането на електромобили в хоризонталната равнина ( ос X и ос Y) не може да става абсолютно точно и вертикалните оси (Z) на предавателната и приемната намотка в реални условия трудно биха съвпаднали, макета се проектира да симулира и разместване във хоризонталната равнина по оси X и Y. За да се даде допълнителна възможност за изследвания, и трите намотки (предавателна, приемна намотка и резонансния кръг) могат да извършват ротация по оста Y. По този начин се симулира и разликата при различните натоварвания на автомобила (брой пасажери и количество багаж).

За изследване на електрическите параметри на макета се изменя входно напрежение. Чрез него може да се променя входната мощност на инвертора и съответно да се променя и мощността, подавана към предавателната намотка на системата за безконтактен пренос на енергия.

Честотата, на която работи системата за безконтактно зареждане на автомобили е важен параметър, чрез който може да се компенсира разликата в товара. Тя се задава посредством генератор на честота и има възможност да се променя, за да може в последствие да се направят и серия от експерименти при честоти, различни от резонансната честота, на която работи макета.

Блок с товарни съпротивления служи за симулиране на различното състояние на батерията по време на заряд. Той е съставен от четири мощни резистора (8 Ω, 50 W), които могат да се включват паралел-

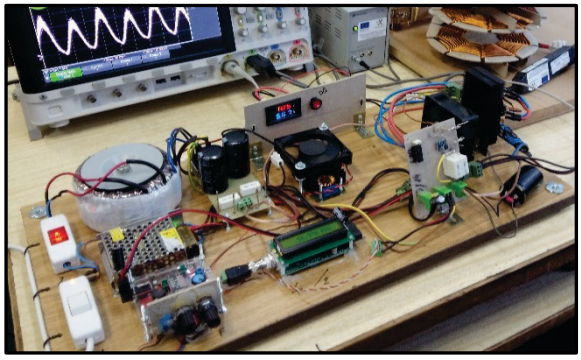
но едно спрямо друго, както и допълнително е поставен превключвател, който може да ги изключва и четирите едновременно. Поставени са на общ охладителен радиатор. По този начин, дори при значителна отделена мощност в товарните съпротивления, се избягва влиянието на температурата върху товарното съпротивление. По този начин съпротивлението може да се променя на 8, 4, 3 и 2 Ω с определена стъпка. Последователно на тях е свързан реохорд, чието съпротивление може да се променя плавно от 0,1 до 1.9 ΩΩ и номинален ток 8 А. В комбинация от четирите съпротивления и реохорд товарното съпротивление може да се променя плавно в границите от 0,1 до 9,9 Ω. По този начин се избягва топлинното влияние от загряването на съпротивленията. На представената по-долу фигура е представена външния вид на блока с товарни съпротивления (Фиг.3).



***Фиг. 3*** *Външен вид на блок с товарни съпротивления.*

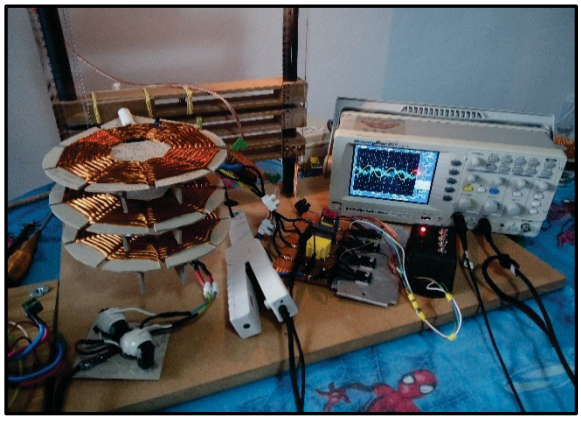
При физическото изграждане на макета той е разделен на две отделни части.

В първата част (Фиг. 4) на обща подложка е монтиран захранващият блок, комбиниран цифров волтметър и амперметър, с който може да се следи входното постоянно напрежение и ток (а оттам и входната мощност на системата) генератора на честота, честотомер и силовата установка, която включва система за управление на транзисторите и крайните транзистори, които са монтирани на охлаждащ радиатор (Фиг.4).



***Фиг. 4*** *Външен вид на първа част на макета.*

Във втората част (Фиг. 5) на обща подложка е монтирана ситемата, чрез която може да се регулира предавателната, приемната намотка и резонансния кръг по височина, както да се разместват хоризонтално една спрямо друга и да се осъществява завъртане по оста Y и на трите намотки. В същата част е поставен изправителния блок, изграден по схема Грец с бързи (Шотки) диоди, комбиниран цифров волтметър и амперметър, с който може да се следи изходното изправено напрежение и ток ( а оттам и изходната мощност на системата) и блока с товарните съпротивления.



***Фиг. 5*** *Външен вид на втора част на макета.*

## ОПТНА ПОСТАНОВКА

За сравнение и по-лесно обобщаване на резултатите, разстоянията между предавателната намотка (Tx), резонансния кръг (RC) и приемната намотка (Rx) е нормализирано и е представено в проценти. В табл. 1 е представено

нормализираното разстояние (Tx- Rx) между предавателната (Tx) и приемната намотка (Rx), прието за 100% и нормализираното разстояние (Rx- RC) между приемната намотка и резонансния кръг (RC), изменящо се в границите от 25% до 75%.

***Табл. 1** Нормализирано разстояние и реално разстояние TX-RX и TX-RC на макета.*

| TX-RX | RX-RC | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100% | 35% | 40% | 45% | 50% | 55% | 60% | 65% |
| 100 mm | 35 mm | 40 mm | 45 mm | 50 mm | 55 mm | 60 mm | 65 mm |
| 120 mm | 42 mm | 48 mm | 54 mm | 60 mm | 66 mm | 72 mm | 78 mm |
| 140 mm | 49 mm | 56 mm | 63 mm | 70 mm | 77 mm | 84 m | 91 mm |

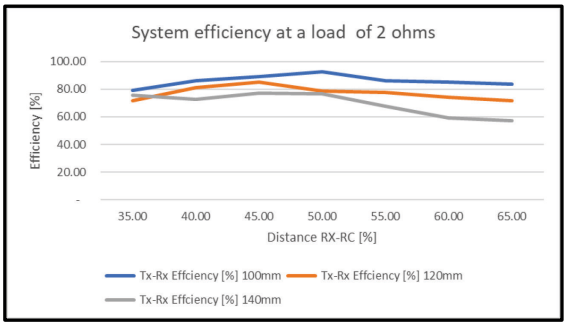
При последващо намаление или увеличаване на разстоянието Rx-RC, КПД на системата спада много, като едновременно с това се увеличава тока през инвертора и предавателната намотка до много големи стойности, които са над допустимите за системата.

Бяха извършени четири поредици от експерименти с четири различни товарни съпротивления: 2, 3, 4 и 5 Ω при посочените в Таблица 1 разстояния между предавателната и приемната намотка и приемната намотка и резонансния кръг. Различните товарни съпротивления съответстват на различно ниво на разряд на батерията на електромобили. Товарно съпротивление от 2 ома съответства на силно разредена батерия, а 5 ома съответства на заредена батерия.

## РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

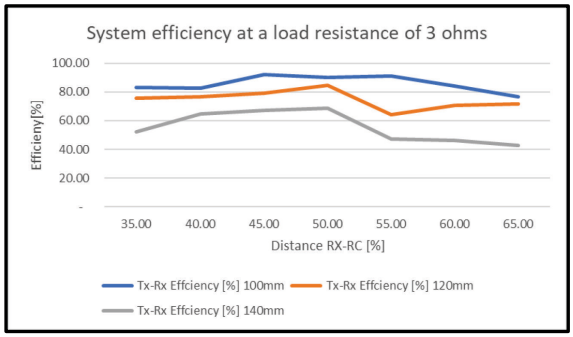
Опитните резултати са представени в четири графики.

На Фиг. 6 е представено КПД на системата при товарно съпротивление от 2 Ω.



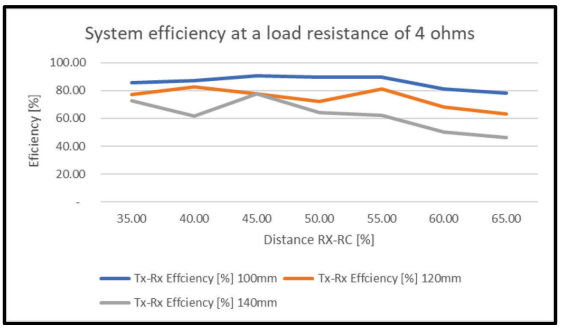

***Фиг. 6**. КПД на системата при товарно съпротивление от 2 ома.*

На Фиг. 7 е представено КПД на системата при товарно съпротивление от 3 Ω.



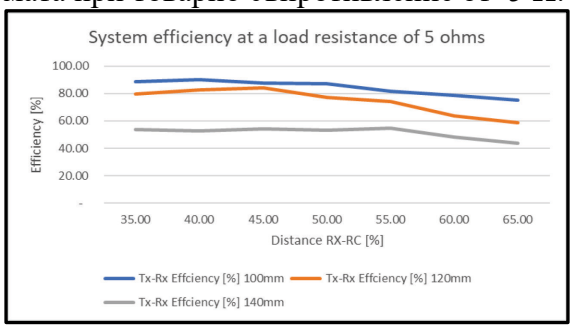

***Фиг. 7**. КПД на системата при товарно съпротивление от 3 ома.*

На Фиг. 8 е представено КПД на системата при товарно съпротивление от 4 Ω.




***Фиг. 8**. КПД на системата при товарно съпротивление от 4 ома.*

На Фиг. 9 е представено КПД на системата при товарно съпротивление от 5 Ω.




***Фиг. 9**. КПД на системата при товарно съпротивление от 5 ома.*

От четирите графики се вижда, че ефективността остава относително постоянна, независимо от нивото на разряд на батерията.

В зависимост от разстоянието между предавателната и приемната намотка, ефективността на системата варира

между 92,83% (при разстояние от 100 mm между предавателната и приемната намотка) и 77,52% (при разстояние от 140 mm между предавателната и приемната намотка).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От изложените по-горе резултати от изследването могат да се направят следните изводи:

- чрез въвеждането на допълнителният резонансен кръг в системата за безконтактен пренос на енергия може да се увеличи значително разстоянието между предавателната и приемната намотка, като се запази КПД на системата в добри граници- над 80 %;

- промяната на товарното съпротивление от 2 Ω до 5 Ω (2,5 пъти) оказва много малко влияние върху КПД на системата, като основен фактор остава разстоянието между предавателната и приемната намотка.

- незначителната промяна на КПД на системата от нивото на разряд на батерията дава възможност тя да се използва както за бърз заряд на електромобили, така и за бавен заряд (когато автомобила е в престой за дълго време) и за дозареждане на батерията по време на движение на автомобила или при кратки престои по време на движение в градски условия (при моментно спиране на автомобила при червен сигнал на светофарна уредба и други подобни ситуации ).

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

*Благодарности: Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1]https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards

[2] N. Shinohara, “Wireless Power Transfer-Theory, technology and applications”, The Institution of Engineering and Technology.

[3] T. Imura, “Wireless Power Transfer Using Magnetic and Electric Resonance Coupling Techniques”, Springer, 2020, ISBN 978-981-15-4579-5.

[4] Budhia, G. Covic and J. Boys,” A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems” in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010.DOI:10.1109/IECON.2010.56753.

[5] N. Madzharov, “Contactless Power Transmitters for Electric Energy”, Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria. 2017, conference on advances in steel structures, vol. II, 2002, p. 1111-1118.

[6] N. Madzharov, D. Iliev, E. Ozdikikiler, “Contactless Charging System for Electric Vehicles with Resonant Circuit”, Mechatronic, eco and energy-saving systems and technologies, Gabrovo, Bulgaria.

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИ ПОТОЦИ ПРИ ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ НА ЗАРЯДНИ СТАНЦИИ

**Гергана Вачева[1*], Пламен Станчев[2], Николай Хинов[1]**

*[1]Технически университет София, кат. Силова електроника,, бул. Климент Охридски 8, гр. София, България, gergana_vacheva@tu-sofia.bg, hinov@tu-sofia.bg*
*[2] Технически университет София, кат. Информационни технологии в индустрията,, бул. Климент Охридски 8, гр. София, България, p.stanchev@tu-sofia.bg*
**кореспондиращ автор: gergana_vacheva@tu-sofia.bg*

# INVESTIGATION OF ENERGY FLOWS FOR CONNECTING CHARGING STATIONS

**Gergana Vacheva[1*], Plamen Stanchev[2], Nikolay Hinov[1]**

*[1]Technical University of Sofia, Department of Power electronics, blvd. Kliment Ohridsky 8, Sofia, Bulgaria;*
*[2] Technical University of Sofia, Department of Information technology in industry,, blvd. Kliment Ohridsky 8, Sofia, Bulgaria;*
**Corresponding author: gergana_vacheva@tu-sofia.bg*

**Abstract**

*The introduction of electric vehicles (EVs) as an alternative to conventional cars presents new challenges for power grids, particularly in terms of managing and balancing energy flows when connecting EV charging stations. This paper examines the opportunities and challenges of integrating EV charging stations into existing power networks and analyzes the efficiency of various energy flow management schemes. The study includes simulations and experiments with different load-balancing methods, including smart management, time-based charging profiles, and the integration of renewable energy sources. The results demonstrate how optimizing energy flows can improve the efficiency and reliability of the power grid, as well as reduce costs and environmental impact. This paper provides a foundation for further research and development in EV power grids and the sustainable management of charging infrastructure.*

**Keywords:** charging station, energy flows, efficiency, stability analysis.

## ВЪВЕДЕНИЕ

С нарастващото търсене на устойчиви транспортни решения електрическите превозни средства (ЕПС) се утвърждават като важен компонент от модерните транспортни системи. Преходът към електромобилност обаче изисква значителна промяна в електрическата инфраструктура, особено по отношение на инсталирането и управлението на зарядни станции за ЕПС. Все повече зарядни станции се свързват към енергийните мрежи, което създава нови предизвикателства за тяхното балансиране, ефективност и устойчивост [1,2]. Основната цел на това изследване е да анализира енергийните потоци при свързването на зарядни станции и да предложи решения за оптимизиране на тяхното управление в различни сценарии [3,4].

Свързването на зарядни станции за ЕПС към съществуващата електрическа мрежа влияе не само върху локалното натоварване, но и върху цялостното състояние на мрежата. Концентрираните точки на зареждане създават високи пикове на потребление, което може да доведе до пренатоварване, загуби на енергия и високи експлоатационни разходи

[5,6]. В отговор на тези предизвикателства, иновативни подходи като смарт мрежи и управление на зареждането в реално време, са от съществено значение за поддържането на стабилността и ефективността на електрическите мрежи. Смарт управлението позволява оптимизиране на времевите профили на зареждане в зависимост от моментното състояние на мрежата и предпочитанията на потребителите, което значително намалява риска от пикове на потребление [7,8].

Допълнително, интегрирането на възобновяеми енергийни източници като слънчеви и вятърни станции в процеса на зареждане на ЕПС предоставя възможност за намаляване на въглеродния отпечатък и разходите за енергия. Въпреки това, възобновяемите източници са непостоянни и изискват допълнителни мерки за контрол и предсказуемост, за да могат да бъдат надеждно интегрирани в мрежата [6,9].

Тази статия се фокусира върху изследването на различни методи за управление на енергийните потоци при свързването на зарядни станции. Чрез симулации и реални тестове ще бъдат оценени ефективността и икономическите ползи от различни схеми за баланс на натоварването. Освен това ще се разгледат потенциалните екологични ползи от внедряването на устойчиви методи за зареждане [10,11].

Това изследване има за цел да предостави задълбочен анализ на съществуващите предизвикателства и възможности в управлението на зарядната инфраструктура за електрически превозни средства, както и да предложи стратегически насоки за оптимизиране на енергийните потоци, които да спомогнат за ефективно и екологично устойчиво развитие на електромобилността.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

В изследването се използват три зарядни станции с различни мощности (P1=25 kW, P2=30 kW и P3=50 kW), присъединени към мрежа с номинално напрежение от 0,4 kV. Чрез симулационни модели се изследва въздействието на тези станции върху мрежата при различни сценарии на зареждане. Изследвани са параметри като активна и реактивна мощност, токове в различните точки от мрежата и коефициента на мощност (cosφ). Изводите от симулациите показват как динамичното разпределение на натоварването може да повлияе на ефективността и стабилността на мрежата, особено в пикови моменти на зареждане.

На Фиг. 1. е представена блоковата схема на изследвания случай. Към разпределителната мрежа са присъединени три зарядни станции на ниско напрежение.




***Фиг. 1**. Блокова схема на изследваната мрежа[1]*

На Фиг. 2 е представена симулационната схема на изследвания случай. Също така, на фигурата са представени и резултатите при изчисление на енергийните потоци. Освен това могат да се наблюдават и загубите в проектираните линии.

Фигурата илюстрира електрическа мрежа с номинално напрежение от 0,4 kV и показва свързването на различни натоварвания и точки в системата, включително зарядни станции и електрически компоненти. В тази конфигурация са представени различни стойности на активна и реактивна мощност, ток и загуби в мрежата, които дават представа за енергийните потоци и ефективността на мрежата при различни натоварвания. Ето основните елементи, представени на фигурата:

Точка F-16:

S=106.357 kVA, P=106.354 kW, Q=0.791 kvar, I=0.154 kA – Това е основният захранващ източник в мрежата, осигуряващ мощност към останалите точки. Отбелязано е, че този източник има коефициент на мощност (PF) от 1, което означава, че работи с минимална реактивна мощност и пълно използване на активната мощност.

Точка N41:

U=0.400 kV с напрежение u=100% – Това е първата точка след основния източник (F-16) с номинално напрежение 0,4 kV и пълна стойност на напрежението. Свързана е с натоварване L-77 (зарядна станция или друг елемент с активна мощност).

Точка L-77:

P=25 kW, Q=0 kvar, I=0.036 kA – Това натоварване е с активна мощност от 25 kW и работи с пълна ефективност (PF=1), без да генерира реактивна мощност. Тази точка показва как натоварвания с различна мощност оказват влияние върху мрежата.

Точка B-47:

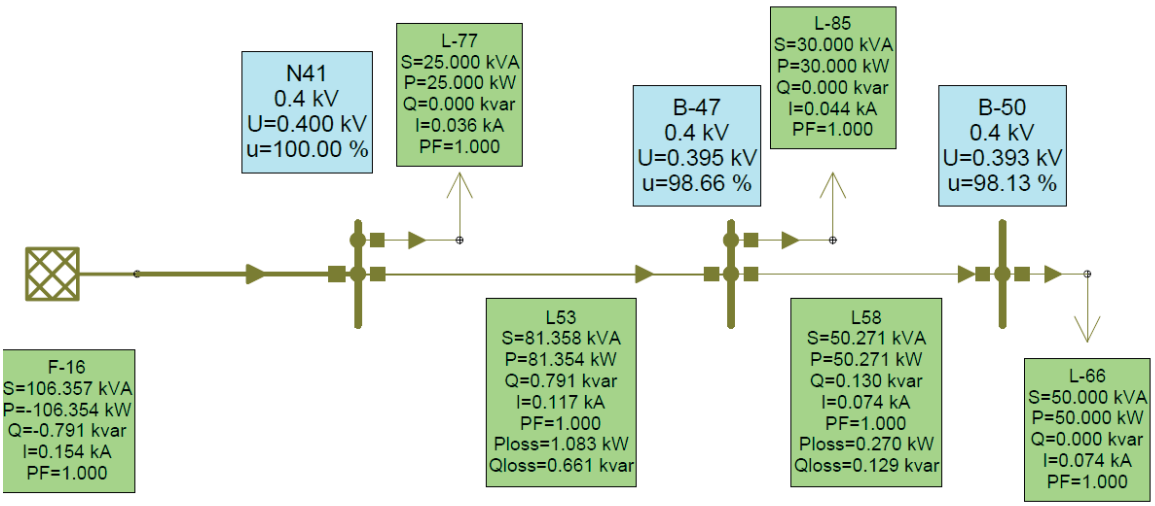
U=0.395 kV, u=98.66% – Тази точка е след L-77 и има лек спад на напрежението, което е 98.66% от номиналното напрежение. Това намаление е нормално за системи с натоварване и показва загубите поради съпротивлението в мрежата.

Точка L-85:

P=30 kW, Q=0 kvar, I=0.044 kA – Това е второ натоварване (зарядна станция или друг потребител) с активна мощност от 30 kW и без реактивна мощност. Както и при предишните точки, тази работа с коефициент на мощност 1 (PF=1) оптимизира използването на активна мощност.

Точка B-50:

U=0.393 kV, u=98.13% – Това е следваща точка в системата, където се наблюдава по-нататъшно намаление на напрежението до 98.13% от номиналното. Това напрежение е понижено спрямо




***Фиг. 2**.Мрежа ниско напрежение с присъединени зарядни станции*

началното, показвайки загубите в системата поради преноса на енергия.

Точка L-66:

P=50 kW, Q=0 kvar, I=0.074 kA – Тази точка представлява зарядна станция или натоварване с активна мощност от 50 kW и нулева реактивна мощност. В сравнение с предходните точки, тази станция е най-мощната и оказва по-голямо влияние върху натоварването на мрежата.

Допълнителни точки L53 и L58:

L53 и L58 представляват елементи от мрежата с мощност от 81.358 kVA и 50.271 kVA съответно. Те имат стойности на загуби на активна и реактивна мощност (Ploss и Qloss), които показват разходите при преноса на енергия. Например, при L53 активната загуба е 1.083 kW, а при L58 е 0.270 kW, което показва загубите при всяка точка.

Фигурата ясно демонстрира динамиката на напрежението и разпределението на мощността в различни точки на мрежата при свързване на зарядни станции и други потребители. Намалението на напрежението между точките показва ефекта на натоварването и загубите в мрежата. Коефициентът на мощност PF=1 за всички точки предполага, че системата е оптимизирана за активна мощност без реактивни компоненти, което подобрява ефективността на преноса и минимизира загубите.

За оразмеряване на основните параметри в изследваната мрежа са използвани следните математически изрази:

$$I_{i-j} = \frac{P_{i-j}}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi} \quad (1)$$

$$\Delta U = \frac{P_{i-j} l_{i-j} \left(r_0 + x_0 tg\varphi\right)}{U_n} \quad (2)$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} 100\% \quad (3)$$

Където:

- $I_{i-j}$ са токовете между възел $i$ и $j$;
- $P_{i-j}$ са мощмностите между $i$ и $j$;
- $l_{i-j}$ е дължината на линията между $i$ и $j$;
- $\Delta U$ пад на напрежение;
- $r_0$ и $x_0$ специфични съпротивления за km;
- $U_n$ номинално напрежение;
- $\Delta U\%$ допустим пад на напрежение.

В Таблица 1 и Таблица 2 са представени данни за изследваната мрежа.

Тази таблица съдържа данни за активната мощност (P), тока (I) и коефициента на мощност (cosφ) за различни точки от мрежата (L-66, L-77 и L-85). Тези параметри позволяват анализ на текущото натоварване в системата и показват как различните точки са засегнати от свързаните зарядни станции. Например, точката L-66, с активна мощност от 50 kW, има по-висок ток (I=72.17 A) в сравнение с точките L-77 и L-85. Това показва влиянието на мощността върху интензивността на тока в различни точки от мрежата, което е важно за оценка на възможни загуби и устойчивостта на мрежата.

*Таблица 1.*

| Име | P[kW] | I[A] | cosφ |
|---|---|---|---|
| L-66 | 50 | 72.17 | 1 |
| L-77 | 25 | 36.08 | 1 |
| L-85 | 30 | 43.3 | 1 |

Тази таблица представя информация за активната и реактивната мощност (P и Q) за различни елементи от мрежата, като например елемента F-16. Данните в таблицата (например P=0.106354 MW и Q=0.000791 MVar) дават по-ясна представа за разпределението на енергийните потоци и как те се влияят от наличието на зарядни станции. С тази информация е възможно да се направи по-дълбок анализ на реактивната мощност в системата, което е от съществено значение за минимизиране на загубите и повишаване на ефективността на мрежата.

*Таблица 2.*

| Име | P[MW] | Q[MVar] |
|---|---|---|
| F-16 | 0.106354 | 0.000791 |

Фигура 2 демонстрира динамиката на напрежението и разпределението на мощността в различни точки на мрежата при свързване на зарядни станции и други потребители. Намалението на напрежението между точките показва ефекта на натоварването и загубите в мрежата. Коефициентът на мощност PF=1 за всички точки предполага, че системата е оптимизирана за активна мощност без реактивни компоненти, което подобрява ефективността на преноса и минимизира загубите.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследването демонстрира значението на ефективното управление на енергийните потоци при присъединяване на зарядни станции за електрически превозни средства към съществуващата електрическа мрежа. Чрез проведените симулации и анализи беше установено, че различните конфигурации и мощности на зарядните станции оказват значително влияние върху напрежението, стабилността и ефективността на системата. По-конкретно, резултатите показват, че оптимизацията на времевите профили на зареждане, интелигентното управление и интеграцията на възобновяеми енергийни източници могат да намалят загубите, да повишат ефективността и да минимизират разходите.

Представените данни и фигури илюстрират как натоварванията в различни точки от мрежата създават загуби, които влияят на напрежението в системата. Намалението на напрежението в различните възли подчертава необходимостта от интелигентни решения за баланс на натоварването, които да поддържат мрежата в стабилно състояние при пикови моменти на зареждане.

Това изследване предоставя основа за бъдещи разработки и подобрения в управлението на зарядната инфраструктура за ЕПС и предлага практически насоки за интеграция на устойчиви решения в електроенергийните мрежи.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Национален фонд „Научни изследвания“, договор номер КП-06-Н57/7/16.11.2021 г.*

*Благодарности: Това изследване е извършено в рамките на проект „Моделиране, проектиране, управление и експлоатация на силови електронни устройства и системи с използване на изкуствен интелект”, КП-06-Н57/7/16.11.2021 г., Национален фонд „Научни изследвания”.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] https://www.se.com

[2] F. A. Ai Yaoyao, S. B. Li Xiangjun, T. C. Han Xiaojuan and F. D. Jia Xuecui, "Capacity Configuration and Economic Evaluation of Grid-Connected PV and Energy Storage Charging Station," *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Tianjin, China, 2018, pp. 3304-3308, doi: 10.1109/CICED.2018.8592051.

[3] Y. Zhang, T. Li, S. Wang, L. Jiang, W. Han and X. Diao, "Safety Assessment of Charging Stations Connected to the Power Grid Considering Distribution Network Constraints," *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Wuhan, China, 2020, pp. 2852-2857, doi: 10.1109/EI250167.2020.9347268.

[4] P. K. Kanth, P. Kumar Tiwari and N. Boda, "A Control Scheme for Grid Connected Solar Powered EV Charging Station With Hybrid Energy Storage System," *2023 IEEE Silchar Subsection Conference (SILCON)*, Silchar, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SILCON59133.2023.10405219.

[5] M. Fatnani, D. Naware and A. Mitra, "Design of Solar PV Based EV Charging Station with Optimized Battery Energy Storage System," *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and*

*Control (STPEC)*, Nagpur, India, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297719.

[6] A. Verma and B. Singh, "An Implementation of Renewable Energy Based Grid Interactive Charging Station," *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790455.

[7] M. Prasad, A. P. Singh and Y. Kumar, "Solar based grid integrated EV charging station with energy storage system," *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236129.

[8] G. Caneponi, F. Cazzato, M. Di Clerico, S. Cochi, M. C. Falvo and M. Manganelli, "EVs charging stations in active distribution grids: A real case-study of smart integration," *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Capri, Italy, 2016, pp. 1133-1137, doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7526035.

[9] P. Shukl and B. Singh, "Distributed Energy Resources Based EV Charging Station With Seamless Connection to Grid," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3, pp. 3826-3836, May-June 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3239583.

[10] M. Mounica, B. Rajpathak, M. L. Kolhe, S. K. Kotha and K. R. Naik, "Grid-Connected DC Electric Vehicle Charging Station Integrated with Solar PV," *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Hyderabad, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEFET61574.2024.10718268.

[11] R. Chakraborty and U. Das, "Planning of Renewable Integrated EV Charging Station in Radial Distribution Network," *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/RESEM57584.2023.10236174.

# РЕГУЛАТОРИ ЗА АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ИНДУСТРИАЛНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

**Тодор Неделчев**
*Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, Габрово, Република България,*
*Кореспондиращ автор: todnedh@abv.bg*

# REGULATORS FOR AUTOMATIC CONTROL OF INDUSTRIAL ELECTRICAL DRIVES

**Todor Nedelchev**
*Technical University of Gabrovo, Hadji Dimitar str. 4, Gabrovo, Republic of Bulgaria,*
*Corresponding author: todnedh@abv.bg*

**Abstract**
*The report presents the regulators of industrial electric drives designed to automatically maintain a predetermined state of the technological process expressed by the set value of the controlled parameter. The most common PID regulators are considered. Alternative PID controllers are presented: on-off control, Fuzzy Logic Control, Model predictive control, Linear-quadratic-Gaussian, Particle Swarm Optimization.*

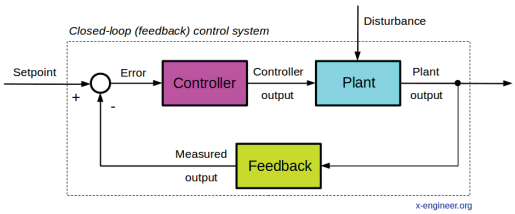
**Keywords:** PID control, FLC-Fuzzy Logic Control, MPC-Model predictive control, Linear-quadratic-Gaussian (LQG) control, Particle Swarm Optimization (PSO).

## ВЪВЕДЕНИЕ

С настъпване на индустриалната революция се появява и огромната Particle Swarm Optimization (PSO) необходимост от автоматично регулиране на производствените процеси и в частност задвижванията.

Основна цел на регулаторите за автоматично управление е да поддържат предварително определено състояние на технологичния процес, изразено чрез зададената стойност на управлявания параметър (параметри). Според закона за управление, регулаторите са от тип с непрекъснат закон на управление, импулсни или релейни. В преобладаващите случаи регулаторите за автоматично управление (РАУ) са системи с обратна връзка и управляващият сигнал е пропорционален на грешката, т.е на разликата между зададената и действителната стойност.

Разликата между зададената и действителната стойност възниква в резултат от смущенията и специфичните особености на регулирания процес. Ролята на РАУ е да елиминира тези смущения и да подържа необходимата зададена стойност. Начините по които регулаторът реагира се наричат закони за управление.




***Фиг. 1**. Блокова схема на РАУ*

Първите регулатори са механични с типичен представител центробежния регулатор за парни машини разработен от Джеймс Уат края на 18 и началото на 19 в.

През същия период се развиват редица нови инженерни системи като електродвигатели, хидравлични, пневматични и електронни усилватели.

Голямо предизвикателство се явява управление на корабите, а по късно и на самолетите.



Internal - INTERNAL use only

В началото на 20 век са изобретени ПИД (Пропорциално - Интегрално-Диференциални) регулаторите. Няма регистриран патент или изобретател на първия ПИД регулатор. Тогава са се разграничавали в отделни устройства. Затова инженерите са им давали различни имена. Например устройството за автоматично поддържане на курса, използвано на корабите, се нарича „автоматичен кормчия“. Най-зрелищната демонстрация на ПИД регулатор е представянето на автопилота на самолета[1]. На 18 юни 1914 г. на изложение във Франция двама пилоти са се качили на крилата на самолета си във въздуха, за да покажат, че самолетът може да лети без ръчно управление.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Първото теоретично обосноваване на съвременното ПИД регулиране е направил Николас Минорски 1922 г. в публикацията „Устойчивост на насочването на автоматично управляеми обекти” [2]. Тази статия бележи началото на едновековни практически реализации, теоретични изследвания и инженерни иновации, които доведоха до едно забележително постижение – понастоящем над 95% от базовите управляващи контури на индустриалната автоматика са с ПИД регулатори в автономно, централизирано или децентрализирано изпълнение.

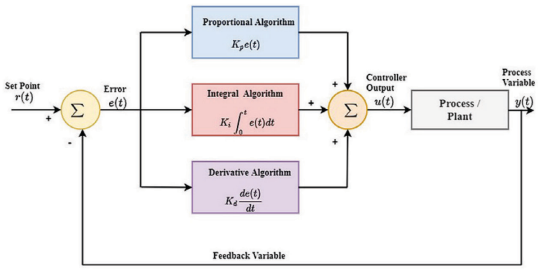
ПИД регулаторът работи по алгоритъм, който следи отклонението от зададената стойност на управлявания параметър получено в момента на отчитане текущата променлива процеса (грешката), натрупваните грешки за последния наблюдаван период и величината на сигнала за грешка. На тази основа се определя не само величината на въздействието (регулиращия сигнал), но и за колко време ще действа. В алгоритъма участват и коефициенти за трите компонента, които отразяват специфичността на процеса и ползваната апаратура.

Пропорционалният регулатор умножава грешката с коефициент пропорционален на отклонението, за да изчисли своя следващ управляващ сигнал.

При прецизиране работата на пропорционалния регулатор се стига до извода, че грешката би могла да бъде сведена до нула чрез автоматично установяване заданието на управляващия сигнал на изкуствено по-висока стойност**.** Така се стига до идеята към пропорционалната част да се добавя предишната грешка или сума от грешките, с което се постига едно изпреварващо коригиране на регулиращия сигнал. Това е математически идентично с интегрирането на грешката и добавяне на натрупаната сума към пропорционалната част на изхода на регулатора. В резултатът се получава пропорционално-интегрален (ПИ) регулатор. Той продължава да генерира непрекъснато регулиращ сигнал, докато грешката не бъде сведена до нула.

Диференциалната част на регулаторът реагира на скорост на изменение на грешката. Намалената скорост на въздействие, осигурена от диференциалната част, намалява вероятността от пререгулиране.

Блоковата схема на ПИД регулатора е представена на фиг. 2.




***Фиг. 2****. ПИД регулатор блокова схема*

За да изчисли големината на управляващият сигнал, ПИД алгоритъмът използва три управляващи члена – пропорционален, интегрален и диференциален. Всеки компонент се умножава по усилването, което се използва за коригиране на теглото на съответния член в уравнението. По този начин може да се настрои ПИД регулатора, за да управлява на определен процес.

Математическият израз на управляващия сигнал е:

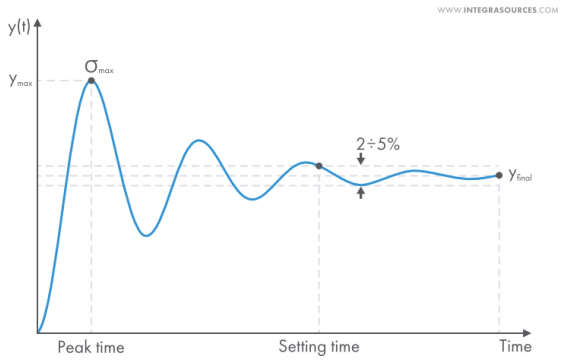
$$y(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$$e(t) = SP(t) - PV(t)\ , \quad (2)$$

където: *SP(t)* е зададената стойност за управление на процеса, *PV(t)* е действителната стойност т.е. *e(t)* е грешката при управлението [5].

За определяне на ефективността на регулатора са въведени критерии характеризиращи преходния процес (фиг. 3.):

- време за установяване - времето за което управляващият сигнал се променя в малки граници $y(f) \pm (2 \div 3)\%$ и променливата на процеса е в стабилно състояние;




***Фиг. 3**. Характеристика на преходния процес*

- управляващ сигнал y(t) с който се управлява процеса;

- пререгулиране σ е процентното съотношение на максималното отклонение на управляващия сигнал ($\Delta y_{\max}$) към нейната стационарна стойност $y(f)$ в посока, обратна на първоначалното й отклонение.

$$\sigma_{max} = \frac{y_{max} - y_f}{y} 100 = \frac{\Delta y_{max}}{y_f} 100 \quad [\%] \quad (3)$$

- стационарна грешка е разликата между желаната стойност на процеса (зададена точка) и действителната променлива на процеса, след като се стабилизира [6].

Най-често използваните структури за ПИД регулатори са паралелни и последователни (сериен тип):

- *Паралелен тип:* В тази структура, пропорционалната П, интегралната И и диференциалната Д части възникват в отделни членове на уравнението, и с комбинирания им ефект се получава сумата. в този тип всеки параметър е независим от другите и съответният регулиращ закон е представен като [4]:

$$y(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)\, dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

където: пропорционалното усилване е $K_p = K_c$, интегрално време е $T_i$ и $k_i = \frac{K_c}{T_i}$, диференциалното време е $T_d$ и $k_d = K_c T_d$ .

- *Сериен тип:* Серийното или интерактивно уравнение произлиза главно от характеристиките на аналоговата електронна верига. Точно като идеално ПИД уравнение промяната в $K_c$ въздейства върху всичките три действия, но както производните, така и интегралните константи оказват влияние върху пропорционалното действие. Този тип има следния закон за управление:

$$e_1(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$
$$w(t) = K_c \left( e_1(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt \right) \quad (5)$$

В зависимост от конкретния регулиран обект се задава нула на пропорционалния, интегралния или диференциалния коефициент усилване, за да се елиминира съответния член от уравнението. Тези типове ПИД регулатори са известни като модифицирани (таблица 1).

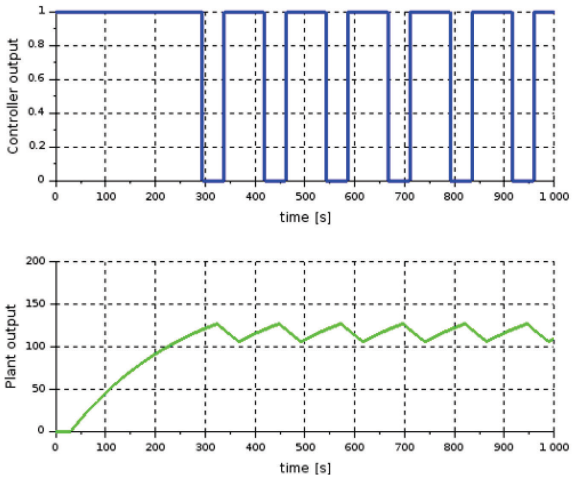
*Таблица 1*

| | П | И | Д |
|---|---|---|---|
| ПИД регулатор | + | + | + |
| П регулатор | + | - | - |
| И регулатор | - | + | - |
| Д регулатор | - | - | + |
| ПИ регулатор | + | + | - |
| ПД регулатор | + | - | + |

***Алтернативни ПИД регулатори***

*РАУ с включено и изключено състояние (on-off control)*

Този вид регулатори подържат само две състояния на управляващия изход – включено (1) когато управляваната променлива не е достигнала зададената стойност (грешката е положителна) и изключено (0) когато грешката е нула или отрицателна – фиг. 4. Регулаторите са евтини и с ниско ниво на сложност, но предлагат ниска точност. Те често не могат да поддържат променливата на процеса на определено ниво поради инерция. Параметърът ще варира над и под зададената точка през цялото време. Подходящи за системи, където не се изисква прецизен контрол.




***Фиг. 4***. *РАУ включено изключено*

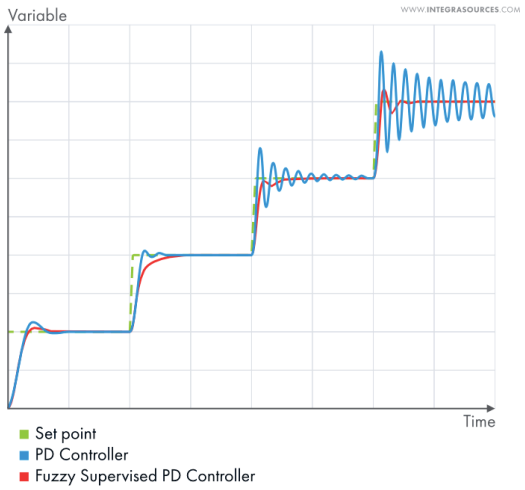
В повечето регулатори с обратна връзка, системата не може да реагира мигновено на смущение и отнема време докато започне промяна на контролирания параметър. Това закъснение е известно като мъртво време.

*РАУ с размита логика*

Управлението с размита логика (Fuzzy logic control FLC) [3] е компютърна цифрова технология, състояща се от теория на размитите множества, размити езикови променливи и размита логика.

Терминът размита логика води началото си от работата и теорията, развита от Лотфи Заде.[6] През 1965 г. той предлага теорията на размитите множества и по-късно установява размитата логика на базата на тази теория.

Системата за размито управление е базирана на размита логика, математическа система, която анализира аналогови входни стойности по отношение на логически променливи, приемащи непрекъснати стойности между 0 и 1, за разлика от класическата цифрова логика, която работи с дискретни стойности на 1 или 0 (съответно вярно или невярно) – фиг. 5.




***Фиг. 5***. *РАУ с размита логика*

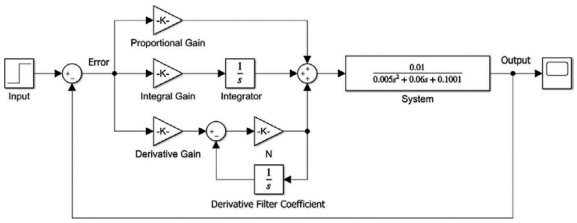
На практика повечето регулатори за автоматично управление с размита логика са ПИД регулатори, модифицирани с размита логика, за да планират усилването. Променливите усилвания работят по-добре за нелинейни процеси. Това решение е подходящо за сложни системи, които имат много несигурност или променливост.

Приложението на FLC се простира от контрол на промишлени процеси до биомедицински инструменти и ценни книжа. В сравнение с конвенционалните системи за управление, РАУ с размита логика се използва основно при сложни недобре дефинирани процеси.

Едно от приложенията на РАУ с ПИД регулатори е свързано с процесите при системите за електрозадвижване. Постояннотоковите (DC) двигатели имат много добри характеристики при работа с различни скорости, достъпно и лесно управление. За това тези двигателите имат

много голямо приложение в инструментални машини, роботизирани системи и много машини в текстилната промишленост. За автоматичното им управление се използват основно ПИД регулатори.

Широкото използване на ПИД регулаторите за управление на DC двигатели довежда до необходимост от прецизна настройка при сложни технологични процеси. Алгоритъмът за оптимизиране на обработката на множество от действителни и очаквани състояния на управлявания процес Particle Swarm Optimization (PSO) е предложен от Kennedy и Eberhart през 1995 г. [7]. Всеки от коефициентите на ПИД регулатора достига оптимална стойност с използване ефекта на груповата памет. Блоковата схема на ПИД регулатор с PSO оптимизация е показана на фиг. 6.




***Фиг. 6**. ПИД регулатор за DC двигател с PSO*

Необходимо е първо да се получи, предавателна функция на DC двигателя с която се управлява ПИД регулатора, чиито параметри са оптимизирани с PSO алгоритъм. Много добър ефект върху процеса има промяна на стойността на коефициента N противошумовия филтър.

В PSO алгоритъма началните коефициенти на ПИД регулатора са генерирани произволно в съответното с управлявания процес пространство, като най-често началните скорости се приемат за нула. След това се изчисляват стойности на годност на произволно генерирани позиции използвайки целевата функция на процеса. Необходимите скорости за регулирания процес се актуализират с помощта на тези позиции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Най-широко приложение при изграждане на регулатори за автоматично управление на постояннотокови двигатели, безчеткови двигатели, стъпкови двигатели и серво двигатели намират ПИД регулаторите. Това е затворена система с обратна връзка, която може да управлява системата въз основа на измерването на променливата на технологичния процес.

ПИД регулаторите намират основно приложение управление в: производството; химическата и фармацевтична промишленост; авиационна промишленост; роботика; преобразуватели на мощност; фотоволтаични системи.

Основни предимства на ПИД регулаторите са:

- осигуряване на по-голяма точност от по-простите регулатори без обратна връзка;

- енергийно по-ефективен;

- не изисква тежък хардуер, така че устройствата са предимно евтини;

- може да бъде реализиран като аналогова електроника, цифрова електроника и механични решения;

- компонентите на регулатора (коефициентите на отделните съставящи) П, И и Д могат да се настройват интуитивно, чрез проба и грешка;

- удължава живота на задвижващите устройства;

- реагира на неизмерени смущения по-добре поради наличието на пропорционални и производни компоненти.

Ситуации, при които ПИД регулатора не е най-добрият избор:

- ако не е настроен правилно, може да направи системата нестабилна и дори да я повреди;

- усилва високочестотния шумов компонент на сигнала за грешка на управляващия изход, което дестабилизира системата

- не се справят добре при управление на повече от един параметър.

Оптималните ПИД регулатори включват широк спектър от типове: размита логика (FLC), моделно предсказуемо управление (MPC), линейно-квадратично-гаусови (LQG), H-безкрайни контролери, PSO оптимизация и много нелинейни оптимални контролери, включително контролери за плъзгащ се режим според някои специалисти.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

**ЛИТЕРАТУРА**

[1] Hadjiski M., S. Koynov 100 Years of Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller, Automation and informatics, pp. 5-11, 3/2022.

[2] Minorsky N., Directional Stability of Automatically Steered Bodies. Journal of the American Society of Naval Engineers, 34, 1922, No. 2, 280-309.

[3] Hu, B., G. K. I. Mann, R. G. Gosine. New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers, IEE Transaction on Fuzzy Systems, vol. 7, №5, 1999, pp. 512-539.

[4] Zhuang, M., D. P. Atherton Automatic tuning of optimum PID controllers, Proceedings of Inst. Elect Eng.-Control Theory Appl., vol. 140, 1993, pp. 216-223.

[5] Rakesh P., Borase D., K. Maghade, S. Y. Sondkar, S. N. Pawar, A review of PID control, tuning methods and applications, International Journal of Dynamics and Control, https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4

**[6]** Yuldashev T., A. Solovev**,** Mathematical Representations of PID Controller Gains, https://www.integrasources.com/blog/pid-controller-gains-mathematical-representations/

[7] Yıldırım S., M. Bingol, Tuning PID controller parameters of the DC motor with PSO algorithm, International Review of Applied Sciences and Engineering, 13.12.2023.

# АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА ИЗЧИСЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИ МАТЕРИАЛИ

**Гергана Миронова**

*Технически университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово, България,*
*Кореспондиращ автор: g.mironova@tugab.bg*

# ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING ELECTRICAL PARAMETERS ON SEMICONDUCTOR MATERIALS

**Gergana Mironova**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*
*Corresponding author: g.mironova@tugab.bg*

**Abstract**
*The Van der Pauw method is a universal and accurate tool for measuring the electrical parameters of various materials, including resistivity and charge carrier mobility. This article considers the application of the method to the characterization of semiconductors, thin films and nanomaterials, which find wide application in electronics and optoelectronics. The technique is used to determine important parameters such as the concentration of charge carriers and their mobility in the context of the development of Hall sensors, semiconductor devices and spin electronic components. In addition, the method allows measuring the electrical properties of exotic materials such as quantum structures and high-temperature superconductors, which opens up new opportunities for innovation in the field of new technologies. Compared to other measurement techniques, the advantages of the method are presented, such as the accuracy and the possibility of use in different shapes and sizes of materials. The results of the study underline the key role of the Van der Pauw method in modern materials science and electronics, as well as in the field of renewable energy systems.*

**Keywords:** Van der Pauw, semiconductors, electrical parameters, Hall element, sensorics.

## ВЪВЕДЕНИЕ

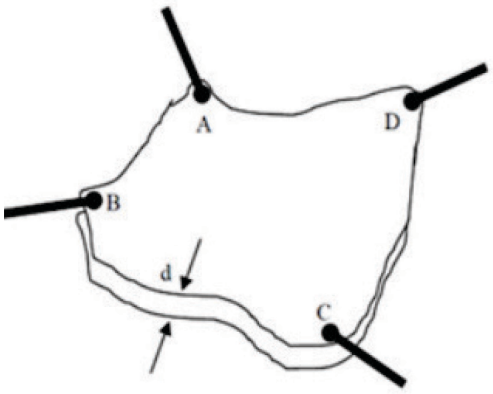
Настоящата статия има за цел да изследва и сравни различните математически методи за определяне на параметрите на елемент на Хол, като акцентира върху техните предимства и недостатъци. Подобен анализ е необходим, тъй като оптималният избор на метод не само повишава точността на измерванията, но и намалява времето и сложността на процеса на калибриране и настройка. По този начин, изследването предоставя основа за по-добро разбиране и приложение на тези методи в различни области на електрониката и автоматизацията.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Анализът и определянето на параметрите на електронните компоненти са от съществено значение за създаването на прецизни и ефективни електронни схеми и устройства. Един от важните елементи, използвани в съвременната електроника, е елементът на Хол, който се отличава със своята способност да преобразува магнитни полета в електрически сигнали. Това го прави изключително подходящ за различни приложения като измерване на магнитни полета, определяне на позиция и скорост, както и за сензорни системи в автомобилната и индустриалната електроника. За да се гарантира точността и

надеждността на елементите на Хол, е необходимо да се определят техните основни параметри, като чувствителност, линейност, температурна стабилност и честотна характеристика. В тази връзка, използването на подходящи математически методи за анализ на тези параметри е от първостепенно значение. Съществуват различни математически подходи, като методи на най-малките квадрати, регресионен анализ и статистически оценки, които могат да бъдат използвани за точното определяне на параметрите на елементите на Хол[1]. Изборът на подходящ метод зависи от редица фактори, включително наличните експериментални данни, условията на работа и изискваната точност[2].

Принципът на методът на Ван дер Пау се основава на измерване на съпротивленията в тънък плосък образец с четири контакта, разположени по краищата на образеца[3].

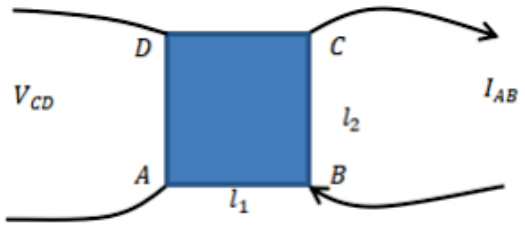



***Фиг. 1**. Прототип на елемент на Хол*

Прототипът трябва да бъде:

1. Плосък и тънък - дебелината му трябва да бъде малка спрямо другите размери.
2. Без дупки - образецът трябва да е без дупки или разрези.
3. Със симетрично разположени контакти - четирите контакта трябва да са разположени на периметъра на образеца, като не е задължително да бъдат на еднакво разстояние един от друг.

За осъществяването на методологията е необходимо да бъдат измерени напрежението и тока през противоположни двойки контакти - едното измерване е на тока между два противоположни контакта (например A и B), като се измерва напрежението между другите два контакта (C и D).




***Фиг. 2**. Симетрично разположени контакти*

За прецизно определяне на специфичното съпротивление ρ на веществото е необходимо да се извърши второ измерване на електрическите параметри на пластината [4,5]. При това измерване токът трябва да преминава през алтернативна двойка противоположни контакти (например B и C), докато напрежението се измерва между останалите два контакта (D и A)

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln(2)} . \frac{R1+R2}{2} . f\left(\frac{R1}{R2}\right) \qquad (1)$$

Където:
d – дебелината на образеца
$R_1 = R_{AB, CD}$
$R_2 = R_{BC, DA}$
$f\left(\frac{R1}{R2}\right)$ – корекционна функция, зависеща от отношението на двете съпротивления.

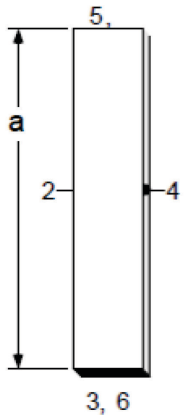
Корекционната функция f(x) може да се определи числено или да се вземе от предварително изготвени таблици.

Подходът на Ван дер Пау предлага както предимства, така и ограничения при изчисляването на параметри на Хол елементи. Методът позволява прецизно измерване на съпротивлението на материали дори когато контактите не са разположени симетрично и е приложим за материали с произволна форма, стига да са спазени изискванията за разположение на контактите и дебелина.

Основните ограничения на този метод включват сложността на точното измерване на напрежението и тока, които трябва да бъдат прецизно определени, за да се избегнат грешки. Неправилното разположение на контактите може да доведе до значителни отклонения в измерванията, което влияе на изчисленията на съпротивлението [6]. При измерване на специфичното съпротивление по метода на Ван дер Пау е важно да се обърне внимание на дебелината на материала, която трябва да бъде възможно най-тънка, за да се намали влиянието на дебелината върху резултата от измерването. Същевременно, при измерване на еквивалентното съпротивление, е препоръчително да се увеличи контактната площ, за да се намали влиянието на реалния размер на контактите върху резултата. Съпротивлението на проводниците също трябва да се вземе предвид при изчисляването на специфичното съпротивление на материала, което ще подобри точността на измерването по метода на Ван дер Пау. Въпреки това, методът остава основополагащ за разработването и характеризирането на полупроводникови материали, използвани в различни електронни устройства, включително Хол сензори.

Методът на Ван дер Пау е само един от подходите за изчисляване на електрическите параметри на Хол елементи. Познаването на различни техники дава възможност за избор на оптимален метод за изчисление на характеристиките, съобразен със специфичните свойства на пластините, изискваната точност и наличното оборудване.

Метод на правоъгълната лента – Bar method – В този метод образецът има правоъгълна форма и четири контакта се разполагат на краищата му. За разлика от метода на Ван дер Пау, при който формата може да бъде произволна, тук контактите са разположени точно на противоположните краища на правоъгълния образец.




***Фиг. 3**. Разположение на контактите на правоъгълен образец*

При използването на метода на правоъгълната лента (Bar Method) за определяне на напрежението на Хол, формулата за Хол напрежението $U_H$ е:

$$U_H = \frac{I \,.\, B}{n \,.q.d}\,, \qquad (2)$$

Където:
I – токът преминаващ през лентата,
B – магнитната индукция (магнитното поле),
n - концентрацията на носители на заряд (брой на заряди на единица обем),
q - зарядът на носителите (за електрони $q = 1{,}6 \times 10^{-19}$,
d - дебелината на правоъгълната лента

Формула е валидна при условие, че дебелината d е значително по-малка от дължината и ширината на лентата, което осигурява равномерно разпределение на тока и минимизира допълнителните ефекти от краищата.

Методът е лесноосъществим за изпълнение и анализ. Позволява директно измерване на напрежението и съпротивлението. Точността на получените данни зависи от геометрията на образеца, което може да е предизвикателство при неиделни или повредени образци.

При използването на метода на кръговия диск (Circular Disc Method) [7] се използва кръгъл образец от изследвания материал, върху който са разположени четири контакта, равномерно разпределени по периферията на диска.

Измерванията на ефекта на Хол се осъществяват чрез подаване на ток между два от контактите и измерване на напрежението на Хол между останалите два. Този подход осигурява висока симетрия на измерванията, което повишава точността на резултатите при изчисленията. Основните недостатъци на метода се състоят в сложната подготовка на кръговия образец и значителното влияние дори на минимални отклонения в разположението на контактите върху точността на резултатите

Специфичното съпротивление в този метод се изразява чрез:

$$\rho = \frac{2\,\pi\,t}{\ln(2)}\,.Rs \qquad (3)$$

Където:

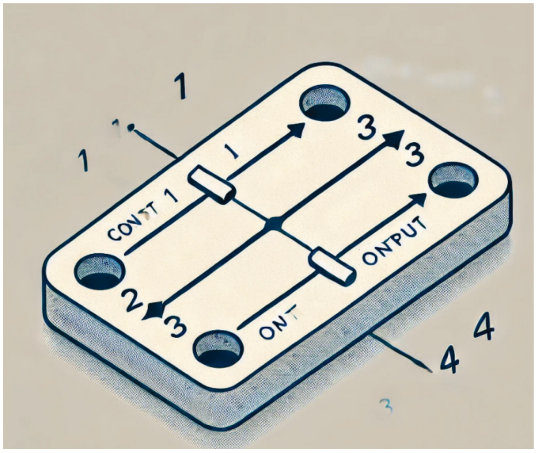
t – дебелината на диска

$R_s$ - измереното съпротивление на образеца (sheet resistance)

ln (2) = 0.693

Тази формула е приложима, когато дискът е достатъчно тънък и измерванията са проведени при равномерно магнитно поле и приложен ток.

Методът на многоконтактните структури (Multi-Contact Structures) се използва за прецизно измерване на Хол напрежението и специфичното съпротивление, като се използват повече от четири контакта върху Хол елемента[8,9]. Това позволява по-точно измерване и по-малко влияние от контактните съпротивления и геометричните ефекти. Този метод често се използва за изследване на нееднородности в материала. Позволява се определяне на разпределението на подвижността на токоносителите и тяхната концентрация по повърхността на образеца, но интерпретацията на резултатите е сложна и са необходими множество измервания.




***Фиг. 4**. Разположение на контактите на многоконтактна структура*

На изводи 1 и 3 се подават противоположни токове за осигуряване на равномерно разпределение на тока през елемента. Измерването на напрежението на Хол се извършва между друга двойка контакти (напр. 2 и 4), които са перпендикулярни на линията на тока. Тази многоконтактна структура намалява влиянието на контактните съпротивления и помага за по-точни измервания, като същевременно подобрява надеждността на данните за Хол напрежението и специфичното съпротивление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всеки от тези методи има своите предимства и недостатъци, и изборът на подходящ метод зависи от конкретния материал, геометрията на образеца, наличното оборудване и необходимата точност на измерванията.

*Благодарности:* The studies were carried out with the financial support of the CoC "Quasar" - project №BG05M2OP001-1.002-0006

## ЛИТЕРАТУРА

[1] S.V. Lozanova, Ch.S. Roumenin, A three-point-probe method for measuring resistivity and the Hall coefficient using Hall devices with minimal design complexity, Measurement, Volume 43, Issue 3, 2010, Pages 385-391, ISSN 0263-2241,

https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.12.006
[2] B. I. Evstatiev, D. V. Kiriakov and I. H. Beloev, "A different approach for measurement of hysteresis losses in magnetic cores," *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Constanta, Romania, 2017, pp. 138-140, doi: 10.1109/SIITME.2017.8259876
[3] Jeffrey Lindemuth, Hall Effect Measurement Handbook
[4] Oliveira, F.S., Cipriano, R.B., da Silva, F.T. et al. Simple analytical method for determining electrical resistivity and sheet resistance using the van der Pauw procedure. Sci Rep 10, 16379 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-72097-1
[5] Yihui Geng, Mathematical analysis of Van der Pauw's method for measuring resistivity, IOP Publishing, Volume 2321, 012027, https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2321/1/012027
[6] Rasool Baghbani; Masoomeh Ashoorirad, Optimization of the Van Der Pauw Method for Measuring the Electrical Properties Spectrum of Biological Solutions, EEE Transactions on Instrumentation and Measurement ( Volume: 71), DOI:
[7] Dorel Homentcovschi, Romeo Bercia, Bruce T. Murray, Analysis of a Hall-Corbino disk plate having a point current source at the center, Solid-State Electronics, Volume 186, 2021, 108179, ISSN 0038-1101, 10.1109/TIM.2022.3156210
[8] Changdong Chen; Sujuan Hu; Zihao Chen; Yue Shen; Chenning Liu; Qian Wu, IEEE Electron Device Letters ( Volume: 41), DOI: 10.1109/LED.2019.2959832
[9] Hector Castro; Jose Galvis; Sonia Castro, Automated Setup for Van Der Pauw Hall Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement ( Volume: 60), DOI: 10.1109/TIM.2010.2048961

# РЕАЛИЗИРАНЕ НА СИСТЕМА И ПРОГРАМНО ОБЕЗПЕЧАВАНЕ ЗА ЛАЗЕРНО ЗАКАЛЯВАНЕ НА ПОВЪРХНИНИ

**Продан Проданов*, Борислав Стоянов, Ивайло Радев**

*Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, Габрово, Р. България*
**кореспондиращ автор: pprodanov@tugab.bg*

# SYSTEM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR LASER SURFACE HARDENING

**Prodan Prodanov*, Borislav Stoyanov, Ivajlo Radev**

*Technical University of Gabrovo, Hadji Dimiter str. 4, Gabrovo, Republic of Bulgaria*
**corresponding author: pprodanov@tugab.bg*

**Abstract**

*The implementation of surface treatment systems involves the use of a precision positioning system, most often multi-axis, based on an industrial robot or coordinate machine. A laser head with a certain power for the needs of the technological process is used as a processing tool, and very often these two systems are combined with a third one – measuring system for feedback and control. Very often a pyrometer suitable for non-contact measurement of surface temperature is used as a measuring system. This paper presents a solution combining positioning, processing and measurement systems based on the above mentioned modules.*

**Keywords:** industrial robot; laser hardening, laser scanner head, pyrometer, robot programing.

## ВЪВЕДЕНИЕ

За реализация на технологичния процес на лазерно закаляване е необходимо съгласуване работата на три основни модула, които го осигуряват – система за позициониране; система за лазерно генериране (лазерен източник); както и система за измерване и регулиране на температурата на процеса – индустриален пирометър. Обединяването им в една структура, триъгълник на управление, обхваща взаимните връзки и предаване на информация между всеки един от тях. За осъществяване на това е необходимо съгласуване на сигнали, съставяне на алгоритми за работа, както и създаване на потребителски програми с цел задаване на движение, на изпълнителните звена, така че да се постигне точно съгласуване с формата на обработвания детайл. Цел на настоящото изследване е разработването на управляващи програми и съгласуване на функционални блокове в трите модула, участващи в индустриална система за повърхностна термична обработка на повърхнини.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При изграждането на такъв тип система са заложени следните модули:

- индустриален робот тип FANUC M20iD [1] с шест степени на свобода, съответно шест задвижващи оси със сер-

водвигатели, с допълнение към него – ротационен едноосен модул [2];

- лазерен захранващ източник, тип LDM4000-100 с номинална изходяща мощност 4kW [3], в комбинация с лазерна обработваща глава тип OTZ-5 VR [4], снабдена с варио-оптика с възможност за регулиране на размерите на лазерното петно в диапазона от (5,5x8) mm до (22x44) mm;

- оптичен пирометър, тип LDC01 Mergenthaler [5], двуцветен, интегриран в лазерната глава.

Съгласуването на работата на тези три модула се извършва в няколко стъпки, като могат да бъдат обобщени до следното: създаване на потребителски програми за движение на индустриалния робот; съгласуване на входно-изходните сигнали между индустриалния робот, модула за управление на лазерния захранващ източник (управление на изходящата мощност); съгласуване на управляващите сигнали свързани с ширината на петното на лазерния източник.

Първата стъпка е синтезирането на управляващи програми за индустриалния робот, които да включват пълната функционалност по отношение на управлението и конкретизиране според формата на закалявания детайл. На фиг. 1 и фиг. 2 са показани синтезираните програми, които се използват за работа при закаляване на области от детайли с равнинна или цилиндрична повърхнина. Програмата съдържа подпрограми за контрол на движението на робота, по зададени координати, линейна скорост, а на лазерния източник – неговото пускане, спиране, проверка на блокировките, задаване на ширината на лазерното петно.

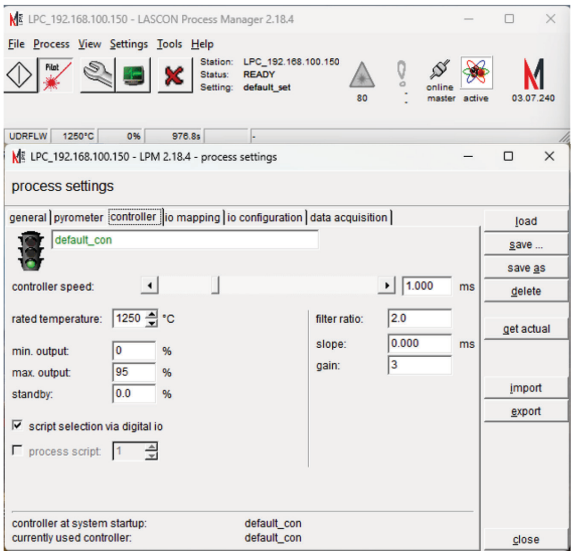
```
/PROG  AAA_TABLE_PARTS
LINE_COUNT    = 36;
MEMORY_SIZE= 1392;
PROTECT                = READ_WRITE;
TCD:  STACK_SIZE       = 0,
      TASK_PRIORITY    = 50,
      TIME_SLICE       = 0,
      BUSY_LAMP_OFF    = 0,
      ABORT_REQUEST    = 0,
      PAUSE_REQUEST    = 0;
DEFAULT_GROUP          = 1,1,*,*,*;
CONTROL_CODE           = 00000000
00000000;
LOCAL_REGISTERS        = 0,0,0;
/MN
   1:  UTOOL_NUM=2 ;
   2:  UFRAME_NUM=0 ;
   3:  LBL[1:START] ;
   4:  OVERRIDE=R[3:Robot SPEED] ;
   5:  !---Initialization--- ;
   6:  CALL CHECK_AUTO_MODE    ;
   7:  CALL AA_LASER_OFF    ;
   8:  CALL CALC_TBL_START    ;
   9:  CALL CALC_TBL_END    ;
  10:  !---HOME POS--- ;
  11:J PR[3:HOME 3 test] 10% CNT10    ;
  12:  !Speed check >2mm/s ;
  13:  LBL[2:Speed check] ;
  14:  IF (R[22:Speed mm/s]>2) THEN ;
  15:  ELSE ;
  16:  MESSAGE[VERY LOW SPEED !] ;
  17:  JMP LBL[2] ;
  18:  ENDIF ;
  19:  !LASER START Position! ;
  20:J PR[3:HOME 3 test] 30% CNT10    ;
  21:L PR[60:Calc Table ORG] 100mm/sec FINE
;
  22:  !Laser ON Signals ;
  23:  DO[7:OFF:Error RESET]=PULSE,1.0sec ;
  24:  DO[4:OFF:Laser Treshold]=ON ;
  25:  DO[5:OFF:Shutter OPEN]=ON ;
  26:  WAIT   1.00(sec) ;
  27:  LBL[3:Laser ON Failure] ;
  28:  !---Laser ON--- ;
  29:  IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=ON),CALL AA_LASER_ON ;
  30:  IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=OFF),JMP LBL[3] ;
  31:L PR[62:Calc Table END] R[22:Speed
mm/s]mm/sec FINE    ;
  32:  !---Laser OFF--- ;
  33:  CALL AA_LASER_OFF    ;
  34:J PR[3:HOME 3 test] 20% CNT10    ;
  35:  PAUSE ;
  36:  JMP LBL[1] ;
/POS
/END
```

***Фиг. 1**. Управляваща програма за следене на равнинна повърхнина*

```
/PROG  AAA_CHUCK_PARTS
LINE_COUNT      = 44;
MEMORY_SIZE   = 1528;
PROTECT                    = READ_WRITE;
TCD:  STACK_SIZE           = 0,
      TASK_PRIORITY        = 50,
      TIME_SLICE   = 0,
      BUSY_LAMP_OFF        = 0,
      ABORT_REQUEST        = 0,
      PAUSE_REQUEST        = 0;
DEFAULT_GROUP              = 1,1,*,*,*;
CONTROL_CODE= 00000000 00000000;
LOCAL_REGISTERS            = 0,0,0;
   1:  UTOOL_NUM=2 ;
   2:  UFRAME_NUM=0 ;
   3:  LBL[1:START] ;
   4:  OVERRIDE=R[3:Robot SPEED] ;
   5:  !---Initialization--- ;
   6:  CALL CHECK_AUTO_MODE    ;
   7:  CALL AA_LASER_OFF    ;
   8:  CALL CALC_CHK_START    ;
   9:  CALL CALC_CHK_END    ;
  10:  CALL CALC_PERIPHERIAL_SPEED    ;
  11:  !---HOME POS--- ;
  12:J PR[3:HOME 3 test] 10% CNT10    ;
  13:  CALL AA_SPEED_CHECK    ;
:  !LASER START Position! ;
  15:J PR[3:HOME 3 test] 30% CNT10    ;
  16:L PR[61:Calc Chuck ORG] 100mm/sec FINE    ;
  17:  !Laser ON Signals ;
  18:  DO[7:OFF:Error RESET]=PULSE,1.0sec ;
  19:  DO[4:OFF:Laser Treshold]=ON ;
  20:  DO[5:OFF:Shutter OPEN]=ON ;
  21:  WAIT   1.00(sec) ;
  22:  LBL[3:Laser ON Failure] ;
  23:  !---Laser ON--- ;
  24:  IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=ON),CALL AA_LASER_ON ;
  25:  IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=OFF),JMP LBL[3] ;
  26:  SELECT R[43:Motion Selection]=R[40:Posit
Linear],JMP LBL[100] ;
  27:        =R[41:Posit Curcle],JMP LBL[101] ;
  28:        =R[42:Posit Spiral],JMP LBL[102] ;
  29:  LBL[100:LINEAR] ;
  30:L PR[63:Calc Chk END Lin] R[22:Speed
mm/s]mm/sec FINE    ;
  31:  JMP LBL[200] ;
  32:  LBL[101:CURCLE] ;
  33:L PR[64:Calc Chk END Cur] R[23:Speed
sec]mm/sec FINE    ;
  34:  IF(DO[13:OFF:Positioner MOVE]=OFF)THEN ;
  35:  JMP LBL[200] ;
  36:  ENDIF ;
  37:  LBL[102:SPIRAL] ;
  38:  !N/A ;
  39:  LBL[200:Laser OFF] ;
  40:  !---Laser OFF--- ;
  41:  CALL AA_LASER_OFF    ;
  42:J PR[3:HOME 3 test] 20% CNT10    ;
  43:  PAUSE ;
  44:  JMP LBL[1] ;
/POS
/END
```

***Фиг. 2**. Управляваща програма за следене на цилиндрична повърхнина*

За управление на технологичния процес на закаляване се използва софтуерния продукт Lascon Process Manager. Приложението предлага интерфейс за настройване на параметрите на процеса закаляване - работната температура на закаляване на детайла, бързодействието при процеса, дълбочина на обратната връзка, събирането и обработването на данни за процеса, както и пускането на така наречения пилотен лазер – лазерен лъч, безопасен за оператор, чрез който може да се наблюдава ширината на лазерното петно и неговото местоположение – фиг. 3.

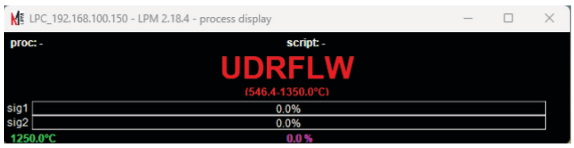



***Фиг. 3**. Основен изглед на софтуер Lascon Process Manager за настройка на параметрите на оптичния пирометър*

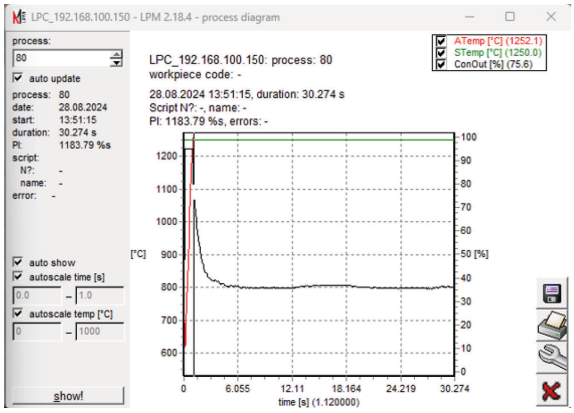
Изпълнението на процеса относно регулирането и задаването на температурата е показано на фиг. 4, като могат да се наблюдават двата сигнала за грешки на двуцветния пирометър, както и текущата стойност на работната температура и времето за протичане на процеса.

Софтуерния продукт Lascon Process Manager позволява запис на технологичния процес по време, зададена и действителна температура и мощност на лазерния източник. Освен това данните могат да се използват в графичен и табличен вид – фиг. 5. Това позволява анализ в последствие на процеса, необходимата температура и мощност при закаля-

ване на различен по геометрия и материал детайли.

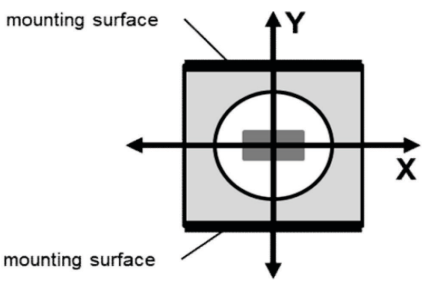



***Фиг. 4**. Прозорец за данни в реално време по време на технологичния процес*



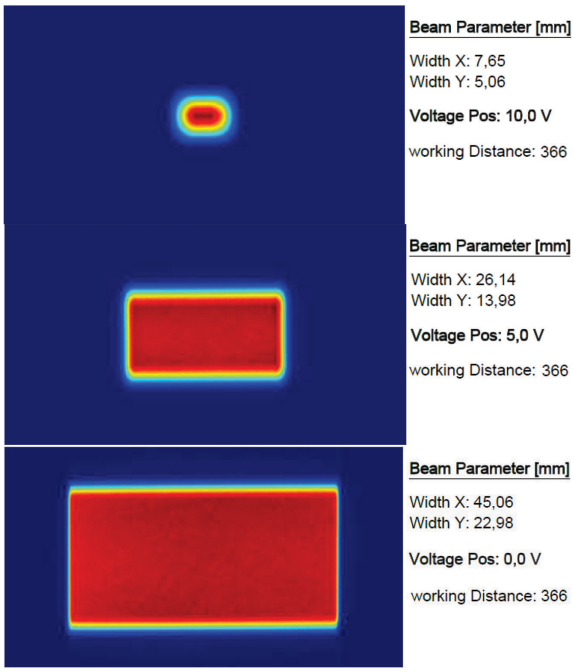

***Фиг. 5**. Диаграма на технологичния процес по време, мощност и температура*

Третата стъпка от основните настройки и свързване е възможността за автоматично софтуерно задаване на ширината на петното на лазерния лъч. От фирмата производител са дефинирали такива данни за управление с аналогово напрежение в диапазона от 0 до 10V по двете оси X и Y, като съответно изменението на петното ще бъде в границите: по X – (8 ÷ 43) mm, а по Y – (5,5 – 22)mm. На фиг. 6 е показана площта на изменение на лазерния сноп в двете направление, като винаги се измества спрямо центъра на лазерната глава.




***Фиг. 6**. Разположение на петното на лазерния лъч спрямо лазерната глава*

Предоставеното от производителя калибриране е показано на фиг. 7, при 0V, 5V и 10V входно напрежение, променяйки площта на лазерното петно.




***Фиг. 7**. Големина на петното при различни входни управляващи напрежения*

Съгласуването на работата на лазерната глава с индустриалния робот по отношение на аналоговото входно напрежение за задаване на петното на лазерния лъч става посредством аналогови изходи от контролера на индустриалния робот. Особеността там е задаването програмно на това изходно напрежение посредством 12 битов регистър, приемащ стойности от 0 до 4096. При това положение изходното напрежение се променя в диапазона (-10 ÷ +10)V. Това налага ограничаване на зададените стойности само в диапазона 0 до 2047 bit, за получаване само на положително изходно аналогово напрежение.

Калкулирането на ширината на петното по оси X и Y (SpotsizeX [mm] и SpotsizeY [mm]) се извършва по следните формули:

$$SpotsizeX = -3{,}75.U_{CONTROL}+44{,}92 \quad (1)$$

$$SpotsizeY = -1{,}81.U_{CONTROL}+23{,}02 \quad (2)$$

където $U_{CONTROL}$ е управляващото напрежение от изходните аналогови модули на контролера на индустриалния робот.

Извършено е изчисление на ширината на петното по X и Y направления спрямо входните напрежение и зададени брой битове в управляващата програма на робота – табл. 1. В табл. 2 и табл. 3 са представени резултатите за ширина на петното като функция на броят зададени bit-ве. Задаването на тези битове става в отделен регистър, обособен при програмирането на робота.

***Табл. 1.*** *Връзка между ширина на петното в mm и брой bit*

| бр. битове X и Y, bit | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|---|---|---|---|---|---|
| напрежение X и Y, V | 0,98 | 1,95 | 2,93 | 3,91 | 4,89 |
| spot size, X | 41,26 | 37,59 | 33,93 | 30,26 | 26,60 |
| spot size, Y | 21,25 | 19,48 | 17,71 | 15,95 | 14,18 |
| бр. битове X и Y, bit | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2047 |
| напрежение X и Y, V | 5,86 | 6,84 | 7,82 | 8,79 | 10,00 |
| spot size, X | 22,94 | 19,27 | 15,61 | 11,94 | 7,42 |
| spot size, Y | 12,41 | 10,64 | 8,87 | 7,10 | 4,92 |

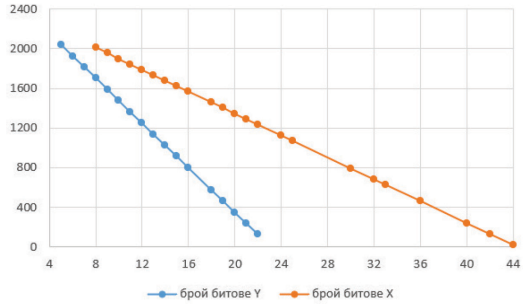
***Табл. 2.*** *Необходим брой bit за задаване на ширина на петното на лъча по оста X*

| spot size X, mm | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Брой битове | 2010 | 1955 | 1900 | 1789 | 1623 | 1457 |
| spot size X, mm | 20 | 21 | 24 | 25 | 30 | 32 |
| Брой битове | 1347 | 1292 | 1126 | 1071 | 794 | 684 |
| spot size X, mm | 33 | 36 | 40 | 42 | 44 | |
| Брой битове | 628 | 463 | 242 | 131 | 20 | |

***Табл. 3.*** *Необходим брой bit за задаване на ширина на петното на лъча по оста Y*

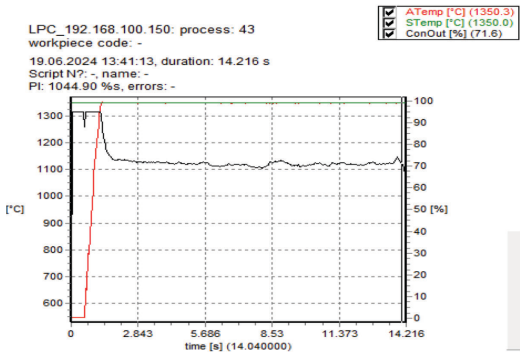
| spot size Y, mm | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Брой битове | 2039 | 1926 | 1814 | 1701 | 1588 | 1476 |
| spot size Y, mm | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Брой битове | 1363 | 1251 | 1138 | 1026 | 913 | 800 |
| spot size Y, mm | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
| Брой битове | 575 | 463 | 350 | 237 | 125 | |

Резултатите са представени графично на фиг. 8, като се вижда линейността и при двете графики. Това е важна особеност за технологичния процес, предвид нуждата от прецизно задаване на ширината на лазерното петно при детайли изискаващи презицна обработка.

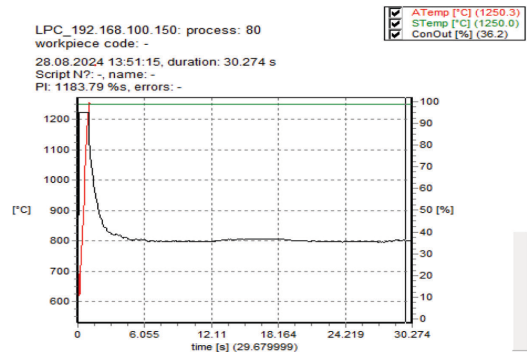



***Фиг. 8****. Връзка между броят зададени в контролера битове и ширина на петното на лазерния лъч в mm*

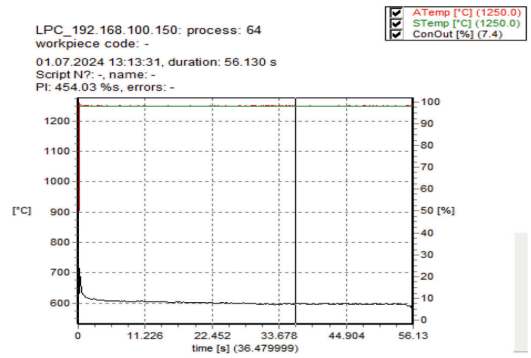
Задаването на различна ширина на петното на лазерния лъч е свързано с повърхностното закаляване на различни по вид детайли, както и бързодействието при обработка. Освен това, този подход способства за равномерното закаляване на детайли с различна големи и позволява обработването на детайли с малка геометрични размери, тесни технологични отвори, както и зъби на зъбни колела с малък диаметър. Задаването на различно по ширина петно влияе на изходната мощност на лазерния източник и лазерна глава, като на фиг. 9, 10 и 11 се вижда големината на тази изходна мощност при еднаква температура (1250$^0$C) на закаляване.




***Фиг. 9.*** *Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (43x22)mm*




***Фиг. 10.*** *Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (26x14)mm*




***Фиг. 11.*** *Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (8x5,5)mm*

От получените диаграми на различните процеси се вижда увеличаването на изходната мощност при по-голяма площ на петното на лазерния лъч, както и увеличаване на времето за работа на лазерната глава за покриване на идентична площ, тоест движение с по-ниска скорост.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализирана и изследвана е система и програмно осигуряване за лазерно закаляване на повърхнини. Така представената система съгласува работата на три отделни модула, обезпечаващи нейното функциониране. В процеса на реализиране и изследване се установи нужда от линейност в управлението на петното на лазерния лъч, задаване на неговата големи, необходимостта от имплементиране в управляващите програми на блокове и алгоритми за проверка на статус и състояния на лазерен източник и пирометър. Използвания пирометър напълно функционално управлява, задава и регулира температурата на закалявания слой и мощността на лазерната глава, като осигурява прецизност и висока точност на регулиране за получаването на качествен закален слой, без прегряване или недогрят детайл.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

*Благодарности: Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1]https://www2.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20id-35
[2]https://www.fanuc.eu/il/en/robots/accessories/robot-motion/positioners
[3] https://www.laserline.com/en int/ldmseries/
[4] https://www.laserline.com/en-int/otz-series/
[5]https://www.mergenthaler-laser.com/en/hardening

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНВЕРТОРЕН ИЗТОЧНИК НА ТОК ЗА ЕЛЕКТРОПОЛИРАНЕ СЪС SIC ТРАНЗИСТОРИ

**Доброслав Данков*, Петко Маринов**
[1]*Технически университет - Габрово, ул.“Х.Димитър“ 4, Габрово, България,*
**кореспондиращ автор: dankov@tugab.bg*

# RESEARCH OF INVERTER CURRENT SOURCE FOR ELECTROPOLISHING WITH SIC TRANSISTORS

**Dobroslav Dankov*, Petko Marinov**
[1] Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str.,Gabrovo, Bulgaria;
*Corresponding author: dankov@tugab.bg

**Abstract**
*Electropolishing is one of the most widely used metal finishing processes. It is a non-contact electrochemical process that can clean, passivate, brighten and improve the biocompatibility of the metal surface. Along with traditional mains-frequency current transformer installations, high-frequency inverter circuits with MOSFETs and IGBT transistors that operate in output current stabilization mode are increasingly being used as power sources. This has led to a reduction in the volume of both the transformer and the device itself. This paper addresses the issue of using wide-area SiC MOSFETs in power supplies for electropolar technologies by presenting simulation results and experimental studies. The increase in the operating frequency as well as the low conduction losses of this type of transistors improves the efficiency of the power source and the stability of its operation.*
**Keywords:** SiC MOSFETs; Electropolishing,, P-Spice simulation, efficiency.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Електрополирането е безконтактен електрохимичен процес, чрез който може да се почисти, пасивира, изсветли и подобри биосъвместимостта на повърхността на метала. Той е намерил обширни инженерни приложения в много области като хранително-вкусовата, медицинската, фармацевтичната и полупроводниковата промишленост[2]. Електрополирането има явен потенциал да бъде използвано освен в индустрията и в по-специфични сфери като микроелектромеханични системи, биомедицински стентове, изкуствени импланти и др.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Токозахранващите източници за електрополиране са специализирани устройства, които подават електрически ток с контролирани параметри към системата за електрополиране. Тези източници захранват процеса, като регулират силата на тока и напрежението, необходими за ефективно отстраняване на микроскопични слоеве метал от повърхността на обекта.

### 1. Изисквания към токозахранващите източници за електрополиране.

Токозахранващите източници за електрополиране обикновено са проектирани да отговарят на специфични изисквания на процеса, като например:

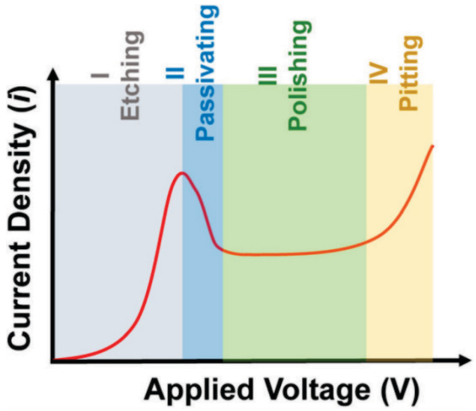
- Регулиране на напрежението и тока – електрополирането изисква прецизен контрол върху тока, който може да варира в зависимост от вида на метала, концентрацията на електролита и желаното качество на полиране.
- Постоянен ток и честотни настройки – някои процеси изискват подаване на постоянен ток (DC), докато други могат да включват импулсни или

променливи режими за по-добър контрол на разтварянето на метала.

➢ Стабилизация на тока – токозахранващите устройства за електрополиране обикновено поддържат стабилен ток, дори при вариации на натоварването, за да гарантират равномерно полиране.

**2. Основни контролни параметри, отговарящи за добрите резултати при електрополиране.**

Ключовите параметри, свързани с кривата напрежение-ток, включват диапазона на приложеното напрежение и диапазона на плътността на тока. Тъй като много фактори са включени и трябва да бъдат оптимизирани в процеса на електрополиране, няма универсален набор от параметри за всички настройки за електрополирането. Първо трябва да се определи системата електрод-електролит. Изборът на електролит за електрополиране силно зависи от вида на анодния метал. Второ, параметрите, свързани с процеса на електрополиране, обикновено се оптимизират спрямо наличната връзка ток-напрежение, която обикновено е документирана в литературата за специфични системи електрод-електролит. Много системи за електрополиране показват общи криви ток-напрежение, сходни с тази, дадена на фиг.1[1-3]. В режим I, това, което се случва основно, е директното разтваряне на метала (т.е. възниква ецване). В режим II, лекото намаляване на плътността на тока с увеличаване на приложеното напрежение обикновено показва генерирането на пасивен слой върху анодната повърхност. В режим III пасивиращият слой се стабилизира и анионите, разтворени от металната повърхност, дифундират през пасивирания слой. В режим IV, с по-нататъшното нарастване на напрежението, пасивираният по-късно слой се разпада върху анодната повърхност. Също така в тази област, анодната метална повърхност ще започне да си нарушава.

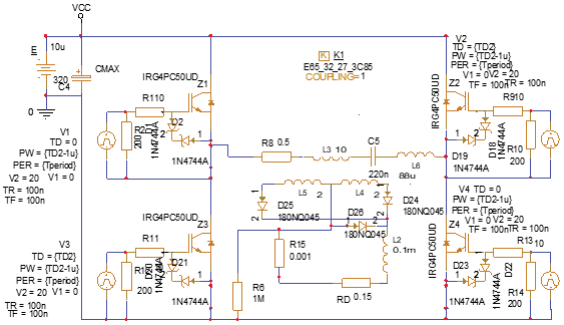



***Фиг. 1**. Волт-амперна характеристика при процеса електрополиране*

**3. Симулационно изследване на работата на силовата схема на инверторен електрополир.**

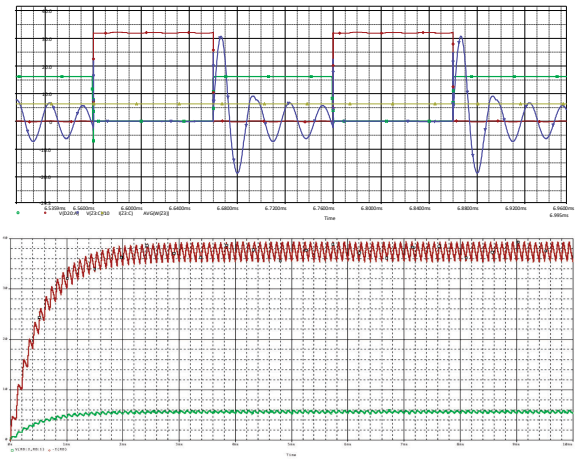
След направен преглед относно схемотехниката на токоизточниците за електрополиране [2-5] се налага извода, че се предпочитат импулсни преобразуватели с ШИМ регулиране като токозахранващи устройства за електрополиране. От друга страна, това е свързано с известни недостатъци по отношение на високите загуби в транзисторите, работещи в ключев режим. Една алтернатива, разпространена широко например при захранващите източници за индукционни технологии, е да се използва схемата на последователен резонансен инвертор с честотно регулиране.

Принципната схема на такъв токоизточник за електрополиране с IGBT транзистори за симулационно изследване е показана на фиг. 2.



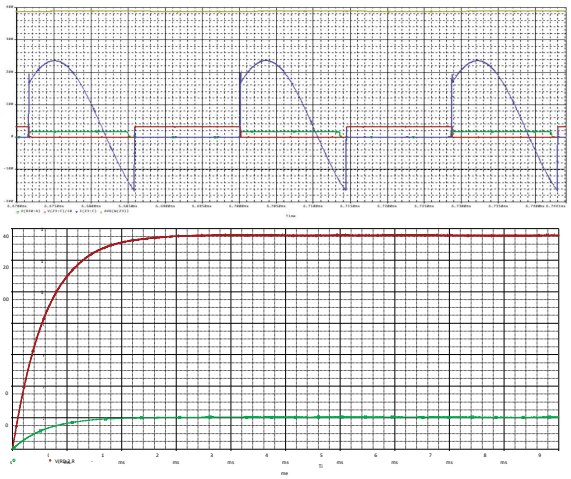

***Фиг. 2**. Силова схема на инверторен електрополир с IGBT транзистори.*

Изследвана е работоспособността на схемата в диапазона на изменение на изходния ток от 40 до 140 А. Времедиаграмите на работата на един от транзисторите, както изходните ток и напрежение са показани на фиг.3 при 40А, а на фиг.4 при 140А.



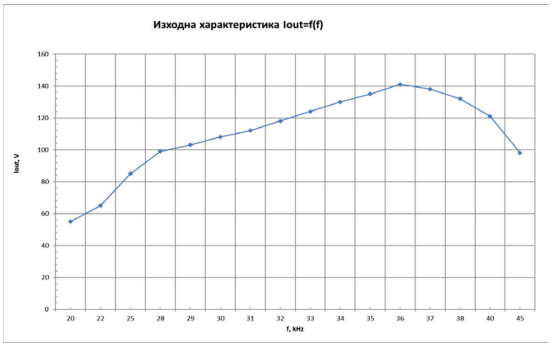
***Фиг. 3**. Времедиаграми от работата на един IGBT транзистор – $U_{GE}$(зелено), $U_{CE}$ /10 (червено), $I_C$ (синьо), Pdiss(жълто) и изходното напрежение Uout(зелено), както и изходен ток Iout (червено) при работна честота f=5 kHz.*

От времедиаграмите се вижда, че транзисторите работят с комутация при нулев ток (ZCS) при изключване и ненулев ток при включване, тъй като в момента на включването им тече ток през обратните им диоди. В резултат на това при максимален ток загубите в IGBT транзистора(Pdiss) са значителни – около 380W.



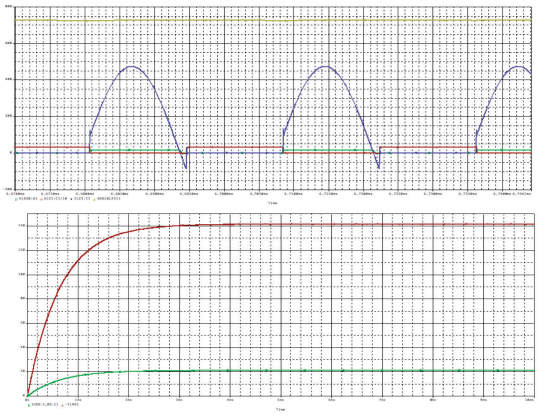
***Фиг. 4**. Времедиаграми от работата при работна честота f=35 kHz.*

В резултат на симулациите при различни работни честоти е построена регулировъчната характеристика на инверторния токоизточник за електрополиране, показана на фиг. 5. Вижда се, че резонансния последователен инвертор може да се регулира и след резонанса, където изходния ток и следователно изходната мощност са най-големи.



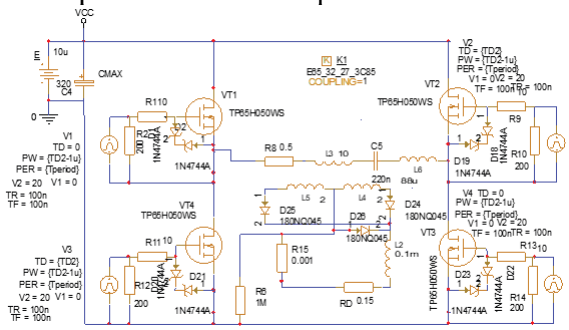

***Фиг. 5**. Регулировъчната характеристика на инверторния токоизточник за електрополиране с IGBT транзистори.*

На фиг.6 са показани времедиаграми на работата на резонансния инвертор над резонансната честота, при което се вижда ZCS комутацията при включване и изключване при ненулев ток. При този режим на работа Pdiss=730W, т.е. нарастват почти двойно, поради бавното възстановяване на обратните диоди. Една алтернатива на използването на Si IGBT транзистори за напрежение 1200V се явяват широкозонните SiC MOSFET транзистори, които за разлика от Si MOSFET могат да работят с напрежения над 1000 V.

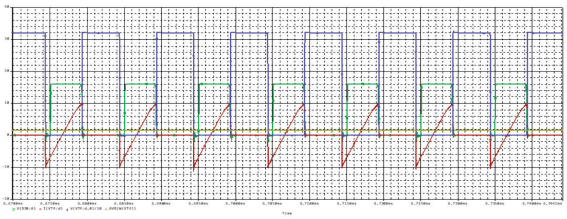


***Фиг. 6**. Времедиаграми от работата на IGBT инвертора при честота f=36 kHz.*

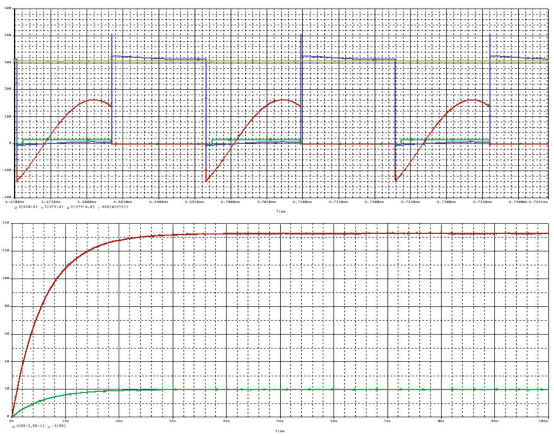
Принципната схема на инвертора за електрополиране със SiC MOSFET транзистори е показана на фиг. 7.



***Фиг. 7**. Силова схема на инверторен електрополир с SiC MOSFET транзистори.*



***Фиг. 8**. Времедиаграми от работата на един SiC MOSFET транзистор – $U_{GS}$(зелено), $U_{DS}$ /10 (червено), $I_D$ (синьо), Pdiss(жълто) и изходното напрежение Uout(зелено), както и изходен ток Iout (червено) при работна честота f=100 kHz.*

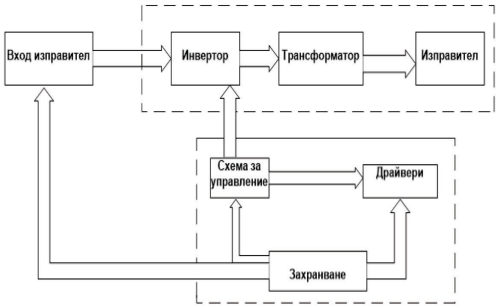


***Фиг. 9**. Времедиаграми от работата на SiC инвертора при честота f=38 kHz.*

По-голямото бързодействие и по-малките загуби от проводимост на SiC позволяват инвертора да работи над резонансната честота на трептящия кръг. Представени са симулационни времедиаграми от работата на SiC инвертора при минимален ток 40A и при максимален ток 140A съответно на фиг. 8 и 9. Виждат се съществено намалените загуби в транзисторите, съответно Pdiss=2W при Iout=40A, f=100kHz и Pdiss=300W при Iout=140A, f=38kHz.

## 4. Избор на блок-схема.

По така направените симулационни изследвания е синтезирана блок-схема на импулсен инверторен електрополир, показана на Фиг. 10.



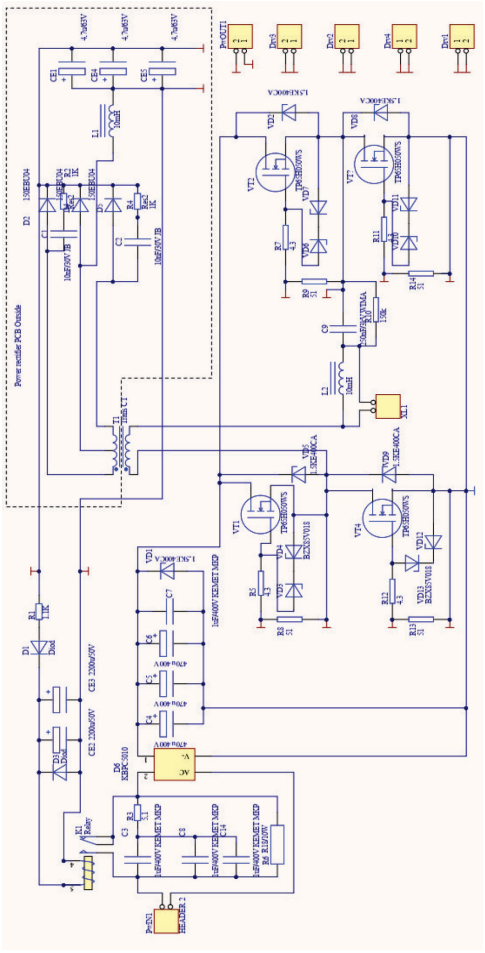

***Фиг. 10**. Блок схема инверторен електрополир*

Съответните модули от блок-схемата са: Захранване – захранване от мрежата 220V AC. Схема управление – ШИМ, който управлява SiC MOSFET. Драйвери – драйверни транзистори усилват сигнала от ШИМ. Входен изправител – изправя се напрежението, от мрежата за да се захранва инверторната част. Инвертор – силов блок с SIC MOSFET инвертира напрежението. Трансформатор – изходен понижаващ трансформатор (разделя галванично инвертора както и изхода. Изправител – изправя изходното напрежение.

## 5. Схемно решение.

Показана е схемата (фиг.11) на инвертор на електрополир със защита от късо съединение на изхода. Работата на схемата при стартиране се прекратява, когато електрода докосне електрополиращия детайл – т.е. имаме късо съединение на изхода, като кондензатора подава напрежение на паралелно включеното реле да изключи или забави системата.

На изхода са свързани мощни диоди 150EV1YU4, които са включени паралелно, като изходния капацитет е достатъчен за забавяне при включване от няколко секунди. Стартирането на системата става при свързване към захранването, като веригата RC, състоящ се от 4μF кондензатор и резистор 4,6 Ω ограничава входния ток до 0,3А. Основният капацитет 3x470μFx350V се зарежда много бавно и след като изходното напрежение достига около 40V, релето затваря контактите си, след това изходното напрежение се повишава до 62 V. Релето има хистерезис - при един ток задейства котвата, а при друг я отпуска. Резисторът, който е включен последователно с релето е подбран така, че включването е при 40V, а изключването при 10V.

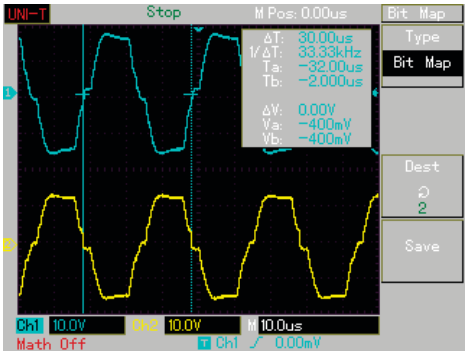


***Фиг. 11**. Силова схема на токозахранващ източник за електрополир*

Веригата на реле-резистора е включена паралелно на товара, така че електрохимичния процес започва при 10-12V, след това релето е включено. В случай че възникне късо съединение напрежението пада драстично до 3-5V, като се има предвид спадът при кабели и електроди. При такова напрежение, релето не може да бъде във включено състояние и се отваря силовата верига, т.е. включена е RC – веригата на входа. След премахването на краткотрайният режим на късо съединение, напрежението на изхода започва да расте, това превключва силовото реле и електрополирът е отново готов за работа в номинален режим. Целият този процес отнема 1 до 2 сек. и е почти незабележим. Процесите в електрода могат да започнат веднага и се прави нов опит за започване на процеса във ваната.

**6. Експериментални изследвания.**

На фиг.12 са представени осцилограми на напрежението $U_{GS}$ на транзисторите VT3 и VT4 при минимална честота (f min) и максимален ток (I max). Вижда се, че минималната честота е 33,3 кHz, тъй като параметрите на реалния кръг се различават от тези при симулацията. В напрежението на гейтовете се наблюдава ярко изразен ефект на Милер – в платото в предния фронт на импулса на ниво около 4 V, където става отпушването на транзисторите.




***Фиг. 12**. Осцилограми на напрежението Ugs на транзисторите VT3 и VT4*

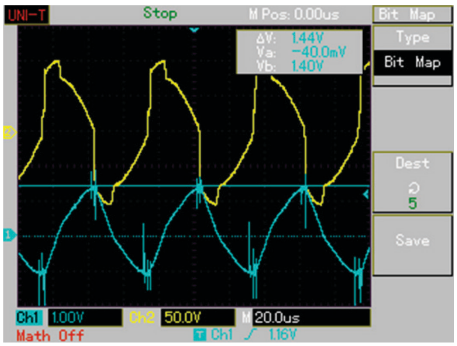
Импулсните поредици са противотактни и поради относително полегатите

фронтове (поради $R_G$ и входния капацитет Ciss на SIC (TP65H050WS), като при Qg=270uC, Rg=10Ω, Uce=15V от формулата:

Qg = Ciss. Uee [1-e(–ton/Rg.Ciss)] (1)

се получава ton=46 nS.

Напрежението Ut1 и тока It1 на първичната на изходния трансформатор, който се явява товар на инвертора, при еквивалентен товар на ваната на електрополира от 4,7 Ω, са показани на фиг.13. Вижда се, че максималния ток е 144 A (div 10 mV/A), който е и максималния ток на всеки от транзисторите на инвертора, като съвпада като стойност с максималния ток на транзисторите от симулациите показани на фиг. 9.




***Фиг. 13**. Осцилограми на напрежението и тока на изходния трансформатор.*

За електрополирането на детайли от неръждаема стомана с площ ~1 $dm^2$ се използва конфигурация на електролитната система показана на табл. 1. На фиг. 14 е представен вида на обработваните детайли преди и след обработката.

Табл. 1

| **Състав на електролита и режим на работа** | **Единица** | **Електролити** |
|---|---|---|
| Ортофосфорна киселина (отн.т. 1,75) $H_3PO_4$ | тегл. % | 65 |
| Сярна киселина (отн.т. 1,84) $H_2SO_4$ | тегл. % | 15 |
| Хромен анхидрид $CrO_3$ | тегл. % | 5 |
| Глицерин CH2(OH)CH(OH)CH2OH | тегл. % | 12 |
| Вода | тегл. % | 3 |
| Анодна плътност на тока | A/dm2 | 8-10 |
| Температура на електролита | °C | 40-70 |
| Продължителност на полирането | min | 10-15 |
| Катод | - | оловен |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разглежданата схема на инверторен електрополир в изпълнение пълен мост е надеждна и сравнително проста. Благодарение на използването на високочестотен резонансен преобразувател с SiC MOSFET транзистори (вместо класически IGBT) се получава по-голяма мощност при малки размери и маса. Управлението е осъществено чрез промяна на честотата, с което се управляват SiC MOSFET транзисторите, както и изходният ток. За да се раздели галванично схемата на силовата част, както и да се намали напрежението от изхода на апарата се използва понижаващ високочестотен трансформатор.



***Фиг. 14**. Детайли преди и след обработка.*

След разделителният понижаващ трансформатор се изправя изходният ток, което води до по-гладка работа на апарата.

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Wei H., Fengzhou F., Fundamental aspects and recent developments in electropolishing, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 139, 2019, Pages 1-23, ISSN 0890-6955.

[2] Yang, G., Wang, B., Tawfiq, K., Wei, H., Zhou, S., & Chen, G. (2016).

Electropolishing of surfaces: theory and applications. Surface Engineering, 33(2), 149–166.
[3] Zaki, S., N. Zhang, M. D. Gilchrist. Electropolishing and Shaping of Micro-Scale Metallic Features. - Micromachines 2022, 13, 468.
[4] https://www.gprectifier.com/dc-power-supply/power-supply-for-electroplating/electropolish-power-supply-1000a-12v-eco.html
[5] https://www.processtechnology.com/application/electro-polishing/
[6] https://www.processtechnology.com/application/electro-polishing/
[7] https://www.antweldcleaner.com/product/ant-weld-cleaner-120

# СТЕРЕОСКОПИЧНА ОБРАБОТКА ОТ USB КАМЕРИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ В АВТОМАТИЗИРАНИ СИСТЕМИ.

**Петър Панайотов*, Горан Горанов**
*Технически университет - Габрово, България*
*Кореспондиращ author: jimp@abv.bg*

# STEREOSCOPIC PROCESSING FROM USB CAMERAS FOR MEASUREMENT IN AUTOMATED SYSTEMS.

**Petar Panayotov*, Goran Goranov**
*Technical University of Gabrovo, Gabrovo*
*Corresponding author: jimp@abv.bg*

**Abstract**

*Stereoscopy enables the projection of three-dimensional depth achieved by combining two-dimensional images. Human vision, including depth perception, is a complex set of processes that begins with acquiring visual information through the eyes, leading to the brain's processing of this information to make sense of it. One of the key functional abilities of humans is estimating the distance to a given object. This article presents a mathematical model for calculating the distance to an object using two digital cameras, with applications in automation.*

**Keywords:** USB camera, stereovision, automatization, PC software

## ВЪВЕДЕНИЕ

Измерването на разстоянието до даден обект е от съществено значение при автоматизирани системи използващи много на брой сензори. В повечето случаи сензорите разположени по дадена машина откриват наличието на даден обект или измерват параметри на обекта като температура, налягане, влажност и т.н. Много често в автоматиката се налага измерване на разстоянието до засечения обект. [1,2,3,4] В зависимост от материала, от които е изработен даден обект се подбират подходящи сензори за разстояние. При необходимост от измерване на разстоянието до метални обекти биха могли да се използват индуктивни или капацитивни сензори, които изменят индуктивността или капацитета на вътрешните си схеми в зависимост от близостта на дадения метален обект до тях. Тези сензори могат да се използват за измерване на малки разстояния и работят само с метални обекти, които имат магнитни свойства.

При необходимост от измерване на разстояние до диелектрични обекти например от пластмаса или гума могат да се използват оптични или ултразвукови сензори. При оптичните сензори измерването на разстоянието се основава на принципа на триангулацията. Лазерният светодиод излъчва светлина, която достига до обекта. Приемникът на сензора (фотодиодна линия) отчита позицията на отразената светлина от обекта. Ъгълът на падане се променя в зависимост от разстоянието и по този начин позицията на лазерната точка върху приемника. Фотодиодната линия се чете от вграден микроконтролер. Контролерът изчислява точно ъгъла от разпределението на светлината върху линията на фотодиода и след това изчислява разстоянието до обекта. Ултразвуковите сензори измерват надеждно безконтактно разстояние в определен диапазон, независимо от условията на околната среда, като например наличието на прах.

И двата вида сензори имат приложение при различни видове материали. Използването на оптични сензори се прилага при материали с добра отражателна способност а ултразвуковите при непорести материали.

Измерването на разстояние с две камери може да бъде универсален сензор, който не се влияе от вида на материала или неговите свойства.

## ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЕ С USB КАМЕРИ

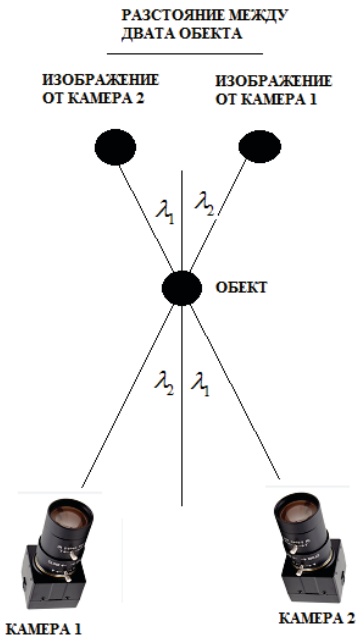
Принципа при измерване на разстояние до даден обект с помощта на USB камери се основава на метода стереовижън [5,6,7,8]. Използването на две еднакви камери на определено разстояние една от друга и фокусирани в една точка ще даде два различни ъгъла на дадено изображение. На фиг.1 е показан принципа за измерване на разстояние от камера до даден обект въз основа на изместването на две изображения заснети от различен ъгъл.

$$\text{Distance} = F\sin(\lambda_1) + F\sin(\lambda_2) \qquad (1)$$

където

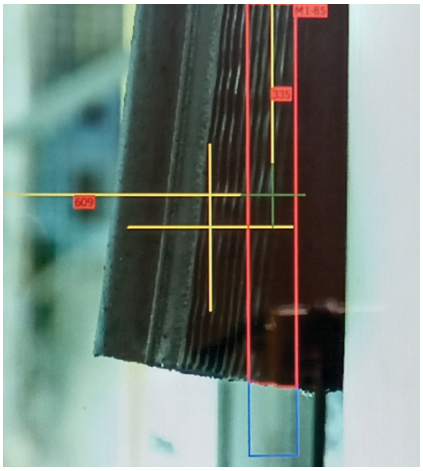
F-Фокусно разстояние

$\lambda_1, \lambda_2$-ъгъл на камерата




***Фиг.1*** *Принципна схема за измерване на разстояние от камера до даден обект*

Изображенията от двете камери ще дадат информация в растерна матрица. За да може да се измери разстояние до даден обект най-напред е необходимо да се определи търсеният обект. Необходимо е обработка на всеки пиксел от даденото изображение за да може да се определят границите на търсения обект. На фиг.2 е показано засичане на обект и неговата форма. Софтуера, които обработва пикселите от дадено изображение определя освен границите на обекта и неговият център на тежестта.

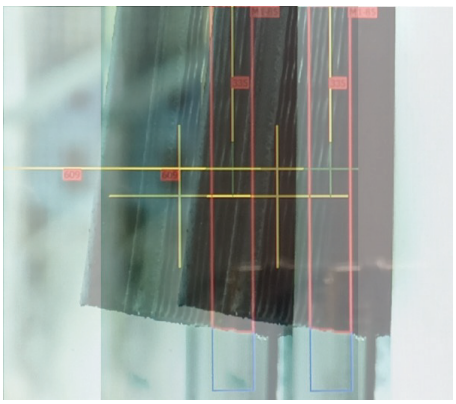


***Фиг.2*** *Засичане на обект от софтуера за обработка*

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i.x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i.}, y_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i.y_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i.} \qquad (2)$$

където

$m_i, (x_i, y_i)$- масата и координатите на дадения обект.



***Фиг.3*** *Наслагване на изображенията от две камери*

В този случай определянето на фокусното разстояние F, се свежда до намиране на разстоянието между двата центъра на тежестта на засечения обект от двете USB камери. За да бъде правилно определен центъра на тежестта е необходимо настройките на софтуера за откриване на обект да бъдат еднакви за двете камери. Точката на пресичане на зрителните полета на двете камери определя дефазирането на заснетия обект. Когато обекта се намира на разстояние съвпадащо с пресечната точка на зрителните полета, дефазирането е равно на нула т.е двата центъра на тежестта съвпадат и двете изображения се наслагват точно едно върху друго. При приближаване на обекта от точката на пресичане на зрителните полета, двете изображения ще се дефазират с отрицателен знак и разстоянието между двата центъра ще стане отрицателно число. Аналогично при отдалечаване но точката на пресичане на зрителните полета, дефазирането приема положителни стойности. По този начин към определена константа се прибавят или изваждат изчислените разстояния и получените резултати определят точно разстоянието на даден обект до камерата.

## МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОЗИЦИЯТА НА ДАДЕН ОБЕКТ В ПРОСТРАНСТВОТО

Този метод предлага допълване на предложения метод, като се използват шест броя камери групирани по двойки за да се определят координатите на даден обект в пространството. Един обект е напълно определен в пространството от шест степени на свобода. Движенията на триизмерните тела имат обикновено шест степени на свобода. Когато на движението на едно твърдо тяло не са наложени никакви ограничения, това тяло може да заема произволно положение в пространството. То се нарича свободно и може да извършва максимално възможните 6 независими движения в пространството – три транслации по всяка една от осите (дължина, широчина и височина) и три ротации около същите оси. Тъй като използваният софтуер трябва да работи като сензор обекта може да се възприеме като точка в пространството, която е определена само от три степени на свобода или три транслации по всяка една от осите. За целта могат да бъдат използвани три двойки камери за намиране на разстоянията от даден обект до съответните двойки камери. Трите стойности биха дали трите координати на центъра на тежестта на ден обект. Този метод може да бъде използван за засичане на различни обекти с различен обем, при които дадена страна може да съвпадне с размера на друга страна на обект с различен обем.

## ВНЕДРЯВАНЕ НА МЕТОДА В АВТОМАТИЗИРАНИ СИСТЕМИ

Тъй като камерите работят във видеорежим и засичането става с непрекъсната скорост е необходим контролер, които да чете всички параметри изчислени от софтуера за обработка на изображенията и да ги предаде към входно изходното устройство на машината или PLC модула. За връзка с контролера могат да бъдат използвани различни видове протоколи и начин на предаване на данни. Най често срещания метод за прехвърляне на данни в индустриални системи е протокола MODBUS TCP/IP. Това е протокол за прехвърляне на данни по Ethernet, като всички параметри се записват в регистри и могат да бъдат прочетени от много устройства свързани в мрежа. За целта е разработен програмируем логически контролер на базата на ESP32 микроконтролер, който може да бъде конфигуриран за работа с MODBUS протокол фиг. 4.




***Фиг.4*** *Контролер за комуникация с компютър за обработка на данни от софтуер за стерео вижън*

Контролерът притежава входно изходни модули, чрез които управлява данните от софтуера за обработка на изображения. По този начин се предават правилно данните за измереното разстояние до даден обект към главното управляващо устройство на самата машина.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработения метод на базата на стерео картина предлага универсален сензор за измерване на разстояние до даден обект, като елиминира всички недостатъци на гореизброените сензори за определяне на разстояние. При този метод не е от значение вида на материала, неговата отражателна способност или звукопоглъщането, което е проблемно при използване на ултразвукови сензори. Предложения метод може да бъде използван и в много други области извън индустриалната автоматизация, като например засичане на скоростта на автомобили или внедрен при автономно движещи се товарни колички за определяне на разстояние до зададени обекти. Предложения метод ще бъде внедрен при измерване на дължината на автомобилни уплътнения. В зависимост от разстоянието на камерата до снимана повърхност в досега използвания софтуер се налага ръчно въвеждане на стойност, която определя действителната дължина на профила в зависимост от броя пиксели засечени от камерата. С помощта на този метод софтуера автоматично може да изчисли на какво разстояние се намира от дадения обект и да преконфигурира своите настройки. Недостатък е необходимостта от мощен хардуер и наличието на компютър, което прави системата трудна за инсталиране в машини имащи ограничено пространство. Друг недостатък поради спецификата на камерите е, че системата може да работи само в светлата част от деня или на осветени места.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] Evgeniy Y. Omelchenko; Evgeniy V. Voronov; Sergey S. Enin, Development of Machine Vision System for Tracking Crane Mechanisms, 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867687

[2] Handong Zhang; Gang Wang; Yuwan Cen., Summary of Distance Measurement Based on Vision in Localization Technology, 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, DOI: 10.1109/IPEMC.2006.4778349

[3] Maoliang Yin; Qiao Zhang; Wenfu Bi; Mengyang Zhang; Ying Zhang; Changchun Hua, 2023 IEEE 13th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Electronic ISSN: 2642-6633

[4] Marin Zhilevski; Petar Mutashki; Mikho Mikhov, A Robotic Camera for Surveying of Sewer Collectors, 2023 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), DOI: 10.1109/CIEES58940.2023.10378832

[5] Yasir M Mustafah, Rahizall Noor, Hasbullah Hasbi, Amelia Wong Azma, Stereo Vision Images Processing for Real-time Object Distance and Size Measurements, 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Electronic ISBN:978-1-4673-0479-5

[6] Y. M. Mustafah, A. W. Azman and M. H. Ani, Object Distance and Size Measurement Using Stereo Vision System, Advanced Materials Research Vols. 622-623 (2013) pp 1373-1377, doi:10.4028 /www.scientific.net/AMR.622-623.1373

[7] M. Milkhalsky; J. Sitte, Active motion vision for distance estimation in autonomous mobile robots, IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004. DOI: 10.1109/RAMECH.2004.1438066

[8] Boulbaba Guedri; Naji Guedri; Rached Gharbi., A New Approach for Real-Time Camera-Object Distance Measurement Through Computer Vision, 2023 IEEE Third International Conference on Signal, Control, and Communication (SCC), Electronic ISBN:979-8-3503-2639-0.

# ХИБРИДНИ БАТЕРИИ ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АВТОМОБИЛИ

**Страхил Събев**

*Технически Университет Габрово, Габрово, България*
*кореспондиращ автор: strahilsubev@gmail.com*

# HYBRID BATTERIES FOR ELECTRIC CARS

**Strahil Sabev**

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*
*Corresponding author: strahilsubev@gmail.com*

**Abstract**

*A key challenge in EV development is creating efficient, long-lasting, and fast-charging batteries. Traditional lithium-ion (Li-ion) are mass produced due to their high energy density, but their limitations in charging speed, lifespan, and thermal stability have driven research into alternative solutions. One of the most modern innovations is the integration of supercapacitors into EV powertrain, creating hybrid energy storage systems. These EV supercapacitor-hybrid batteries aim to combine the best of both worlds: the high energy density of batteries and the fast charging and discharging capabilities of supercapacitors. We will take a look at the benefits of adding a Super Capacitor to a EV car.*

**Keywords:** Supercapacitor (SC), Hybrid Battery

## ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на електромобилите и хибридните превозни средства възниква необходимостта от по-ефективни и дълготрайни енергийни системи. Основен компонент на тези автомобили са батериите, които съхраняват електрическата енергия. Една от новите технологии в тази област е използването на хибридни системи, съчетаващи традиционни акумулаторни батерии с суперкондензатори. Този доклад разглежда какво представляват тези хибридни батерии, какви са техните предимства и недостатъци и как се прилагат в автомобилите.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Хибридната енергийна система комбинира литиево-йонни батерии с суперкондензатори с цел оптимизиране на енергийното управление на автомобилите. Тези две технологии се допълват взаимно, като всяка от тях компенсира слабостите на другата. Литиево-йонните батерии имат висока енергийна плътност, което означава, че могат да съхраняват голямо количество енергия на малко пространство, но имат ограничена способност за бърза доставка на енергия и страдат от загуба на капацитет след определен брой цикли на зареждане. Суперкондензаторите, от друга страна, имат много висока скорост на зареждане и разреждане, но значително по-малка енергийна плътност.

### 1. Принцип на работа

Основната идея на хибридната система е да използва предимствата на всяка технология според специфичните нужди на автомобила по време на движение:

1. Суперкондензаторите се използват за краткосрочни задачи, които изискват бързо освобождаване на енергия, като:
   - о Ускорение на автомобила.
   - о Осигуряване на мощност за електронните системи в моментите на пикова консумация.

o Рекуперативно спиране (когато кинетичната енергия от спирането се превръща обратно в електрическа енергия).

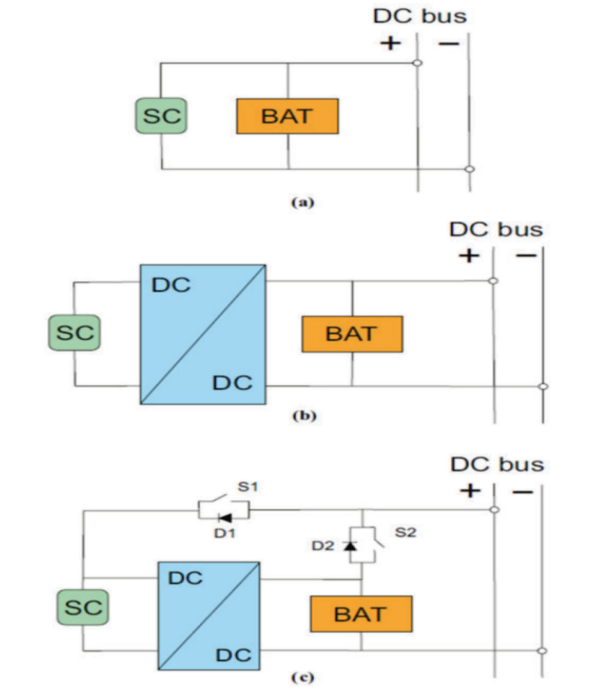
2. Батериите играят роля при по-продължителните операции, като:

o Съхраняване на големи количества енергия за по-дълги пътувания.

o Захранване на системата по време на нормално каране.

o Поддържане на базовата мощност на електрическото задвижване.

## 2. Архитектура на хибридната система




***Фиг. 1**. Топологии на хибридни батерии: а) Пасивна конфигурация b) Полу активна конфигурация c) Активна конфигурация*

В зависимост от приложението, хибридните системи могат да бъдат паралелни, последователни или смесени.

1. Паралелна архитектура – В тази конфигурация батериите и суперкондензаторите са свързани успоредно и всяка от тях може да доставя енергия към двигателя според моментните нужди. Контролерът избира кое устройство да се използва въз основа на текущото търсене на енергия.

o Предимство: Едновременно използване на двете технологии за оптимално енергийно управление.

o Недостатък: По-сложна електроника и управление за синхронизиране на енергийния поток.

2. Последователна архитектура – В тази конфигурация енергията първо преминава през суперкондензатора, а след това към батерията. Суперкондензаторът осигурява енергия за кратки, интензивни задачи, а батерията осигурява дългосрочно захранване.

o Предимство: По-проста интеграция и по-малка сложност на системата.

o Недостатък: По-ниска гъвкавост при доставянето на енергия.

3.Смесена архитектура – Комбинира елементи на паралелната и последователната архитектура за по-сложен и адаптивен енергиен мениджмънт, който позволява едновременното или последователното използване на батерията и суперкондензатора според условията на шофиране.

## 3. Управление на енергията и оптимизация

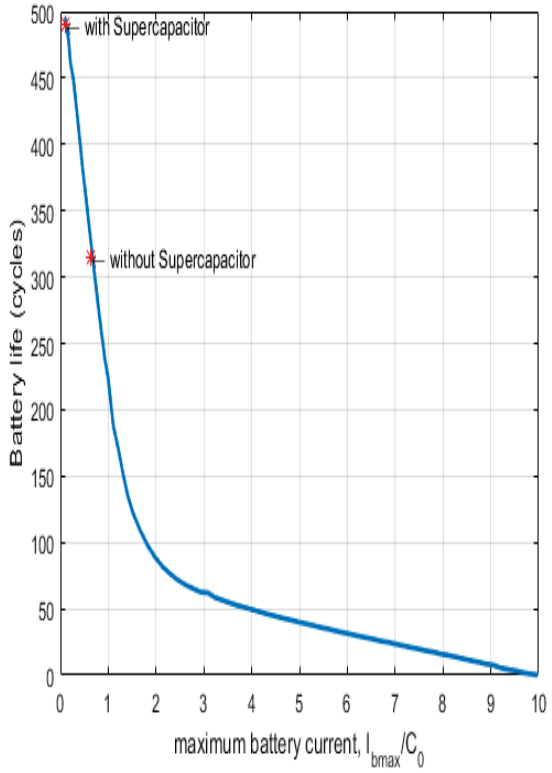
Ключов аспект на хибридните системи е управлението на енергията. В хибридните автомобили с батерии и суперкондензатори се използват интелигентни контролери, които решават коя част от системата да бъде активирана в даден момент:

• При ускорение: Контролерът може да превключи към суперкондензаторите, които могат бързо да освободят голямо количество енергия за кратко време. Това осигурява незабавен тласък на мощността, без да натоварва батерията.

• При спиране: Когато автомобилът използва рекуперативна система за спиране, енергията, която се събира, се съхранява в суперкондензаторите поради тяхната способност да се зареждат много бързо.

• По време на нормално каране: Батериите осигуряват постоянен поток от

енергия за задвижването на автомобила. В зависимост от нуждите на автомобила, системата може да комбинира захранването от батериите и суперкондензаторите за по-голяма ефективност.




***Фиг. 2*** *Животът на батерията като функция на максималния ток, където C0 е номиналният капацитет на батерията*

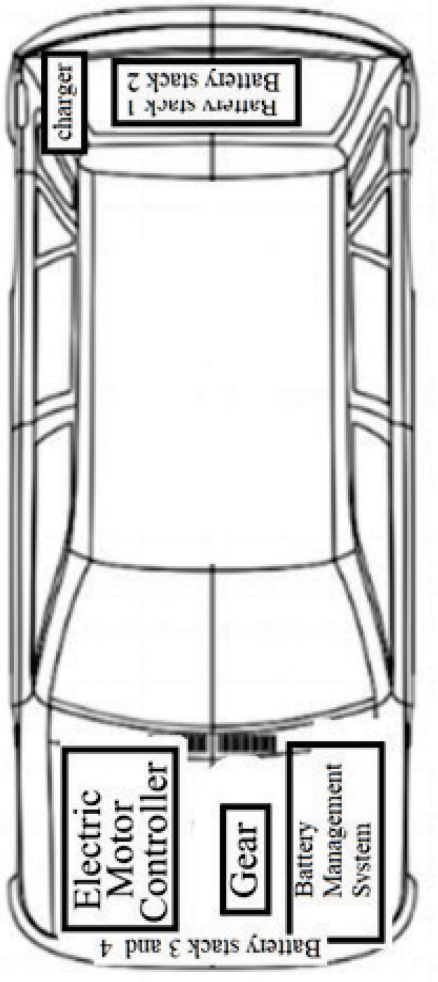
## 4. Теоретично добавяне на супер кондензатор към работещ тестов автомобил и резултати

Тестовият автомобил Opel Corsa B преработен и сертифициран изцяло като електромобил.



***Фиг.3*** *Външен изглед на преустроения автомобил Opel Corsa B.*

По същество преустройството се състои в замяна на бензиновия агрегат с електрически, като се запазват скоростната кутия и шасито. В допълнение към смяната на двигателя е необходим контролер на електродвигателя с управление на скоростта и защита на двигателя.




***Фиг.4*** *Схематичен изглед на разположението на компонентите на задвижването в преустроения автомобил Opel Corsa B*

Необходима е система за управление (BMS), която да контролира акумулатора. Схематичното оформление на отделните електрически задвижващи агрегати е показано на фигура 2.

За да се балансира теглото на автомобила върху двете оси, най-тежкият елемент - батерията - е разпределен на 2 места - в двигателния отсек и в багажното отделение.

Електрическият двигател е поставен под контролера за управлението му и е свързан механично с оригиналната скоростна кутия.

***Таблица 1*** *Електрически параметри за Opel Corsa B*

| | | |
|---|---|---|
| *Operating Voltage Range of the System(V)* | | *121.5V~186.8V (144 V)* |
| *Nominal voltage(V)* | | *162* |
| *Rated Energy （kWh ）20±5℃,* | | *16.2kWh* |
| *Rated capacity （Ah）20±5℃,* | | *100Ah* |
| *Temperature Range of the Working Environment （℃）* | | *Charging-20～55* |
| | | *Discharging-20～55* |
| *Relative Humidity of the Working Environment* | | *10%～95%* |
| *Storage temperature(℃)* | | *-20～+55* |
| *Car maximum charging current(A)* | | *≤50* |
| *Maximum continuous discharge current(A)* | | *100A* |
| *Operating time under working condition* | *100A DC* | *Sustainable working* |
| | *300A DC* | *Allow continuous working hours not higher than 300s* |
| | *500A DC* | *Allow continuous working hours not higher than 10s* |
| *Charge retention* | | *≥ 90% (Placing at Normal Temperature for One Month）* |
| *Creepage distance* | *Between high voltage connection terminals* | *≥55mm* |
| | *Between Live Parts and Electric Platform* | *≥30mm* |
| *Cooling model* | | *Natural Cooling* |
| *Cabinet Size （mm） (Integrated）* | | *795*454*348/695*554*348* |
| *Charging standard* | | *Level 2 ( 240V, 50 Hz, 6 kW)* |

На базата на тези параметри се взема решение да се добави към системата супер кондензатор с максимален капацитет на отдаване, 250 А ток за 10 секунди. Той ще се зарежда и управлява от BMS модулът по алгоритъм съобразен с неговите характеристики. На следващата схема с червено са показани в кои режими има подобрение.

***Таблица 2*** *Електрически параметри с Супер Кондензатор за Opel Corsa B*

| | |
|---|---|
| *Operating Voltage Range of the System(V)* | *121.5V~186.8V (144 V)* |
| *Nominal voltage(V)* | *162* |
| *Rated Energy （kWh ）20±5℃,* | *16.2kWh* |
| *Rated capacity （Ah）20±5℃,* | *100Ah* |
| *Temperature Range of the Working Environment （℃）* | *Charging-20～55* |
| | *Discharging-20～55* |
| *Relative Humidity of the Working Environment* | *10%～95%* |
| *Storage temperature(℃)* | *-20～+55* |
| *Car maximum charging current(A)* | *≤50* |
| *Maximum continuous discharge current(A)* | *100A* |
| *Operating time under working condition* — *100A DC* | *Sustainable working or 25sec autonomy only on SC* |
| *Operating time under working condition* — *[50A(SC)+300(MB)]50s+300A DC 250s* | *Allow continuous working hours not higher than 300s (16.5% incrise for the first 50 sec)* |
| *Operating time under working condition* — *[250A (SC)+250A (MB)10s]+500A(MB) DC 5s* | *Allow continuous working hours not higher than 15s (50% increse)* |
| *Charge retention* | *≥ 90% (Placing at Normal Temperature for One Month）* |
| *Creepage distance* — *Between high voltage connection terminals* | *≥55mm* |
| *Creepage distance* — *Between Live Parts and Electric Platform* | *≥30mm* |
| *Cooling model* | *Natural Cooling* |
| *Cabinet Size （mm） (Integrated）* | *795*454*348/695*554*348* |
| *Charging standard* | *Level 2 ( 240V, 50 Hz, 6 kW)* |
| | |

От таблицата се вижда че в средният ,300 амперов режим, има 16.5 % подобрение в първите 50 секунди. В режимът за максимално натоварване-500 амперов, имаме 50% удължаване на времето на ползване. Като може и да се настрое, да има 50% повече мощност за същото време. Това доста подобрява характеристиките на автомобилът при изкачване на стръмни наклони с товар, бързо ускоряване при различни маневри, по-безопасно и сигурно изпреварване. Като това влияе положително на капацитета на батерията. Суперкондензаторът дори изцяло може да замени батерията за около 30 секунди, при товар под 100 ампера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хибридните системи, съчетаващи литиево-йонни батерии и суперкондензатори, представляват обещаваща технология за подобряване на ефективността, динамиката и дълготрайността на електрическите и хибридните автомобили. Те осигуряват бърза доставка на енергия при кратки задачи и по-дълъг живот на батериите, като по този начин намаляват общите разходи за поддръжка и увеличават ефективността на енергийното управление. Въпреки че все още съществуват предизвикателства, свързани с разходите и сложността, технологичният напредък и развитието на електромобилната индустрия предполагат, че хибридните системи ще играят ключова роля в бъдещето на транспорта.

От дадените примери става ясно, че има много ползи за мощностните характеристики и издържливостта на литиево-йонната батерия, когато е съчетана с суперкондензатор. От това можем да направим изводи ,че тази технология тепърва ще се развива и усъвършенства, което ще подобри електромобилът, като мощност и ефектнивност.

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Research Article IET Energy Systems Integration eISSN 2516-8401

[2] https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5683

[3] International Journal For Technological Research In Engineering Volume 2, Issue 9, May-2015 ISSN (Online): 2347 – 4718

[4] Energy Procedia 105 ( 2017 ) 2145 – 2150 ,ScienceDirect, The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016

[5] Description of the conversion process and results on the Opel Corsa with an internal combustion engine into an electric car) by Dobroslav Dankov, Nikolay Madjarov and Prodan Prodanov-Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics Technical University of Gabrovo.

НАПРАВЛЕНИЕ

# КОМУНИКАЦИОННА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

SESSION

# COMMUNICATION ENGINEERING AND TECHNOLOGIES

# ИЗКУСТВЕНИ НЕВРОННИ МРЕЖИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ИНДЕКСИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА КОМУНИКАЦИОННИТЕ КАНАЛИ

**Ивелина Балабанова**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България,*
*Кореспондиращ автор: ivstoeva@abv.bg*

# ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PERFORMABCE INDICES FORECASTIING OF COMMUNICATION CHANNELS

**Ivelina Balabanova**

*Technical University of Gabrovo, 4 Str. "Hadji Dimitar", Gabrovo, Bulgaria,*
** Corresponding author: ivstoeva@abv.bg*

**Abstract**

*The paper proposes an approach for predictive analysis of performance indices during traffic transmission and service in information and communication channels with Artificial Intelligence (AI) concept. Radial Basis Neural Networks (RBNNs) and Feed-Forward Neural Networks (FFNNs) in a change of the Spread parameter and the type of neural activation – Hyperbolic tangent and Logarithmic Sigmoid, in the radial-basis and output layers of the networks are applied. Training and verification procedures of the specified neural structures for the approximation of System Throughput (ST) and System Response Time (SRT) indices against the Service Demand (SD) traffic factor were conducted. The performance evaluation of RBNNs and FFNNs is based on a set of criteria consisting of Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Variance, etc. The Radial Basis and Feed-Forward models assumed with minimization found for the specified criteria and a high correlation between the Observed and Predicted values about ST and SRT incoming traffic indices are synthesized.*

**Keywords:** ICT technologies; performance prediction; QoS; radial basis; feed-forward.

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Ефективността на обслужване на пакетни данни в информационно-комуникационните системи SD е комплексен процес, основаващ се на редица фактори и параметри на преносната среда и използваните комуникационни канали за връзка. Съществени индикатори, свързани с тези процедури са „пропускателната способност ST“ и „общото време за чакане на обслужване и обработка на потребителски заявки SRT“. Поддържането на оптимално съотношение между посочените индекси попада в обхвата на всяка ИКТ структура, независимо от сложността на организация на информационния мониторинг и администриране [1-3]. Това изискване може да бъде постигнато чрез интеграцията на аналитични инструменти за прогнозен анализ, позволяващи изчисляване на „очакван количествен еквивалент“ на ST и SRT. Наличието на тези прогнозни количествени оценки ще даде възможност за повишаване на бързодействието и надеждността при обслужване на системните потребители на ICTs. Проблемът е особено актуален в редица сектори на комуникациите като 5G; LTE; Wireless, Cellular, High-Speed, Mobile Edge Networks; Internet; IoT и др. В качеството на инструменти за статистическо моделиране в подобни изследвания служат Long Short-Term Memory, Recurrent Units, Adaptive-Neuro Fuzzy Interface Systems, Gaussian Process Regression,

Convolutional Neural Networks и други [4-9].

Обект на изследване в настоящия доклад е моделирана ICT инфраструктура с опашкова организация на обработката на заявки при дефиниран набор от сървърни звена за първична и вторична манипулация с данните чрез Java Modeling Tool платформа. Основната задача тук се свърза със синтез на модели на основата на AI за прогнозиране на указаните:

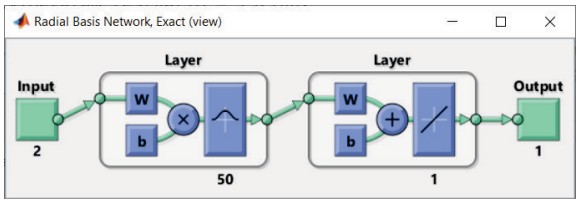
- System Throughput;
- System Response Time;

индекси относно входящия постъпващ трафик на етап планиране с оглед на изграждане и експлоатация. Въведен е хибриден подход с включване Radial Basis Neural Networks и Feed-Forward Neural Networks при декларирани управляеми фактори:

- Service Demand;
- Service Demand$^2$.

## 2. ОБУЧЕНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ НА RADIAL BASIS NEURAL NETWORKS

В рамките на първа фаза от анализа е направено обучение и оценка на ефективността на Radial Basis Neural Networks. Заложените невронни модели са изградени от входен, скрит радиално-базисен и изходен слой с линейна активационна функция. Особеност на този вид мрежи е общата фаза на създаване и невронно обучение. В структурно отношение количеството на изчислителните неврони във втория слой на RBNNs остава непроменен независимо от увеличаването или намаляването на „широчината на функцията – Spread Indicator (SI)“. Броят на радиално базисните скрити неврони автоматично се приравнява на фиксираното количество на еталоните в подавания към мрежите входен набор, показано на фиг. 1. В таблица 1 са дадени резултатите за изходните показатели при оценка на качеството на RBNNs – MSE, MAE и RMSE, едновременно обобщени за ST и STR.




***Фиг. 1.*** *RBNN за прогнозен анализ на индекси на производителност ST и STR*

***Табл. 1.*** *RBNN при прогнозиране на изменението на индекси на производителност ST и STR при две входни променливи*

| SI | MSE | MAE | RMSE |
|---|---|---|---|
| **System Throughput** | | | |
| 0.10 | 7.7309e-12 | 2.0281e-06 | 2.7805e-06 |
| 0.15 | 2.3484e-11 | 4.0773e-06 | 4.8460e-06 |
| 0.20 | 5.9231e-11 | 6.0761e-06 | 7.6962e-06 |
| 0.25 | 6.4694e-11 | 6.2573e-06 | 8.0433e-06 |
| 0.30 | 7.1730e-11 | 7.0615e-06 | 8.4693e-06 |
| 0.35 | 7.7241e-11 | 7.3046e-06 | 8.7887e-06 |
| 0.40 | 8.1960e-11 | 7.7676e-06 | 9.0532e-06 |
| 0.45 | 8.1520e-11 | 7.7370e-06 | 9.0288e-06 |
| 0.50 | 8.4402e-11 | 7.9536e-06 | 9.1870e-06 |
| 0.55 | 8.4309e-11 | 7.9503e-06 | 9.1820e-06 |
| 0.60 | 8.4188e-11 | 7.9454e-06 | 9.1754e-06 |
| 0.65 | 8.6694e-11 | 8.0451e-06 | 9.3110e-06 |
| 0.70 | 8.8591e-11 | 8.1885e-06 | 9.4123e-06 |
| 0.75 | 8.8577e-11 | 8.1878e-06 | 9.4115e-06 |
| 0.80 | 8.8570e-11 | 8.1875e-06 | 9.4112e-06 |
| 0.85 | 8.8576e-11 | 8.1883e-06 | 9.4115e-06 |
| 0.90 | 8.8721e-11 | 8.1890e-06 | 9.4192e-06 |
| **System Response Time** | | | |
| 0.10 | 2.2659e-16 | 1.0985e-08 | 1.5053e-08 |
| 0.15 | 7.0014e-16 | 2.2364e-08 | 2.6460e-08 |
| 0.20 | 1.7846e-15 | 3.3327e-08 | 4.2245e-08 |
| 0.25 | 1.7846e-15 | 3.3327e-08 | 4.2245e-08 |
| 0.30 | 2.1609e-15 | 3.8694e-08 | 4.6485e-08 |
| 0.35 | 2.3329e-15 | 4.0039e-08 | 4.8300e-08 |
| 0.40 | 2.4844e-15 | 4.2629e-08 | 4.9844e-08 |
| 0.45 | 2.4698e-15 | 4.2454e-08 | 4.9697e-08 |
| 0.50 | 2.5663e-15 | 4.3712e-08 | 5.0659e-08 |
| 0.55 | 2.5637e-15 | 4.3698e-08 | 5.0633e-08 |
| 0.60 | 2.5581e-15 | 4.3630e-08 | 5.0578e-08 |
| 0.65 | 2.6415e-15 | 4.4207e-08 | 5.1396e-08 |
| 0.70 | 2.7021e-15 | 4.5046e-08 | 5.1981e-08 |
| 0.75 | 2.7017e-15 | 4.5041e-08 | 5.1978e-08 |
| 0.80 | 2.7010e-15 | 4.5034e-08 | 5.1971e-08 |
| 0.85 | 2.7006e-15 | 4.5010e-08 | 5.1968e-08 |
| 0.90 | 2.7064e-15 | 4.5021e-08 | 5.2023e-08 |

Проведеният анализ на поведението на указаните критерии обхваща RBNNs при стъпково нарастване на SI в диапазона 0.1 – 0.9. Установени са удовлетворяващи целите на изследването степени:

- „$10^{-11}$“ за средноквадратичната и „$10^{-6}$“ при средната абсолютна грешка и средното квадратично отклонение;

- „$10^{-15}$“ при MSE и „$10^{-8}$“ за MAE и RMSE;

на приложените входни данни при обучаващите процедури. Регистрираните стойности на MSE, MAE и RMSE се характеризират с експоненциално нарастване до нива на SI = 0.4. Наблюдавано е известно установяване на количествените критерии с вариращи колебания:

- „$8.1400^{-11}$ до $8.9000^{-11}$“ при MSE, „$7.7000^{-6}$ до $8.2000^{-6}$“ за MAE и „$9.0000^{-6}$ до $9.4200^{-6}$“ относно RMSE при невронен подбор за ST;
- „$2.5600^{-15}$ до $2.7100^{-15}$“ относно MSE, „$4.3500^{-8}$ до $4.5100^{-8}$“ за MAE и „$5.0000^{-8}$ до $5.2100^{-8}$“ относно RMSE при избор на прогнозен модел за SRT;

до крайна широчина на радиално базисната функция SI = 0.9. Вследствие на извършените дейности са селектирани RBNN архитектури за прогнозиране на трафични индекси на производителност ST и SRT при минимална заложена широчина на радиално базисната функция SI = 0.1, в случайте на постигане на MSE = $7.7309^{-12}$ и MSE = $2.2659^{-16}$.

## 3. СИНТЕЗ И ВЕРИФИКАЦИЯ НА FEED-FORWARD НЕВРОННИ СТРУКТУРИ

Втората фаза от реализираните изследвания се свежда до анализ на ефективността на Feed-Forward Neural Networks за прогнозен анализ на ST и SRT. За FFNNs са характерни отделни процеси на създаване и обучение по Levenberg-Marquardt градиентен алгоритъм, както и константна тангес-сигмоидална активация tansig във втория структурен слой. При невронен синтез е разгледана и анализирана приложимостта два варианта на активация в изходния слой на мрежите, т.е. последователно използване на логаритмична-сигмооидална logsig и tansig функция. Процедурите са проведени при еднаква вариация на скритите неврони HN, ограничена от 3 до 13 изчислителни единици.

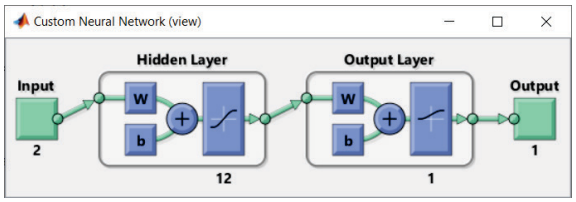
Таблица 2 съдържа снетите стойности на идентичните критерии за оценка на качеството MSE, MAE и RMSE за трафичен индекс ST. В хода на изследванията са констатирани значително завишени нива на базисните фактори за невронен побор при използване на logsig активационен тип, в пъти по-големи в сравнение с RBNNs.

***Табл. 2.*** *FFNN при прогнозен анализ на индекс ST при logsig и tansig изходна активация*

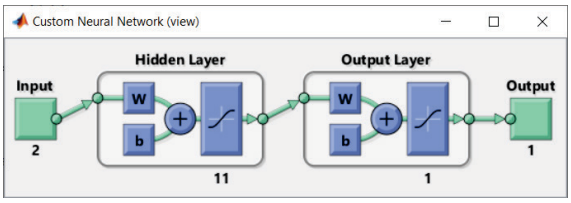
| HN | MSE | MAE | RMSE |
|---|---|---|---|
| | ***Logsig изходна активация*** | | |
| ***3*** | 0.1516 | 0.2269 | 0.3894 |
| ***4*** | | 0.2238 | 0.3893 |
| ***5*** | 0.1567 | 0.2661 | 0.3958 |
| ***6*** | 0.1515 | 0.2231 | 0.3893 |
| ***7*** | 0.1516 | 0.2259 | 0.3894 |
| ***8*** | 0.1515 | 0.2233 | |
| ***9*** | 0.1516 | 0.2232 | |
| ***10*** | 0.1515 | 0.2225 | 0.3893 |
| ***11*** | 0.1516 | 0.2239 | |
| ***12*** | 0.1515 | 0.2221 | |
| ***13*** | 0.1515 | 0.2234 | |
| | ***Tansig изходна активация*** | | |
| ***3*** | 0.0081 | 0.0682 | 0.0898 |
| ***4*** | 0.0054 | 0.0588 | 0.0733 |
| ***5*** | 0.0082 | 0.0563 | 0.0904 |
| ***6*** | 0.0178 | 0.0958 | 0.1334 |
| ***7*** | 0.0078 | 0.0662 | 0.0882 |
| ***8*** | 0.0149 | 0.1009 | 0.1220 |
| ***9*** | 0.0018 | 0.0354 | 0.0422 |
| ***10*** | 0.0095 | 0.0751 | 0.0976 |
| ***11*** | 0.0012 | 0.0296 | 0.0340 |
| ***12*** | 0.0045 | 0.0527 | 0.0668 |
| ***13*** | 0.0028 | 0.0389 | 0.0530 |

Отчетените грешки остават сравнително близки в цялостния диапазон, независимо от увеличаването на невроните в скрития слой. Относно модел за прогнозен анализ на „пропускателната способност“ е селектирана архитектура с получени MSE = 0.015, MAE = 0.2221 и RMSE = 0.3893, представена на фиг. 2.а). Посредством замяната на типа на изходна активация при FFNNs се постигна значително подобряване на качествените показатели. Тук тяхната минимизация е сведена до нива 0.0012 при MSE, 0.0296 за MAE и 0.0340 относно RMSE, регистрирани на намерен най-подходящ невронен модел за прогнозен анализ със съдържание на 11 скрити неврона на фиг. 2.б). Максимална средно квадратична грешка 0.0081, средна абсолютна грешка

0.0682 и средно квадратично отклонение 0.0898 са установени при FFNN при начален зададен брой неврони в скрития слой.




*а)*



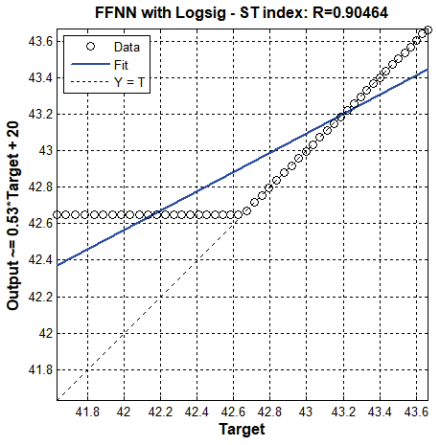

*б)*

***Фиг. 2.*** *Синтезирани FFNNs за прогнозиране на ST с а) Logsig и б) Tansig изходни функции*

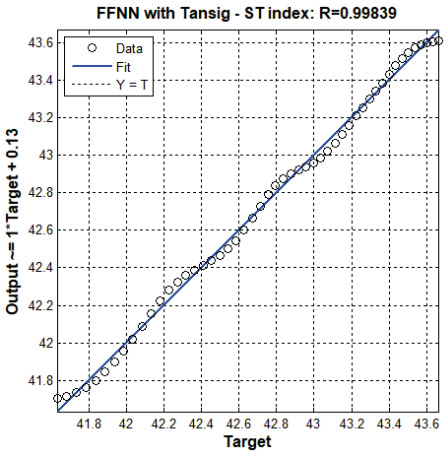
Различията във функционалността на синтезираните невронни модели са допълнително илюстрирани чрез линиите на регресия за мрежовите изходи на фиг. 3 и диаграмите на грешките на фиг. 4. Залагането на логаритмично-сигмоидална активация в изходния слой се свързва с:

- ❖ постигане на коефициент на корелация R = 0.90464 и забележимо отклонение на емпиричната спрямо теоретичната линия на регресия, предизвикващи подобно явление относно обхванатите информационни еталони;
- ❖ наличие на известна част от еталони от информационната извадка с голяма разлика между теоретичничните и прогнозните нива на трафичен индекс ST, превишаващи приемливото за друга част от извадката ниво „-0.02000“.

Използването на тангенс-сигмоидална изходна функция притежава силно положителен ефект, изразяващ се в констатирана превишаваща logsig корелация R = 0.99839. Също така и минимални Residuals в приемливи граници на отклонение на Predicted в сравнение с Observed стойности на разглеждания ICT трафичен индекс ST.



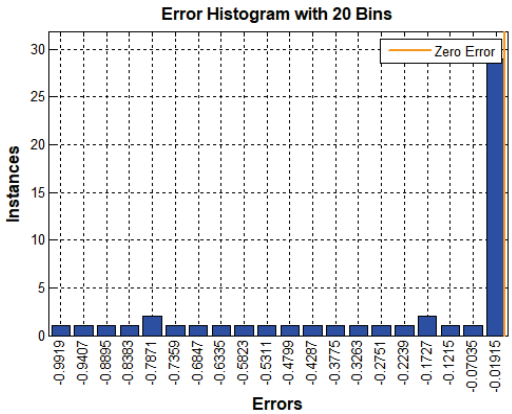

*а)*



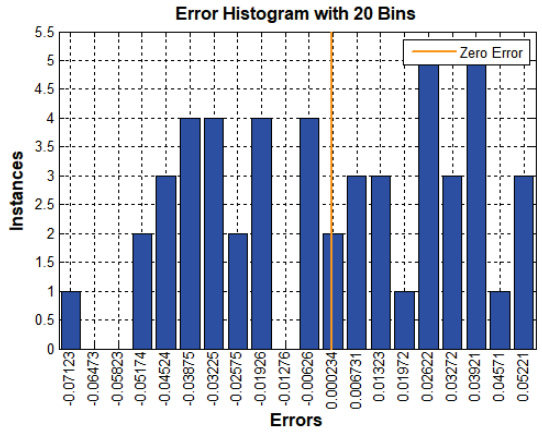

*б)*

***Фиг. 3.*** *Линии на регресия за селектираните FFNNs за прогнозен анализ на ST с а) Logsig и б) Tansig изходни функции*

Използването на тангенс-сигмоидална изходна функция притежава силно положителен ефект, изразяващ се в констатирана превишаваща logsig корелация R = 0.99839. Също така и минимални Residuals.




*а)*




*б)*

***Фиг. 4.*** *Хистограми на грешките за избраните крайни FFNNsза прогнозиране на ST с а) Logsig и б) Tansig изходни функции*

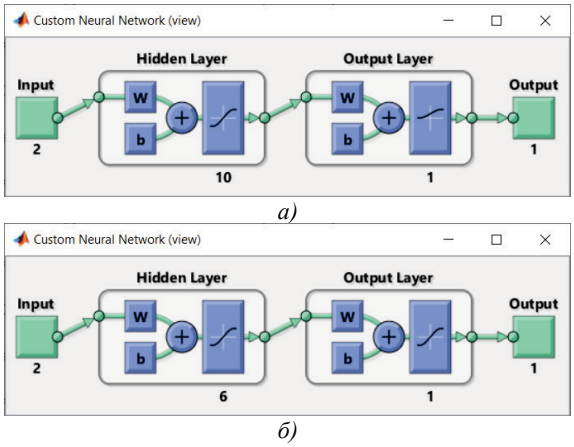
По отношение на втория целеви индекс на производителност са констатирани процедури по минимизация на MSE, MAE и RMSE (таблица 3). Ясно изразено е подобряването на посочените показатели, особено относно пригодността на logsig изходен тип на активация. Факт е регистрираният порядък за средноквадратичната грешка „$10^{-6}$“ при търсене на най-подходящ модел за индекс ST. Запазва се тенденцията за минимални изменения на MSE и поява на възникнала липса на изменение на RMSE при нарастване на количеството на изчислителните единици в скритите слоеве на мрежите.

В качеството на краен прогнозен модел е избрана FFNN със съдържание на 10 междинни неврона при постигнати MSE = $6.7014^{-6}$, MAE = 0.0017 и RMSE = 0.026 на фиг. 5.а). Съществено е подобрението на критериите за количествен анализ при задаване на тангенс-сигмоидална изходна функция на активация за трафичен индекс SRT в сравнение с изходните резултати при подбор на FFNNs за ST. Тук постигнатите нива се доближават до ефективността на Radial Basis Neural Networks. Получени са най-високи стойности на MSE = $3.2301^{-8}$, MAE = $1.2424^{-4}$ и RMSE = $1.7972^{-4}$ при невронна структура с 5 междинни неврона.

***Табл. 3.*** *FFNN при прогнозиране на индекс на производителност на SRT при logsig и tan-sig изходна функции*

| HN | MSE | MAE | RMSE |
|---|---|---|---|
| **Logsig изходна активация** | | | |
| 3 | 6.7039e-06 | 0.0017 | 0.0026 |
| 4 | 6.7453e-06 | 0.0018 | |
| 5 | 6.7098e-06 | | |
| 6 | 6.7073e-06 | | |
| 7 | 6.7188e-06 | | |
| 8 | 6.7086e-06 | | |
| 9 | 6.7024e-06 | 0.0017 | |
| 10 | 6.7014e-06 | | |
| 11 | 6.7377e-06 | 0.0018 | |
| 12 | 6.7069e-06 | | |
| 13 | 6.7171e-06 | | |
| **Tansig изходна активация** | | | |
| 3 | 6.3586e-09 | 4.4472e-05 | 7.9741e-05 |
| 4 | 2.3862e-08 | 1.0029e-04 | 1.5447e-04 |
| 5 | 3.2301e-08 | 1.2424e-04 | 1.7972e-04 |
| 6 | 1.5496e-09 | 2.4740e-05 | 3.9365e-05 |
| 7 | 1.8582e-09 | 2.5191e-05 | 4.3107e-05 |
| 8 | 6.4455e-09 | 4.7123e-05 | 8.0284e-05 |
| 9 | 1.9885e-08 | 7.9292e-04 | 1.4101e-04 |
| 10 | 2.2955e-09 | 3.0967e-05 | 4.7912e-05 |
| 11 | 1.9759e-09 | 2.3942e-05 | 4.4451e-05 |
| 12 | 3.5390e-09 | 3.4721e-05 | 5.9489e-05 |
| 13 | 1.7884e-09 | 2.2597e-05 | 4.2289e-05 |

Анализът показва най-добра ефективност за FFNN модел с 6 HN изчислителни единици за прогнозиране на „общото телетрафично време за чакане в опашката и обработка на заявки“, показан на фиг. 5.б). Спрямо синтезираната структура са отчетени минимални показания - средноквадратична грешка $1.5496^{-9}$, средна абсолютна грешка $2.4740^{-5}$ и средно квадратично отклонение $3.9365^{-5}$.




*а)*

*б)*

***Фиг. 5.*** *Селектирани FFNNs при вариационен анализ на SRT с а) Logsig и б) Tansig изходни активации*

Изходните количествени еквиваленти потвърждават по-добрата ICT параметризация при тангенс-сигмоидална в сравнение с логаритмична-сигмоидална активация, както за единия, така и за другия трафичен индекс на производителност за обезпечаване на QoS.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потвърдена е високата степен на адекватност по отношение на RBNNs. Установена е неподходяща приложимост на logsig активация в изходните слоеве на FFNNs при прогнозиране за индекс ST. Сравнително по-добра адекватност е наблюдавана при комплексен индекс SRT“. Констатирана е възходяща ефективност при верификация на изходен активационен тип tansig спрямо приетите тестови индекси на производителност ST и SRT при FFNNs.

Предвижда се разширяване на обхвата на изследванията с включване на Generalized Regression Neural Networks и Cascade-Forward Neural Networks.

*Благодарности: Изследванията в публикацията са реализирани и финансирани по Договор № 2406Е/ 2024г. „Мониторинг на мрежовия трафик и достъп на информация чрез биометрична диагностика с изкуствен интелект“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Waller J. Performance benchmarking of application monitoring frameworks. Kiel: Kiel Computer Science Series, 2014.

[2] Dutta V. Performance analysis on throughput in 4G network in digital environment with SISO technique. International Journal of Information Technology and Computer Science 2013;2023(07):71-79.

[3] Ferreira G., Ravazzi C., Dabbene F., Calafiore G., Fiore M. Forecasting network traffic: A survey and tutorial with open-source comparative evaluation. International Journal IEEE Access 2023;2023(1):1-28.

[4] Lohrasbinasab I., Shahraki A., Taherkordi A., Jurcut A. From statistical to machine leaning-based network traffic prediction. International Journal Transactions on Emerging Telecommunications Technologies 2021;33(4):1-29.

[5] Zhan S., Yu L., Wang Z., Du Y., Yu Y., Cao Q., Dang S., Khan Z. Cell traffic prediction based on convolutional neural network for software-defined ultra-dense visible light communication networks. International Journal of Security and Communication Networks 2021;2021(1):1-10.

[6] Awaforiaju T., Lasisi H., Olawuyi A., Olatunde O. Artificial neural networks of key performance indicators for mobile telecommunications. Journal of Scince and Technologies 2023;15(2):43-53.

[7] Dodan, M., Vien, Q. and Nguyen, T. Internet traffic prediction using recurrent neural networks. International Journal Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems 2022;9 (4):1-14.

[8] Do Q., Doan T., Nguyen T., Duong N., Linh V. Prediction of data traffic in telecom networks based on deep neural networks. Journal of Computer Science 2020;16(9):1268-1277.

[9] Borisov V., Borisova S., Lupinovich S., Vihor V., Torubara A. Neural networks in statistical analysis and monitoring system telecommunication network. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering 2020;9(4):5447-5450.

# ДИСТАНЦИОНЕН МОНИТОРИНГ НА СИСТЕМИ ЗА РЕЗЕРВНО ЗАХРАНВАНЕ

**Тодор Тодоров, Емил Йончев*, Георги Божев**
*ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев 158, София, България*
**кореспондиращ автор: e_iontchev@yahoo.com*

# REMOTE MONITORING OF BACKUP POWER SYSTEMS

**Todor Todorov, Emil Iontchev*, Georgi Bozhev**
*Higher School of Transport "Todor Kableshkov", 158 Geo Milev Str,. Sofia, Bulgaria*
**Corresponding author: e_iontchev@yahoo.com*

**Abstract**
*In emergency backup power systems, the most expensive component with the shortest lifespan is the battery (AB). This necessitates continuous monitoring and control of its key parameters. In a previous article, the authors proposed a system for collecting certain parameters of the AB and processing them. However, access to the data via the internet was limited. To address this shortcoming, two options for modifying the monitoring system are proposed. Solutions for improved graphical data representation and enhanced security of data access are also suggested. The data is stored in a MySQL database and visualized using the Grafana platform. Access to the data is provided through an Nginx proxy server to ensure that only authorized individuals can view and use it. Acceptable ranges for each parameter have been set, and if they are exceeded, an email notification is sent to the relevant parties. At the end of each day, the data is compressed and encrypted with a unique key, ensuring its reliable long-term storage. The proposed monitoring options have been practically implemented, and experiments have been conducted, proving their functionality.*

**Keywords:** backup power supply, battery, Internet of Things, microcontroller.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Аварийни резервни захранвания се използват в почти всички области на човешкия живот. Елемента с най-висока цена и кратък срок на експлоатация в тези системи е акумулаторната батерия(АБ). Това налага нейните параметри да бъдат непрекъснато наблюдавани и контролирани. Това може да стане в самото място където се намира тя, което решение изисква да има ежедневно присъствие на отговорен за целта персонал. Друга възможност е да се използват решенията предлагани от концепцията интернет на нещата. Тя предоставя различни комуникационни мрежи и протоколи посредством, които състоянието на батерията и на резервното захранване като цяло, да се наблюдава отдалечено, без да е необходимо конкретния собственик да назначава човек, отговорен за тази дейност. Така фирмата доставчик на резервното захранване може да осигури надеждна и по-дълговечна експлоатация на акумулаторната батерия. Предоставя се възможност за събиране на данни за всяка батерия, да се анализират, архивират и съхраняват за период от време, колкото е необходим. Така може да се докаже и настъпил дефект пред фирмата производител на акумулаторната батерия или като обратна връзка с евентуални препоръки. Такава система е особено полезна когато резервното захранване е предназначено за големи промишлени, транспортни предприятия, болници, административни сгради, където има много батерии, които работят съвместно. В тези случай, дефектирането на някоя батерия

може да доведе до отказ в системата, което е недопустимо.

За целта са разработени системи за мониторинг и контрол на батерии (СМК), които измерват и контролират основните параметри на АБ и защитават по-големи полета батерии. Някои от големите компании на пазара разработващи такива системи са [1,2, 3].

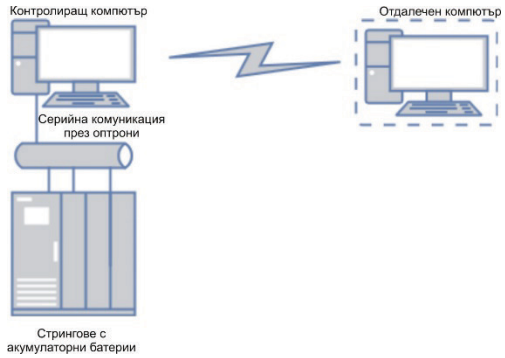
Собствена разработка за СМК на АБ е представена в статия [4]. Системата контролира и събира данни за всяка батерия, които се записват в база данни на локален сървър. Наблюдаването на данните може да стане като се използва отдалечен достъп до контролния компютър. Този метод не дава възможност за сигурна и безопасна връзка, както и не дава възможност да се изпращат съобщения при излизане на някои параметри извън предписаните норми.

В настоящата статия са описани два варианта за надграждане на системата описана в [4] с цел данните да бъдат графично представени, както и да се изпращат съобщения по e-mail и sms, когато са извън зададените граници. Данните да бъдат архивирани, компресирани и маркирани със сертифициран цифров подпис и времеви етикет кога е създаден архива. Така достъп до данните може да има всеки с издадено разрешение, като това може да става от всяка точка, в която има интернет.

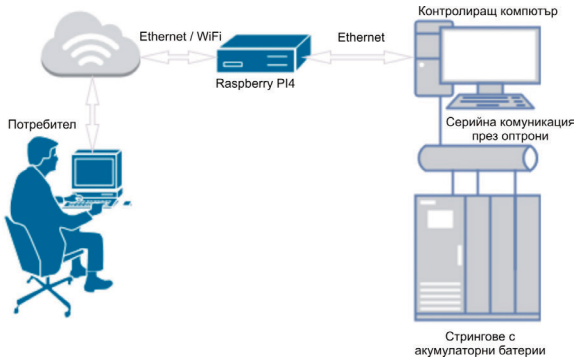
## ХАРДУЕРНИ РЕШЕНИЯ

Съществуващото към момента решение за мониторинг на системата разгледана в [4] е показано на фигура 1. Контрола на параметрите на АБ се извършва от модул с микроконтролер, който е свързан към всяка батерия. Данните получени от тези модули се събират по команда от контролният компютър. Това става по сериен интерфейс, който е галванично разделен с оптрони. Получените данни се съхраняват в html формат на Apache HTTP сървър, инсталиран на контролния компютър. Достъпа до тях на локално ниво става на адрес 127.0.0.1. От интернет достъпа става с използване на приложението AnyDesk, като по този начин се преодолява изискването за наличието на статичен адрес.

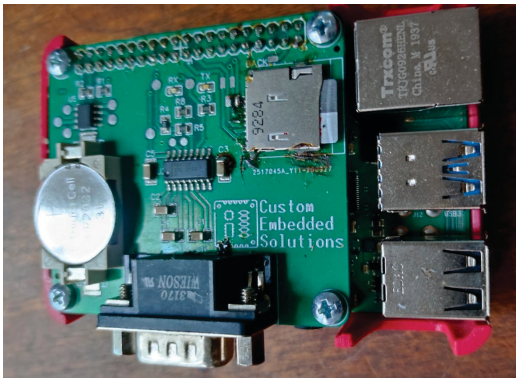
Въпреки, че AnyDesk използва протокола TLS 1.2 и криптиране на връзка с AES-256, използването му представлява сериозен риск за сигурността на системата. Това е една от причините за търсене на нови варианти за достъп до системата.




*Фиг.1. Блокова схема на съществуваща СМК*




*Фиг. 2. Първи вариант за промяна на СМК*

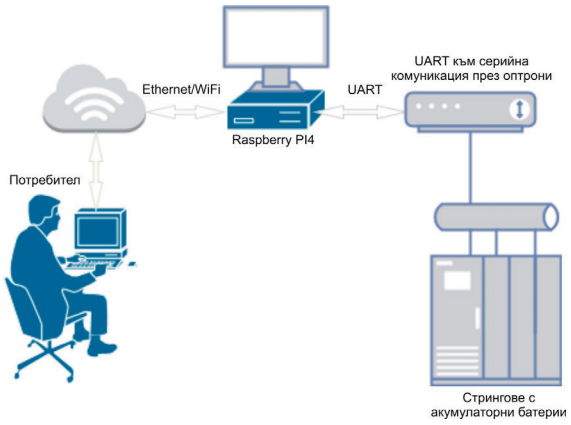



*Фиг. 4. Комуникационен модул*

Добавяне на нови функции на системата е избрано да се направи на базата на Raspberry Pi. Една от причините за този избор е сравнително ниската цена, наличието на няколко вида мрежи за комуникации, малки размери, възможност за сравнително лесно включване на допълнителни сензори и изпълнителни механизми. Операционната система на платформата позволява да се инсталират необходимите програмни продукти, които са с отворен код и не е необходимо да се заплаща за тях.

При варианта показан на фигура 2 старата система се запазва, добавя се само платформата Raspberry. На нея са инсталирани програмите за архивиране, компресиране и криптиране на данните за едно денонощие.

Графично представяне на данните и следене дали техните стойности са в зададените граници. При излизане извън




*Фиг.3. Втори вариант за промяна на СМК*

тези граници се изпраща e-mail и sms съобщение. Платформата Raspberry е свързана към интернет посредством WiFi или Ethernet връзка. Контролният компютър събира суровите данните от акумулаторните батерии и ги записва в текстови файл. През определен период се прехвърля към Raspberry Pi4 по локалната Ethernet мрежа. Получените резултати от обработката им се визуализират и могат да бъдат наблюдавани от всяка точка с достъп до интернет. Недостатък на този вариант е, че данните от файла не се прехвърлят в реално време. Това означава, че всички евентуални аларми ще бъдат получени с определено закъснение.

Следващата стъпка е функциите изпълнявани от контролният компютър да бъдат изпълнявани от Raspberry Pi4. Основните блокове на системата са показани на фигура 3.

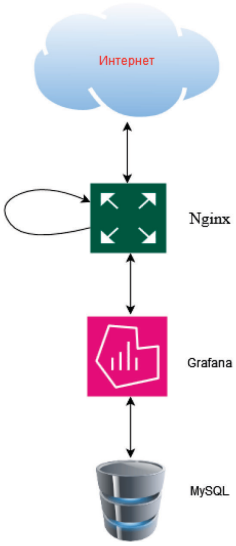
Това е изпълнено с пренаписване на управляващата програма за новата операционна система и разработката на нов комуникационен модул за свързване на отделните стрингове с акумулаторни батерии. Този модул преобразува UART интерфейса в галванично развързан, с оптронни на входа и изхода, последователен интерфейс. Освен тази функция, на него е добавена SD карта, на която се прави резервно копие на суровите данни. Достъпа до тях е само от оторизиран служител със специална за целта програма. Вида на новият комуникационен модул е показан на фигура 4.

Предимството на този вариант е, че щом има налични сурови данни от системата, те се прехвърлят посредством MQTT протокол към базата данни и програмата за визуализация. Премахнат е и контролният компютър работещ под операционна система Windows, който е и с по-висока консумация на електрическа енергия. Предвидено е архивираните данни да се съхраняват и в облачен сървър, с цел повишаване сигурността, наличността и достъпността до тях.

## СОФТУЕРНИ РЕШЕНИЯ

За управление на отделните софтуерни приложения на Raspberry Pi4 е инсталирана операционна система Debian. С цел по-висока сигурност и надеждност на системата, оптимално използване на хардуерните ресурси и по-лесно мащабиране на проекта в бъдеще, е инсталирана платформата Docker. Съответно за изпълнение на основните услуги са използвани три софтуерни приложения, работещи в изолирани потребителски пространства – контейнери. Това са: MySQL[5], Grafana[6] и Nginx[7].

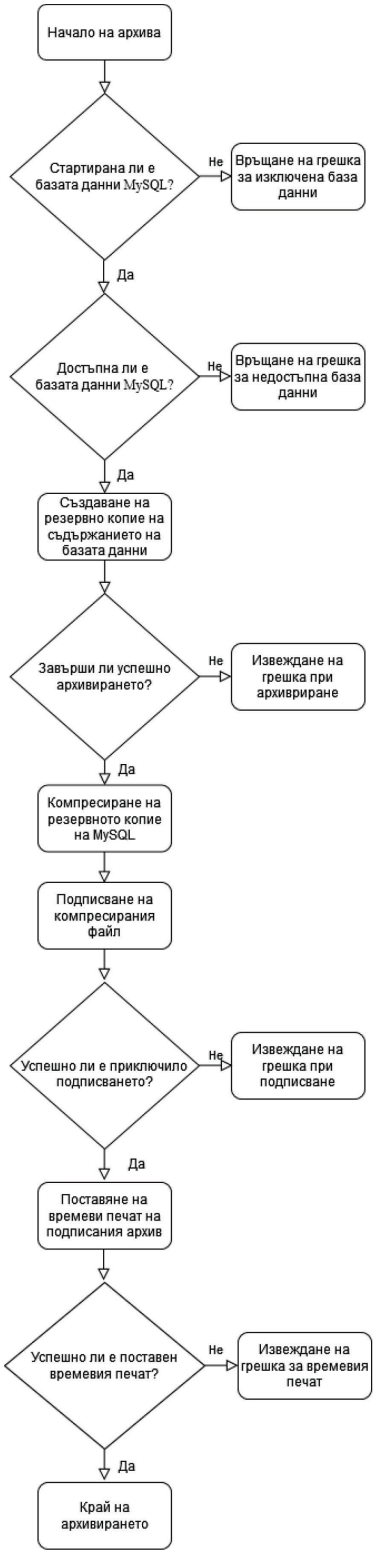
Данните за параметрите на акумулаторните батерии се получават всяка минута, а тези за оценяване на качеството на доставяната енергия на входа и изхода на системата всяка секунда. Впоследствие след обработка се получават времеви серии от 15 секунди и 10 минути. Всичко това е причина за реализиране на базата данни да се използва MySQL.




*Фиг. 5. Последователност на достъп до данните от интернет*

Подходящ инструмент за графично представяне на данните организирани във времеви серии, както и създаване на подходящи аларми при излизане извън зададените допустими граници на параметрите на АБ, е уеб приложението Grafana.

Достъпът до базата данни и създадените резултати от Grafana, трябва да е само от оторизирани потребители, които имат издаден клиентски сертификат, подписан от удостоверяващ орган. Подходящ за целта е уеб сървъра Nginx. Зад него са разположени останалите два контейнера.




*Фиг. 6. Алгоритъм за архивиране на данните*

Използва се като прокси сървър, който прехвърля само заявки, които имат необходимия сертификат. Същевременно може да обслужва заявки от много потребители едновременно и то с висока скорост.

Проверката за сертификатите е двустепенна, от интернет до прокси сървъра и от него до Grafana. Последователността на получаване на необходимата информация от системата е представена на фигура 5.

Таблица 1 Контролирани параметри на АБ

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| time | UBat0 | UBat1 | UBat2 | UBat3 | TBat0 | TBat1 | TBat2 | TBat3 | Rin0 | Rin1 | Rin2 | Rin3 |
| 05:00 | 12.939 | 13.017 | 12.958 | 13.057 | 23.546 | 23.686 | 23.566 | 23.626 | 4.025 | 4.022 | 4.027 | 4.015 |
| 05:01 | 13.079 | 12.996 | 13.018 | 12.909 | 23.686 | 23.646 | 23.586 | 23.586 | 4.022 | 4.022 | 4.018 | 4.018 |
| 05:02 | 13.069 | 12.948 | 13.066 | 13.089 | 23.646 | 23.586 | 23.526 | 23.506 | 4.015 | 4.015 | 4.030 | 4.025 |
| 05:03 | 12.996 | 13.038 | 13.074 | 13.074 | 23.606 | 23.506 | 23.506 | 23.686 | 4.020 | 4.015 | 4.013 | 4.027 |
| 05:04 | 13.020 | 12.980 | 13.006 | 13.009 | 23.626 | 23.626 | 23.526 | 23.666 | 4.020 | 4.015 | 4.013 | 4.027 |
| 05:05 | 13.050 | 13.044 | 13.033 | 13.048 | 23.506 | 23.646 | 23.546 | 23.626 | 4.010 | 4.020 | 4.032 | 4.022 |
| 05:06 | 12.959 | 13.035 | 13.018 | 13.083 | 23.626 | 23.666 | 23.686 | 23.546 | 4.012 | 4.020 | 4.012 | 4.013 |
| 05:07 | 12.922 | 13.076 | 13.025 | 12.938 | 23.686 | 23.566 | 23.666 | 23.686 | 4.030 | 4.010 | 4.027 | 4.010 |
| 05:08 | 13.009 | 12.916 | 13.031 | 13.031 | 23.526 | 23.566 | 23.526 | 23.566 | 4.030 | 4.010 | 4.027 | 4.010 |
| 05:09 | 12.938 | 12.955 | 12.978 | 13.063 | 23.526 | 23.646 | 23.566 | 23.666 | 4.020 | 4.027 | 4.015 | 4.013 |
| 05:10 | 12.965 | 13.017 | 13.056 | 13.036 | 23.626 | 23.506 | 23.506 | 23.646 | 4.020 | 4.025 | 4.022 | 4.027 |
| 05:11 | 13.085 | 13.035 | 13.089 | 12.945 | 23.526 | 23.606 | 23.586 | 23.646 | 4.020 | 4.015 | 4.018 | 4.022 |
| 05:12 | 12.992 | 12.957 | 13.025 | 12.925 | 23.666 | 23.686 | 23.506 | 23.566 | 4.020 | 4.015 | 4.018 | 4.022 |
| 05:13 | 12.926 | 12.913 | 13.080 | 13.011 | 23.526 | 23.666 | 23.506 | 23.626 | 4.020 | 4.032 | 4.013 | 4.025 |
| 05:14 | 13.012 | 12.929 | 13.063 | 12.902 | 23.506 | 23.646 | 23.546 | 23.666 | 4.020 | 4.035 | 4.010 | 4.020 |
| 05:15 | 13.085 | 13.033 | 13.040 | 13.088 | 23.586 | 23.506 | 23.566 | 23.506 | 4.037 | 4.015 | 4.020 | 4.000 |
| 05:16 | 13.071 | 13.005 | 13.096 | 13.009 | 23.606 | 23.546 | 23.526 | 23.646 | 4.037 | 4.015 | 4.020 | 4.000 |
| 05:17 | 13.071 | 13.090 | 12.917 | 12.923 | 23.606 | 23.626 | 23.686 | 23.606 | 4.022 | 4.018 | 4.025 | 4.027 |

Когато клиент се опита да получи достъп до уеб интерфейса на Grafana, заявката минава през Nginx. Той изисква клиентски SSL сертификат, който трябва да е подписан от удостоверяващ орган (CA), включен в списъка на Nginx с доверени удостоверителни вериги [8]. Проверява автентичността на клиентския сертификат и дали срокът му на валидност не е изтекъл. След успешната проверка, Nginx установява дали услугата Grafana е достъпна, преди да позволи достъп на клиента.

При проблеми с услугите се връща HTTP грешка, като не позволява на клиента да получи достъп до неработеща услуга. Ако се потвърди, че Grafana работи, на клиента се предоставя достъп до уеб интерфейса. Прехвърлянето на данни е по защитен канал, установен от клиентския сертификат.

Предвидено е в края на всеки работен ден събраната и обработена информация да се архивира и след това компресира. Полученият компресиран файл се подписва с цифров подпис, сертифициран от удостоверяващ орган и към него се добавя времеви етикет (timestamp), за да се гарантира автентичността и целостта му [9]. Алгоритъмът за получаване на архива е представен на фигура 6. Всяка стъпка включва проверки за справяне с потенциални проблеми, което гарантира, че процесът е стабилен и надежден.

За достъп от всяка една точка с налична интернет връзка е избрано да се използва домейн име, което се подържа от междинен сървър, даващ възможност динамични IP адреси да бъдат насочвани към това име. За целта и рутера на входа на системата е настроен винаги да пренасочва заявките от избраното име на домейн и порт, към зададен вътрешен адрес и устройство с конкретен MAC адрес.

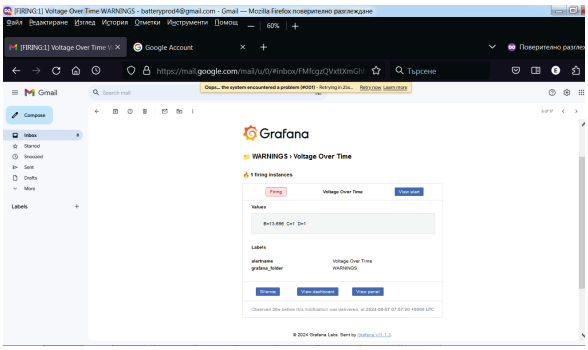
## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

В статията са показани резултатите от проведени тестове със СМК с включване на Raspberry Pi 4 към контролния компютър. Реализираната система е включена към четири оловно киселинни акумулаторни батерии. Към всяка от тях са включени модули за събиране на избрани техни параметри. Това са напрежението на всяка батерия, нейната температура и нейното вътрешно съпротивление. Измерванията са правени през една минута и са записвани в отделен csv файл, в споделена папка, в контролния компютър на СМК. Вида на данните е показан в таблица 1. На платформата Raspberry Pi са инсталирани разгледаните софтуерни приложения в предходната точка. Двете системи са свързани в LAN мрежа. След всеки кръгъл час записаните данни от файла, се прехвърлят в базата данни MySQL.




*Фиг. 7. Графично представени данни*

Следва визуализиране на данните от Grafana и контролиране дали техните стойности са в зададените граници. Вида на избраните контролни уреди за показване на моментните стойности на напрежението и вътрешното съпротивление, както и техните стойности във функция на времето, са показани на фигура 7.




*Фиг. 8. Изпратен e-mail за вдигната аларма*

При излизане на контролираните параметри извън посочените граници се изпраща e-mail до заинтересованите лица фигура 8.

Такъв се изпраща и при възстановяване на параметрите в нормалните граници.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложените варианти за надграждане на съществуваща система за контрол на параметри на акумулаторни батерии са тествани и е доказана тяхната работоспособност. И в двата случая има защита на данните и достъп до тях, само от оторизирани за целта хора. Архивирането е с цифров подпис, което гарантира, че никой няма да има достъп без съответното разрешение. Решението с прехвърляне на данните през споделена папка има недостатък, че това се извършва през определен период, в случая това е един астрономически час. Предимството на решението с разработване на допълнителен модул за адаптиране на UART интерфейса на Raspberry Pi към оптронния интерфейс на системата, е че данните се прехвърлят директно в базата данни и едновременно с това се прави архив в добавената SD карта на модула. Така се увеличава надеждността на системата.

## БЛАГОДАРНОСТ

*Представената система за измерване и контрол на основни параметри на акумулаторни батерии от системи за резервно захранване е част от Научно изследователски проект по Договор № 74/09.04.2024г., с възложител ВТУ „Тодор Каблешков”.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] https://www.dfuntech.com/bg/best-ups-data-center-battery-monitoring-software-linux-battery-monitor-software.html - 17.09.24

[2] http://nrgsource.eu/bg - 17.09.24

[3] https://heliosps.com/ - 17.09.24

[4] Todorov T., Iontchev E. "Measurement and control of key parameters of rechargeable batteries in backup power systems" Mechanics, Transport, Communications, vol. 22, no. 3/2, 2024, Article No. 2512, pp. X-88 - X-93, ISSN 1312-3823.

[5] https://www.oracle.com/mysql/what-is-mysql/ - 20.09.24

[6] https://www.redhat.com/en/topics/data-services/what-is-grafana - 20.09.24

[7] https://medium.com/globant/understanding-nginx-as-a-reverse-proxy-564f76e856b2 - 20.09.24

[8] https://easy-rsa.readthedocs.io/en/latest/ - 25.09.24

[9] https://www.signfiles.com/timestamping/ - 25.09.24.

# ПРОГНОЗИРАНЕ НА ПОСТЪПВАНЕТО И ОБСЛУЖВАНЕТО НА ПАКЕТИ В КОМУНИКАЦИИТЕ ЧРЕЗ РЕГРЕСИОНЕН АНАЛИЗ И НЕВРОННИ МРЕЖИ

**Ивелина Балабанова**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България*
*Кореспондиращ автор: ivstoeva@abv.bg*

# SERVICE DEMAND FORECASTING IN COMMUNICATIONS BY REGRESSION ANALYSIS AND NEURAL NETWORKS

**Ivelina Balabanova**

*Technical University of Gabrovo, 4 Str. "Hadji Dimitar", Gabrovo, Bulgaria,*
** Corresponding author: ivstoeva@abv.bg*

**Abstract**
*The paper presents an approach developed for forecasting of traffic performance indices at the transmission medium monitoring procedures by classical regression analysis and artificial intelligence concept. The object of research are ICT structures with a queuing organization of the service of user requests. Adequacy assessments of Linear Regression and Cascade-Forward Neural Networks (CFNNs) were subsequently applied. Specific metrics to examine the quality have been analyzed, respectively Coefficient of determination $R^2$, Mean-Squared Error - MSE, Mean Absolute Error - MAE and Root-Mena Square Error - RMSE. Significant levels of $R^2$ and required minimization of the errors defined during neural learning were obtained about the optimality and suitability requirements of the predictive models derived.*

**Keywords:** transmission medium; service demand; predictive analysis; regression analysis; cascade-forward.

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Регресионният анализ е един от най-често прилаганите аналитични способи в контекста на решаване на задачи за прогнозен анализ и оценка на значимостта и взаимовръзките между заложените променливи и обекти. Широкият спектър от изследвани области при интеграция на класическия анализ включва:

- бизнес, икономика, финанси, застраховане, маркетинг;
- земеделие, зоология, ветеринарна медицина и наука за климата;
- демография, здравеопазване;
- генетика, ксенобиология;
- недвижими имоти;
- транспорт, логистика [1-6].

Високата ефективност на изкуствените невронни мрежи е съизмерима с тази, постигана при класическите математически процедури при регресионно моделиране. Това се потвърждава от множеството сфери на тяхна интеграция при прогнозиране на вариациите на разнородни фактори, като по-съществените са:

- медицина - генетична диагностика, синтез на лекарства и медикаменти;
- метеорология – прогнозиране на валежите;
- фондова борса, финанси, електронна търговия, управление на риска;
- киберсигурност - детектиране на аномалии в мрежовия трафик, диагностика и оценка на заплахите, превенция срещу атаки [7-11].

В представеното проучване са изследвани възможностите за адаптиране на посочените статистически похвати в сферата на комуникациите. Докладът е насочен към разглеждане на един от ос-

новните аспекти при QoS в системи с опашкова организация на повикванията. В конкретният случай е разгледана имитационно моделирана комуникационна система с обект прогнозиране на количествени метрики на пакетното предаване на данни спрямо специфични индекси на преносната среда. Дефинирани са следните управляеми фактори:

- $x_1$ – Пропускателна способност (System Throughput - ST);
- $x_2$ – Сумарно време за престой в опашката и обслужване (System Response Time - SRT),
- и прогнозируем индекс на производителност:
- y – Комплексна метрика на постъпванията и обслужването на пакетна информация (System Demand - SD).

## 2. ИЗВЕЖДАНЕ НА АНАЛИТИЧНИ РЕГРЕСИОННИ МОДЕЛИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ИНДЕКС SD

На основата на линеен регресионен анализ бяха проведени последователни стъпки на извеждане и оценка на адекватността на аналитичен модел за прогнозиране на индекс на производителност SD спрямо входящи фактори ST и SRT. Първоначално беше извършена диагностика на формираната информационна извадка с включени ST, SRT и SD, представена на Фиг. 1.а), чрез способите на Дескриптивния анализ. Направена е оценка на статистическите показатели „Средна стойност Mean“ и „Стандартно отклонение Std. Dev.“ на дефинираните параметри, показана на Фиг. 1.б). Анализирана е тестова извадка със съдържание на 50 еталона за всеки индекс на преносната среда.

Проведен е регресионен анализ спрямо проверка на пригодността на модел (1), показан по-долу.

| | 1<br>x1 | 2<br>x2 | 3<br>y |
|---|---|---|---|
| 1 | 43,666363 | 0,229009226 | 0,606 |
| 2 | 43,6344152 | 0,2291769 | 0,61837 |
| 3 | 43,6021152 | 0,229346672 | 0,63073 |
| 4 | 43,5694594 | 0,229518569 | 0,6431 |
| 5 | 43,5364445 | 0,22969262 | 0,65547 |
| 6 | 43,5030669 | 0,229868851 | 0,66784 |
| 7 | 43,4693232 | 0,23004729 | 0,6802 |
| 8 | 43,4352099 | 0,230227965 | 0,69257 |
| 9 | 43,4007237 | 0,230410904 | 0,70494 |
| 10 | 43,3658612 | 0,230596135 | 0,71731 |
| 11 | 43,330619 | 0,230783686 | 0,72967 |
| 12 | 43,2949935 | 0,230973588 | 0,74204 |
| 13 | 43,2589821 | 0,231165865 | 0,75441 |
| 14 | 43,2225813 | 0,231360546 | 0,76678 |
| 15 | 43,1857877 | 0,231557661 | 0,77914 |
| 16 | 43,1485984 | 0,231757238 | 0,79151 |
| 17 | 43,1110102 | 0,231959306 | 0,80388 |
| 18 | 43,07302 | 0,232163893 | 0,81624 |

*а)*

| | Means and Standard Deviations (QoS) | | |
|---|---|---|---|
| Variable | Means | Std.Dev. | N |
| x1 | 42,73106 | 0,605487 | 50 |
| x2 | 0,23407 | 0,003326 | 50 |
| y | 0,90900 | 0,180284 | 50 |

*б)*

***Фиг. 1.*** *Извадка с трафични индекси на производителност а) и резултати от Дескриптивен анализ б)*

$$y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (1)$$

Резултатите от приложена линейна регресия са обобщени на Фиг. 2. Постигната е висока стойност на Коефициента на определеност $R^2$ = 0.99994031, показваща, че 99.994031 % от изменението на параметър „y“ се дължи на въздействието на управляемите фактори „$x_1$“ и „$x_2$“. Всички изходни Коефициенти на регресия, както следва $b_o$ = 144.905, $b_1$ = -1.835 (отразяващ влиянието на $x_1$) и $b_2$ = -280.170 (свързан с оценка на въздействието на $x_2$), се определят като значими спрямо констатираната Вероятност “p level“ много по-малка от прието Равнище на значимост α = 0.05.

| | Regression Summary for Dependent Variable: y (QoS)<br>R= ,99997016 R?= ,99994031 Adjusted R?= ,99993777<br>F(2,47)=3937E2 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00142 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N=50 | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(47) | p-value |
| Intercept | | | 144,905 | 2,280890 | 63,5300 | 0,000000 |
| x1 | -6,16449 | 0,089758 | -1,835 | 0,026725 | -68,6791 | 0,000000 |
| x2 | -5,16703 | 0,089758 | -280,107 | 4,865810 | -57,5664 | 0,000000 |

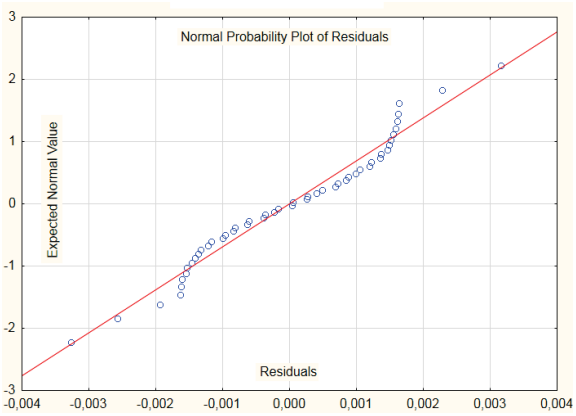
***Фиг. 2.*** *Резултати от линейна регресия*

Критерият на Фишър F(2,47) = 3937E2 и съответната му вероятност p<0.0000, отчетени спрямо p level << 0.05, потвърждават висока адекватност на модел (1) при описание на входните данни. Крайният вид на синтезираният аналитичен модел за прогнозиране на вариациите на „Комплексна метрика на постъпванията и обслужването на пакети“ следва да бъде записан по-следният начин:

$$y = 144.905 – 1.835x_1 – 280.170x_2 \quad (1)$$

| Case No. | Predicted & Residual Values (QoS) Dependent variable: y Observed Value | Predicted Value | Residual |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,606000 | 0,609268 | -0,003268 |
| 2 | 0,618370 | 0,620941 | -0,002571 |
| 3 | 0,630730 | 0,632673 | -0,001943 |
| 4 | 0,643100 | 0,644462 | -0,001362 |
| 5 | 0,655470 | 0,656307 | -0,000837 |
| 6 | 0,667840 | 0,668208 | -0,000368 |
| 7 | 0,680200 | 0,680161 | 0,000039 |
| 8 | 0,692570 | 0,692167 | 0,000403 |
| 9 | 0,704940 | 0,704223 | 0,000717 |
| 10 | 0,717310 | 0,716328 | 0,000982 |
| 11 | 0,729670 | 0,728480 | 0,001190 |
| 12 | 0,742040 | 0,740677 | 0,001363 |
| 13 | 0,754410 | 0,752917 | 0,001493 |
| 14 | 0,766780 | 0,765198 | 0,001582 |
| 15 | 0,779140 | 0,777519 | 0,001622 |
| 16 | 0,791510 | 0,789876 | 0,001634 |
| 17 | 0,803880 | 0,802267 | 0,001613 |
| 18 | 0,816240 | 0,814691 | 0,001549 |

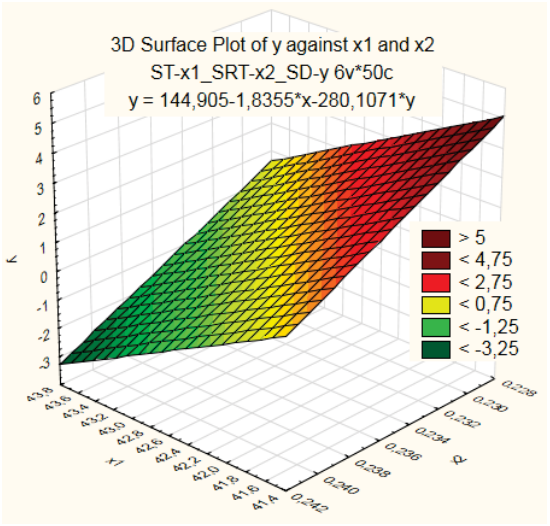
*а)*



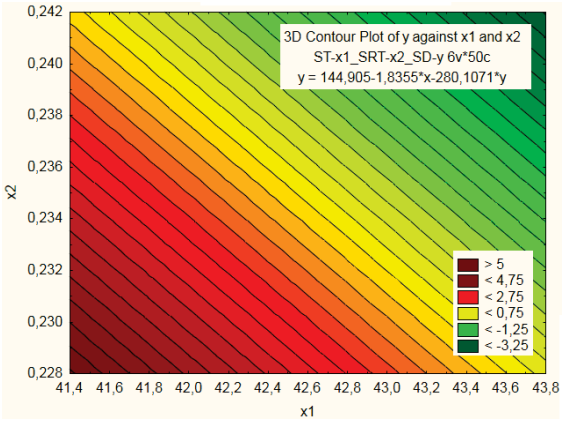

*б)*

***Фиг. 3.*** *Теоретични и прогнозни стойности на индекс SD а) и Нормална вероятностна графика на Residuals б)*

Във връзка с потвърждаване на ефективността на изведения аналитичен модел са представени количествените еквиваленти на наблюдаваните в хода на имитационно моделиране и получените прогнозни степени на индекса, категоризиращ постъпването и обработката на пакети на Фиг. 3.а). Допълнително е оценена коректността на приложения регресионен анализ чрез формиране на „Нормалната вероятностна диаграма на остатъците“ на Фиг. 3.б). Диаграмата дава индикация на Нормалното разпределение на Residuals, отчитащо се според близкото разположение на Остатъците по направление на линията от 45° - факт за коректност на анализа.




*а)*




*б)*

***Фиг. 4.*** *Повърхнина на отклика а) и Линии на еднакъв отклик $y = f(x_1, x_2)$ б)*

Фигура 4 представя получената „Повърхнината на отклика“ $y = f(x_1, x_2)$ и полученото сечение на повърхнината с равнина, успоредна на равнината $x_1Ox_2$, т.е. „Линиите на еднакъв отклик“ $y = f(x_1, x_2)$. Посочените зависимости на отклик потвърждават, че значителен дял от въз-

ходящите изменения на изходен параметър SD се получават при „средни и високи нива на фактор $x_1$“ и „ниски и средни нива на фактор $x_2$“.

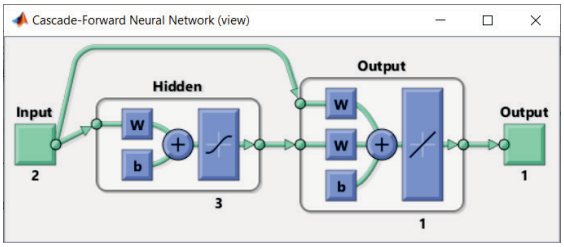
## 3. ОБУЧЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ НА CFNN ЗА ПРОГНОЗЕН АНАЛИЗ НА ИНДЕКС SD

Изследвани са трислойни архитектури на Cascade-Forward Neural Networks в качеството на инструменти за прогнозен анализ. Заложено е обучение на моделите по Градиентен алгоритъм Levenberg-Marquardt и стъпково нарастване на невроните в скрития структурен слой. Оценени са въведени критерии MSE, MAE и RMSE при търсено изискване на минимизация като резултатите от анализа са поместени в Таблица 1. Търсеният оптимум - най-ниски степени MSE = $2.3554^{-10}$, MAE = $1.1072^{-05}$ и RMSE = $1.5347^{-05}$, беше намерен при идентично за указаните показатели начално количество от скрити неврони за приетия вариационен диапазон на анализ от 3 до 13 изчислителни единици. Максималните грешки от невронно обучение бяха установени при CFNN архитектура със съдържание на 7 междинни неврона за критерий MSE и 6 скрити неврона по отношение на метрики MAE и RMSE. Избраният краен CFNN модел за целите на прогнозния анализ е даден на Фиг. 5.

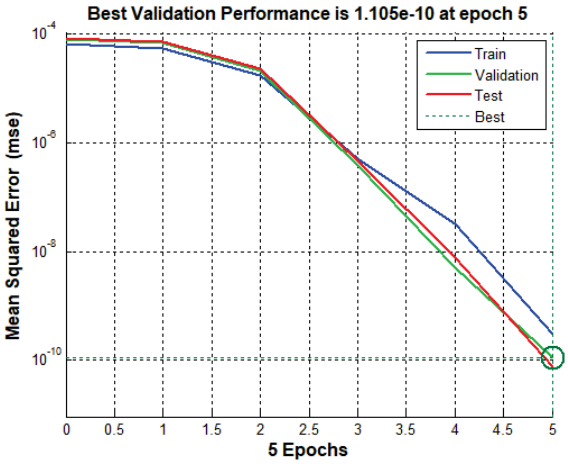
***Табл 1.*** *CFNNs за прогнозен анализ на индекс на производителност SD*

| Скрити неврони | MSE | MAE | RMSE |
|---|---|---|---|
| 3 | 2.3554e-10 | 1.1072e-05 | 1.5347e-05 |
| 4 | 8.2243e-10 | 2.4804e-05 | 2.8678e-05 |
| 5 | 3.8306e-10 | 1.4728e-05 | 1.9572e-05 |
| 6 | 5.3349e-10 | 1.9294e-05 | 2.3098e-05 |
| 7 | 9.8670e-10 | 2.3889e-05 | 3.1412e-05 |
| 8 | 7.0750e-10 | 6.4034e-05 | 8.4113e-05 |
| 9 | 2.8468e-10 | 3.6045e-05 | 5.3355e-05 |
| 10 | 5.5014e-10 | 3.2375e-05 | 7.4172e-05 |
| 11 | 7.1471e-10 | 1.2870e-05 | 2.6734e-05 |
| 12 | 8.8477e-10 | 1.2549e-05 | 2.9745e-05 |
| 13 | 4.6280e-10 | 3.6757e-05 | 6.8029e-05 |

Във връзка със селектираната архитектура на Фиг. 6 е представен хода на изменение на MSE за основните мрежови процеси „обучение“, „валидиране“ и „тестване“. Наблюдавана е много близка тенденция на низходящо експоненциално изменение в поведението на кривите, описващи посоченият показател за оценка на качеството. Мрежовото обучение е проведено в обхвата на пет итерации, за които е достигната „най-добра валидираща производителност“ $1.105^{-10}$. Според посочените факти не са открити индикации за „преобучение“ на анализираната невронна архитектура.

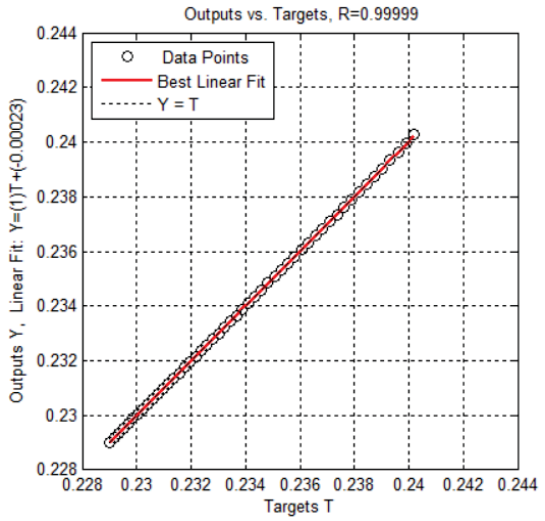



***Фиг. 5.*** *Селектиран CFFN модел за прогнозиране на индекс SD*

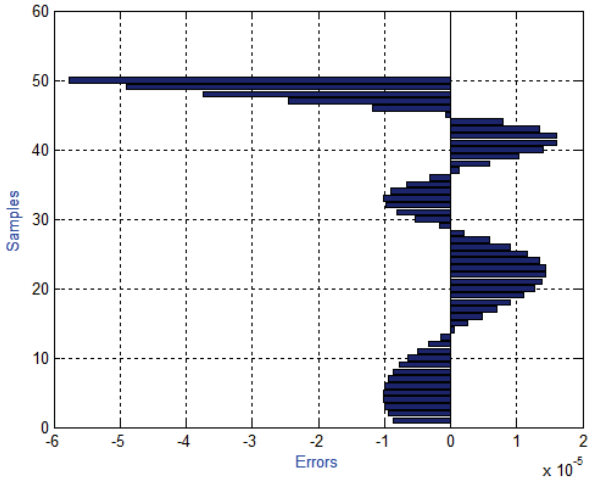



***Фиг. 6.*** *MSE при обучение, валидиране и тестване на CFNN за прогнозен анализ*

Наблюдавано е почти идентично съвпадение между теоретичната и емпиричната линия на регресия за синтезирания CFNN модел на Фиг. 7. Регистрирана е значителна корелация R = 0.99999 между целевите и получените прогнозни стойности на SD с приложение на CFNN, потвърждаваща високата адекватност на синтезирания инструмент за регресионно моделиране.




***Фиг. 7.*** *Линии на регресия за синтезираната CFNN архитектура за прогнозиране на индекс на производителност SD*




***Фиг. 8.*** *Диаграма на мрежовите грешки за избрания CFNN модел за прогнозен анализ*

Фигура 8 представя положителните и отрицателните вариации на Остатъците, получени вследствие на прогнозните процеси с използване на CFNN (Фиг. 5). Установените разлики между Observed и Predicted стойности при оценка на „Комплексната метрика за пакетно предаване на информация“ се приемат за допустими, въпреки наличните отрицателни пикове на еталоните в края на обработваната информационна извадка.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Висока степен на сходимост е установена между наблюдаваните в хода на имитационно моделиране и получените прогнозни нива на метрика SD при линейна зависимост спрямо ST и SRT. Констатирано е преимущество на невронните мрежи в сравнение с регресионния анализ при наличие на експоненциална зависимост между управляемите фактори и прогнозирания индекс на производителност. Въпреки възникналото ограничение пред регресионния анализ се препоръчва продължаване на изследването при манипулации с други параметри на входящия и изходящия трафик в хода на търсене на полиномиални модели с висока адаптивност. По отношение на ефективността на Cascade-Forward Neural Networks се предвиждат процедури по сравнителен анализ спрямо допълнително въведени видове невронни мрежи при регресионна диагностика на ресурсната спецификация на преносната среда.

*Благодарности: Изследванията в публикацията са реализирани и финансирани по Договор № 2406Е/ 2024г. „Мониторинг на мрежовия трафик и достъп на информация чрез биометрична диагностика с изкуствен интелект“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Iqbal M. Application of regression techniques with their advantages and disadvantages. Elektron Magazine 2020;1(4):11-17.

[2] Gaugler T., Stoeckl S., Rathgeber A. Global climate impacts of agriculture: a meta-regression analysis of food production. Journal of Cleaner production 2020;276(2020):1-10.

[3] Rambotti S., Breiger R. Extreme and Inconsistent: a case-oriented regression analysis of health, inequality and poverty. Socius Sage Journals 2020;6(2020):1-8.

[4] Alamin M., Sultana M., Xu H., Mollah M. Robustification of linear regression and its application in genome-wide association studies. Frontiers Genetics Journal 2020;11(549):1-17.

[5] Banas M., Czaja J., Dabrowski J. The application of regression analysis for estimating

the market value of commercial real estate. Geomatics and Environmental Engineering Journal 2022;16(1):17-35.
[6] Rekha R., Abirami P., Aishvarya G., Akshaya B., Annapoorna A., Sanchana S. A web based application for tracking pubic transport and predicting usage. International Journal of Aquatic Science 2021;12(2):3770-3783.
[7] Mansouri S. Application of neural networks in the medical field. Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications 2023;14(1):69-81.
[8] Chima A., Duroha A. Artificial network application in prediction – a review. African Journal of Computing & ICT 2019;12(4):75-85.
[9] Madhiarasan M., Louzazni M. Analysis of artificial neural networks: architecture, types and forecasting applications. Journal of Electrical and Computer Engineering 2022;2022(1):1-9.
[10] González-Cortés D., Onieva E., Pastor I., Wu J. The application of artificial neural networks to forecast financial time series. *Logic Journal of the IGPL* 2024;2024(1):1-13.
[11] Kharbanda V. Application of artificial intelligence in cyber security. International Journal of Security and Privacy in Pervasive Computing 2023;15(1):1-13.

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ПРЪСТОВИ ОТПЕЧАТЪЦИ ЧРЕЗ ДИСКРЕТНА УЕЙВЛЕТ ТРАНСФОРМАЦИЯ И НЕВРОННИ МРЕЖИ С SCG ОБУЧАВАЩ АЛГОРИТЪМ

**Ивелина Балабанова**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България, Кореспондиращ автор: ivstoeva@abv.bg*

# FINGERPRINT IDENTIFICATION BY DISCRETE WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORKS WITH SCG LEARNING ALGORITHM

**Ivelina Balabanova**

*Technical University of Gabrovo, 4 Str. "Hadji Dimitar", Gabrovo, Bulgaria, * Corresponding author: ivstoeva@abv.bg*

**Abstract**

*The paper proposes a fingerprint recognition approach for user authentication and access using DIP (Digital Image Processing) and AI (Artificial Intelligence) tools. The processing procedures of biometric data doffed with the adaptation of image compression techniques - 2D Discrete Wavelet Transform (DWT), have been conducted. A dataset with features - complex of Approximation and Detail coefficients, for the personalization of 6 persons has been formed. Feed-Forward Neural Networks (FFNNs) training and verification processes with Gradient learning using Scaled Conjugate Gradient (SCG) algorithm was carried out. An assessment of biometric recognition accuracy in examining a wide range of upscaling of neurons in the hidden network layers was summarized. A complex analysis about Validation performance, Training state, Deviation between target and output network results and Concussion matrices of the network architectures with the highest and lowest established adaptability has been obtained.*

**Keywords:** fingerprint; image processing; DWT coefficients; FFNNs; gradient algorithm.

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Биометричните системи се основават на използването на измерими физиологични или поведенчески характеристики, даващи възможност за надеждна автентификация на лица спрямо регламентирани нива на сигурност. В инфраструктурно отношение се разграничават "Server-based" и "Client-based" архитектури [1, 2]. Някои от най-разпространените разновидности на този род системи функционират на принципа на:

- лицево разпознаване;
- гласова идентификация;
- ирисово/ретиново сканиране, анализ на очен отпечатък;
- диагностика на електронни подписи;
- анализ на специфични геометрични особености на ръката;
- разпознаване на вени;
- верификация на пръстови отпечатъци и др.

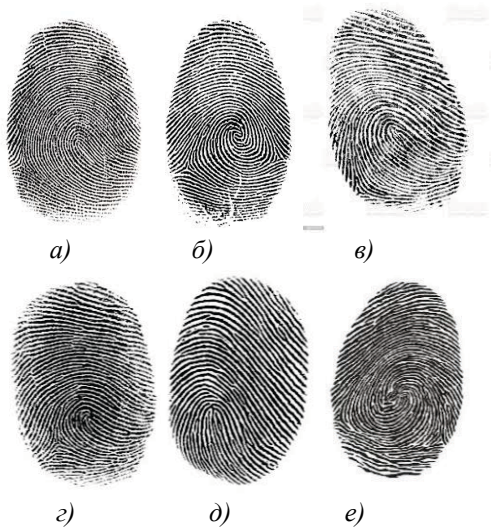
По-специално пръстовата биометрия намира широка употреба в редица сектори като „контрол на имиграцията", „банкови операции", „криминалистика", „здравеопазване", „публичен транспорт" [1-5]. Сред съвременните технически средства, използвани за снемане и регистрация на пръстови биометрични данни, могат да бъдат споменати „конвенционални Prism-Type оптични сензори", „Solid-State сензори" и „иновативни оптични сензори, използващи, дисперсията

на светлинните лъчи от вътрешната структура на отпечатъка“ [6].

В доклада е разработен подход за диагностика на лица – обект на потребителска автентификация на достъпа на основата на извлечени информативни признаци чрез DWT техники и пръстова идентификация посредством изкуствени невронни мрежи с обучение по Градиентен алгоритъм SCG.

## 2. ДЕФИНИРАНЕ НА ЗАДАЧАТА ЗА БИОМЕТРИЧНА ДИАГНОСТИКА

Настоящето изследване разглежда задачата за анализ на снети пръстови отпечатъци във формат на двумерни монохромни изображения при персонализация на достъпа на шест лица, показани на Фиг. 1. Заложено е адаптиране на двумерната Дискретна уейвлет трансформация за предварителни DIP процедури, състоящи се в извличането на входящи параметри за последващо обучение и верификация на FFNNs за разпознаване.

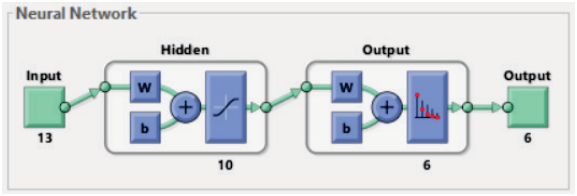



***Фиг. 1.*** *Пръстови отпечатъци на а) Person №1 , б) Person №2, в) Person №3, г) Person №4, д) Person №5 и е) Person №6*

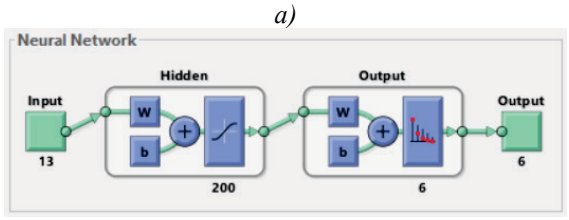
Вследствие на проведени pre-processing дейности с използване на Haar, Coiflets, Biorthogonal и Symplets видове DWT беше получен комплекс от „Апроксимиращи“ и „Детайлизиращи“ коефициенти. Указаните категории характеристики са използвани за обучение на трислойни невронни структури с пряко разпространение на сигналите и обратно разпространение на грешката при задаване на „тангес-сигмоидална“ и „softmax“ функции на активация в скритите и изходните слоеве. Обучаващите процеси са FFNN моделите за пръстова идентификация са съобразени спрямо изискване за минимизация на грешката при обучение, с оглед, на което беше избран Градиентен алгоритъм Scaled Conjugate Gradient. Спецификата на прилагания обучаващ подход и типа на активационната функция в изходните слоеве регламентира интерпретирането на генерираните мрежови резултати не като числов, а като вероятностен тип.

## 3. FEED-FORWARD МРЕЖИ ЗА АВТЕНТИФИКАЦИЯ НА БАЗАТА НА ПРЪСТОВА БИОМЕТРИЯ

Основна фаза от изследването заема експерименталното определяне на подходящ диапазон на залагане количество изчислителни единици в междинните слоеве в обхвата, на който да бъде установена структура с най-добра мрежовата производителност. Първоначално бяха избрани вариации на модели за идентификация на целевите пръстови отпечатъци със значителен брой скрити неврони „300 до 500“, „500 до 1000“, но беше констатиран фактът, че това не води до съществени разлики в критериите „Точност“ и „Cross-Entropy“. В обхвата на анализираните диапазони беше достигната максимална точност около 90.00 – 95.00 %. Поради това е въведен по-нисък диапазон „5 до 250“ на задаване на изчислителни звена в междинните слоеве на FFNNs. В рамките на проведените изследвания бяха селектирани две структури с установена най-подходяща и най-ниска адаптивност на Фиг. 2. Постигнатите точности при биометрична пръстова диагностика се равняват на 100.00 % и 83.00 % за мрежи с фиксирани 10 и 200 скрити неврона.

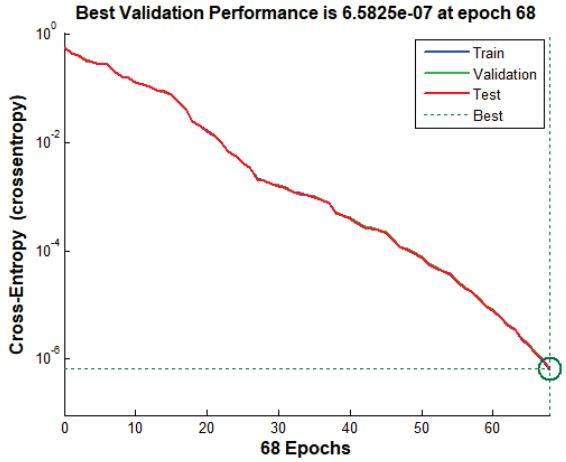



*а)*

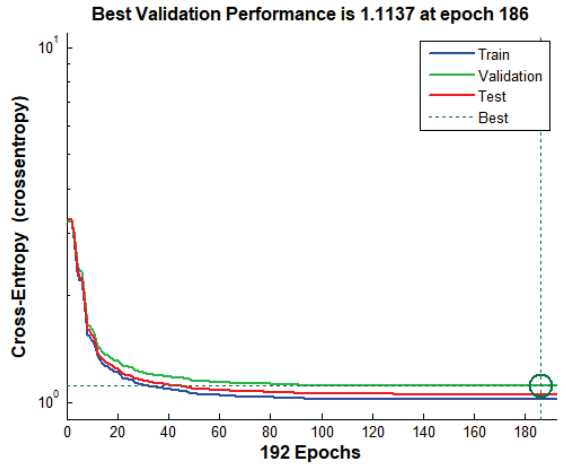



*б)*

***Фиг. 2.*** *Невронни мрежи при SCG обучение с най-висока а) и най-ниска ефективност б)*



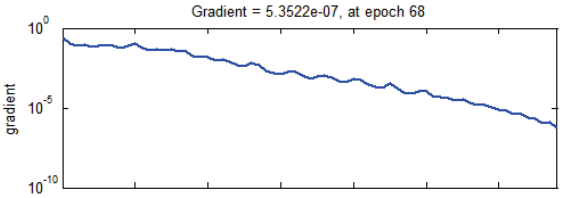

*а)*

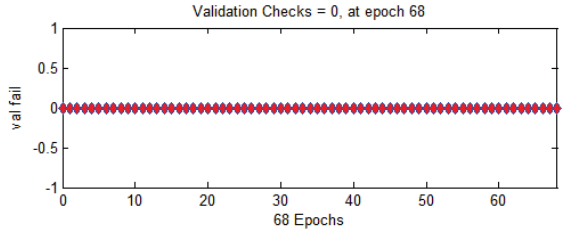



*б)*

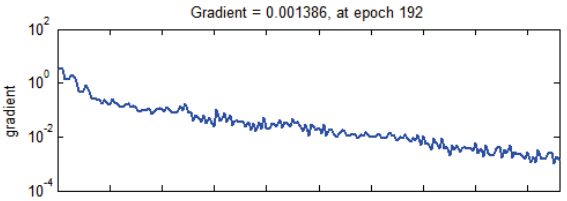
***Фиг. 3.*** *Критерий Cross-Entropy за регистрираните невронни мрежи при SCG обучение с най-висока а) и най-ниска ефективност б)*

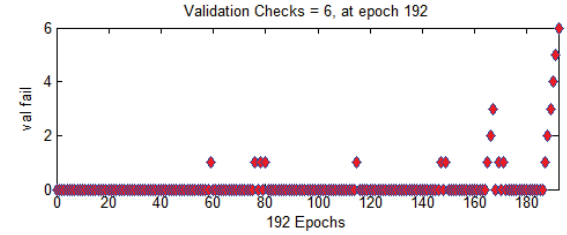
По отношение на синтезираните крайни невронни модели за идентификация е проведена методична оценка на производителността на Фиг. 3 и състоянието на мрежово обучение на Фиг. 4. Регистрирани са най-добри валидиращи производителности, съответно 6.5825e-07 и 1.1137 при крайна 68-ма и междинна 186-та итерация от цялостното невронно обучение.




*а)*



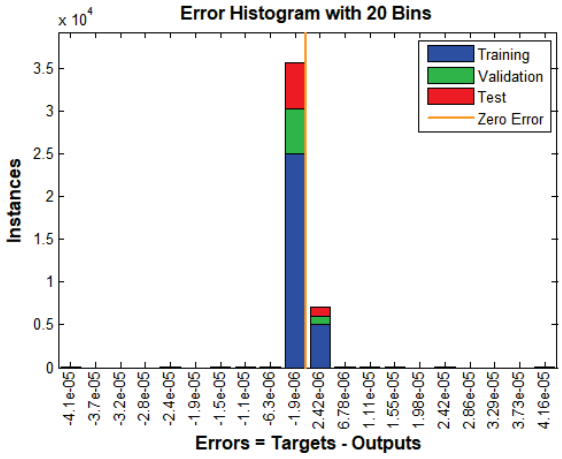




*б)*

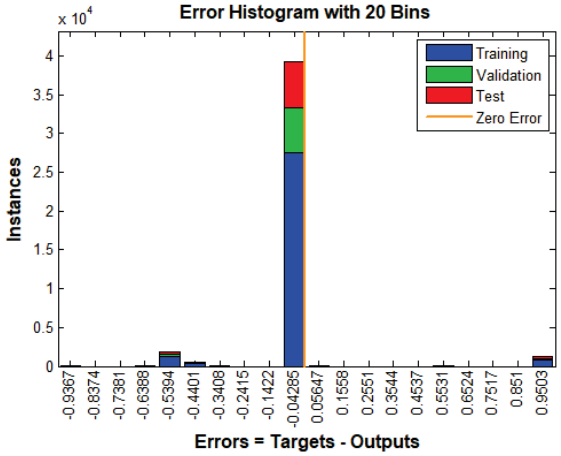
***Фиг. 4.*** *Състояние на мрежово обучение за намерените невронни архитектури при SCG обучение с най-висока а) и най-ниска ефективност б)*

При двете невронни структури е наблюдавана сходна тенденция на близко поведение на индикатора Cross-Entropy за стандартните мрежови процеси „обучение“, „валидиране“ и „тестване“. Констатирано е плавно намаляване с наличие на известни пикове и спадове в изменението на Градиента, преустановени при достигане на 68-ми и 192-и обучаващ цикъл. Във връзка с мрежата с най-добра ефективност при разпознаване не са из-

вършени „validation checks“, докато при втората анализирана архитектура бяха регистрирани шест проведени верификации в хода на последната итерация.



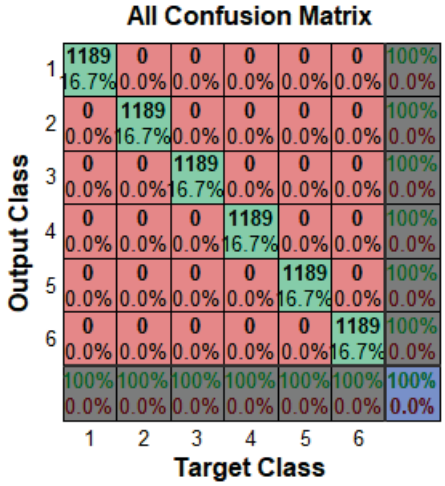

*а)*



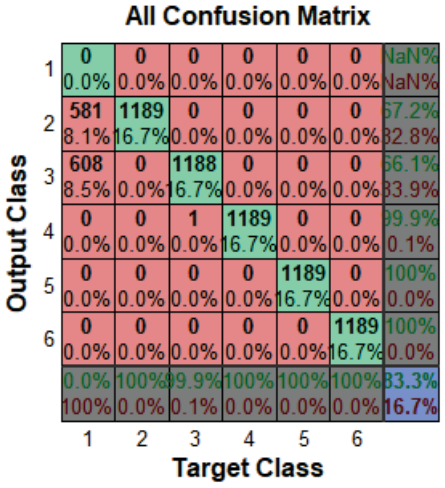

*б)*

***Фиг. 5.*** *Диаграми на грешките за установените невронни мрежи при SCG обучение с най-висока а) и най-ниска ефективност б)*

Преимуществата на FFNN модела при задаване на 10 междинни неврона са потвърдени спрямо отчетените нива на грешките от еталоните в отделните информационни извадки за основните мрежови процеси. За разглеждания случай постигнатите количествени еквиваленти попадат в порядък „1.9e-06“ за значителен дял и „2.42e-06“ за сравнително малка част от приложените еталони. По различен начин е представена параметризацията по отношение на грешките при мрежата с най-ниска установена пригодност, където се забелязват в пъти по-високите нива на грешките. Спрямо основният дял на обучаващите, валидиращите и тестовите информационните еталони е констатиран постигнат минимален еквивалент от едва „0.04285“.




*а)*




*б)*

***Фиг. 6.*** *Класификационни матрици за констатираните невронни архитектури при SCG обучение с най-висока а) и най-ниска ефективност б)*

Разпределението на коректно и некоректно класифицираните еталони, асоциирани към състава на дефинирани категории пръстови отпечатъци, е дадено на Фиг. 6. Във връзка с FFNN модела с влошена спецификация беше установена неправилно определена принадлежност за еталони, спадащи към състава на анализираните данни за обект на автентификация Person № 1. В изпълнение на

класификационните процедури беше получено некоректно разпределение към втора и трета изходна група, спадащи към съдържанието на приложената информационна извадка.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постигната е добра пригодност на избрания обучаващ алгоритъм и фиксираните типове на активация на изчислителните единици във втори и трети структурен слой на FFNNs при манипулации с тестовите пръстови отпечатъци. Предложеният подход следва да бъде модифициран във фазата на извличане на характеристики при обработката на биометричните данни с въвеждане на Discrete Cosine Transform (DCT). По този начин ще бъде повишено количеството на входните информативни признаци, с което се цели прилагане на аналитични инструменти за по-задълбочен и детайлен анализ относно:

- възможностите за комбиниране на различни DIP техники и оценка на ефекта върху минимизацията на грешката от разпознаване;
- повишаване на достоверността на резултатите при автентификация чрез двуетапна верификация при последователно прилагане на DWT и DCT входни информационни набори с оглед на постигане на доближаващи се точности при биометрична пръстова диагностика.

*Благодарности: Изследванията в публикацията са реализирани и финансирани по Договор № 2406Е/ 2024г. „Мониторинг на мрежовия трафик и достъп на информация чрез биометрична диагностика с изкуствен интелект“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Kumar S., Walia E. Analysis of various biometric techniques. International Journal of Computer Science and Information Technology 2011;2(4):1595-1597.

[2] Patel A., Patel U., Suthar F. Fingerprint recognitionin biometric security systems. Journal of Knowledge and Research in Computer Science and Applications 2019;1(2):44-49.

[3] Faridah Y., Nasir H., Kushsairy A., Safie S., Khan S., Gunawan T. Fingerprint biometric system. Trends Bioinform 2016;9(2):52-58.

[4] Azizan N., Razak W., Bakar N., Yanya N., Aziz M., Abdullah L. The study of the applications of biometrics systems: a literature review. Journal of Engineering Science and Technology 2021;1(2021):111-119.

[5] Genevese A., Munoz E., Piuri V., Scotti F. Advanced biometric technologies: emerging scenarios and research trends. Springer 2018;1(2018):1-28.

[6] Uchida K. Fingerprint identification. Journal of Advanced Technologies 2015;2(1):19-27.

# ПРЕЦИЗНО ИЗМЕРВАНЕ НА ИНДУКТИВНОСТИ И КАПАЦИТЕТИ В РАДИОЧЕСТОТНИ СХЕМИ

**М. Томов[1], П. Когиас[2], Б. Арсов[3], С. Садинов[4]**

*[1]Технически университет - Габрово, бул. Х. Димитър 4, Габрово, България, mtomov@tugab.bg*
*[2]Тракийски университет Демокрит, физически отдел, кампус Св. Лука, Кавала, Гърция, kogias@teiemt.gr;*
*[3]Международен славянски университет, Маршал Тито 77, Свети Николе, Северска Македония, borisarsov45@gmail.com;*
*[4] Технически университет - Габрово, бул. Х. Димитър 4, Габрово, България, murry@tugab.bg*
**кореспондиращ автор: mtomov@tugab.bg*

# PRECISED MEASUREMENT OF INDUCTANCE AND CAPACITANCE IN RADIO FREQUENCY CIRCUITS

**M. Tomov[1], P. Kogias[2], B. Arsov[3], S. Sadinov[4]**

*[1]Technical University of Gabrovo, bul. H. Dimitar 4, Gabrovo, Bulgaria, mtomov@tugab.bg;*
*[2] Department of Physics Democritus University of Thrace, Campus, St. Lucas, Kavala, Greece, kogias@teiemt.gr;*
*[3]International Slavic University, Marshal Tito, 77, Sveti Nikole, North Macedonia, borisarsov45@gmail.com;*
*[4] Technical University of Gabrovo, bul. H. Dimitar 4, Gabrovo, Bulgaria, murry@tugab.bg;*
** Corresponding author: mtomov@tugab.bg*

**Abstract**

*A precised measurement of inductances and capacitances is of critical importance in attempts for successful design of high radio frequency schematic and in construction of quality simulation models for the correct exploration of the processes in the RF circuits of the communication devices. This paper presents a methodological and practical sequence of actions using selected measuring instruments, thanks to which extremely high accuracy is achieved in the measurements of inductive and capacitive the elements which make up the circuits as well as in the measurement of real impedances in radio frequency schematics. The proposed methodology diminish significantly the frequency dependence of the measurement process. A comparative analysis of the measurement accuracy with the various devices used is also made.*

**Keywords:** RF schematic measurement, inductance measurements; capacitance measurements.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Основният проблем при измерване на индуктивности и капацитети [1, 4] е зависимостта на процеса на измерване от честотата на сигналите, за които е разработена (моделирана) или предстои да бъде разработена съответната радио схема. При измерване на индуктивности възниква поне още един сериозен проблем и той се състои в това, че значителна част от бобините (особено онези, които нямат защитен корпус) се навиват по начини, които физически не гарантират изчислената стойност на индуктивността на бобината със 100 процентова точност [2, 3].

Според теорията за анализ на предавателна линия, импедансът в единия

край на коаксиалния кабел не е същия в другия край на кабела, това зависи от честотата на сигнала, от физическите и електрически параметри на коаксиалния кабел [5, 6]. По тази причина всичко, което се намира между измервателния уред и обекта на измерването (бобина, кондензатор или импеданс), наслагва реактивни съставки на импеданса, породени от паразитни индуктивности и паразитни капацитети, което в крайна сметка води до погрешно измерване в една или друга степен. Обикновено грешката е недопустимо голяма.

За да бъде елиминирана тази грешка е необходимо, всички нежелани реактанси да бъдат компенсирани предварително, като по този начин да бъде „преместена“ нулевата точка на скалата на измервателния уред, откъдето да бъде отчетена стойността на импеданса в точките на измерване, т.е. на клемите на съответния реактивен елемент (бобина, кондензатор). Този процес представлява калибриране на инструмента, което радикално променя концепцията на измерването и прави самото измерване с много висок клас на точност, дори за претенциозни изследвания в областта на радиокомуникациите.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

За провеждане на настоящото изследване са използвани основно два измервателни уреда. Единият е стандартен RLC (фиг.1а) измервателен мултиметър, който се използва за измерване на индуктивности, капацитети и съпротивления и който служи за сравнителна база за измерването с втория уред – портативен векторен мрежов анализатор LiteVNA (фиг. 1б).

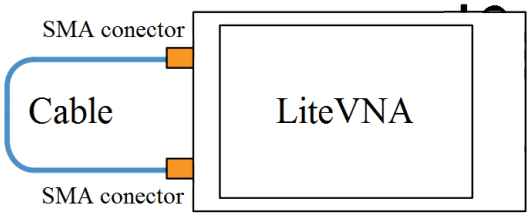
Една от забележителните и важни функционалности на векторния мрежов анализатор LiteVNA е процедура за калибриране, която може да бъде извършвана преди всяко измерване, данните от нея да се съхранят във файл и могат да се задават отново, когато се прилагат същите схеми и условия на измерване.




*а* *б*

***Фиг. 1**. Измервателни уреди: а) RLC; б) LiteVNA*

В случаи на еднопортови устройства (двуполюсници) за калибрирането се използва набор от три специални крайни конектора, които осигуряват два (2) гранични режима на измервателната верига (отворена и късо съединение) и един еталонен режим на 50 Ω чисто активен товар [7].




***Фиг. 2**. Калибриране „THROUGH“ на Векторен мрежов анализатор LiteVNA*

В случаите, когато се измерват параметри на двупортово устройство (четириполюсник) се извършва още една процедура за калибриране, наречена „THROUGH“. Той свързва PORT1 към PORT2 директно чрез еталонен коаксиален единичен кабел или чрез двойка кабели, свързани чрез стандартен SMA адаптер, както е изобразено на фиг.2.

Калибрирането на анализатора ефективно елиминира по-голямата част от паразитните ефекти, причинени от собственото реактивно съпротивление на свързващия кабел, реактивните у контактните активни съпротивления на

всички конектори и преобразуватели в измервателната верига, което значимо влияе върху точността на измерването особено при високи радио честоти.

Резонансната честота на трептящ кръг се дава с израза:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Където $L$ и $C$ са съответно индуктивността на бобината и капацитета на кондензатора [6]. При проектиране на бобина без сърцевина се използва следната емпирична формула.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \quad (2)$$

Където $\mu_o$ е магнитната проницаемост на вакуума, $N$ е броят на навивките на бобината, $S$ е сечението на сърцевината, а $l$ е дължината ѝ. При използване на бобина с феритна сърцевина, в числителя на формула (2) участва като множител и магнитната проницаемост на материала на сърцевината.

Капацитетът на кондензатор се изчислява съгласно израза:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (3)$$

Където $\mu_o$ е диелектричната проницаемост на вакуума, $\mu_o$ е диелектричната проницаемост на използвания за диелектрик материал, $S$ е припокритата площ на плочите на кондензатора, а $d$ е разстоянието между тях.

Прилагането на тези емпирични формули дава изчислителните стойности на индуктивността и капацитета, които служат като репер при измерването на същите величини в реалните градивни елементи от радиотехническата схема.

Действителните параметри на реална бобина и кондензатор винаги се отличават в различна степен от изчислителните поради изброените по-горе причини и се налага задължителна процедура на калибриране на измервателния прибор.

За да бъдат елиминирани надеждно възможните фактори, изкривяващи резултата от измерването е необходимо точките на галваничен контакт с клемите на бобината или кондензатора да бъдат максимално близо до корпуса на елемента или до същинската му част. Дори и най-малките излишни удължения на клемите или контактните проводници на бобината или кондензатора внасят паразитни индуктивности и капацитети, които от своя страна изменят стойността на основния параметър на елемента. Честотната зависимост на тези параметри представлява квадратна функция и по тази причина предизвиква фрапиращи грешки при измерванията дори при нищожно увеличаване на работната честота в лентата, за която се прави измерването [5].

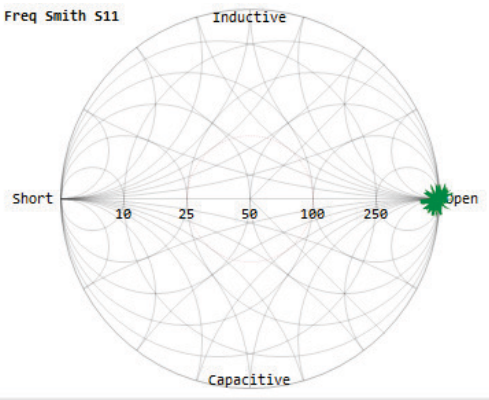
За представената тук методология на измерване е избран честотен диапазон от 20 MHz около работна честота от 50 MHz, т.е. долна гранична честота: 40 MHz и горна гранична честота 60 MHz.

Еталонните елементи за калибриране, приложени към векторния анализатор LiteVNA са изпълнени като конекторни накрайници съгласно стандарта SMA, поради което калибрирането с тяхна помощ може да бъде осъществено само до SMA конектор.

От тази гледна точка, за провеждане на високопрецизно измерване на индуктивност или капацитет с LiteVNA, в опитната постановка се налага използване на преходно приспособление под формата на коаксиален кабел с SMA накрайник в единия край за включване към прибора, а вторият край на кабела завършва с два добре изолирани защипващи електрода (сигнал и маса) за осъществяване на надежден галваничен контакт с клемите на градивния елемент, обект на измерването.

Използването на този преход позволява калибриране към отворена верига с двата крайни електрода един до друг на

разстояние, което заемат при защипването на измервания елемент в подходящите точки за галваничен контакт съгласно горните разсъждения.

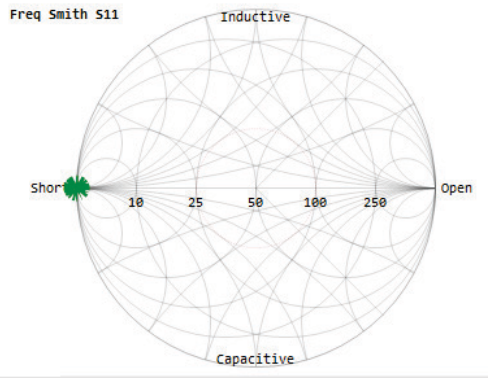



***Фиг. 3**. Калибриране към отворена верига*

За калибриране към късо съединение се използва парче от контактния проводник на елемента (кондензатор или бобина) или от проводника, от който е изградена ръчно навитата бобина. Важно е дължината на това парче да бъде минимално възможната за електрически надеждно защипване от електродите. Резултатът от това калибриране е показан на фиг. 4.

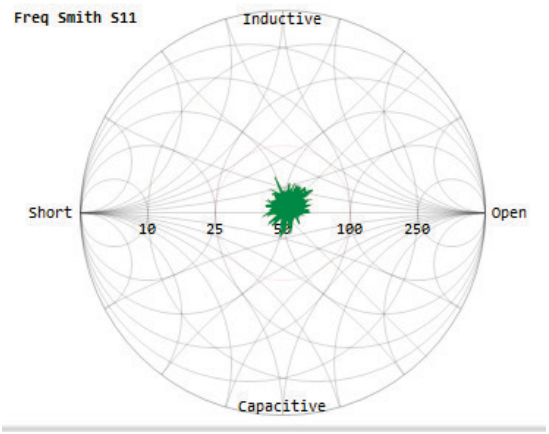
За калибриране към чисто активен товар 50 Ω, се използва еталонен безиндуктивен резистор с активно съпротивление 50 Ω. Защипването на електродите за клемите на резистора става максимално близко до корпуса му за да бъде обхванат паразитния капацитет, който съществува между клемите на всеки градивен елемент.

Резултатът от това калибриране е показан на фиг. 5.




***Фиг. 4**. Калибриране към късо съединение*

Калибрирането на измервателния уред за избраната честотна лента „THROUGH“ (фиг. 2) се изпълнява с приложения в комплекта на уреда измервателен кабел, чрез който се свързват паралелно двата му терминала и реакцията на уреда, графично изглежда като отворена верига върху диаграмата на Смит (фиг. 3).




***Фиг. 5**. Калибриране към 50 Ω активен товар*

В зависимост от целите на измерване, калибрирането може да бъде извършено директно чрез управляващото меню на измервателния уред или от инсталирания на компютър софтуерен интерфейс, който разполага с богат набор от функционалности, като при това позволява и симулационни изследвания [8].

И в двата случая след приключване на процедурата по калибриране за честотната лента 40MHz-60MHz, данните от калибрирането могат да бъдат записани във файл за директно зареждане за следващи измервания при същите условия.

След като уредът е калибриран и всички паразитни съпротивления, индуктивности и капацитети са елиминирани в аванс се пристъпва към измерване на индуктивността на една бобина с известни конструктивни параметри: брой навивки: N=9400 активно съпротивление на медния проводник R=900 Ω, дебелина на медния проводник d=0.13 mm, диаметър на сърцевината на бобината: D=12mm.

Изчислителната стойност на бобината съгласно (2) е 279 mH, измерената индуктивност стандартен RLC мултиметър (фиг1а) е L=847mH, Същата бобина, измерена с тестер на електронни елементи (фиг1б) показва индуктивност L=2037 mH и активно съпротивление R=881 Ω.

Налице е значителна разлика между изчислителната стойност на бобината и измерените стойности на нейната индуктивност с различни уреди.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използването на портативния векторен анализатор след коректно калибриране, което елиминира авансово всички паразитни съпротивления, индуктивности и капацитети е възможно най-прецизният метод за непосредствено мерене на индуктивности, капацитети и пълни импеданси на елементите на радиокомуникационни схеми при високи работни радиочестоти.

Функционалностите на програмния интерфейс на прибора позволява също така офсетово авансово изместване на фазата, което елиминира наличните честотни и фазови изкривявания, обусловени от реализацията на галваничния контакт между измервателната сонда на уреда и клемите на измервания елемент.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] Hamam R.E., Karalis A., Joannopoulos J.D., Soljacic M. “Coupled-mode theory for general free-space resonant scattering of waves”, Physical review A, vol. 75, issue 5, ID 053801, 2007.

[2] Grebennikov A. V., RF and Microwave Power Amplifier Design, New York: McGraw-Hill, 2004.

[3] Kraus H.L., Bostian C. W., Raabs F.H., “Solid State Radio Engineering”, © John Wiley&sons Inc., 1980.

[4] Nedelchev I., Sadinov S., “Radio communication equipment”, © V. Aprilov University Publishing House, ISBN: 978-954-683-574-1, Gabrovo, 2017.

[5] Tomov M., Approaches for optimization of known active element models as per the purposes of the exploration - UNITECH' 2017- Gabrovo, 17-18.11.2017, Volume II, ISSN1313-230X, p.83-88.

[6] Nedelchev I., Tomov M., Optimization Of High Efficient RF Power Amplifying Schematics By Automated S-matrix Analysys- Scientific conference of Angel Kanchev University of Rousse 2016, Scientific papers of Rousse University - 2016, ISSN 1311-3321, volume 55, series 3.2. p.8-12.

[7] Nedelchev I., Sadinov S., Tomov M., Radio Frequency Parallel Circuit Class E Power Amplifier, International Scientific Conference - UNITECH'2016 - Gabrovo, 18-19.11.2016, Volume II, ISSN 1313-230X, pp. 102-107.

[8] Karapenev B. Modeling and simulation study of a simplified model of high-power radio frequency MS transistors. Scientific works of the University of Ruse, volume 51, series3.2,p.46-51, ISSN 1311-3321, 2012 г.

# ДВОЙНО ХАОТИЧНО ПРЕВКЛЮЧВАНЕ, БАЗИРАНО НА ХИБРИДНА СИНХРОНИЗАЦИОННА СХЕМА МЕЖДУ ДВЕ ИДЕНТИЧНИ ХАОТИЧНИ СИСТЕМИ

**Христина Стойчева**

*Технически университет - Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България,*
*Кореспондиращ автор: hsstoycheva@tugab.bg*

# DOUBLE CHAOTIC SWITCHING BASED ON HYBRID SYNCHRONIZATION SCHEME BETWEEN TWO IDENTICAL CHAOTIC SYSTEMS

**Hristina Stoycheva**

*Technical University of Gabrovo, 4 Str. "Hadji Dimitar", Gabrovo, Bulgaria,*
** Corresponding author: hsstoycheva@tugab.bg*

**Abstract**

*In this article, a secure communication system with double chaotic switching has been applied to a digital information signal. The suggested security approach was implemented by switching between two non-identical third order chaotic systems. For practical application purposes, this system was tested with additive white gaussian noise (AWGN) channel. The recovery of the information signal at the receiver is achieved by a hybrid synchronization scheme between two novel identical third-order chaotic systems. The controls are synthesized based on Lyapunov's second stability law. The results obtained by theoretical and graphical analysis are in excellent agreement.*

**Keywords:** chaos, chaos synchronization, chaotic switching, secure communication.

## ВЪВЕДЕНИЕ

С течение на времето, въпреки мащабното развитие на комуникационните технологии, една област остава обект на непрекъснат научен интерес, а именно защитеното предаване на информацията. Съществуват различни подходи и методи за шифриране на информационни сигнали, които намират широко приложение в следните области на изследване: оторизиран достъп [1], защита на чувствителна информация в облачно пространство [2], LORA модулация [3], хаотично аудио криптиране [4] и др.

Един от фундаменталните способи за шифриране на информационни сигнали, е превключването. Подходът е базов, но в комбинация със сложната динамика на една хаотична система, се наблюдава не само високо ниво на защита, но и лесна реализация.

Хаосът намира приложение в множество научни области, като икономика [5], физика [6], химия [7], екология [8], но най-разпространената сред тях остава областта на защитените комуникации [9, 10, 11, 12, 13, 14].

В настоящия доклад е предложен подход за реализиране на защитено предаване на цифров информационен сигнал, посредством хаотично превключване между две неидентични хаотични системи. В приемника се реализира хибридна синхронизационна схема, на база на която след приключване на преходните процеси и установяване в режим на синхронизация, информационният сигнал бива възстановен.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Концепцията за защитено предаване на цифрови информационни сигнали посредством хаотично превключване е добре известна и широко разпространена. Най-общо тя се изразява в превключване между два хаотични сигнала в съответствие със стойностите на цифровия информационнен сигнал.

В съществена част от публикациите по темата се засяга превключване между две стойности на даден параметър на една хаотична система [15,16], което води до промяна на хаотичния сигнал и съответно до относително добро ниво на защита. Друг разпространен метод е превключването между два от векторите на състоянието на една и съща хаотична система [17,18]. Методът е ефективен и при него се наблюдава по-високо ниво на защита на предаваната информация, породено от различното изменение на сигналите във функция на времето. И двата широко разпространени способа за хаотично превключване обаче споделят един и същ недостатък, а именно използването на една хаотична система.

Представяният в настоящият доклад статия подход за защитено предаване на цифров информационен сигнал чрез хаотично превключване използва две неидентични хаотични системи.

### *Описание на избраните хаотични системи*

Избрани са две различни хаотични системи. Първата е системата на Lorenz [19] - известен математичен модел от трети ред, описван със следните уравнения:

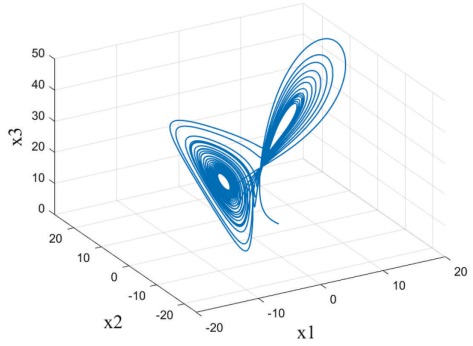
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\sigma x_1 + \sigma x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 x_3 + r x_1 - x_2 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases} \quad (1)$$

Оптималните стойности на параметрите, за които в системата възникват хаотични колебания са $\sigma = 10$, $b = \frac{8}{3}$ и $r > 25$.

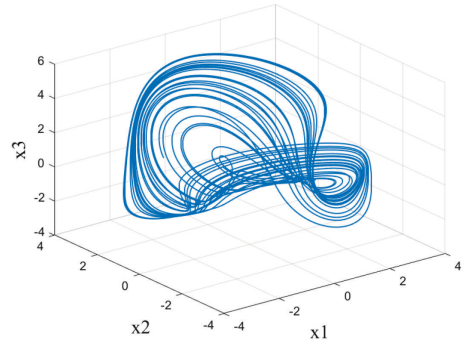
Втората система [20] е нов абстрактен математичен модел от трети ред с тригонометрична нелинейност, описан от Ramar през 2023г.:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a x_1 - \mathrm{k} x_2 x_3 \\ \dot{x}_2 = \mathrm{b} sin x_1 + x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = \mathrm{g} x_1 x_2 - c x_3 + d \end{cases} \quad (2)$$

Стойностите на параметрите са както следва: $a = 1.5$, $b = 10$, $c = 4$, $d = 2$, $g = 4$ и $k = 2$.




***Фиг. 1**. Хаотичен атрактор на система на Lorenz*




***Фиг. 2**. Хаотичен атрактор на система на Ramar*

И двете системи са симулирани с произволни начални условия, като атракторите им са представени на фиг. 1 и фиг. 2.

### *Хибридна синхронизационна схема*

При задачите за синхронизация на хаотични системи най-често се синтезира синхронизационна схема между две еднотипни, непрекъснати системи с еднопосочна връзка между тях. Следният обобщен запис представя синхронизационната схема:

$$\begin{matrix} Master: \\ Slave: \end{matrix} \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = f(\tilde{\mathbf{x}}) + u(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}}), \end{cases} \quad (3)$$

където $\dot{\mathbf{x}}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \in \Re^n$ са векторите на състоянието на системата, $f(\mathbf{x})$ е нелинейна функция, а $u(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})$ е управляващ сигнал към подчинената система. Началните условия на системите са различни, т.е. $\mathbf{x}(0) \neq \tilde{\mathbf{x}}(0)$.

За да е възможна синхронизацията между две хаотични системи, е необходимо да се синтезира подходящо управление между тях. Най-надеждният метод за постигане на такъв контрол се основава на втория метод за устойчивост на Ляпунов [21]. В обобщение, този метод изисква избор на такава функция V(e), която отговаря на следните условия:

$$V(\mathbf{e}) > 0, \ \forall \mathbf{e} \neq 0, \quad (4)$$

$$V(\mathbf{e}) = 0, \ \mathbf{e} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} < 0, \ \forall \mathbf{e} \neq 0. \quad (6)$$

Удовлетворяването на първите две условия е лесно постижимо чрез използване на квадратична функция на отделните компоненти на вектора на грешката $\mathbf{e}$. Удовлетворяването на третото условие обаче изисква синтез на подходящо управление, в зависимост както от вида и характера на синхронизираните системи, така и от типа на избраната синхронизация.

При хибридна синхронизация между системите се търси такова управление $u(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})$, че да бъде изпълнено условието

$$\lim_{t \to \infty} \mathbf{e}(t) = 0, \quad (7)$$

където функцията на разсъгласуване между системите има следния вид

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) \pm \tilde{\mathbf{x}}(t). \quad (8)$$

Изборът кои функции $e_i(t)$ да са суми и кои разлики от съответните променливи на състоянието е произволен.

Синтезирана е синхронизационна схема между две идентични хаотични системи на Ramar с управляваща система (2) и следната подчинена система:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = a\tilde{x}_1 - \mathrm{k}\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + u_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \mathrm{b}sin\tilde{x}_1 + \tilde{x}_1\tilde{x}_3 + u_2 \\ \dot{\tilde{x}}_3 = g\tilde{x}_1\tilde{x}_2 - c\tilde{x}_3 + d \end{cases} \quad (9)$$

Функциите от разсъгласуване за избраната комбинация на хибридна синхронизация имат следния вид:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 + \dot{\tilde{x}}_1 \\ \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\tilde{x}}_2 \\ \dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\tilde{x}}_3 \end{cases} \quad (10)$$

В този случай за втората и третата двойки променливи ще се постигне идентична синхронизация, а за първата двойка променливи поведението на подчинената система ще бъде обратно спрямо поведението на управляващата система.

Чрез заместване на уравненията на управляващата и управляваната система в (10) се получават следните зависимости:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = a_1 e_1 - kx_2x_3 - k\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + u_1 \\ \dot{e}_2 = bsinx_1 + x_1x_3 - bsin\tilde{x}_1 - \tilde{x}_1\tilde{x}_3 - u_2 \\ \dot{e}_3 = -ce_3 + gx_1x_2 - g\tilde{x}_1\tilde{x}_2 - u_3 \end{cases} \quad (11)$$

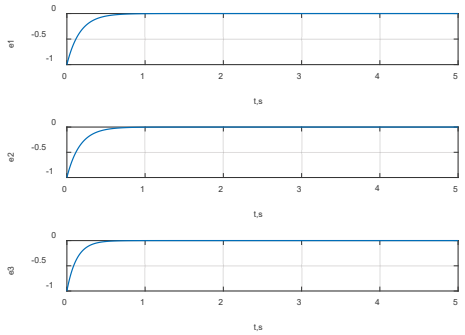
Като се вземе предвид (11) и обобщената форма на функциите на разсъгласуване, управляващите функции се получават, както следва:

$$\begin{cases} u_1 = -a_1e_1 + kx_2x_3 + k\tilde{x}_2\tilde{x}_3 - k_1e_1 \\ u_2 = bsinx_1 + x_1x_3 - bsin\tilde{x}_1 - \tilde{x}_1\tilde{x}_3 + k_2e_2 \\ u_3 = -ce_3 + gx_1x_2 - g\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + k_3e_3 \end{cases} \quad (12)$$

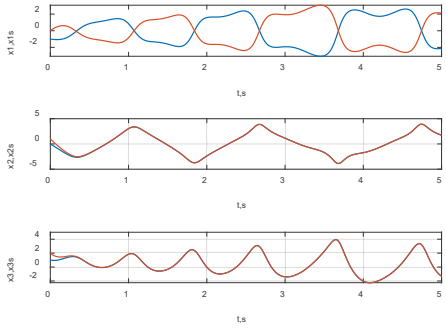
Функциите на разсъгласуване между управляващата и подчинената системи приемат формата (13) след заместване на управляващите функции в (11)

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1e_1 \\ \dot{e}_2 = -k_2e_2 \\ \dot{e}_3 = -k_3e_3 \end{cases} \quad (13)$$

Управление, базирано на втория метод за устойчивост на Ляпунов, ще бъде постигнато за положителни константи $k_i$, което ще удовлетвори условие (6).



***Фиг. 3**. Функции на разсъгласуване*



***Фиг. 4**. Времеви характеристики Master - Slave*

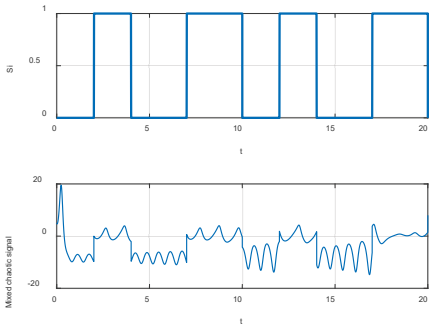
Реализирана е схема за синхронизация между (2) и (9) със синтезирани управляващи функции (12). Схемата за синхронизация се изследва в симулационната среда Simulink, а графичните резултати са изведени с помощта на MATLAB. Избрани се следните произволни начални условия $\mathbf{x} = [-1\ 0\ 1]^T$ и $\tilde{\mathbf{x}} = [0\ 1\ 2]^T$ и положителните константи $k_i = 1$, $i = 1 \div 3$. Получените функции на разсъгласуване са представени на фиг. 3.

Ясно се вижда, че след установяване на преходният процес, грешките от разсъгласуване между системите се установяват в нула и между управляващата и подчинената системи настъпва режим на хибридна синхронизация (фиг. 4).

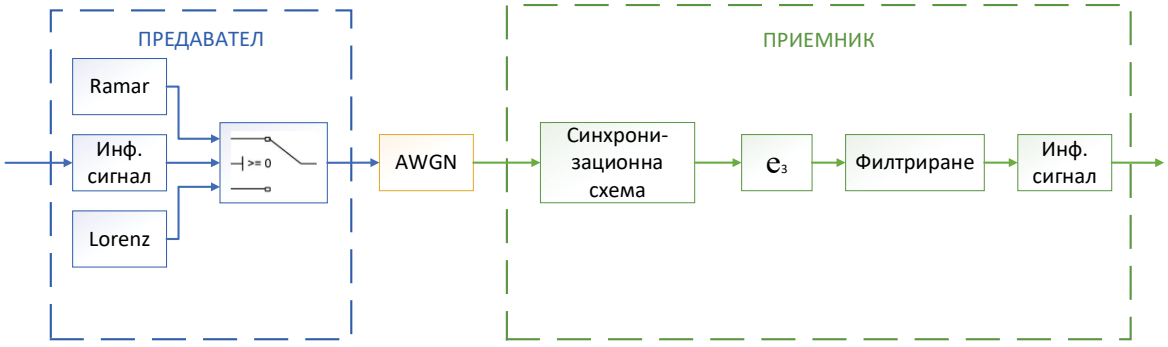
### *Хаотично превключване*

Реализираният в настоящия доклад подход за защитено предаване на цифров информационен сигнал, чрез хаотично превключване, използва две неидентични хаотични системи и е представен чрез опростена блокова схема на фиг. 5.

В предавателя са реализирани две неидентични хаотични системи от трети ред – система на Lorenz и система на Ramar, като в зависимост от стойността на цифровия информационен сигнал (0 или 1), се осъществява превключване между променливите на състоянието – $x_1$ за ситемата на Lorenz и $x_3$ за системата на Ramar. Полученият хаотичен сигнал се предава по незащитен канал за връзка с нормално разпределения на шума. Генерираната информационна поредица и полученият смесен хаотичен сигнал са представени на фиг. 6.



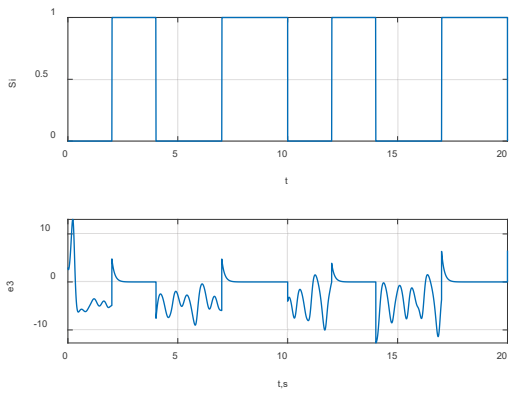
***Фиг. 6**. Генерирана информационна поредица и смесен хаотичен сигнал*



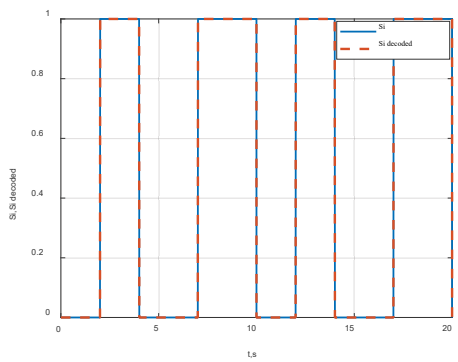

***Фиг. 5**. Обобщена блокова схема на двойно хаотично превключване*

Постъпилият в приемника зашумен хаотичен сигнал преминава през блока за синхронизация, където на база втори метод за устойчивост на Ляпунов е реализирана хибридна синхронизация между две системи на Ramar.

При предадена стойност 1 на информационният сигнал за съответната продължителност от време се предава променливата $x_3$ за система на Ramar. Следователно при постъпване на сигнала в приемника, хаотична синхронизация ще настъпи само за периода на предаване на стойността „1“. През останалото време системите ще са в режим на десинхронизация. Грешката от разсъгласуване $e_3$ между системите (2) и (9), заедно с генерираната в предавателя информационна поредица са показани на фиг. 7.




***Фиг. 7****. Генерирана информационна поредица и грешка от разсъгласуване* $e_3$




***Фиг. 8****. Генерирана и дешифрирана информационна поредица*

Ясно се вижда, че при предадена стойност „1“ на информационния сигнал и след приключване на преходния процес, грешката от разсъгласуване между управляващата и подчинената система се установава в нула.

След подходяща прагова обработка и филтриране, информационната поредица е напълно възстановена – фиг. 8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият доклад представя иновативен подход за защитено предаване на цифрови информационни сигнали чрез хаотично превключване между две неидентични хаотични системи. Използването на хаотични системи за генериране на сигнали, съчетано с хибридна синхронизационна схема, осигурява ефективно решение за преодоляване на предизвикателствата, свързани с шифрирането. Симулационните изследвания потвърждават успешното възстановяване на информационната поредица, подчертавайки надеждността и ефективността на предложения подход.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] Umar, Talha, Mohammad Nadeem, and Faisal Anwer. "Chaos based image encryption scheme to secure sensitive multimedia content in cloud storage." *Expert Systems with Applications* 257 (2024): 125050.

[2] Erkan, Emre, Hidayet Oğraş, and Şehmus Fidan. "Application of a secure data transmission with an effective timing algorithm based on LoRa modulation and chaos." *Microprocessors and Microsystems* 99 (2023): 104829.

[3] Li, Zongyang, Hongxiang Wang, and Yuefeng Ji. "Hardware fingerprint construction of optical transmitters based on permutation entropy spectrum of chaos for secure authentication." *Optics & Laser Technology* 171 (2024): 109947.

[4] Haridas, Thejas, et al. "Chaos-based audio encryption: Efficacy of 2D and 3D hyperchaotic systems." *Franklin Open* 8 (2024): 100158.

[5] Vogl, Markus, Milena Kojić, and Petar Mitić. "Dynamics of green and conventional bond markets: Evidence from the generalized chaos analysis." *Physica A:*

*Statistical Mechanics and its Applications* 633 (2024): 129397.
[6] Xie, Jiayu, Jie Wang, and Bing Tang. "Circular motion and chaos bound of a charged particle near charged 4D Einstein–Gauss–Bonnet-AdS black holes." *Physics of the Dark Universe* 42 (2023): 101271.
[7] Zhang, Jianwei, et al. "Complexity analysis of multiscale flow field of dynamic impinging stream based on chaos theory and Stockwell transform." *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 193 (2023): 109524.
[8] Kumar, Ajay, et al. "A chaos study of fractal–fractional predator–prey model of mathematical ecology." *Mathematics and Computers in Simulation* 225 (2024): 857-888.
[9] Zhang, Yu-Kun, et al. "Secure optical communication based on M-ary signals masked by optical chaos." *Optics Communications* 528 (2023): 129017.
[10] Zhong, Dong-Zhou, et al. "Four-channels optical chaos secure communications with the rate of 400 Gb/s using optical reservoir computing based on two quantum dot spin-VCSELs." *Optics Communications* 529 (2023): 129109.
[11] Rai, Amrita, et al. "Realization of chaotic oscillator and use in secure communication." *E-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 6 (2023): 100321.
[12] Sano, Hideki. "Common Encryption Key Generation and Secure Communication Using PDE Chaotic Synchronization." *IFAC-PapersOnLine* 56.2 (2023): 9942-9947.
[13] Gokyildirim, Abdullah, et al. "A novel five-term 3D chaotic system with cubic nonlinearity and its microcontroller-based secure communication implementation." *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 160 (2023): 154497.
[14] Wen, Heping, et al. "Secure image encryption algorithm using chaos-based block permutation and weighted bit planes chain diffusion." *IScience* 27.1 (2024).
[15] Yang, Tao. "A survey of chaotic secure communication systems." *International journal of computational cognition* 2.2 (2004): 81-130.
[16] Sathiyamurthi, P., and S. Ramakrishnan. "Speech encryption using chaotic shift keying for secured speech communication." *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing* 2017 (2017): 1-11.
[17] Ahmad, Israr, Muhammad Shafiq, and M. Mossa Al-Sawalha. "Globally exponential multi switching - combination synchronization control of chaotic systems for secure communications." Chinese Journal of Physics 56.3 (2018): 974-987.
[18] Candido, Renato, Magno TM Silva, and Marcio Eisencraft. "A switching scheme between conventional and chaos-based communication systems." *Proceedings of the 6th International Conference on Nonlinear Science and Complexity*. 2016.
[19] Shen, Bo-Wen. "A Review of Lorenz's Models from 1960 to 2008." *International Journal of Bifurcation and Chaos* 33.10 (2023): 2330024.
[20] Ramar, Rameshbabu. "Design of a new chaotic system with sine function: Dynamic analysis and offset boosting control." *Chaos Theory and Applications* 5.2 (2023): 118-126.
[21] Hamidouche, Baghdadi, Kamel Guesmi, and Najib Essounbouli. "Control and Stabilization of Chaotic Systems Using Lyapunov Stability Theory." *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*. Vol. 1. IEEE, 2023.

# ИЗГРАЖДАНЕ И КОНФИГУРИРАНЕ НА ХИБРИДНА МРЕЖОВА СВЪРЗАНОСТ ЗА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЕ МЕЖДУ СГРАДИ

**Станимир Садинов**

*Технически университет Габрово, ул. Х. Димитър 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: murry@tugab.bg*

# CONSTRUCTION AND CONFIGURING HYBRID NETWORK CONNECTIVITY FOR VIDEO SURVEILLANCE BETWEEN BUILDINGS

**Stanimir Sadinov**

*Technical University of Gabrovo, H. Dimitar 4, Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: murry@tugab.bg*

**Abstract**

*The paper offers an example solution for the design and implementation of a hybrid communication network connectivity between three buildings. For this purpose, three different types of transmission media are used - wireless, optical and cable. The idea is to present a sample design and testing of a hybrid network with configuration of end devices and construction of a video server. Finally, sample tests and experimental work screens representing the capabilities of the selected equipment are presented.*

***Keywords:*** *PON, VLAN, NVR, video server*

## ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на технологиите, широколентовият достъп, както и прогресът в телекомуникациите правят света, в който живеем постоянно променящ се. Резултатът от тази постоянна промяна на онлайн пространството е един нов вид свят – на дигитална система, продукт от сближаването на сфери като Интернет технологиите, телекомуникациите, медиите и забавната/развлекателната индустрия. Тези нови тенденции насочват вниманието към интензивна подкрепа за изграждане на хибридни мрежи, които с потенциала си, ще способстват за усъвършенстването на всички аспекти на широколентовата технология и широколентовите услуги. Хибридните мрежи могат да съдържат в себе си едновременно оптични, кабелни и безжични такива. В момента оптичните влакна се явяват най-съвършената и перспективна физична среда за пренасяне на информационни комуникационни сигнали. Предаването на информация с помощта на оптични влакна и влакнесто-оптични кабелни комуникационни линии и мрежи предоставя огромни предимства, в сравнение с класическите комуникационни преносни системи, използващи конвенционалните симетрични и коаксиални съобщителни кабели с медни проводници [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11]. Все още обаче масово оптичните трасета не достигат изцяло до крайния клиент или дори да достигат – локалните мрежи – които са собственост и се поддържат от самия потребител, са изградени с медни кабелни трасета. Не са и редки случаите, в които към локалната мрежа трябва да се добави някое отделено работно място, до което няма как да стигне изцяло кабелна връзка – в тези случаи се използват и безжични мрежи [4, 8, 12].

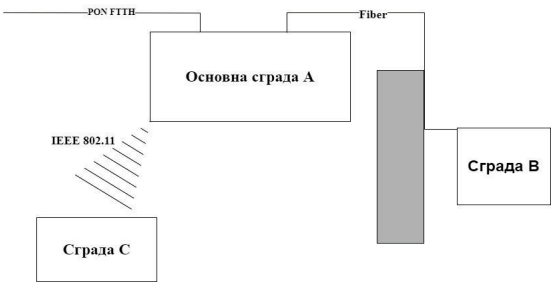
## ИЗЛОЖЕНИЕ

В представена статия се разглежда проект на примерна хибридна мрежа, която ще трябва да осигури комуникация между мрежови устройства и камери за видеонаблюдение в три различни сгради, намиращи се на малко разстояние една от друга. Представения проект може да послужи при обучението на студенти с цел демонстрация на придобитите знания в реална среда на изпълнение на примерно задание. В разглеждания вариант основната сграда е на 3 етажа и в нея ще трябва да се конфигурират компютрите на служителите и камерите за видеонаблюдение. В проекта тя е записана като „Сграда А“. Останалите две сгради на компанията – „Сграда В“ и „Сграда С“ са по-малки складови помещения, в които не работят постоянно служители и в тях ще трябва да се конфигурират единствено камери. Също така видеонаблюдението в тях няма да се изгражда единствено локално, а трябва да има връзка с основната „сграда А“, тъй като в нея в отделено сървърно помещение ще бъде монтирана цялата апаратура на компанията, включително и записващите устройства.

Доставката на Интернет услугата до сградите ще се осъществява чрез Пасивна оптична мрежа (PON) технология, като вида на услугата е PON FTTH (Fiber To The Home) [5, 7, 9, 10, 11], тоест трасето ще е оптично от доставчика до самата сграда на компанията, и ще завършва в сървърното помещение.

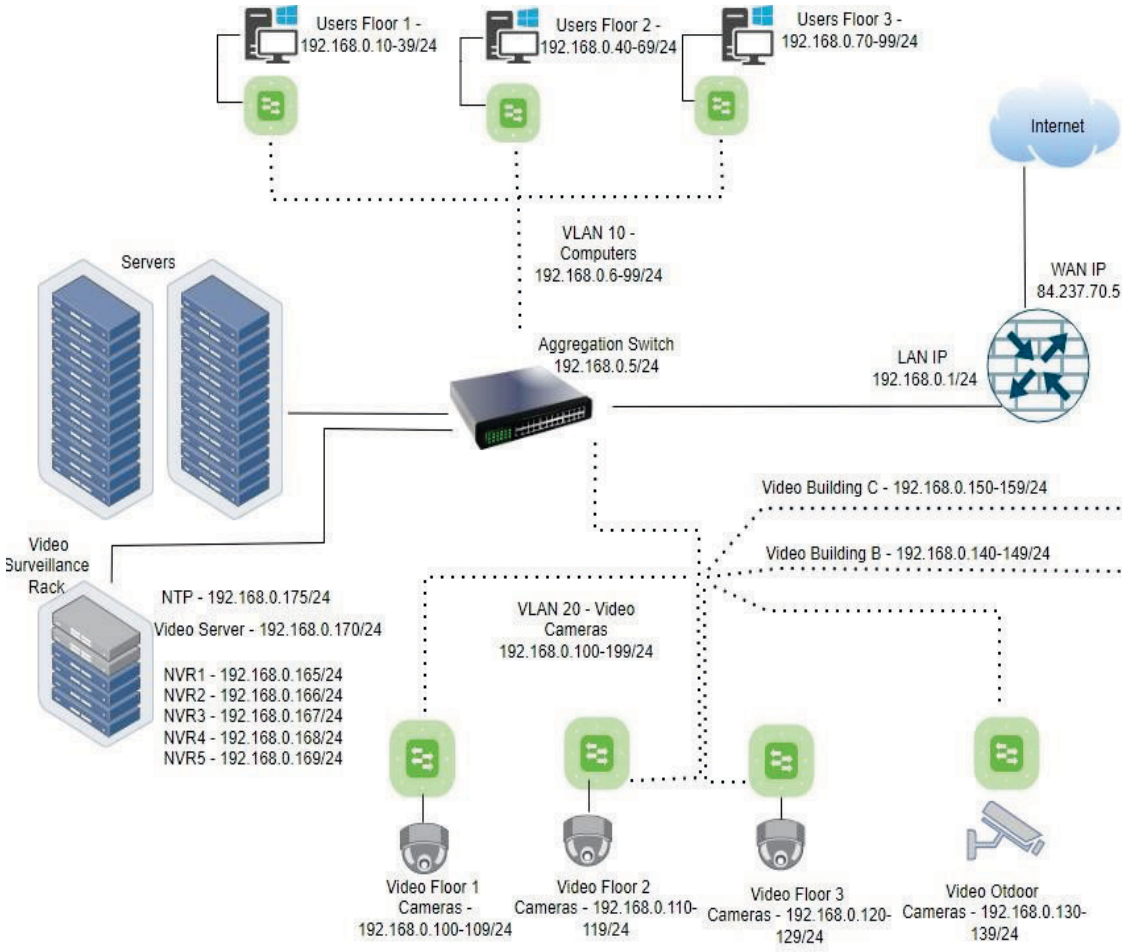
Между „Сграда А“ и „Сграда В“ няма пряка видимост, но има кабелен сноп стигащ от едната до другата сграда – в проекта на мрежата е заложено да се прекара оптичен кабел, с който да се осъществи връзката между двете сгради. (фиг.1) Въпреки, че тук скоростта на предаване на данни не е критична, е избрана оптична връзка заради следните й предимства в текущата ситуация:

- Разстоянието между двете крайни точки на трасето надвишава 100 метра и е много вероятно, ако комуникацията минава по меден кабел, да възниква затихване на сигнала;
- През по-голямата си част трасето ще минава през сноп пълен с кабели, провеждащи ниско и високо напрежение и оптичният кабел няма да се повлиява от електромагнитните излъчвания по маршрута си;
- Тъй като трасето е външно, оптичният кабел защитава апаратурата от повреди причинени от свръхнапрежение по комуникационната линия породено от гръмотевични бури.




***Фиг. 1****.Разпределение на отделните сгради на компанията и връзките между тях*

Между „Сграда А“ и „Сграда С“ няма как да се прекара кабелно трасе, но има пряка видимост, затова сигналът между тях ще се прехвърли безжично. За целта ще се монтират външни антени на двете сгради, които ще преобразуват сигнала от медния кабел в локалната мрежа в основната сграда в безжичен и после обратно в кабелна връзка в „Сграда С“, за да се добавят устройствата към мрежата. Примерна схемна мрежова конфигурация е представена на фиг.2



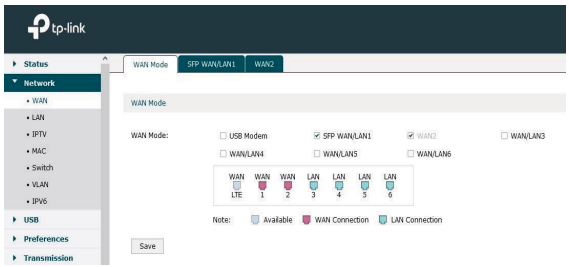

***Фиг. 2.*** *Схема на компютърната локална мрежа в основната сграда – междинни, крайни устройства и апаратура в сървърното помещение*

За маршрутизатор на локалната мрежа и гейтуей към Интернет е избран TP-Link ER7206. Моделът е избран най-вече заради високоскоростните си интерфейси и вградения SFP WAN порт, който позволява оптичното трасе от доставчика да завърши директно в маршрутизатора избягвайки употребата на ONU устройства или медия конвертори. Също така има достатъчно на брой допълнителни функции, които подсигуряват лесното развитие и мащабируемост на мрежата на компанията в бъдеще – достатъчно на брой LAN портове, поддръжка на различни VPN тунели, протоколи за динамично рутиране, удобен web интерфейс за управление и мониторинг на мрежата и други.

Първоначалното достъпване до потребителския интерфейс на маршрутизатора става чрез въвеждането на IP адреса му по подразбиране (192.168.0.1) в браузър от компютър, който е в същата мрежа. След това системата изисква създаването на администраторска парола за достъп. След като маршрутизаторът е достъпен, първо се настройва WAN мрежата му – тоест входящия сигнал от доставчика.

От меню Netowrk-WAN-WAN Mode се задава кои физически интерфейси да са активни и кои не, също така кои да са WAN и кои да са LAN – фиг.3.

В частния случай на предложения проект за WAN са избрани задължителния WAN RJ45 порт и SFP порта, който ще приема сигнала от доставчика. Всички други свободни портове са конфигурирани в LAN режим.

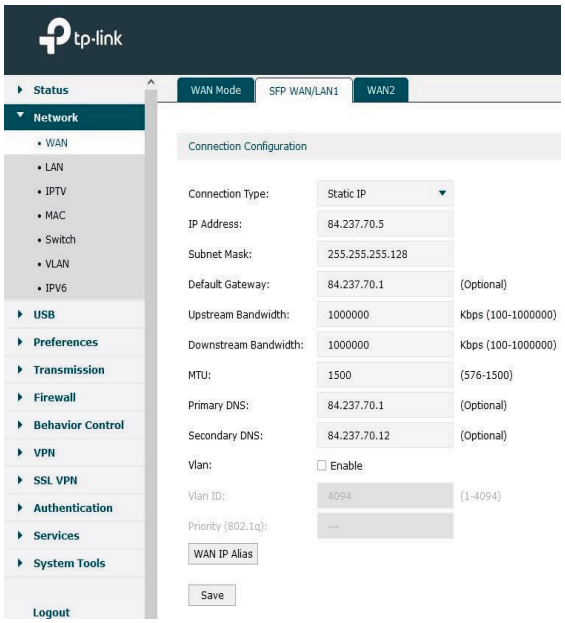



***Фиг.3.*** *WAN mode избор*

Компанията има подписан договор с доставчика на Интернет той да предоставя 1 брой статичен външен реален IP адрес - 84.337.70.5 (фиг.4).

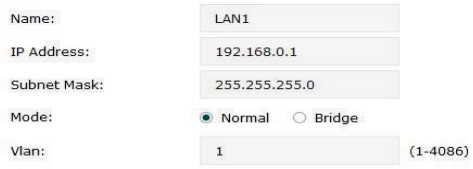
В меню Network-WAN-SFP WAN трябва да се зададе режим на WAN порта, като модела ER7206 предоставя следните възможности: Static IP, Dynamic IP, PPPoE, L2TP, PPTP

В случая се избира режим “Static IP” и се въвежда предоставеното от доставчика IP, както и допълнителните мрежови настройки като мрежова маска, шлюз, основен и вторичен DNS и други.




***Фиг.4.*** *WAN конфигурация на маршрутизатора*

От меню Network-LAN се задава конфигурацията на локалната мрежа на маршрутизатора. За целите на проекта и по-лесното разбиране на мрежата ще бъде оставено адресирането по подразбиране в локалната мрежа – т.е. мрежата ще бъде с адрес 192.168.0.1. Маската ще бъде 255.255.255.0 т.е. в мрежата едновременно ще могат да се включат до 254 устройства – фиг.5.




***Фиг. 5.*** *LAN конфигурация на маршрутизатора*

От същото меню се конфигурира (ако се налага) DHCP услугата на маршрутизатора. Трябва да се отбележи отметката за активиране на DHCP сървъра, да се настрои „pool“ с адреси, които да бъдат раздавани и за какво време да бъде един адрес „отдаван“ на устройство. От гледна точка на сигурност в мрежата, максималният брой на раздадените по DHCP адреси е ограничен до 21 (от 1-ви раздаван адрес 192.168.0.200 до последен – 192.168.0.220), тъй като всички устройства, които ще бъдат част от мрежата, ще бъдат с настроени статични адреси – фиг.6.



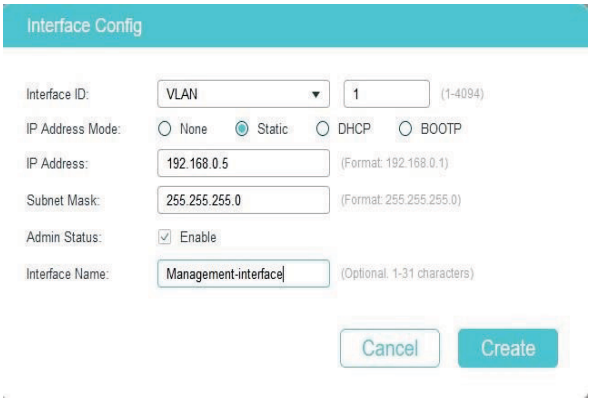

***Фиг. 6****. DHCP конфигурация на маршрутизатора*

За избора на комутатор (aggregation switch), на който ще бъдат конфигурирани VLAN-и, които ще разделят трафика на клиентските компютри от този на видеонаблюдението е избран TP-Link TL-SG2218 със следните характеристики: 16 RJ45 гигабитови порта, 2 гигабитови SFP порта, L2/L3 функции, VLANs, Управление през web interface/ CLI.

Избран е управляем L2/L3 комутатор с висикоскоростни интерфейси. На него

ще се разчита да разпределя трафика между различни виртуални локални мрежи, да прави връзката между всички компютри на компанията и локалните сървъри, да обединява няколкото на брой суича, които разделят видеонаблюдението по зони, и да предава сигналите от видео камерите към записващите устройства, както и да предава целия изходящ трафик към маршрутизатора на мрежата.

Първоначалният достъп до комутатора е сходен с този на маршрутизатора. След като един път е достъпен, първо трябва да се конфигурира адреса му. Това става от секция L3 Features – меню Interface. Както е описано е схемата на мрежата, суичът ще е с адрес 192.168.0.5/24 – фиг. 7.

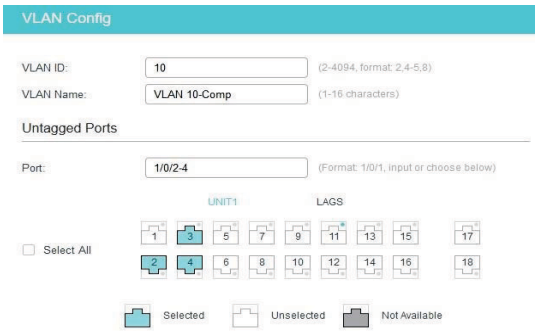



***Фиг. 7**. Мрежова настройка на комутатора*

След като устройството има валиден адрес от мрежата, трябва да се конфигурират 2 VLAN – един за компютърната техника в сградата и друг за видеонаблюдението. Компютърната мрежа има 3 „access“ комутатора – по 1 на всеки етаж. Тоест за начало в този VLAN ще трябва да се добавят 3 порта на суича. Този VLAN ще бъде с ID 10 и име VLAN 10-Computers.

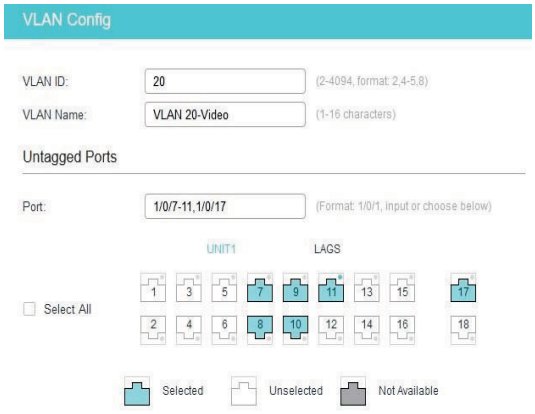
Видеонаблюдението общо разполага с 6 суича, които обединяват камерите по различните зони, следователно трябва да се отделят 6 порта във VLAN, който ще е с ID 20 и име VLAN 20-Video.

За конфигурация за виртуалните локални мрежи трябва да се влезе в секция L2 Features на комутатора и от там меню VLAN-VLAN Config – бутон „Add“. За VLAN, в който ще са компютрите, ще бъдат избрани портове 2,3 и 4 на комутатора – фиг.8.




***Фиг. 8**. VLAN 10 конфигурация*

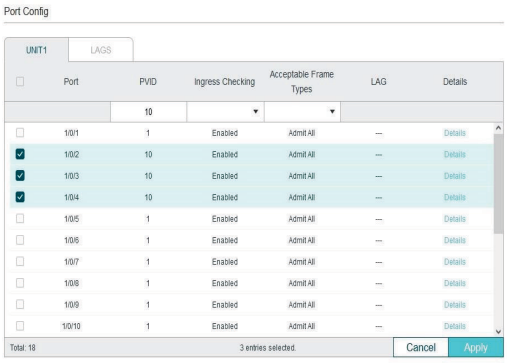
За VLAN, в който ще бъдат комутаторите обединяващи всички видео камери, ще бъдат избрани портове 7-11 и 17. 17ти порт е SFP – от него директно ще излиза оптичен кабел, който ще свързва видео мрежата в основната сграда с тази в „Сграда В“.




***Фиг. 9**. VLAN 20 конфигурация*

За да сработят правилно виртуалните локални мрежи, конфигурирани на комутатора, последната нужна стъпка е да се свържат физическите портове с номер (ID) на VLAN, в който са. Конфигурацията се изпълнява от VLAN – Port Config – фиг.10. Портове 2-4(VLAN за компютрите) се отбелязват със съответния номер на VLAN, в който са – 10 – в полето „PVID“.

Портове 7-11,17 се правят по същия начин, но съответно с „PVID“ – 20.



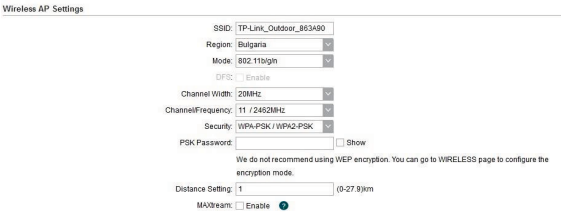

***Фиг.10.*** *VLAN Port Config*

За комутатори (access switch), които ще обединяват всички компютри по отделните етажи са избрани TP-Link TL-SG3452X. Комутаторите са с гигабитови RJ45 портове, така че да отговарят на скоростта на мрежата и са 48-портови – разполагат с достатъчно на брой портове за устройствата на всеки един етаж, като е предвидено и място за бъдещо разширяване на мрежата.

За комутатор, който ще обединява видеокамерите по различните зони, е избран TP-Link TL-SL1218MP. Той е неуправляем модел, но всичките му портове поддържат PoE+. Технологията PoE ще се използва с цел по-лесна и бърза инсталация на цялата система за видеонаблюдение, както и за по практична поддръжка на системата в бъдеще.

За да се свърже основната сграда със „Сграда С“ ще бъдат използвани 2 броя антени (CPE устройства) TP-Link CPE 210,тъй като между сградите има пряка видимост, но няма как да се прекара кабелно трасе.

Устройството, което ще е на основната сграда (което физически ще е свързано с локалната мрежа и ще трябва да я разшири) ще е настроено в режим Access Point т.е. ще преобразува мрежата в безжична. Първоначално устройството се достъпва чрез адреса си по подразбиране, след което с настройките за режим, ще се конфигурира и статичен IP адрес от 192.168.0.180/24 – фиг. 11.




***Фиг.11.*** *TP-Link CPE210 конфигурация*

Трябва да се настроят и SSID на мрежата, режим на 802.11, кой честотен канал да използва устройството, тип на криптиране и други.

При първоначалното си пускане отсрещното устройство трябва да се настрои в режим Client и всички настройки за безжичната мрежа трябва да са като на Access Point-а, в противен случай устройствата няма да успеят да се свържат успешно. То ще бъде с IP адрес 192.168.0.181/24. Неговият LAN порт ще бъде свързан с TP-Link TLSL1218MP PoE суича в „Сграда С“ и той ще се явява входна/изходна точка за тази безжична част на локалната мрежа.

Всички видеокамери в сградите на компанията ще са Hikvision DS-2CD1347G2-L (фиг.12) с основни характеристики: 4.0 Мегапиксела (2560x1440@20 кад/сек); Фиксиран обектив f=2.8 мм/F1.0; Вградена бяла LED светлина с обхват до 30м; Детекция на движение; Поддържа dual stream компресия H.265+, H.265, H.264+, H.26; Захранване: 12Vdc/PoE 4.5W. Тъй като моделът е с клас IP67 защита и също така може да работи в много широк температурен диапазон е подходящ както за вътрешен, така и за външен монтаж, всички кръгове на системата ще са изградени с него [14].



***Фиг.12****. IP камера Hikvision DS-2CD1347G2-L*

След като устройството е захранено и добавено към мрежата, трябва да се достъпи чрез адреса си по подразбиране през браузър




След създаването на администраторска парола, ще зареди основната страница:

Тъй като камерата ще е с грешен час и дата, времето се настройва от меню Configuration-System-System Settings-Time Settings. Задава се времева зона. Времето може да се настрои ръчно, да се синхронизира с времето на компютъра, от който се настройва или да се зададе адрес на NTP server. Тъй като в мрежата на компанията е предвиден NTP сървър, се прави настройка с неговия IP адрес.

От меню Configuration-Network-Basic Setting-TCP/IP се настройва мрежовата карта на устройството. В случая това ще е първата камера от 1-ви етаж на основната сграда, следователно ще й се зададе адрес от 192.168.0.100/24.

По такъв начин се настройват всички камери от мрежата със съответните си IP адреси [13].

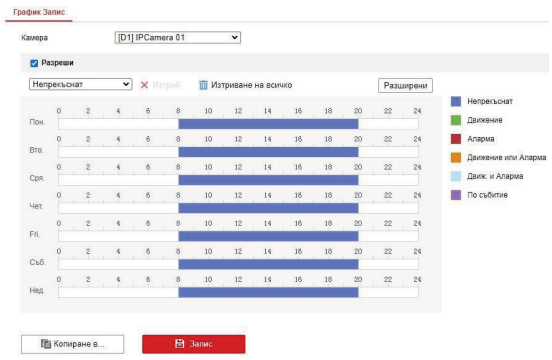
За записващи устройства ще се използват Hikvision DS-7616NI-K2 [14]. Общо ще са нужни 5 броя – по 1 бр. за всеки от 3-те етажа на основната сграда, 1 бр. за външния кръг на основната сграда и 1 бр., който ще обединява камерите в двата допълнителни склада, тъй като там камерите ще са по-малко на брой. На всички записващи устройства са предвидени да останат достатъчно на брой свободни канали за бъдещо разширение на мрежата. Както се вижда от логическото разпределение на мрежата на фиг. 2 – рекордерите ще заемат адресите от 192.168.0.65/24 до 192.168.0.69/24.

Основни характеристика на NVR: 16-канален мрежов рекордер, H.265/H.264+/H.264/MPEG4 компресия за видеонаблюдение, резолюция на запис до 8 MPx, до 4xSATA твърд диск (до 6TB/диск), HDMI + VGA мониторни изходи и 3 USB порта.

Рекордерът първоначално се достъпва по същия начин като камерите. Следват и същите настройки за време и мрежова карта.

От меню Configuration-System-Camera Management се вижда с кои камери в момента записващото устройство може да се свърже по мрежата. Избират се камерите, които трябва да се добавят към това устройство. За добавянето си всяка камера ще изисква да се въведат данните й за потребителско име и парола.

След като вече има добавени камери към рекордера се въвежда график на запис. Влиза се в меню Configuration-Storage-Schedule и за всеки канал (добавена камера) се избира тип на записа (непрекъснат, движение, аларма и др) и се задава часови график на запис – фиг.13.



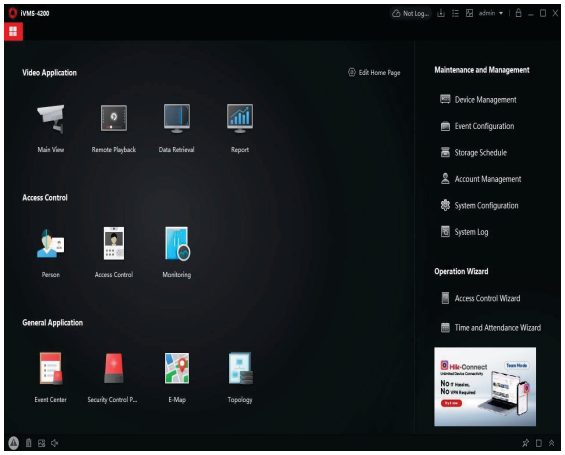

***Фиг. 13**. Примерен график на запис*

За изграждане на видео сървър е избрана софтуерната платформа iVMS 4200, която е безплатна за ползване и специално разработена за работа с различни по тип устройства и продукти с Hikvision марка.

iVMS-4200 е универсален софтуер за видео управление за DVR, NVR, IP камери, енкодери, устройства за контрол на достъп, охранителни контролни панели, видеодомофонни устройства, декодери, VCA устройства и др. Осигурява множество функционалности, включително преглед на живо в реално време, видеозапис, дистанционно търсене и

възпроизвеждане, архивиране на файлове, получаване на аларми и други.

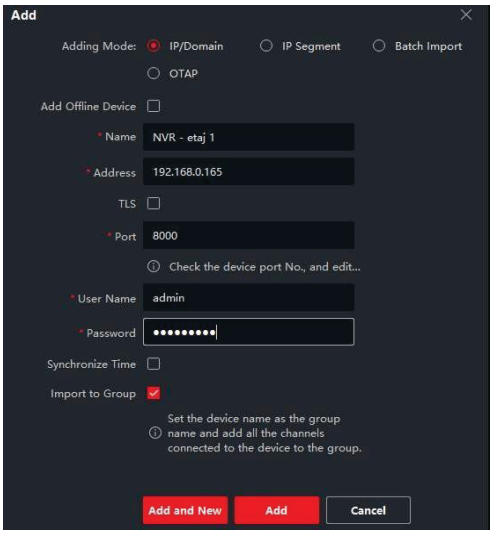
След инсталацията на софтуера iVMS 4200 и отварянето му, потребителят влиза на началната му страница – фиг. 14.




***Фиг. 14**. Начална страница на iVMS 4200*

Първата стъпка е да се добавят всички записващи устройства от мрежата към софтуера. За целта се влиза в меню Device Management-Device-бутон „Add“ и в появилия се прозорец се попълват мрежовите данни и данните за автентикация на устройството, което трябва да се добави – фиг. 15.

Тази стъпка се повтаря за всички NVR(DVR) устройства в мрежата. След това потребителят вече може да вижда всички камери от тях в реално време в меню „Main View“. В случая на клиента – IP адреси от 192.168.0.165 до 192.168.0.169. Не е проблем да се добави устройство, което не е в същата локална мрежа, стига то да е конфигурирано да „се вижда“ в Интернет и да е известен порта, по който то се достъпва. Също така ако в последствие към мрежата бъдат добавени IP видеокамери, които не са част от някой от рекордерите, също могат да бъдат изведени за наблюдение в софтуера.




***Фиг.15**. Добавяне на устройство към iVMS 4200*



***Фиг.16**. Меню „Main View“*

От долната лента с инструменти, натискайки иконката с дискета може да се запамети текущата подредба на камерите, за да не се пренареждат след всяко отваряне на програмата. Въвежда се име на изгледа и той вече стои най-горе в частта с избор на устройства в „Main View“.

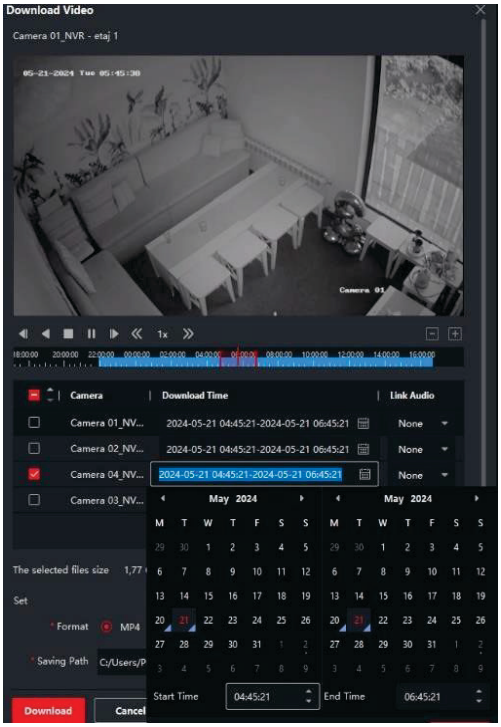
Преглед на записи - от началната страница се избира меню „Remote Playback“ (фиг. 17). Избира се камера, чиито записи трябва да се проверят. След това от долната лента с инструменти се избира ден от календара, в който има направени записи и час. Натиска се „Play“ бутона и записът от посочената дата и час започва да се изпълнява. До изборът за дата и час има инструменти за пускане, пауза и спиране на видеозаписа, както и за намалява-

не/ускоряване на скоростта на преглед от 1x до 16x.




***Фиг.17.*** *Меню „Remote Playback“*

Сваляне на запис – от същата лента с инструменти се натиска бутон „Download“. С натискането му се отваря прозорец, от който се избира период на запис, който трябва да бъде свален (фиг. 18). Избира се дали зададения период да се свали само за 1 камера или за няколко (всички).




***Фиг. 18****. Инструмент „Download“*

Осигуряване на отдалечен достъп – За да може сървъра да се достъпва отдалечено, когато потрябва, а не да е нужен физически достъп до него, се позволява Windows функцията „Remote Desktop“, чрез която всеки оторизиран потребител в мрежата ще успява да достъпи сървъра, докато работи на друга машина.

## ПРОВЕДЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

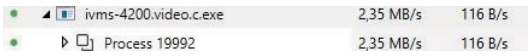
За експерименти с вече изградената и работеща мрежа се използва софтуерен инструмент „NetLimiter“, през който могат да се наблюдават отделните приложения и процеси, които са активни в даден момент в една Windows базирана машина. Инструментът следи какъв bandwidth (честотна лента) използва всяко приложение от локалната мрежа и с каква скорост качва/сваля данни в нея. В конкретния случай се следи активността на процеса създаден от iVMS4200.

Кликвайки върху 3-те точки до името на камерата излизат допълнителни функции. Кликвайки на Remote Configuration-Video се влиза директно във Видео настройките на конкретната камера. От бутон „Copy To“ конфигурацията на една камера може да се пренесе на всички други – фиг.19.




***Фиг. 19****. Видео настройки на камера*

*Тест 1* – Добавена е 1бр. камера от NVR в „Main View“. Конфигурирана е с 1280*720 резолюция, 2048 kbps Bitrate, 25Fps и H.264 компресиране . Получени са следните данни от инструмента NetLimiter:



След това от меню Remote Configuration-Video на камерата единствено е променен параметъра Bitrate от 2048Kbps на 3072Kbps. Download скоростта на iVMS 4200 се променя по следния начин:




*Тест 2* – Направени са изчисления и за 10бр едновременно записващи се IP камери с резолюция от 4MPX (2560 x 1440), Bitrate 8192Kbps, 30Fps и H.264 компресиране в продължителност на 10 дни. Резултатът е (приблизително) заета честотна лента от 82Mbps и заето място (обем на записа) на твърдия диск на записващото устройство от 8.85TB т.е. NVR с твърд диск с обем от 6TB би записвал 6 до 7 дни.

*Тест 3* – Направени са изчисления със същия брой и видео конфигурация на камерите с единствена разлика, че типа на компресията е променен от H.264 на H.265, съответно Bitrate = 4830. Резултатът е (приблизително) заета честотна лента от 48Mbps и заето място (обем на записа) на твърдия диск на записващото устройство от 5.2TB т.е.

NVR с твърд диск с обем от 6TB би записвал 10 до 11 дни.

*Тест 4* – Направени са изчисления със същия брой камери, но тяхната видео конфигурация е променена на резолюция от 3MPX (2048 x 1536), Bitrate 2695Kbps, 20Fps и H.265 компресия. Резултатът е (приблизително) заета честотна лента от 27Mbps и заето място (обем на записа) на твърдия диск на записващото устройство от 2.9TB. С тази конфигурация е постигнат запис върху твърдия диск до 20 дни.

В заключение, предложеното примерно решение за проект на хибридна комуникационна мрежова свързаност между три сгради е реализирано и тествано. Чрез него се демонстрира възможността за използването на три различни видове преносна среда – безжична, оптична и кабелна. Подобна реализация е често срещана в практиката и може да послужи при обучението на студенти да проектират, реализират и тестват подобни примерни решения познавайки възможностите на хардуер, софтуер и различни комуникационни преносни среди.

*Благодарности: Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Разработка на IoT/4G/5G-базирани комуникационни решения за платформи, системи и услуги в "Интелигентен град"", договор 2403Е/2024 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Computer Networking: A System Administrator's Handbook, D.K. Academy, 2018.
[2] Macshmillan T., Cisco: Computer Networks. Basics, 2016.
[3] Lowe D., Computer Networks For Dummies, 2014.
[4] Milanov L., Networking Fundamentals. LAN Design, Switching, SoftUni, 2016
[5] Toshkov A., Design and construction of optical networks, 2011.
[6] Perros H., Connection-Oriented Networks, 2005.
[7] Steenbergen R., Everything You Always Wanted to Know About Optical Networking – But Were Afraid to Ask, 2013.
[8] Dankov P., Introduction to Wireless Communications, 2007.
[9] Gugova V., V. Pulkov Optical cable lines and networks, 2011.
[10] Ferdinandov E., K. Dimitrov, Optical communication systems, 2007.
[11] Ramaswami R., Optical Networks. A Practical Perspective, 2010.
[12] Communication-Systems-Engineering 2nd-Edition, John Proakis, Masoud Salehi, 2010.
[13] Simpson W., H. Greenfield IPTV and Internet Video, 2009.
[14] https://www.hikvision.com

НАПРАВЛЕНИЕ

# КОМПЮТЪРНИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ

SESSION

# COMPUTER SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

# СЕГМЕНТИРАНЕ НА ПОТРЕБИТЕЛИТЕ НА УСЛУГИ ЧРЕЗ ПРОФИЛИТЕ ИМ В СОЦИАЛНИТЕ МРЕЖИ

**Виктория Велкова**

*Технически Университет - Габрово, ул. "Х. Димитър" 4, Габрово, България*
*Кореспондиращ автор: v.velkova@tugab.bg*

# USER SEGMENTATION USING SOCIAL MEDIA PROFILES

**Victoria Velkova**

*Technical University - Gabrovo, 4 "H. Dimitar" str., Gabrovo, Bulgaria*
** Corresponding author: v.velkova@tugab.bg*

**Abstract**
*This paper presents a methodology for segmenting users of digital services using OAuth authorization. By analyzing data from users' social media profiles, we can form user segments to improve personalized content delivery. The proposed approach involves collecting and processing data from social networks, identifying key user attributes and forming meaningful segments.*

**Keywords:** User segmentation; OAuth authentication; Social networks

## ВЪВЕДЕНИЕ

С експоненциалния ръст на облачните услуги предоставянето на персонализирани преживявания стана критично важно за задържането и удовлетворението на потребителите. Сегментирането на потребителите или профилирането е процес на разделяне на потребителите на отделни групи (сегменти) въз основа на различни характеристики и поведение. Това помага за по-ефективното разбиране и насочване към конкретни аудитории. Съществуват два основни вида профилиране - явно и скрито [1].

Явното (експлицитно) сегментиране включва директно събиране на информация от потребителите чрез действия или предпочитания, които те изразяват, като например попълване на формуляри, избор на предпочитания или предоставяне на обратна връзка. Този метод разчита на съзнателния принос на потребителите, за да ги категоризира в различни групи въз основа на заявените от тях предпочитания или характеристики.

Скритото (имплицитно) сегментиране, от друга страна, включва извеждане на потребителски атрибути или предпочитания въз основа на тяхното поведение, взаимодействия или наблюдавани модели. Този метод анализира действията на потребителите, като например историята на сърфиране, поведението при покупка или взаимодействията в социалните медии, за да ги категоризира, без да изисква изричен потребителски вход. Сегментирането, основано на анализ на профилите на потребителите в социалните мрежи, представлява форма на имплицитно сегментиране [2]. То използва данни за активности, взаимодействия и поведение на потребителите в социалните медии, за да извлече техните предпочитания и характеристики. Чрез анализ на социални връзки, харесвания, споделяния и коментари, потребителите се категоризират в сегменти въз основа на наблюдаваното им поведение в платформата. Този подход осигурява динамично сегментиране в реално време, като улавя предпочитанията без необходи-

мост от изрично потребителско участие. Целта на този доклад е да се разработи методология за сегментиране на потребителите на облачни услуги, като се използват данни от социални мрежи, получени чрез OAuth авторизация. Целта е да се подобри персонализацията на доставяне на съдържание чрез създаване на по-точни потребителски сегменти въз основа на динамично поведение в социалните мрежи.

## СЪЩЕСТВУВАЩИ РАЗРАБОТКИ

Сегментирането на потребителите на услуги е тема на задълбочени изследвания, като са предложени различни методологии и техники за подобряване на персонализацията и ангажираността на потребителите. В този раздел е направен преглед на съществуващата литература за сегментирането на потребителите, като се акцентира върху използването на демографски данни, поведенчески данни и възникващата роля на данните от социалните мрежи в тази област.

Традиционните подходи за сегментиране разчитат основно на демографски данни като възраст, пол, местоположение и доход. Въпреки че тези методи са лесни за прилагане, те често не успяват да уловят динамичните и сложни аспекти на потребителските предпочитания и поведение. В [3] се изследва използването на демографски данни при вземането на решения и предизвикателствата, произтичащи от липсата на такива данни в интернет. Проучването анализира различни методи за профилиране на потребители за демографски препоръчителни системи, като се разглеждат различни атрибути, техники за представяне и методи за профилиране.

Поведенческата сегментация изследва взаимодействията на потребителите с определена услуга, използвайки показатели като честота на използване, активност и история на покупки. Тези данни предоставят информация за предпочитанията на потребителите, което позволява персонализиране, но често не включват контекста от социалните мрежи. Изследванията за профилиране на поведението в социалните мрежи подчертават необходимостта от повишена сигурност и защита от неоторизиран достъп. В проучване с 356 респонденти [4] се използват контролирана и неконтролирана класификация, което успешно идентифицира потребителски групи с ограничен брой характеристики.

Използването на данни от социалните мрежи за сегментиране на потребителите е нова тенденция, свързана с разпространението на социалните медии и богатството на предлаганите данни. Анализът на социалните мрежи изследва взаимоотношенията и взаимодействията в социалния граф на потребителя, предоставяйки информация за неговите предпочитания, интереси и влияние. Този подход е успешно приложен в области като маркетинг, здравеопазване и сигурност, но в облачните услуги остава недостатъчно проучен.

Основен текст на доклада. В [5] авторите използват техники като обработка на естествен език и машинно обучение за извличане и обработка на информация от социална мрежа X. В [6] Xu, Liu и Zhang изследват поведението на потребителите в социалните мрежи, акцентирайки на влиянието му върху взаимодействията в тези платформи. Статията анализира моделите на активност и идентифицира фактори, които определят ангажираността, като релевантност на съдържанието и структура на мрежата. Изследователите прилагат размити системи и интелигентни алгоритми, за да моделират динамиката на поведението и количествено да оценят влиянието му върху социалните връзки.

Достъпът до потребителски профили в социалните мрежи може да се осъществи чрез OAuth [7], отворен стандарт за делегиран достъп. Той позволява на уебсайтове и приложения да получат ограничен достъп до информацията на потребителя, без да се изисква споделяне на пароли. OAuth дава възможност на

потребителите да влизат в приложения на трети страни чрез идентификационни данни от социални мрежи като Facebook, X, Google, LinkedIn и други, като по този начин те разрешават на тези приложения достъп до определени данни от техните профили.

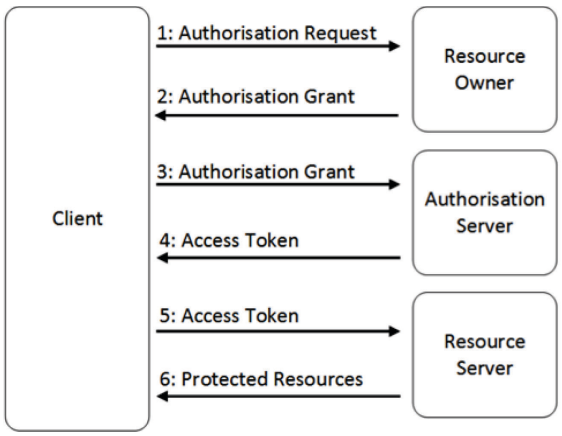
Множество проучвания показват потенциала на данните от социалните мрежи за подобряване на потребителското сегментиране. В [8] се предлага нов метод за сегментиране, базиран на анализ на текстовете за самоописание с техники за извличане на текст и размита клъстеризация. Този подход позволява на компаниите да сегментират клиенти ефективно на базата на коментари и идеи, споделени в социалните мрежи.

В контекста на цифровите услуги, интеграцията на потребителски данни от социалните мрежи чрез OAuth авторизация предоставя изчерпателна представа за потребителите. Достъпът до информация за социални връзки, дейности и интереси позволява на облачните платформи да осигурят по-персонализирани и ангажиращи изживявания. В [9] се разглежда използването на социалните мрежи за набиране на участници в научни изследвания, подчертавайки липсата на регулации и биоетични насоки. Авторите предлагат методология за етично набиране на участници, акцентирайки на личната неприкосновеност, прозрачността и новите етични аспекти, като спазване на условията за ползване и последствията от онлайн взаимодействия.

## РЕЗУЛТАТИ

В този раздел са описани резултатите, получени след прилагане на подход за сегментиране на потребителите, който използва OAuth авторизация на достъпа чрез профили във Facebook, X и LinkedIn.

На Фиг. 1 е показан преглед на функционирането на OAuth 2.0. Процесът се инициира от клиента, който изпраща (1) заявка за оторизация до собственика на ресурса. В отговор собственикът на ресурса генерира разрешение за оторизация и го изпраща (2) на клиента. След получаване на разрешението, клиентът инициира заявка за токен за достъп, удостоверявайки се пред сървъра за разрешение и представяйки разрешението (3). След успешно удостоверяване на клиента и валидиране на разрешението, сървърът за упълномощаване издава (4) токен за достъп. Клиентът след това прави заявка за защитен ресурс, представяйки токена на сървъра за ресурси (5). Накрая, след валидиране на токена за достъп, сървърът за ресурси изпраща (6) защитените ресурси на клиента.




*Фиг. 1 Функциониране на протокол OAuth 2.0*

Извличането на потребителските данни от Facebook профил включва следните стъпки:

- Регистрация на приложение за облачна услуга в портала за разработчици на Facebook. Тази стъпка осигурява на приложението уникален App ID и App Secret, които са необходими за извършване на OAuth заявки.
- Заявка за разрешение: Потребителите се насочват към страницата за вход във Facebook, където могат да се удостоверят и да предоставят на приложението разрешение за достъп до техните данни. Исканите разрешения включват основна информация за профила, както и допълнителни права, сред които public_profile (публичен профил), email (имейл), user_hometown (роден град), user_birthday (рожден ден), user_age_range (възрастов

диапазон), user_gender (пол), user_link (връзки, свързани с профила), user_friends (приятели), user_location (местоположение), user_likes (харесвания), user_photos (снимки), user_videos (видеоклипове) и user_posts (публикации).

- Обмен на токени за достъп: При оторизация на потребителя Facebook пренасочва потребителя обратно към приложението с код за оторизация. След това приложението разменя този код за оторизация за токен за достъп, като използва следното API повикване:

POST
https://graph.facebook.com/v20.0/oauth/access_token

Тази заявка включва идентификатора на приложението, тайната на приложението, кода за оторизация и URI за пренасочване. Отговорът съдържа маркера за достъп, който се използва за достъп до данните на потребителя.

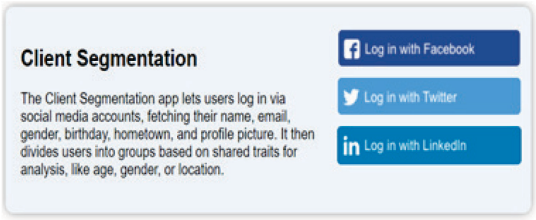
- Извличане на данни: Използвайки маркера за достъп, приложението прави заявки към Graph API на Facebook за извличане на потребителски данни, например:

GET
https://graph.facebook.com/v20.0/me?fields=id,name,email,picture,likes,posts

Тази заявка извлича основната информация за профила на потребителя, харесвания и публикации. Данните се връщат във формат JSON. От извлечените данни се получават различни характеристики, които са показателни за предпочитанията и поведението на потребителите. Основните характеристики включват:

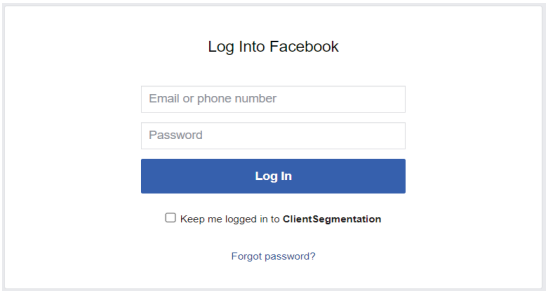
- Демографска информация: възраст, пол и местоположение.
- Социални връзки: брой приятели и взаимодействия с приятели.
- Интереси: харесвани страници, категории интереси и честота на взаимодействие с харесвани страници.
- Модели на активност: честота и вид на публикациите, коментарите и харесванията.

Разработено е уеб приложение на Python, което осъществява сегментиране на потребителите за услуга, предоставяща персонализирано съдържание на посетителите на музеи. На Фиг. 2 е показан потребителският интерфейс на приложението, в който потребителите могат да се оторизират, използвайки своите профили във Facebook, X или LinkedIn.



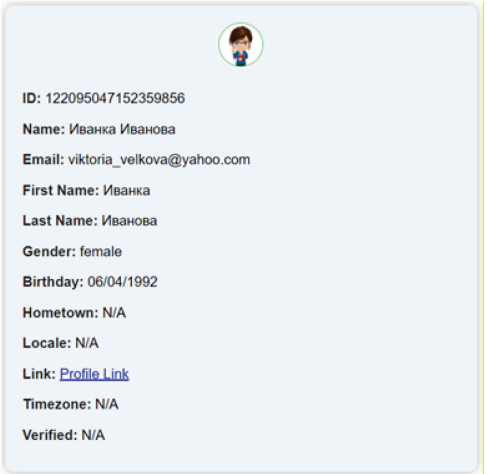

*Фиг. 2 Потребителски интерфейс*

Когато потребителят избере да се регистрира чрез акаунт във Facebook, той се пренасочва да авторизира достъпа си чрез имейл или телефонен номер и парола (виж. фиг. 3).




*Фиг. 3 Авторизация чрез Facebook профил*

След успешна авторизация приложението извлича заявените потребителски данни, анализира ги и ги визуализира (виж Фиг. 4).




*Фиг. 4 Потребителски данни*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Това проучване демонстрира потенциала на използването на потребителските данни, получени чрез OAuth авторизация, с цел сегментиране на потребителите на цифрови услуги. Използването на данните от профилите на потребителите в социалните мрежи позволява създаването на по-точни и адаптивни потребителски сегменти. Въпреки това, подходът е свързан с предизвикателства, включващи поверителността, качеството и мащабируемостта на данните, които трябва да бъдат преодолени, за да се реализира напълно потенциалът му.

Бъдещите изследвания ще се съсредоточат върху разширяването на източниците на данни, както и проучването на усъвършенствани техники за клъстеризация на потребителските профили.

*Благодарности: Това изследване е частично финансирано от Министерството на образованието и науката [Проект № 2409E].*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Purificato, E., Boratto, L., & De Luca, E. W. (2024). User Modeling and User Profiling: A Comprehensive Survey. arXiv preprint arXiv:2402.09660.

[2] Tuten, T. L. (2023). Social media marketing. Sage Publications Limited.

[3] Al-Shamri, M. Y. H. (2016). User profiling approaches for demographic recommender systems. Knowledge-Based Systems, 100, 175-187.

[4] Boja, C., Zamfiroiu, A., Zurini, M., & Iancu, B. (2019). USER BEHAVIOUR PROFILING IN SOCIAL MEDIA APPLICATIONS. Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research, 53(1).

[5] Xavier, C. C., & Souza, M. (2020). A basic approach for extracting and analyzing data from Twitter. Special topics in multimedia, IoT and web technologies, 185-211.

[6] Xu, Y., Liu, Y., & Zhang, X. (2020). Analysis of social network user behaviour and its influence. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 38(2), 1159-1171.

[7] Siriwardena, P., & Siriwardena, P. (2020). OAuth 2.0 Fundamentals. Advanced API Security: OAuth 2.0 and Beyond, 81-101.

[8] Öztaysi, B., & Onar, S. Ç. (2013). User segmentation based on twitter data using fuzzy clustering. In Data Mining in Dynamic Social Networks and Fuzzy Systems (pp. 316-333). IGI Global.

[9] Gelinas, L., Pierce, R., Winkler, S., Cohen, I. G., Lynch, H. F., & Bierer, B. E. (2017). Using social media as a research recruitment tool: ethical issues and recommendations. The American journal of bioethics, 17(3), 3-14.

# МОБИЛНО ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА ДОСТАВЯНЕ НА СЪДЪРЖАНИЕ ЗА МУЗЕЙНИ ЕКСПОНАТИ ЧРЕЗ ТЕХНОЛОГИЯ NFC

**Виктория Велкова**
*Технически Университет - Габрово, ул. "Х. Димитър" 4, Габрово, България*
*Кореспондиращ автор: v.velkova@tugab.bg*

# MOBILE APP FOR CONTENT DELIVERY FOR MUSEUM EXHIBITS USING NFC TECHNOLOGY

**Victoria Velkova**
*Technical University - Gabrovo, 4 H. Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*
** Corresponding author: v.velkova@tugab.bg*

**Abstract**
*This paper presents a mobile application for delivering content for museum exhibits using Near Field Communication (NFC) tags. The application is built using the Monaca Cloud IDE hybrid mobile application development environment. The goal of the presented development is to deliver multimedia content for a museum exhibit associated with an NFC tag. The identifier of each tag is associated with a specific exhibit. The application displays this content when the client brings his mobile phone close to an NFC tag.*

**Keywords:** Smart museums, NFC tags, Mobile apps

## ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременния свят на информационните технологии и комуникациите, непрекъснатият напредък води до иновации, които трансформират начините, по които взаимодействаме с околната среда. NFC (Near Field Communication) етикетите работят чрез безжично предаване на информация на много къси разстояния, обикновено до 3-10 см. Те съдържат малък чип и антена, които позволяват на устройства, като смартфони или NFC четци, да обменят данни при допир или близост. Когато NFC устройство приближи до етикета, то генерира магнитно поле, което активира чипа на етикета. След това информацията, съхранена в чипа, се предава на устройството, което може да извърши различни действия, като отваряне на уебсайт, изпращане на контактни данни или активиране на приложения [1,2].

NFC етикетите се използват широко в маркетинга, плащанията и управление на инвентара. Комуникацията се осъществява чрез доближаване на двете устройства, като връзката се установява посредством процес, наречен електромагнитна индукция.

Появата на NFC технологията е свързано с революционизиране на процеса на плащания. Използването на NFC при разплащане осигурява бърз и удобен начин за извършване на финансови транзакции. При тази технология, потребителите просто доближават своите NFC устройства, като смартфони или смарт часовници, до терминал за плащане. Устройството автоматично предава информация за картата или акаунта, а транзакцията се осъществява почти мигновено. NFC плащанията предлагат висока степен на сигурност, тъй като данните се шифроват и транзакциите се извършват без физическо взаимодействие с картата. С напредъка на технологиите и въвеждането на решения като Apple Pay, Google Pay и Samsung Pay, мобилните плащания

се трансформираха. Тези дигитални портфейли позволяват на потребителите да съхраняват данни за плащанията в своите мобилни устройства и да извършват транзакции чрез доближаване на телефона до POS терминал, като за допълнителна сигурност се използват биометрични проверки, предоставяни от платформи като Pay.com.

Освен това, NFC съвместимите смартфони позволяват на потребителите да сканират NFC етикети, за да получат информация за продукти, услуги или да проследят техния произход. В съвременния бързо променящ се пазар търговците трябва да намират иновативни начини за привличане на потребители. Рекламни материали като плакати, брошури и визитни картички с активирана NFC технология могат да ангажират потенциалните клиенти, предоставяйки персонализирано съдържание като информация за уебсайтове или промоционални оферти след взаимодействие с NFC етикета.

Целта на този доклад е разработването на хибридно мобилно приложение за доставяне на съдържание за музейни експонати чрез използване на NFC етикети. Приложението използва възможностите на Framework7 за изграждане на потребителски интерфейс. Достъпът до вградения в мобилните устройства NFC четец се реализира чрез Cordova плъгин.

## СЪЩЕСТВУВАЩИ РАЗРАБОТКИ

Развитието на NFC технологията води до нейното широко интегриране в различни сектори, като мобилни плащания, търговия, култура, транспорт, реклама, образование и здравеопазване. В [3] авторите анализират еволюцията на технологията, като изследват литературни източници, описващи внедряването ѝ в тези области. Използването на NFC етикети в музеите е нарастваща тенденция, която предлага нови начини за ангажиране на посетителите и обогатяване на културния опит. NFC технологията позволява на потребителите лесно да получават допълнителна информация за експонатите чрез доближаване на смартфон или друго мобилно устройство до NFC етикетите, което отключва съдържание като текстови описания, видеоматериали, аудио гидове или интерактивни функции. Изследванията на авторите на доклад [4] показват, че NFC технологията значително улеснява достъпа до цифрово съдържание в културни пространства, подобрявайки образователните възможности на посетителите. Също така, авторите на публикация [5] демонстрират успешното използване на NFC за предоставяне на контекстуални и персонализирани преживявания в музейни експозиции. Изследванията в [6,7] подчертават потенциала на NFC да насърчава взаимодействието между посетителите и културното съдържание чрез улеснен достъп до информация в реално време.

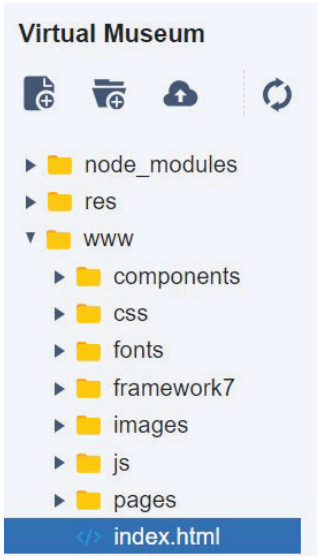
Авторите в доклади [8,9] разглеждат интелигентна архивна кутия за мониторинг на микроклимата в музейни хранилища, която не изисква физическо взаимодействие. Кутията използва NFC сензор без батерия, захранван от NFC-съвместим смартфон (Samsung Galaxy S10). Измерванията показват средна температурна грешка от 0,34°C (в диапазона 6,8°C – 50°C) и грешка в относителната влажност от 2% (в диапазона 20%-80%). Системата има ниска енергийна консумация (900 μW) и комуникационен обхват от 4,5 см. Тази иновация улеснява наблюдението на условията в хранилището и намалява риска от деградация на музейните артефакти.

Възможността за предоставяне на персонализирано съдържание в музеите се разглежда като ключов фактор за повишаване на удовлетвореността на посетителите. В мобилното приложение Smart Museums [10], авторите използват NFC тагове, за да подобрят потребителското изживяване чрез взаимодействие с интерактивни експонати и достъп до допълнително цифрово съдържание. Тази технология създава по-завладяваща и ангажираща среда в музеите, като позволява на посетителите да персонализират

своето преживяване и да получават информация, съобразена с техните интереси.

## МОБИЛНО ПРИЛОЖЕЕНИЕ

На Фиг. 1 е показана структурата на проекта чрез който се изгражда мобилното приложение.




***Фиг.1*** *Структура на проекта*

Структурата на проекта е организирана по следния начин:

- Папка **www** - съдържа целият програмен код.
- Папка **js** – Съдържа JavaScript код за инициализация на приложението (app.js), описание на пътищата до ресурсите който използва приложението (routes.js) и локалната база данни (store.js) в която се съдържа информация за музейните експонати и асоциацията им с NFC етикети.
- Индексният HTML документ (index.html ), неговият код се зарежда при стартиране на приложението.
- Конфигурационен файл **config.xml** – описание на параметри, необходими за изграждане на приложение за Android и iOS.

Разработено е хибридно мобилно приложение с помощта на програмна рамка Cordova (CLI v.11.0.0). Потребителският интерфейс е изграден с помощта на Framework7 v.6.3.0. Приложението може да се инсталира на мобилни устройства с Android и iOS. Приложението използва плъгина phonegap-nfc с цел достъп до информацията от NFC етикетите.

Потребителският интерфейс (виж Фиг. 2) на приложението е проектиран да бъде интуитивен и лесен за използване. Той включва основен екран, който показва инструкции за сканиране на NFC етикет, както и области за показване на извлечената информация от етикета.

***Фиг.2*** *Потребителски интерфейс – начален екран*

Ако вграденият в мобилното устройство NFC четец е забранен, приложението изпраща съобщение до потребителя да разреши услугата. Това гарантира, че потребителят е наясно с необходимостта от активиране на NFC функционалността за правилната работа на приложението.

Приложението е проектирано да обработва различни видове мултимедийно съдържание, свързано с музейните експонати, включително текстови описания, изображения, аудио и видео файлове. Това позволява богато и разнообразно представяне на информацията за всеки експонат.

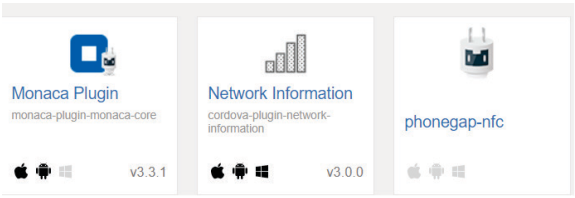
## ТЕСТВАНЕ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО

Приложението може да бъде тествано по три начина:

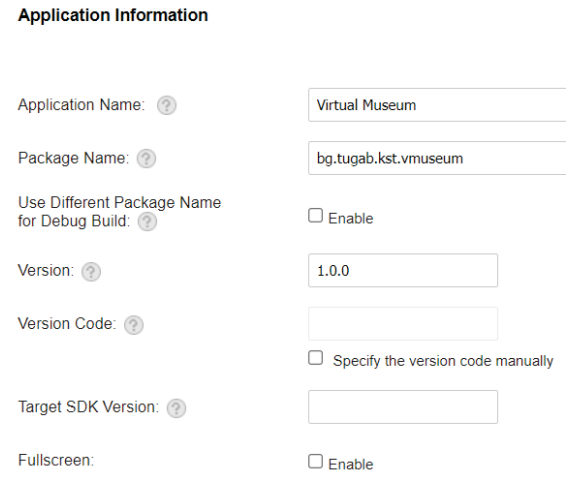
- Използване на вградения в Monaca Cloud IDE симулатор.
- Използване на Monaca Debugger.
- Тестване на реално устройство.

За да тестваме приложението трябва да преминем през няколко основни стъпки за настройки. От менюто на Monaca Cloud IDE избираме Configure, а след

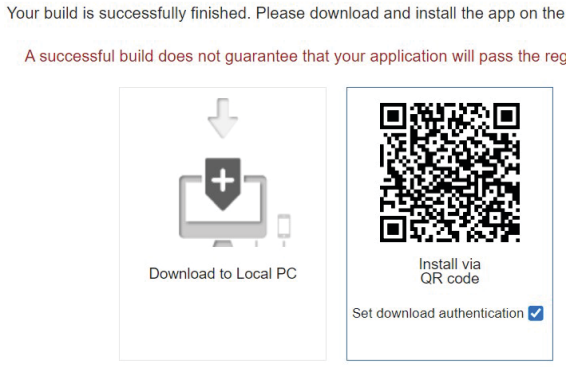
това Cordova Plugin Settings за да добавим необходимите плъгини. (виж Фиг. 3).




***Фиг. 3.*** *Избор на плъгини*



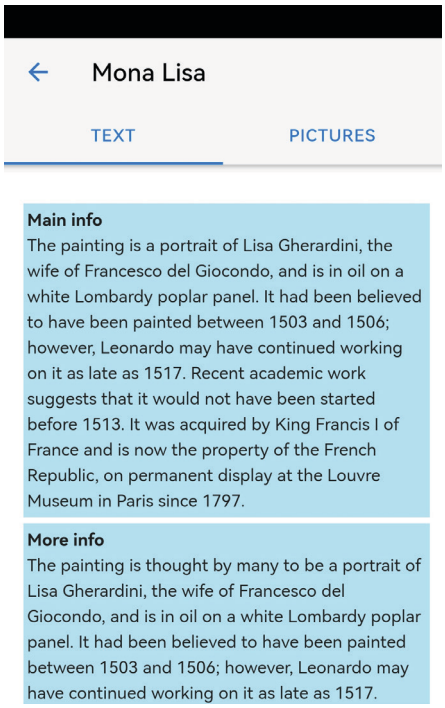

***а)***



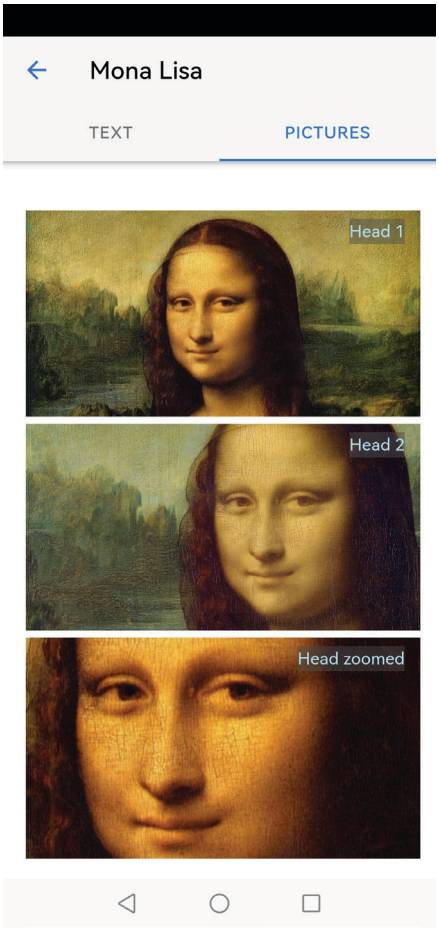

***б)***

***Фиг.4*** *Конфигуриране и изграждане на приложението: а) конфигуриране; б) изграждане*

Следва задаване на конфигурационни параметри като името на приложението „Virtual Museum“ и името на пакета bg.tugab.kst.vmuseum и др. (виж Фиг. 4а). След успешно конфигуриране на приложението следва изграждане а цел получаване на инсталационен файл за съответната операционна система (виж Фиг. 4б).




***Фиг.5*** *Изглед на текстовата информация за експонат*




***Фиг.6*** *Изглед на изображение за експонат*

На Фиг. 5 и Фиг. 6 е показано съдържанието асоциирано с конкретен експонат – текстово описание и изображения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият доклад анализира процеса на разработване на хибридно мобилно приложение за доставка на съдържание, свързано с музейни експонати, чрез интеграция на технология NFC. Чрез това приложение посетителите могат да получат допълнителна информация за експонатите с минимално усилие, като просто доближат своите мобилни устройства до NFC етикетите, разположени в музея.

Процесът на настройка, конфигурация и тестване на приложението е систематично разгледан, включително стъпките за интеграция с NFC четец и използването на Cordova плъгин за достъп до NFC етикетите.

Бъдещите разработки ще се фокусират върху разширяване на функционалността на приложението чрез динамично извличане на данни от сървър-хранилище за мултимедийно съдържание, което ще осигури по-голяма гъвкавост и персонализирано съдържание за музейните експонати. Тази иновация ще подобри изживяването на посетителите, като предостави актуализирана и контекстуално подходяща информация.

*Благодарности: Това изследване е частично финансирано от Министерството на образованието и науката [Проект № 2409Е].*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Singh, N. K. (2020). Near-field communication (NFC): An alternative to RFID in libraries. *Information Technology and Libraries*, *39*(2).

[2] Thanapal, P., Prabhu, J., & Jakhar, M. (2017, November). A survey on barcode RFID and NFC. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 4, p. 042049). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/4/042049.

[3] Nikitina, K., Melnikova, M., & Biliatdinov, K. (2024). Analysis of NFC technology evolution. *International Journal of Open Information Technologies*, *12*(2), 49-54.

[4] Jovanka, F., Richardson, S., Zabrina, P. K., Adiati, M. P., & Rosman, D. (2023, July). The Influences Of NFC Technology Adoption on Visitor's Attitude and Intention To Visit Museum: A Study Of Generation Z. In *2023 International Conference on Digital Applications, Transformation & Economy (ICDATE)* (pp. 1-6). IEEE.

[5] Di Rosa, E., & Benente, F. (2013, October). "Excavate and learn": Enhancing visitor experience with touch and NFC. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (Vol. 2, pp. 689-692). IEEE.

[6] Nikitina, N., Kharitonova, E., & Elmagarmid, A. (2017). NFC technology in museums: Enhancing visitor experiences through interactive systems. *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, 58-64. https://doi.org/10.1109/INCoS.2017.58

[7] Seo, Y. D., & Ahn, J. H. (2013). Efficient nfc tagging pattern-based contents recommendation for museum viewers. *Applied Mechanics and Materials*, *263*, 2876-2880.

[8] Gawade, D. R., Ziemann, S., Kumar, S., Iacopino, D., Belcastro, M., Alfieri, D., & Buckley, J. L. (2021). A smart archive box for museum artifact monitoring using battery-less temperature and humidity sensing. *Sensors*, *21*(14), 4903.

[9] Gawade, D. R., Kumar, S., Simorangkir, R. B., O'Callaghan, B., Iacopino, D., Rather, N., & Buckley, J. L. (2023, June). Performance characterization of a battery-less NFC sensor for museum artifact monitoring. In *2023 34th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)* (pp. 1-7). IEEE..

[10] Chhatbar, D. (2024). IoT technologies to enable location-based services (LBS) for smart tourism. https://doi.org/10.1145/2702613.2732899.

# ПОДХОДИ И ПРИЛОЖЕНИЯ ЗА СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАНИ МРЕЖИ

**Мирослав Славов, Делян Генков***

*Технически университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово, България*
**кореспондиращ автор: dgenkov@tugab.bg*

# SOFTWARE DEFINED NETWORKING APPLICATIONS AND APPROACHES

**Miroslav Slavov, Delyan Genkov***

*Technical University - Gabrovo, 4, Hadji Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria;*
**Corresponding author: dgenkov@tugab.bg*

**Abstract**

*Software defined networking is a modern way to configure and monitor today's networks. Instead of configuring every device separately, this approach allows centralized configuration and monitoring of the networking devices through a software applications. There are still no clear definitions for what exactly is a software defined network. Different vendors have their own appoaches in creating such hardware and applications.*

*Present paper describes some solutions and applications of software defined networks..*

**Keywords:** Software Defined Network; SDN; Applications; Approaches.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Софтуерно дефинираните мрежи (Software Defined Network – SDN) е обещаваща технология, която все повече набира популярност и все повече производители на мрежово оборудване се ориентират към нея. Въпреки това съществуват множество проблеми и неясноти по отношение на начина на реализиране и начина на работа на устройствата в тези мрежи. Поради тази причина много от водещите компании в областта на мрежовото оборудване разработват свои собствени решения, които понякога се различават значително по отношение на реализацията и начина на фунциониране.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

SDN е подход за изграждане на мрежи, които използва софтуерно базирани контролери и приложно програмни интерфейси (API) за комуникация с по-ниско разположената хардуерна инфраструктура и за насочване на трафика в мрежата. [1]

В традиционните мрежи се разполага със специфични мрежови устройства, като напр. маршрутизатори, комутатори и защитни стени, които изпълняват определени задачи. [2]

Мрежовото устройство има различни функции, които трябва да изпълнява. Например, някои от нещата, които рутерът трябва да направи, за да препрати IP пакет са:

- трябва да провери IP адреса на местоназначението в маршрутизиращата таблица, за да разбере къде да препрати пакета;
- необходими са маршрутизиращи протоколи като OSPF, EIGRP или BGP за научаване на мрежите, добавени в таблицата;
- трябва да се използва ARP, за да

разбере MAC адреса на следващото устройство (хоп) или крайния получател и да промени MAC адреса на получателя в Ethernet рамката;

- времето на живот (Time to Live - TTL) в IP пакета трябва да се намали с 1 и контролната сума в заглавната част на IP пакета трябва да се изчисли наново;
- контролната сума на Ethernet рамката трябва да се преизчисли.

Всички тези задачи се изпълняват в някоя от следните три равнини:

- *Контролна равнина (control plane)*
- *Равнина за данни (data plane)*
- *Равнина за управление (management plane)*

*Контролна равнина*

Контролната равнина е отговорна за обмен на маршрутизираща информация, изграждане на ARP таблицата и т.н. Някои от задачите, които се изпълняват от контролната равнина са:

- научаване на MAC адреси за изграждане на таблица;
- изпълнение на STP за създаване на топология без цикли;
- изграждане на ARP таблици;
- изпълнение на маршрутизиращи протоколи и изграждане на маршрутизираща таблицата;

*Равнина за данни*

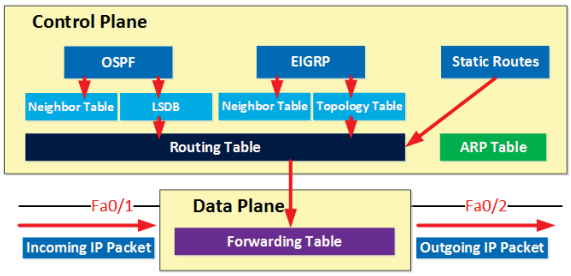
Равнината за данни е отговорна за препращането на трафика. Тя разчита на информацията, която контролната равнина предоставя. Задачи, за които се грижи са:

- опаковане и разопаковане на пакети;
- добавяне или премахване на заглавия като 802.1Q;
- съпоставяне на MAC адреси за пренасочване;
- съпоставяне на IP адреса в полето за получател с маршрутизиращата таблицата;
- променя адресите на източника и получателя, когато се използва NAT;
- изхвърляне на трафик в съответствие със списъците за достъп.

Задачите на равнината за данни трябва да се изпълняват възможно най-бързо, поради което пренасочването на трафика се извършва от специализиран за задачите хардуер (Application-Specific Integrated Circuit – ASIC) и TCAM (Ternary Content Addressable Memory) таблици.

*Равнина за управление*

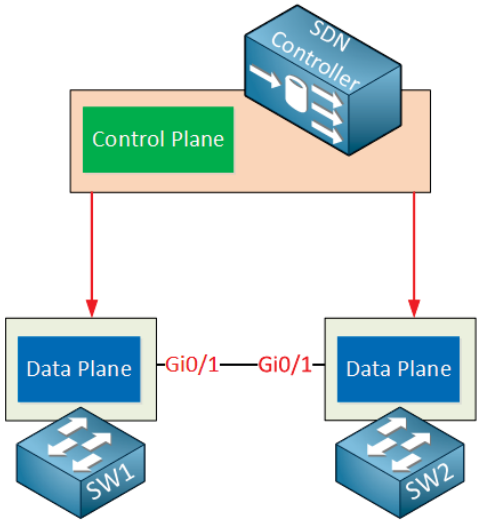
Равнината за управление се използва за достъп и управление мрежовите устройства. Например достъп устройството чрез telnet, SSH или конзолен порт.



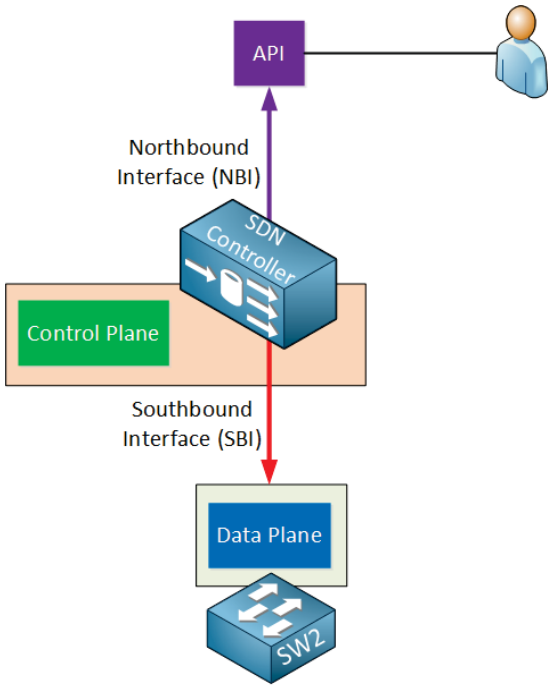

***Фиг. 1**. Контролна, равнина за данни и равнина за управление при традиционните мрежи [2]*

При традиционните мрежи трите равнини са разположение във всяко едно устройство (фиг. 1) и всяко устройство може да изпълнява функции от която и да е равнина или от няколко равнини, което води до разпределение на контролната равнина.

При SDN се реализира разпределение на контролната и равнината за данни, като контролната равнина се централизира, а равнината за данни се разпределя между няколко устройства (фиг. 2). За реализирането на контролната равнина се използват специализирани устройства, наречени SDN контролери. Тези контролери реализират два интерфейса, осъществяващи връзка към останлите две равнини – тази за данни и за управление.




***Фиг. 2**. Контролна и равнина за данни при софтуерно-дефинираните мрежи (SDN) [2]*



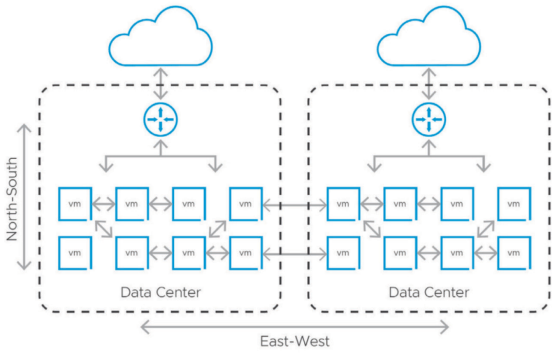

***Фиг. 3**. Северен (northbound) и южен (southbound) интерфейс на SDN контролера [2]*

Двата интерфейса се наричат северен (Northbound Interface – NBI), осъществяващ връзката към равнината за управление, позволяващ управление на контролера и южен интерфейс (Southbound Interface – NBI), осъществяващ връзката към равнината за данни (фиг. 3)

**Подходи**

Различните компании, занимаващи се с разработка и доставка на мрежово оборудване имат свои собствени реализации на SDN, като някои от тях се базират на софтуерни, други и на хардуерни решения. Някои компании реализират своите решения и на базата на това как се реализират мрежите и каква е преобладаващата посока на трафика.

Някои от SDN мрежите се реализират за да осъществят връзка между отделни виртуални мрежи в един или отделни центрове за данни. Тъй като в тази ситуация трафикът е между виртуалните машини е възможно той да не премине през точка на обединяване (aggregation point), поради което този трафик се нарича и неагрегиран трафик, но е по-познат като трафик Изток- Запад (East-West traffic). Той е показан на фиг. 4.




***Фиг. 4**. Трафик Изток-Запад (East-West) и трафик Север-Юг (North-South)[3]*

*Cisco Systems*

Като една от водещите компании в областта на мрежовото оборудване Cisco Systems предлага решение и в областта на SDN. По отношение на управление на трафика в центъра за данни или трафикът Изток-Запад, компанията предлага решение, наречено Cisco ACI (Application Centric Infrastructure).

Cisco ACI опростява управлението на мрежата в центъра за данни и подобрява сигурността чрез предоставяне на централизиран подход, ориентиран към приложението. [4]

С автоматизация и контрол, базиран на политики, той позволява на постигане на гъвкави ИТ операции и ускорява цифровата трансформация в центъра за данни.

Друга важна особеност Cisco ACI е способността му да поддържа мултиоблачни среди.

Някои от предимствата на Cisco ACI включват:

1. опростени мрежови операции;
2. последователно поведение на приложението;
3. повишена гъвкавост и мащабируемост;
4. подобрена сигурност;
5. Поддръжка на много-облачна среда.

Основните блокове на Cisco ACI включват контролерът Application Policy Infrastructure Controller (APIC) и комутаторите Nexus 9000 серии. (фиг. 5)




***Фиг. 5**. Cisco ACI инфраструктура [4]*

Други SDN се реализират за да осъществят връзка между устройства, разположени в кампус мрежи или мрежи в различни клонове на компания и Интернет. Обикновено този трафик е филтриран и преминава през точка, в която той се обединява. Този трафик се нарича трафик Север-Юг (North-South traffic – фиг. 4)

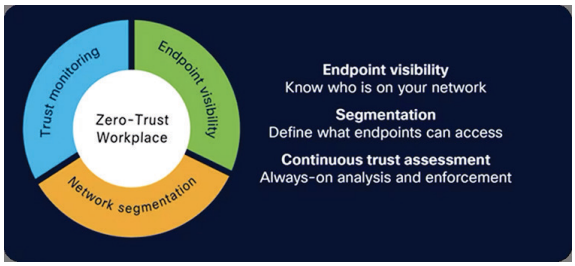
*Cisco Systems*

По отношение на този тип трафик от компанията Cisco Systems предлагат решение наречено Cisco Application Policy Infrastructure Controller – Enterprise Module – APIC-EM, базирано на контролера на Cisco API – APIC. В последствие компанията заменя това решение с Cisco Software-Defined Access (Cisco SD-Access), което е и актуалното и препоръчвано решение на компанията по отношение на трафик Север-Юг.

Cisco SD-Access позволява реализирането на т.нар. работна среда с нулева довереност (Zero-Trust Workplace), като позволява създаване на правила за сигурност по отношение на устройствата, разположени в мрежата, постоянно наблюдение на тези устройства и изолирането им при откриване на заразени или устройства, представляващи заплаха за мрежата.

Възможности на работната среда с нулево доверие

Cisco SD-Access помага за рационализиране на процеса на предоставяне на достъп до потребители и устройства, като същевременно намалява повишения риск от неизвестни IoT устройства. (фиг. 6) Чрез използване на мрежова инфраструктура и телеметрия за информиране и налагане на сигурността, SD-Access може да предостави възможности на работното място с нулево доверие за IoT крайни точки и управлявани потребителски устройства, като същевременно помага да се осигури непрекъснат доверен достъп.




***Фиг. 6**. SD-Access Zero-Trust Workplace [5]*

Реализирането на Zero-Trust Workplace чрез Cisco SD-Access позволява:

- идентифициране и проверка на всички крайни точки и потребители, включително IoT крайни точки, които се свързват към мрежата
- създаване на политика и сегментиране, за осигуряване на достъп с най-малко привилегии въз основа на крайна точка и потребителски тип
- непрекъснато наблюдаване на поведението на крайната точка, включително криптиран трафик, за да се осигури съответствие
- спиране разпространението на заплахи, включително ransomware, като се постави под карантина всяка крайна точка, която проявява злонамерено или несъответстващо поведение. [5]

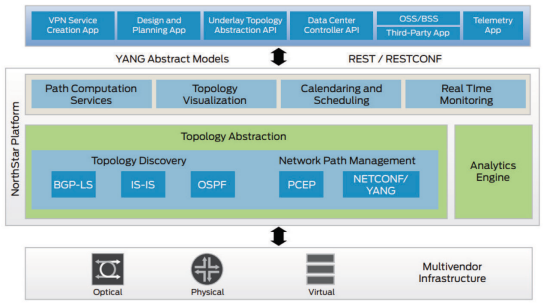
*Juniper Networks*

Компанията Juniper Networks предлага решение за софтуерно дефинирани глобални мрежи (SD-WAN), което се състои от хардуерни маршрутизатори серия NXF, собствен контролер - NorthStar Controller и централизирано приложение за управление на мрежата - Contrail Networking control and management system [6].

В устройствата е вграден Open vSwitch – програмна рамка с отворен код за комутатор и мрежова автоматизация, която ефективно оптимизира потоците данни, осигурява цялостни маршрутизиращи функции и подобрява производителността.

Контролерът NorthStar Controller е мощно и гъвкаво решение за инженеринг на трафик, което позволява детайлна видимост и контрол на IP/MPLS потоците в големи доставчици на услуги и корпоративни мрежи. Той позволява на мрежовите оператори да оптимизират своята мрежова инфраструктура чрез проактивен мониторинг, планиране и изрично маршрутизиране на големи натоварвания от трафик динамично въз основа на посочените ограничения. Контролерът е базиран на архитектурата Path Computation Element (PCE), описана в документа RFC 5440 [7].

Концепцията, вложена в контролера за маршрутизация се нарича Source Packet Routing in Networks (SPRING). Тя представлява SDN-базиран метод за маршрутизация, в който контролерът управлява мрежовите ресурси и насочва трафика според нуждите на приложението. Архитектурата на контролера е показана на фигура 7.




***Фиг. 7**. Архитектура на NorthStar [8]*

Contrail Networking е прост, отворен и гъвкав продукт за автоматизация на облачна мрежа с SDN архитектура. Със своята мащабируема архитектура с микроуслуги, приложението организира виртуални мрежи с производителност на облачни услуги.

**Приложения на SDN**

Софтуерно дефинираните мрежи намират приложение в много разнообразни сценарии. Тук са показани само някои идеи за възможни приложения:

- Центрове за управление на данни, които ще осигуряват облачни услуги на клиентите си. Там се предвижда да се обслужват много клиенти едновременно и сървърните и мрежови ресурси трябва да се скалират динамично, на базата на нуждите на потребителите. Концепцията SDN в центъра за управление на данни позволява да се изгради една голяма топология на канално ниво, която да избягва много копия на еднакви пакети и по този начин да позволи бърза миграция на виртуалните машини между физическите ресурси [9];
- Паралелни връзки през глобални мрежи – много организации имат основна и резервна връзка между отдалечените си мрежи. Традиционните маршрутизиращи протоколи обикновено избират по-добрия път и използват него, а резервния стои неизползван и се активира само когато основният отпадне. Със софтуерно дефинираните мрежи може да се управлява трафика на потребителите динамично, поотделно за всеки пакет или за всеки поток данни и така да се използва по-ефективно мрежовата топология;
- В домашни мрежи – прилагането на подхода на софтуерно дефинираните мрежи може да потребителите видимост за използването на мрежата и за евентуални проблеми в нея, дори преди те реално да се случат. Освен това този подход може да осигури на потребителите средства за по-добро управление на ресурсите, например тегленето на голямо количество данни или мрежовите компютърни игри, използвани от един член

на семейството да не могат да провалят процеса на отдалечена работа или онлайн конференция за друг член.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад са описани някои подходи за изграждане на софтуерно дефинирани мрежи и приложението им в съвременния свят. Тази концепция представлява един нов поглед към компютърните мрежи, който се развива все повече и е предмет на бъдещи изследвания. Бъдещите планове на екипа включват изграждане на опитна постановка за изследвания, тестване на различни контролери и изграждане на приложения с реално приложение в практиката.

*Източник на финансиране: Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2405Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Усъвършенстване на обучението чрез информационни и комуникационни технологии“ към Технически университет – Габрово.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] VMware, What is Software-Defined Networking (SDN), https://www.vmware.com/topics/software-defined-networking (30.10.2024 г.)

[2] NetworkLessons, Introduction to SDN (Software Defined Networking), https://networklessons.com/cisco/ccna-routing-switching-icnd2-200-105/introduction-to-sdn-software-defined-networking (30.10.2024 г.)

[3] Michael Rebmann, A Closer Look at VMware NSX Security, https://www.cloud13.ch/2022/12/21/a-closer-look-at-vmware-nsx-security/ (03.11.2024 г.)

[4] Cisco Systems, Cisco Application Centric Infrastructure (ACI) https://ebooks.cisco.com/story/cisco-application-centric-infrastructure-aci/page/1 (03.11.2024 г.)

[5] Cisco Systems, Cisco Software-Defined Access for Zero-Trust Workplace At-a-Glance https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/software-defined-access/at-a-glance-c45-738181.html (03.11.2024 г.)

[6] Juniper Networks, Contrail Service Orchestration, https://www.juniper.net/us/en/products/sdn-and-orchestration/contrail.html (03.11.2024)

[7] JP. Vasseur, JL. Le Roux, Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP), IETF, Request for Comments: 5440

[8] NetworkScreen, Juniper Networks NorthStar Controller, https://www.networkscreen.com/NorthStar-Controller.asp, (01.11.2024 г.)

[9] Nick Feamster, Software Defined Networking Course, The University of Chicago, Coursera, https://www.coursera.org/learn/sdn/home/module/1 (11.01.2023).

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА ЗА ТЕСТВАНЕ НА КОНТРОЛЕР ЗА СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАНИ МРЕЖИ

**Цветан Райков, Делян Генков*, Мирослав Славов**

*Технически университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: dgenkov@tugab.bg*

# EXPERIMENTAL SETUP FOR TESTING OF SOFTWARE DEFINED NETWORKS CONTROLLER

**Tsvetan Raykov, Delyan Genkov*, Miroslav Slavov**

*Technical University - Gabrovo, 4, Hadji Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria;*

**Corresponding author: dgenkov@tugab.bg*

**Abstract**

*Software defined networking is an important development of the traditional networks. In this concept, the networking devices communicate with a software, named controller, in order to receive their configuration and to report their status. There are plenty of free and commercial controllers. In this paper, we provide the results from a simulation tests between networking devices and controller.*

**Keywords:** Software Device Network; SDN; Controller; Mininet; pox.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Софтуерно дефинираните мрежи са важно развитие на традиционните компютърни мрежи. Те намират все по-широко разпространение в съвременния свят на информационни и комуникационни технологии. Въпреки различните разбирания и реализации на много производители, принципът на работата им се основава на разделянето на управляващата логика, наречена „контролна равнина“ (control plane) и логиката за препращане на данни, наричан „равнина за данни“ (data plane).

Равнината за данни включва хардуерните и софтуерните компоненти, които извършват комутация, маршрутизация, филтриране и понякога криптиране на пакети. Равнината на данните работи според указанията от контролната равнина и се занимава с предаването на трафик в мрежата на ниво пакет.

Контролната равнина е "мозъка" на мрежовите устройства. Тя отговаря за вземането на решения относно управлението на трафика. Тя генерира маршрутизиращи таблици, таблици на съседство и правила за препращане, които равнината за данни ще следва. При софтуерно дефинираните мрежи, управлението на мрежовите устройства е отделено от тях и е поставена в централизирано устройство наречено - SDN контролер. Така, вместо всяко устройство да е управлявано от своята управляваща равнина, те се управляват централизирано от контролера. Това позволява централизиране на управлението, централизиране на политиките и улеснява менажирането на устройствата [1].

На практика в софтуерно дефинираните мрежи обикновено се реализира и трети слой - управляваща равнина (Management plane), която взаимодейства както с контролната, така и с равнината за данни. Тя се фокусира върху предоставянето на интерфейси за ръчно или автоматизирано управление на устрой-

ствата. На практика тя предоставя на администраторите на мрежите инструментите, необходими да конфигурират устройствата, да следят производителността на мрежата, както и да отстраняват мрежови проблеми. Тази равнина не е стандартизирана и не е предмет на настоящото изследване.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основните компоненти на софтуерно дефинираните мрежи са крайните устройства (комутатори, защитни стени, маршрутизатори), контролер и управляващо приложение. Конкретните изследвания на екипа за настоящия доклад са насочени към първите два компонента. Комуникацията между устройствата и контролерите се извършва чрез протокол, наричан южен програмен интерфейс (Southbound API). Примери за такива протоколи са OpenFlow [2], NETCONF [3] и други.

От гледна точка на съвместимост и наличие на отворен код, който може да бъде модифициран при нужда, нашият опит препоръчва използването на OpenFlow. Към момента на написване на настоящия документ са налични версии на OpenFlow 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 и 1.5. През 2016 година е разработен OpenFlow 1.6, но той е достъпен само за платени членове на Open Network Foundation. Към момента най-широко поддържани и използвани са версии 1.0 и 1.3.

В наше предишно изследване, описано в [4] са изложени проучванията за възможности за апаратни и програмни средства за крайни устройства. Поради високата цена на хардуерните реализации, нашият екип прие да използва софтуерни симулации на устройства. В настоящата разработка се използва симулаторът mininet [5]. С помощта му може да се създаде реалистична виртуална мрежа, симулираща комутатори и крайни устройства в различни конфигурации. В симулацията също може да се вкарва външен програмен код, симулиращ различни мрежови елементи, например контролер за софтуерно дефинирани мрежи.

Съществува голямо многообразие от контролери за софтуерно дефинирани мрежи, някои от които с отворен код, които могат да се вградят в симулатора. Някои от тях са:

- NOX - оригиналният OpenFlow контролер. Той служи като платформа за мрежово управление, която осигурява програмен интерфейс на високо ниво за управление и разработване на приложения за мрежов контрол. NOX първоначално е разработен от Nicira Networks, сега собственост на VMware, заедно с OpenFlow — беше представен за първи път на общността през 2009 г [6]. Съвременната версия на NOX поддържа само C++ и има по-малко приложения.
- POX - предоставя рамка за комуникация със SDN комутатори, използвайки протокола OpenFlow или OVSDB. Разработчиците могат да използват POX, за да създадат SDN контролер, използвайки езика за програмиране Python. Това е популярен инструмент за преподаване и изследване на софтуерно дефинирани мрежи и програмиране на мрежови приложения. POX може да се използва като основен SDN контролер, като се използват стандартните компоненти, които идват в комплект с него. Разработчиците могат да създадат по-сложен SDN контролер чрез създаване на нови POX компоненти или да пишат мрежови приложения, които адресират API на POX [7].
- Ryu е компонентно-базирана рамка за софтуерно дефинирани мрежи с отворен код на Python. Ryu предоставя софтуерни компоненти с добре дефиниран програмен интерфейс, който улеснява разработчиците да създават нови приложения за управление и контрол на мрежата. Ryu поддържа различни протоколи за управление на мрежови устройства, като OpenFlow, Netconf и др. За OpenFlow, Ryu поддържа напълно 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 и Nicira Extensions. Целият код е свободно достъпен под лицензa Apache 2.0 [8]. За съжаление има не особено добра производителност.

- OpenDaylight е сложен и разширяем проект на Java, широко разпро-странен в индустрията, с интеграция за OpenStack и много облачни платформи [9].

Сравнение на представените контролери е показано в таблица 1.

***Таблица 1***. *Сравнение на контролери*

| | NOX | POX | Ryu | ODL |
|---|---|---|---|---|
| Език | C++ | Python | Python | Java |
| Произв. | бърз | бавен | бавен | бърз |
| Разпре-делен | не | не | да | да |
| Open Flow | 1.0 | 1.0 | <=1.5 | 1.3 |
| учене | средно | лесно | средно | трудно |

За изграждане на настоящата платформа е избран контролерът POX, поради използвания от него програмен език python и възможностите за разширения.

## ОПИСАНИЕ НА РЕАЛИЗАЦИЯТА

За създаване на платформата за софтуерно дефинирани мрежи е необходимо да се изтегли и инсталира симулаторът mininet. Възможностите за инсталация са няколко: да се изтегли виртуална машина и да се стартира във виртуализационна платформа, да се инсталира чрез компилация на първичния код или да се използват готови прекомпилирани пакети, достъпни за някои версии на linux. В настоящата разработка е използван подходът с виртуална машина. Изтегленият файл е във формат Open Virtualization Format (.ovf), който се поддържа от много виртуализационни платформи. За настоящото изследване е избрана платформата Oracle Virtual Box – безплатен хипервайзор от тип 2 с отворен код, чрез който могат да се виртуализират различни операционни системи [10]. В него се импортира и стартира изтеглената виртуална машина.

За отдалечен достъп до виртуалната машина трябва да се използва SSH клиент. В настоящата разработка е използван безплатния клиент PuTTY [11]. Стартирането на симулацията и изграждането на мрежовата топология е показано на фигура 1.

```
mininet@mininet-vm:~$ sudo mn --topo single,3 --mac \
> --switch ovsk --controller remote
*** Creating network
*** Adding controller
Unable to contact the remote controller at 127.0.0.1:6653
Connecting to remote controller at 127.0.0.1:6633
*** Adding hosts:
h1 h2 h3
*** Adding switches:
s1
*** Adding links:
(h1, s1) (h2, s1) (h3, s1)
*** Configuring hosts
h1 h2 h3
*** Starting controller
c0
*** Starting 1 switches
s1 ...
*** Starting CLI:
mininet> _
```

***Фиг. 1***. *Стартиране на топологията*

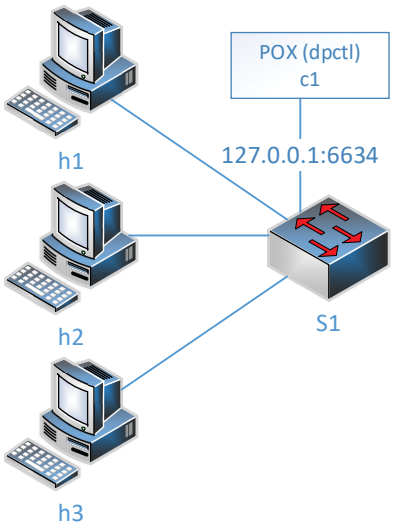
Командата за стартиране е:

```
sudo mn --topo single,3 --mac
--switch ovsk -controller remote
```

Параметрите означават:

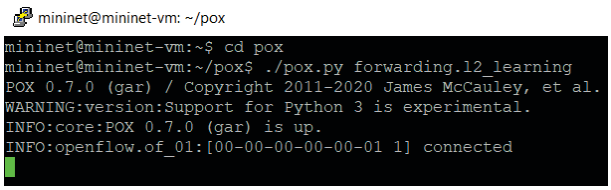
- sudo – изпълни командата с администраторски права;
- mn – команда mininet;
- topo single,3 – изгради топология с един комутатор и три компютъра;
- mac – използва малки числа за MAC адреси за лесно помнене;
- switch ovsk – да се използва комутатор Open vSwitch (OVS);
- controller remote – да се използва външен контролер, вместо вградения в комутатора.

От изхода на командата се вижда, че се създава контролер, стартиран на порт 6633, добавят се трите компютъра h1, h2 и h3, както и комутатора s1. Сега симулирана мрежа вече е стартирана. Тя има топологията, показана на фигура 2.



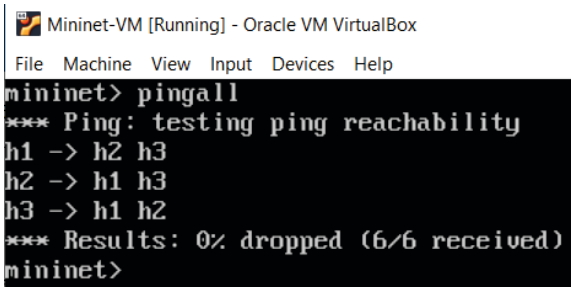

***Фиг. 2***. *Схема на топологията*

Сега трябва да стартираме контролера и да му определим модел на поведение. За целта се свързване със SSH клиента към виртуалната машина, отиваме в директория pox и стартираме python кода на контролера с параметър forwarding.l2_learning, който представлява стандартното поведение на комутатор – да научава MAC адресите на компютрите, свързани към него, да проверява MAC адреса на получателя в таблицата с MAC адресите и да препраща данните на съответния порт, където е свързан получателя. На фигура 3 е показан резултатът от стартирането на контролера и успешното му свързване към комутатора.




***Фиг. 3**. Стартиране на контролера*

За да проверим функционалността на симулираната мрежа, можем от терминала на виртуалната машина да използваме командата pingall, както е показано на фигура 4.



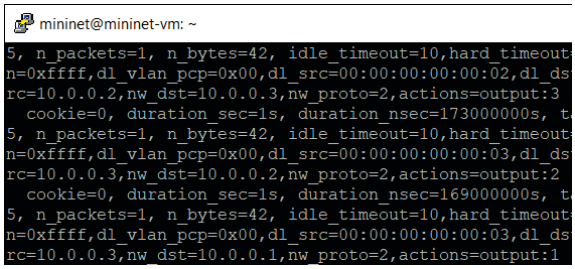

***Фиг. 4**. Проверка на работоспособността*

Командата изпраща тестови ICMP Echo Request пакети последователно от всеки компютър към всички други и ги поканва да върнат Echo Reply отговор. На фигурата се вижда, че всички 6 пакета са изпратени и получени успешно, т.е. мрежата е работоспособна.

С командата dpctl можем да видим създадените в паметта на комутатора потоци данни, в резултат от препратените пакети. Синтаксисът на командата е:

```
dpctl dump-flows tcp:127.0.0.1:6654
```

Където dump-flows означава да се покажат запаметените от комутатора пакети, адресът 127.0.0.1 е на локалната виртуална машина, а TCP порт 6654 е портът, на който се достъпва комутаторът s1. Ако в топологията има повече комутатори, те заемат следващите номера на портове. Резултатът от изпълнението на командата е показан на фигура 5.




***Фиг. 5**. Запаметени потоци от комутатора*

Част от екрана е изрязан, но изходът от командата показва всички изпратени в мрежата пакети от всеки компютър към останалите три и обратните отговори. На екрана се виждат лесните за проследяване IP адреси на трите компютъра: 10.0.0.1, 10.0.0.2 и 10.0.0.3, както и лесните MAC адреси 00:00:00:00:00:01, 00:00:00:00:00:02 и 00:00:00:00:00:03, в резултат на използвания при стартирането на топологията параметър --mac.

За да се симулират по-сложни топологии, може да се използват tree (дървовидна топология) и torus (тороид). Командата за дървовидна топология е:

```
topo=tree,depth=2,fanout=4
```

където topo=tree – създай дървовидна топология, depth=2 – дълбочина (брой нива) на дървото, fanout=4 – брой комутатори на всяко следващо ниво.

На фигура 6 е показано създаване на дървовидна топология.

```
mininet@mininet-vm:~$ sudo mn --topo tree,depth=2,fanout=4
*** Creating network
*** Adding controller
*** Adding hosts:
h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16
*** Adding switches:
s1 s2 s3 s4 s5
*** Adding links:
(s1, s2) (s1, s3) (s1, s4) (s1, s5) (s2, h1) (s2, h2) (s2, h
s3, h8) (s4, h9) (s4, h10) (s4, h11) (s4, h12) (s5, h13) (s5
*** Configuring hosts
h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16
*** Starting controller
c0
*** Starting 5 switches
s1 s2 s3 s4 s5 ...
*** Starting CLI:
mininet> _
```

***Фиг. 6**. Създаване на дървовидна топология*

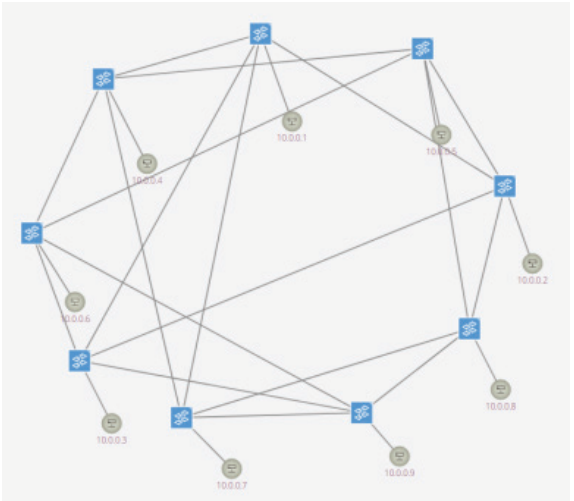
На фигурата се вижда, че се създават пет комутатора – s1 на първо ниво, към който е свързан контролера и четирите комутатора от второ ниво – s2, s3, s4 и s5, към които са свързани по четири компютъра – h1 до h16.

Създаването на тороидната топология е показано на фигура 7.

```
mininet@mininet-vm:~$ sudo mn --topo torus,3,3 --switch ovsk,stp=1
*** Creating network
*** Adding controller
*** Adding hosts:
h1x1 h1x2 h1x3 h2x1 h2x2 h2x3 h3x1 h3x2 h3x3
*** Adding switches:
s1x1 s1x2 s1x3 s2x1 s2x2 s2x3 s3x1 s3x2 s3x3
*** Adding links:
(h1x1, s1x1) (h1x2, s1x2) (h1x3, s1x3) (h2x1, s2x1) (h2x2, s2x2) (h
x2) (h3x3, s3x3) (s1x1, s1x2) (s1x1, s2x1) (s1x2, s1x3) (s1x2, s2x2
, s2x2) (s2x1, s3x1) (s2x2, s2x3) (s2x2, s3x2) (s2x3, s2x1) (s2x3,
s3x2, s1x2) (s3x2, s3x3) (s3x3, s1x3) (s3x3, s3x1)
*** Configuring hosts
h1x1 h1x2 h1x3 h2x1 h2x2 h2x3 h3x1 h3x2 h3x3
*** Starting controller
c0
*** Starting 9 switches
s1x1 s1x2 s1x3 s2x1 s2x2 s2x3 s3x1 s3x2 s3x3 ...
*** Starting CLI:
mininet> _
```

***Фиг. 7**. Създаване на тороидна топология*

Графичното представяне на тороидната топология е представено на фигура 8.



***Фиг. 8**. Тороидна топология*

Топологията се състои от 9 комутатора с по един компютър, свързан към всеки комутатор. Тъй като между комутаторите има излишни връзки, тя няма да работи, ако не се стартира протокол, който да блокира излишните връзки и да премахва затворените цикли. В случая е използван протокол STP (Spanning Tree Protocol) [12].

Възможно е да се създаде всякаква топология, като се създаде скрипт на python и се наследи вградения клас Topo. В него трябва да се създадат комутаторите, компютрите и връзките по следния начин:

```
from mininet.topo import Topo
class topo(Topo):
    def __init__( self ):
    Topo.__init__( self )
    s1 = self.addSwitch('s1')
    s2 = self.addSwitch('s2')
    #...
    h1 = self.addHost('h1')
    h2 = self.addHost('h2')
    #...
    self.addLink(h1,s1)
    self.addLink(h2,s2)
    #...
topos={ 'topo': (lambda: topo () )}
```

Записва се файла с произволно име, например topo.py, след което топологията се стартира по следния начин:

```
sudo mn --custom ./topo.py
```

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад е разгледана опитна постановка за тестване на комуникация с контролер за софтуерно дефинирани мрежи. Текущата постановка използва един контролер – POX, написан на python. Бъдещата работа предполага изследване на всички описани в увода контролери, модификация на съществуващия код с цел добавяне на нови функционалности и модификация на съществуващи. Крайната цел е избор на най-подходящия контролер, конфигуриране на отказоустойчивост и създаване на приложение за мрежово наблюдение и управление, което да дава възможност на потребителя чрез графичен интерфейс да

дефинира настройките за мрежовите устройства. Приложението ще комуникира с контролера, чрез северен интерфейс (Northbound Interface), който ще бъде създаден специално за целта, под формата на REST API.

*Източник на финансиране: Настоящият документ е изготвен с финансовата помощ на договор № 2405Е за провеждане на научни изследвания по проект на тема: „Усъвършенстване на обучението чрез информационни и комуникационни технологии“ към Технически университет – Габрово.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Jerzy Kaczmarski, Management vs. Control vs. Data Planes in a Network Device - https://codilime.com/blog/management-plane-vs-control-plane-vs-data-plane/ - Date of usage: 06.10.2024.

[2] Open Networking Foundation. OpenFlow. https://opennetworking.org/sdn-resources/customer-case-studies/openflow/ Date of usage 05.10.2024.

[3] Cisco Systems. NETCONF Protocol. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/prog/configuration/168/b_168_programmability_cg/NETCONG_YANG.pdf, Date of usage 05.10.2024.

[4] Genkov, D., Ts. Raykov, Software Defined Networking – Concepts, Implementations and Tools.

[5] Minimet, Mininet - An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC). http://mininet.org/, Date of usage 08.10.2024.

[6] Sridhar Rao. SDN Series Part Three: NOX, the Original OpenFlow Controller, https://thenewstack.io/sdn-series-part-iii-nox-the-original-openflow-controller/, Date of usage 05.10.2023.

[7] Brian Linkletter, Using the POX SDN controller, https://brianlinkletter.com/2015/04/using-the-pox-sdn-controller/, date of usage: 02.10.2024.

[8] Ryu SDN Framework Community, Build SDN Agilely. https://ryu-sdn.org/. Date of usage 05.10.2024.

[9] OpenDaylight Project, OpenDaylight, https://www.opendaylight.org/, Date of usage, 05.10.2024.

[10] Oracle, VirtualBox - Powerful open source virtualization, https://www.virtualbox.org/, Date of usage – 10.10.2024.

[11] Simon Tatham, PuTTY - an SSH and telnet client, https://www.putty.org/, Date of usage 10.10.2024.

[12] Cisco Systems, Spanning Tree Protocol, https://www.cisco.com/c/en/us/tech/lan-switching/spanning-tree-protocol/ index.html, Date of usage: 07.11.24.

# ДВУТАКТЕН ЛОГАРИТМИЧЕН АНАЛОГО-ЦИФРОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ (ЛАЦП)

**Борислав Недев**

*Технически университет – Габрово, ул.“Хаджи Димитър“4, Габрово, България, Кореспондиращ автор: b.nedev@tugab.bg*

# TWO-CYCLE LOGARITHMIC ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (LADC)

**Borislav Nedev[1]**

*Technical University of -Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria*
** Corresponding author: b.nedev@tugab.bg*

**Abstract**

*A new approach and implementation of a logarithmic analog-to-digital converter (LADC) is presented, based on a classic two-cycle ADC. In this approach, the measured input voltage is integrated and logarithmized in the forward direction, while in the reverse direction, a linear dependence is used to detect the point at which the integration of the negative reference voltage reaches zero. The counted pulses in the second cycle are in a logarithmic dependence on the input voltage. Circuit solutions, analytical dependencies, and obtained results are provided.*

**Keywords:** logarithmic analog-to-digital converter (LADC).

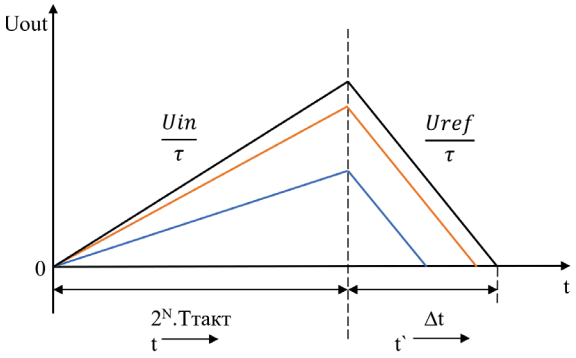
## ВЪВЕДЕНИЕ

Класическите аналого - цифрови преобразуватели (АЦП) имат линейна предавателна характеристика или нарастването на входното напрежение и изменението на изходния код стъпалообразно е по права линия. Това означава, че за целия динамичен диапазон на изследваното напрежение цифровия код ще бъде разпределен равномерно, което в някои случаи когато се търси по-голяма прецизност при ниските нива на сигнала ще е непрактично. Тогава едно от решенията е да се преобразува входния сигнал в цифров вид по логаритмична зависимост (с логаритмична по вид предавателна характеристика), вместо да се повишава разредността на класическия АЦП.

В този доклад се представят схеми и съпътстващите ги аналитични зависимости на преобразуване на АЦП с двутактно интегриране в логаритмичен аналого - цифров преобразувател (ЛАЦП). Представя се реализираната предавателна характеристика.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Основно звено в АЦП с двутактно интегриране е т.нар. интегратор. Това е операционен усилвател (ОУ) с включен кондензатор в ООВ [1] и подадени чрез превключвател на входа на схемата изследван сигнал и обратно по полярност опорно напрежение -Uref [2].



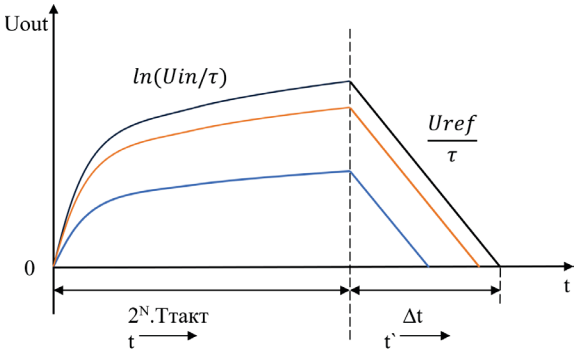

***Фиг. 1**.Времедиаграма на АЦП с двутактно интегриране*

Принципът на работа на този АЦП се пояснява чрез графиката от фигура1 на зависимостта на изходното напрежение (Uout) на ОУ от времето на напълване на двоичен брояч за време t при интегриране на изследваното напрежение в права посока (Uin/τ, където τ=R.C е времеконстантата на интегратора). След което броячът се нулира и започва да се пълни с определен брой импулси за време Δt, при интегрирането в обратна посока (втори такт) с постоянен наклон Uref/τ. Отчетеният брой импулси n за времето на до-стигане на Uout=0V, ще даде двоичния код в линейна зависимост на входното напрежение Uin:

$$n = \Delta t/T_{такт} = (Uin/Uref)2^N, \qquad (1)$$

където N е разредността на брояча (съответно на АЦП).

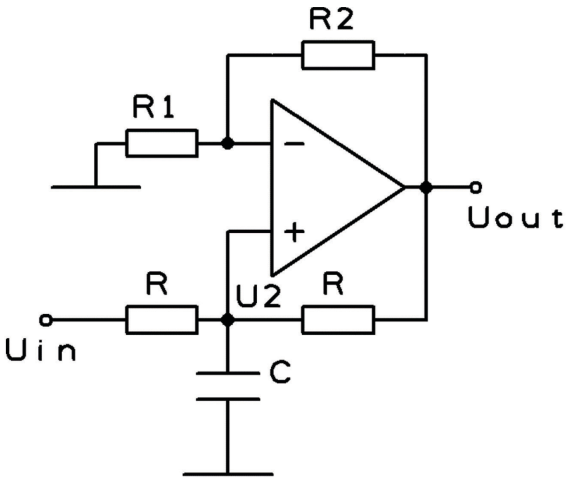
Промяната на интегриране от линейна Uin/τ в логаритмична зависимост ln(Uin/τ), както е показано на фигура 2 би променило изходния за двутактния АЦП цифров код в логаритмичен вид.




***Фиг. 2**.Времедиаграма на двутактен логаритмичен АЦП*

Съчетаването на неинвертиращ интегратор показан на фигура 3 от [3] с логаритмичен преобразувател (фигура 4) е реализирано в схемата представена на фигура 5. Това по своята същност ще представлява логаритмичен интегратор, чиято предавателна характеристика ще определим, след направените по-долу разсъждения и извеждане на отделни аналитични зависимости.

За да се постигне неинвертиращ интегратор (фиг. 3) е необходимо да се създаде отрицателно съпротивление (-R1). Това е съпротивление при което приложеното напрежение и протичащия ток не съвпадат по направление.



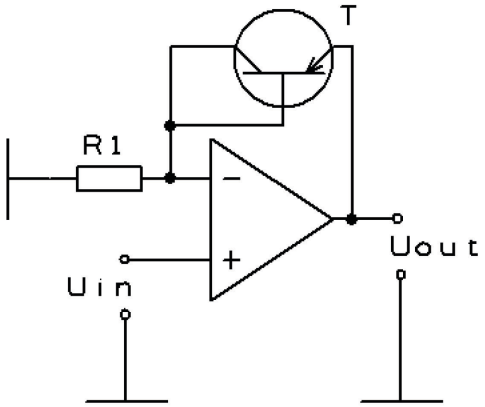

***Фиг. 3**. Неинвертиращ интегратор*

Реализирането на отрицателно съпротивление (-R1) [3] може да се реализира с активни схеми. Ако приемем, че R1=R се получава реализация на неинвертиращия интегратор с операторна по Лаплас предавателна функция:

$$W(s) = U_2(s)/Uin(s) = 1/(sRC), \qquad (2)$$

където RC е времеконстантата на интегратора, а s=σ+jω е комплексна променлива (честота) [4].

Фигура 4 представя схемата на неинвертиращ логаритмичен




***Фиг. 4**. Неинвертиращ логаритмичен преобразувател*

преобразувател. За него е характерно, че се използват свойствата на p-n преход на диод или биполярен транзистор, за да се получи необходимата функционална характеристика [5].

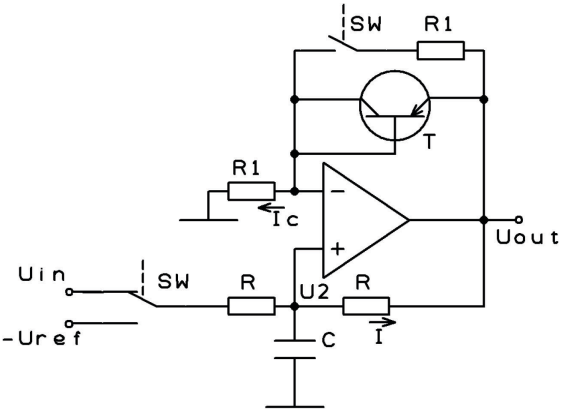
Схемата от фигура 4 е с използването на PNP транзистор. Тук е важно да се отбележи, че е необходимо обратното му напрежение $U_{EBO}$ да е по-голямо от възможното обратно напрежение в схемата. Затова е избран транзистор 2T3851 с $U_{EBO}$=6V и еднополярно захранване (+5V) на ОУ LM324N.

От [5] може да се вземе, че токът, който протича през транзистора при нулево напрежение колектор – база е:

$$Ic = Ico[\exp(qU_{BE}/kT) - 1]. \quad (3)$$

Където Ico е обратния колекторен ток на насищане и за маломощни транзистори е около 0,1 pA, q е заряд на електрона, k – константа на Болцман, T – температура в $^{o}$K. За стайна температура $V_T$=kT/q≈25 mV е широчината на забранената зона на полупроводника.

На фигура 5 е показана схемата на двутактен логаритмичен интегратор като логаритмичното интегриране е с показаното положение на аналоговите ключове SW. При подаване на логическа 1 на управляващите ги входове ключовете ще се превключат и ще реализират линейно интегриране в обратна посока.




***Фиг. 5**. Двутактен логаритмичен интегратор*

Използвайки законите на Кирхоф за схемата на неинвертиращ логаритмичен интегратор (първоначално положение на ключовете) можем да изведем, че:

$$Uout = U_2 - U_R = U_{R1} + U_{BE} \quad (4)$$

За идеален ОУ с диференциално напрежение $U_D$≈0, напреженията на инвертиращия и неинвертиращ вход са равни, т.е. $U_{R1}$=$U_2$, също Ic=-I от където следва, че:

$$U_{BE} = -U_R = -I.R = Ic.R \quad (5)$$

Ако поставим резистор R=R1 от (4) и (5) се получава, че:

$$Uout = 2U_{R1} = 2U_2 = 2Ic.R \quad (6)$$

Заместваики Ic от (3) в (6) се получава, че:

$$Uout = 2.Ico[\exp(qU_{BE}/kT) - 1].R, \quad (7)$$

Откъдето след преобразуване се получава:

$$U_{BE} = V_T.\ln[(Uout/2Ico.R)+1] \quad (8)$$

Също така от (5) се получава, че $U_{BE}$=$U_{R1}$=$U_2$ и като вземем от (6), че $U_2$=Uout/2, следва:

$$Uout =2.V_T.\ln[(U_2/Ico.R)+1] \quad (9)$$

От (2) си извеждаме израз за $U_2$(s) и полагаме в (9). Получава се окончателна зависимост на Uout=f(Uin):

$$Uout =2.V_T.\ln[(Uin/sIco.R^2.C)+1] \quad (10)$$

При превключване на схемата към -Uref, т.е. към линейно интегриране в обратна посока, изходното напрежение се изменя по следната зависимост (11):

$$Uout = 2.V_T.\ln[(Uin/sIco.R^2.C)+1] - 2.Uref/s.R.C \quad (11)$$

При достигане на нулева стойност на изходното напрежение от [2] може да се изведе, че времето за което протича вторият такт е:

$$\Delta t = V_T.R.C.\ln[(Uin.2^N.Tтакт/Ico.R^2.C)+ +1]/Uref, \quad (12)$$

Където N е броя разряди на логаритмичния АЦП. Вижда се, че броя импулси n, които отчита двоичният брояч за време Δt е в логаритмична зависимост от входното напрежение.

На фигура 6 е показана схема на реализация на представения логаритмичен АЦП.

Компараторът в схемата сравнява нивото на изходното напрежение (Uout) на ОУ с нулево ниво (маса) и когато то бива достигнато подава сигнал логическа нула към логическия елемент (схема И), което спира отчитането на тактови импулси от N разредния двоичен брояч. Нов цикъл на измерване започва след като показанието бива отчетено и брояча се нулира от вход Clear. Същевременно е необходимо Т тригерът да се обърне в изходно положение (логическа нула на инвертиращия изход). Това ще превключи аналоговите ключове SW1 и SW2 в първоначалното указано в схемата положение. Ще започне нов цикъл на измерване при който броячът ще се напълни с $2^N$ импулса и ще обърне Т тригера (логическа 1 на инвертиращия изход), което ще превключи схемата във втория такт на интегриране - в обратна посока до достигане на нулево ниво на Uout , което спира пълненето на брояча и т.н., и т.н.

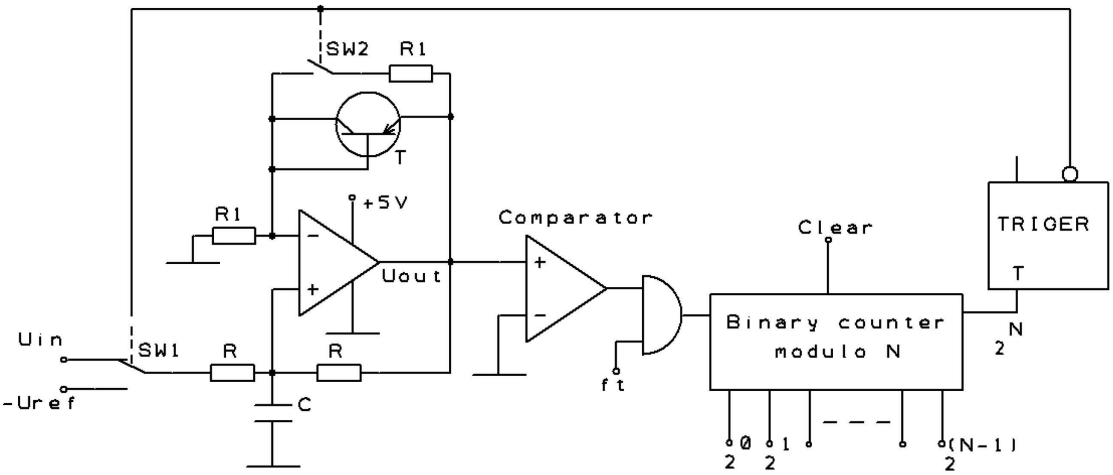
Включването на биполярен транзистор в схемата на логаритмичния интегратор ще внесе промяна в температурната стабилност на преобразувателя. Тук освен температурната компенсация на опорното напрежение е необходима и допълнителна такава за работата на транзистора Т.

Честотата с която ще се дискретизира входния сигнал ще бъде:

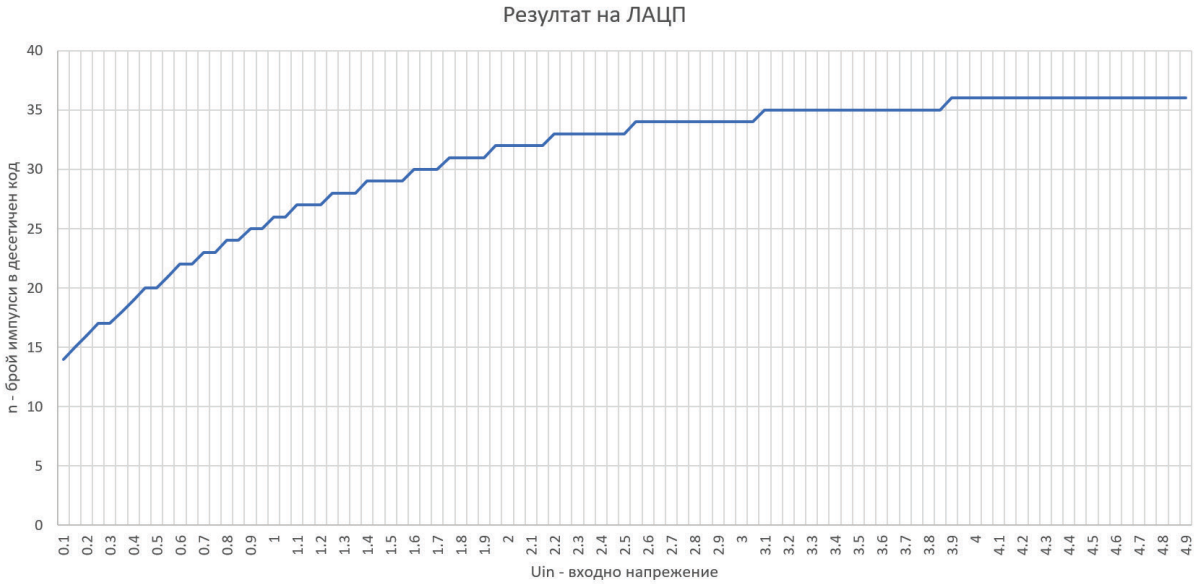
$$f_D = f_T/2^{N+1}, \quad (13)$$

където $f_T$=1/Tтакт е тактовата честота с която работи ЛАЦП. Поради двата цикъла на работа се запазва основния недостатък на АЦП с двутактно интегриране, а именно неговата бавна скорост на дискретизация. Поради това този преобразувател би намерил приложение при изследване на сравнително бавни сигнали.

Реализираният по представената схема ЛАЦП, дава във вид на графика следната предавателна характеристика (фиг.7). Двоичните числа са представени в десетична бройна система.




***Фиг. 6**. Схема на логаритмичен АЦП*




***Фиг.** 7. Предавателна характеристика на логаритмичен АЦП*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада се представя елегантно решение за реализация на логаритмичен АЦП. Изведени са аналитичните зависимости по които преобразувателя работи и е снета предавателната характеристика като е представена във вид на графика.

Относно стабилност и точност на преобразуването може да се говори след реализирането на антилогаритмичен (експоненциален) цифрово - аналогов преобразувател, което ще е в процес на бъдещи разработки. С него ще е възможно да се направи съпоставка между реалния изследван сигнал и дискретизирания и възстановен обработван сигнал.

*Благодарности: Този доклад е финансиран по проект № 2405Е „Усъвършенстване на обучението чрез информационни и комуникационни технологии“ за научни изследвания на Технически университет – Габрово.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Рынок Микроэлектроники. Схема интегрирования, (2023), [Online]. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_9_2.htm . (Accessed 11.2024).

[2] Soclof, Sidney. *Applications of Analog Integrated Circuits*, Sofia, Technika, 1990.

[3] Рынок Микроэлектроники. Преобразователь отрицательного сопротивления, (2023), [Online]. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_10_6.htm . (Accessed 11.2024).

[4] Wikipedia. Преобразование на Лаплас, (2024), [Online]. https://bg.wikipedia.org/wiki/Преобразование_на_Лаплас . (Accessed 11.2024).

[5] Рынок Микроэлектроники. Логарифмирующие и экспоненциальные преобразователи, (2023), [Online]. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_13_1.htm. (Accessed 11.2024).

# РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНА СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ НА БОЙЛЕР ЗА ГОРЕЩА ВОДА

**Христо Килифарев[1], Борислав Недев[2]**

*[1]Технически университет – Габрово, Хаджи Димитър 4, Габрово, България, hri.100@gmail.com*

*[2]Технически университет – Габрово, Хаджи Димитър 4, Габрово, България, b.nedev@tugab.bg*

**кореспондиращ автор: hri.100@gmail.com*

# DEVELOPMENT OF AN ENERGY EFFICIENT SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF A HOT WATER BOILER

**Hristo Kilifarev[1], Borislav Nedev[2]**

*[1,2]Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria;*

**Corresponding author: hri.100@gmail.com*

**Abstract**

*It is convenient to know at any time what the temperature is and how much hot water is left in the water boiler, especially when we are taking a shower. It is also important that the water heating in the boiler is achieved with the lowest possible electricity costs - this can be achieved by improving its efficiency and by using the difference in the price of electricity during the day and night. The hottest water in the boiler vessel accumulates in its upper part in a layer, under which there is colder water. This creates temperature zones in height. Increasing efficiency can be achieved by more accurately determining the remaining relative amount of hot water and by appropriately controlling the heating element. By maintaining a different setpoint for the day and night of the relative amount of hot water and its temperature can lead to a reduction in costs. This report presents the development of an embedded system for monitoring and effective control of an electric hot water boiler, based on the Arduino Uno platform. Functional capabilities and requirements for the system are defined, a functional block diagram of the system is presented, a selection of hardware components for implementation is made, a user interface is designed, and a generalized operating algorithm is described.*

**Keywords:** embedded system; hot water boiler; temperature control; Arduino Uno.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Удобно е да се знае във всеки един момент, каква е температурата и колко е оставащото количеството гореща вода, което има в бойлера, особено, когато сме под душа. Важно е също загряването на водата в бойлера да бъде постигано с възможно най-малко разходи за електроенергия – това може да се постигне с подобряване на ефективността му и чрез използване на разликата в цената на електроенергията през деня и нощта. Най-горещата вода в съда на бойлера се натрупва в горната му част в слой, под който има по-студена вода. Така се създават сравнително рязко разграничени температурни зони във височина. Увеличаване на ефективността може да се постигне с по-точното определяне на оставащото относително количество гореща вода и чрез подходящото управление на нагревателния елемент. Чрез подходящо монтиране на допълнителни температурни сензори към корпуса на водосъдържателя на съществуващ бойлер, които са разположени на различна височина, става възможно да се измери температурата на водата в различните слое-

ве и да се изчисли сравнително точно, колко е оставащото количество вода с определена зададена температура. Чрез подходящо управление на моментите на включване и изключване на нагревателя с по-голяма точност от класическия терморегулатор, според текущата и зададената температура, както и според нужното количество гореща вода в бойлера е възможно да се постигне повишаване на ефективността на работа.

Чрез поддържане на различно задание за деня и нощта на относителното количество гореща вода и нейната температура може да се постигне намаляване на разходите с повече от 25% месечно, поради разликата в цената на електроенергията за дневна и нощна тарифа [1].

Настоящият доклад представя разработването на една вградена система за мониторинг и ефективен контрол на електрически бойлер за гореща вода, базирана на Arduino Uno платформата.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Масово в търговската мрежа в България се предлагат контролери за енергийно ефективно управление на бойлери за гореща вода, произведени от фирма Naturela Electronics. Предлагат се различни по сложност и технически параметри модели за електрически бойлери [1], например:

1. NHC-32 - електронен терморегулатор с LED индикация;
2. NHC-33 / NHC-34 / NHC-34M - терморегулатори с LCD дисплей;
3. NHC-56M - интелигентен терморегулатор с цветен TFT дисплей;
4. NHC-57W - интелигентен терморегулатор с 2.4" цветен IPS дисплей и ефектни светещи сензорни бутони.

Сред най-новите разработки на фирма TESY са електрическите бойлери ModEco Cloud - част от фамилията уреди TESY Cloud, предлагащи фунции за управление през Интернет, които имат вграден контролер с много функционални възможности [2].

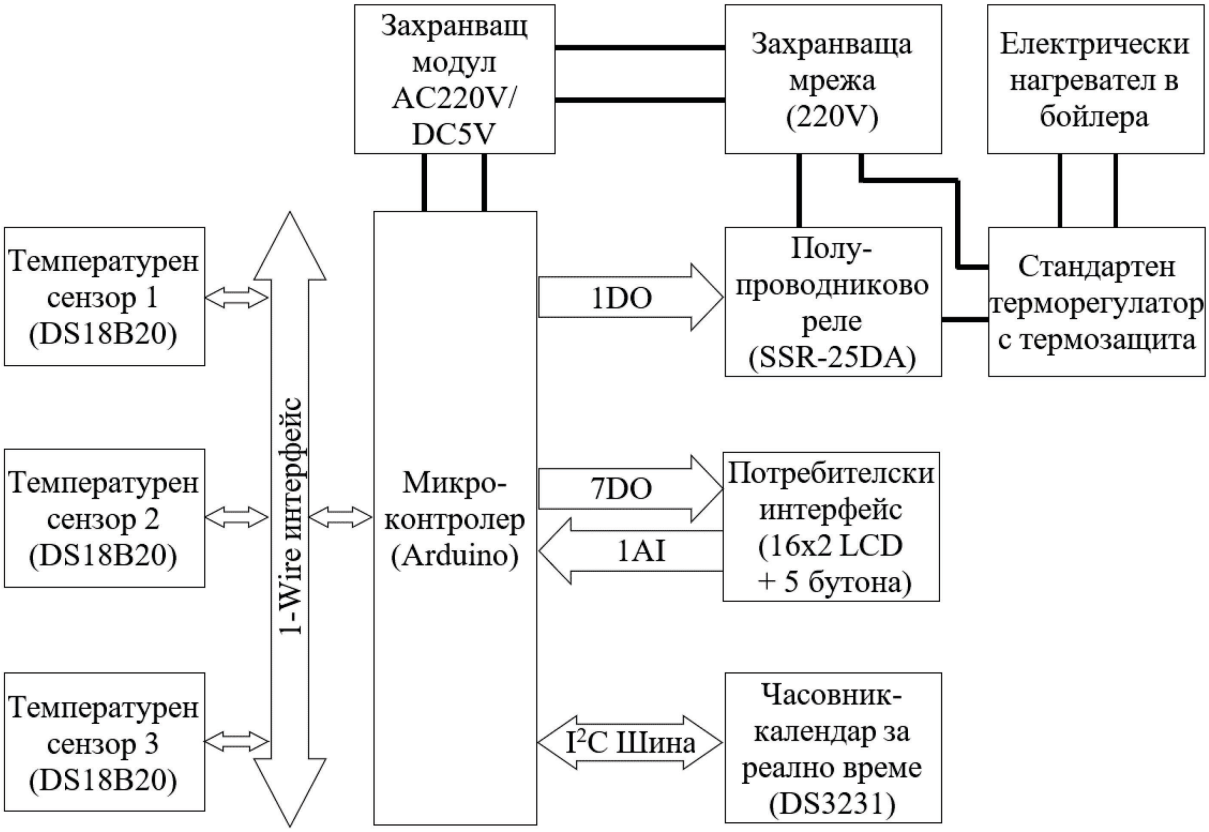
Направеното проучване и анализ на работата на съществуващи бойлери с електронно управление, дефинира следните по-важни функционални възможности и изисквания към разработваната енергийно ефективна система за мониторинг и управление:

- Да поддържа два режима на работа – ръчен и автоматичен. При ръчен режим бойлера работи с една зададена температура, подобно на нормален бойлер, а при автоматичен режим заданието за температура ще се променя според текущия час от денонощието, което ще се програмира за две часови зони, съответстващи на дневна и нощна тарифа за електроенергия;
- Енергоефективността на бойлера да се повиши, чрез промяна на начина за управление на нагревателя и отчитането на текущата температура в различни зони на водосъдържателя;
- Реализиране на удобен и многофункционален потребителски интерфейс чрез бутони и извеждане на информация и настройки на LCD екран;
- Нивото на безопасност на съществуващия бойлер, в който се вгражда контролера, да се запази или да се повиши;
- Ниска цена за реализация;
- Възможност за бъдещо функционално надграждане (софтуерно), без нужда от хардуерна промяна.

Дефинираните функционални възможности и изисквания към разработваната система могат да бъдат осъществени по представената функционална блокова схема на фиг. 1.

В блоковата схема на проектираната система, управлението на всички модули и контрола на загряване на водата се извършва от микроконтролер, който е базиран на Arduino развойна среда.

В системата трябва да се следят няколко основни показателя – температура, час и режим на работа. За тази цел в блоковата схема са предвидени часовник-календар за реално време и три цифрови температурни сензора. Предвидено е часовникът да комуникира чрез




***Фиг. 1.*** *Функционална блокова схема на разработваната система*

I2C интерфейс с микроконтролера, а температурните сензори - по One Wire цифров интерфейс. Те измерват температурата на корпуса на водосъдържателя (трябва да се монтират под външната изолация на бойлера), а микроконтролерът периодично прочита техните измерени стойности и пресмята текущата температура на водата чрез определени математически зависимости.

В блоковата схема е предвидено полупроводниково реле за силовата част (драйвер), което осъществява връзката между Ардуино модула и електрическия нагревател на бойлера. То включва и изключва захранването му с голяма мощност, а се управлява с изведен маломощен сигнал от микроконтролера програмно.

Към силовата част релето е свързано последователно на фазовия проводник на нагревателния елемент като с цел безопасност е запазен стандартния терморегулатор, който ще изключи нагревателният елемент в случай, че останалата част не сработи адекватно.

За локално визуализиране на текущото състояние и за настройване на параметрите на загряване, в блоковата схема е предвиден разширителен модул с 16x2 LCD и 5 бутона.

За съхраняване на задаваните параметри на загряване на водата, както и за текущите настройки, в схемата е нужна енергонезависима памет – например EEPROM с достатъчен обем.

***Избор на компоненти за реализация***

За конкретна прототипна реализация на системата е направен избор на компоненти и модули. На фиг. 2 е представена обобщена принципна електрическа схема на разработваната система.

Избраните компоненти и модули са:

- Микроконтролерна развойна платка Ардуино Uno R3, изградена с микропроцесор ATmega328P [3]. Реализира програмно цялостното управление на бойлера чрез температурни сензори, изпълнителни механизми и реализира потребителският интерфейс. Разполага с вгра-

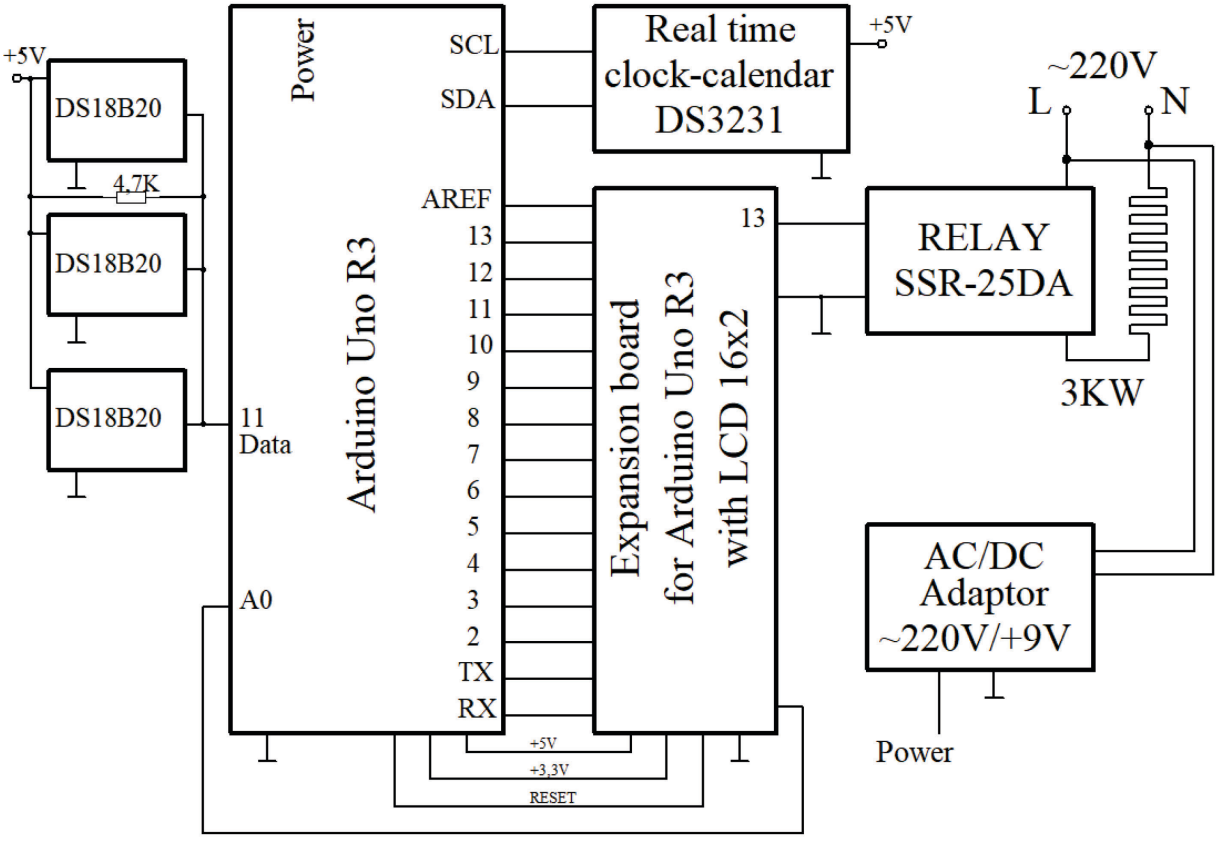
дена EEPROM памет за съхраняване на зададените настройки;

- За реализиране на потребителски интерфейс е избрано да се използва комбиниран разширителен модул за визуализация и въвеждане с бутони, в който се обединяват течнокристален дисплей (LCD) и 5 функционални бутона (LCD KeyPad Shield For Arduino) [4]. Модулът е с двуредов LCD дисплей с 16 символа на ред. За да не бъдат заети цифровите линии, бутоните са свързани чрез делител на напрежение към аналогов вход A0;

- Като драйвер за връзка между управляващите сигнали на Arduino Uno към нагревателния елемент на бойлера е избрано да се използва полупроводниково (солид стейт) реле за по-стигане на голямо бързодействие на превключване, висока надеждност и дълъг експлоатационен срок. Тъй като мощността на нагревателите на битовите бойлери е обикновено около 3 kW, това означава, че консумирания ток от захранващата мрежа при напрежение 220 V е около 14 A. От съображения за резерв по мощност на релето е избран модел с максимален ток на товара 25A. На тези параметри отговаря реле SSR-25DA на фирма "Fotek" [5], което е еднофазно, с комутационно напрежение от 24VAC до 380 VAC и управляващо входно напрежение от 3 VDC до 32 VDC;

- За осигуряване на допълнителна защита на системата е избрано да се използва стандартното реле на бойлера с вградената термозащита;

- За измерване на температурата на водата в бойлера е избрано да се използват 3 бр. цифрови сензора DS18B20, които използват 1-Wire интерфейс за комуникация към микроконтролера [6]. Те трябва да се монтират така, че да измерват температурата на водосъдържателя в горната, средната и долната му част. Сензорите имат широк температурен обхват и предлагат висока точност (±0.5°C) за целия работен обхват. Сензорът се предлага също и във водоустойчив корпус (сонда) от неръждаема стомана, подходящ за разработката. Необходимо е да




***Фиг. 2.*** *Принципна електрическа схема на разработваната система*

се свърже резистор със стойност 4,7 - 10 kΩ между изводите за +5V и данни;

- За точно и автономно измерване на големи времеви интервали, нужни за превключване на режимите на работа при смяна на дневна и нощна тарифа, е предвиден модул на часовник за реално време DS3231 [7]. Той се свързва с микроконтролера чрез I2C интерфейс. Тъй като поддържа функция за календар е възможно да се задават също циклични задания за дните от седмицата, както и за по-дълги интервали;

- За постояннотоково захранване на системата може да се използва мрежов адаптер с параметри 230V AC/ 9V DC с товарен ток 2 A.

***Потребителски интерфейс***

За реализацията на потребителския интерфейс е използван LCD keypad модул с 2 реда и 16 символа на ред, който разполага с 5 бутона – select, up, down, left и right. За визуализиране на текущото състояние и зададените настройки в системата са проектирани 5 екранни шаблона, а за въвеждане на стойности за 14 параметъра - 4 основни екрани. Предвидено е тези екрани да се сменят през 3 секунди, циклично, в избран ред. Поради ограниченото място на дисплея са въведени съкратени названия на параметрите и са зададени ограничения за разрядността на числата.

На първия екран (фиг. 3) се визуализират:

- Ред 0 - текущото време (дата и час);

- Ред 1 – текуща средна температура на водата (в ºC) и състоянието на нагревателя - включен / изключен (H = ON/OFF).

| 2 | 0 | 2 | 4 | . | 1 | 1 | . | 2 | 1 | | h | h | : | m | m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T | = | X | X | . | X | | º | C | | | H | : | O | F | F |

***Фиг. 3.*** *Информационен екран 0*

На следващия екран (фиг. 4) се визуализират температурите от трите сензора в системата – означенията Ts1, Ts2 и Ts3 на Ред 0, а на Ред 1 - стойностите им във формат XX.X в ºC.

| | T | s | 1 | | | T | s | 2 | | | T | s | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | X | . | X | | | X | X | . | X | | X | X | . | X |

***Фиг. 4.*** *Информационен екран 1*

Следващият информационен екран (фиг. 5) визуализира на Ред 0 - текущото относително количество на загрята вода в бойлера - чрез бар граф и като стойност XX.X в %. На Ред 1 е текущата тарифа Tarrif = Day / Night.

| @ | @ | @ | @ | @ | @ | @ | * | * | * | | X | X | . | X | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T | a | r | r | i | f | : | | N | i | g | h | t | |

***Фиг. 5.*** *Информационен екран 2*

На фиг. 6 се визуализират текущо зададените температурни настройки в ºC:

- Ред 0 - граничните стойности - минимална (Tl), максимална (Th) и надпис „dt“;

- Ред 1 - дневна (Td) и нощна (Tn) температури и стойността на температурният хистерезис (dt).

| T | l | = | X | X | | | T | h | = | X | X | | | d | t |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T | n | = | X | X | | | T | d | = | X | X | | | | X |

***Фиг. 6.*** *Информационен екран 3*

На следващия екран (фиг. 7) се визуализира на Ред 0 текущият режим на работа (MODE) – автоматичен (AUTO) или ръчен (MANUAL). На Ред 1 се извежда зададената температура (Tman) в ºC, само когато MODE = MANUAL.

| | | M | O | D | E | : | | M | A | N | U | A | L | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T | m | a | n | = | X | X | . | X | | º | C | | |

***Фиг. 7.*** *Информационен екран 4*

За задаване на стойности са предвидени следните екрани: SETDATE (година, месец, ден, ден_от_седмицата); SETTIME (часове, минути, секунди); SETTEMP (Tmin, Tmax, Tday, Tnight, Tmanual, Tdelta); SETMODE (M=auto/manual). Въвеждането на стойност на разряд от число за текущо избран настройван параметър се извършва,

чрез бутоните Up и Down, избор на разряд – чрез Left и Right, а запаметяването – чрез Select.

***Алгоритъм на работа***

При стартиране на контролера се извършва еднократно инициализиране на температурните сензори чрез команди през 1-Wire интерфейса, инициализира се I2C шината и свързаният чрез нея часовник-календар, инициализират се също цифровите изводи, LCD дисплея и комуникацията по сериен интерфейс. След това се прочитат текущите дата и час от часовника и всички настройки от EEPROM паметта, привеждат се в начално състояние всички променливи и се извежда начален приветствен текст към LCD. От този момент стартира безкраен цикъл с основната програма, в която се извършват последователно следните действия: четат се текущите температури от трите сензора, изчисляват се средна температура и количество загрята вода в проценти и се проверява за натиснат бутон четири пъти в секунда. Актуализират се и се извеждат информационните екрани към LCD или се извършват настройки при регистриран натиснат и разпознат бутон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработването на системата са изпълнени заложените изисквания и функционалност, повишена е надеждността на работа и удобството при експлоатация от потребителя спрямо обикновения бойлер. Възможни са функционални подобрения при бъдещо развитие в системата като се добавят екрани за извеждане на месечната консумирана електроенергия, да се промени методиката за изчисляване на оставащо количество топла вода в бойлера (в % и в литри), като за това е необходимо да се промени единствено софтуерната част на контролера.

*Този доклад е финансиран по проект № 2405Е „Усъвършенстване на обучението чрез информационни и комуникационни технологии“ за научни изследвания на Технически университет – Габрово.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Naturela Electronics, Electronic thermostats for electric and combination boilers (translated), https://www.naturela-bg.com/bg/products/elektronni-termoregulatori/, (Accessed 11.2024).

[2] TESY, ModEco Cloud with Internet control (translated), https://tesy.bg/produkti/elektricheski-bojleri/bojleri-modeco/modeco-cloud-s-upravlenie-prez-internet, (Accessed 11.2024).

[3] Arduino Docs, UNO R3 SMD | Arduino Documentation, https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3-smd/, (Accessed 11.2024).

[4] DFROBOT, DFR0009 LCD KeyPad Shield For Arduino, https://wiki.dfrobot.com/LCD_KeyPad_Shield_For_Arduino_SKU__DFR0009, (Accessed 11.2024).

[5] FOTEK CONTROLS CO., LTD., SSR-F-25DA: Solid State Module, https://www.fotek.com.tw/en-gb/product-category/143, (Accessed 11.2024).

[6] Analog Devices Inc., DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, PDF, 19-7487; Rev 6; 7/19, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18B20.pdf, (Accessed 11.2024).

[7] Analog Devices Inc., DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal, PDF, 19-5170; Rev 10; 3/15, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf, (Accessed 11.2024).

НАПРАВЛЕНИЕ

# АВТОМАТИКА И РОБОТИКА

SESSION

# AUTOMATION AND ROBOTICS

# РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПЛАТКА ЗА IO-LINK ИНТЕРФЕЙС

**Димитър Димитров, Стефан Иванов**

*Технически университет – Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, Габрово 5300*

# DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL PCB BOARD FOR IO-LINK INTERFACE

**Dimitar Dimitrov, Стефан Иванов**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar str., Gabrovo 5300, Bulgaria*

**Abstract**

*In modern automation, the use of sensors and actuators that require the exchange of larger amounts of data is becoming increasingly common. This necessitates the introduction of standardized interfaces that enable such exchange. The article describes the process of developing an experimental IO-Link board, designed for training and laboratory research in the field of industrial automation. IO-Link is a standardized interface for communication between sensors and actuators, widely used in industrial applications. The board is designed to provide trainees with an accessible and functional environment for learning the IO-Link communication protocol, configuring devices, and enabling real-time communication. The development includes hardware design and the integration of a microcontroller with IO-Link slave functionality. The conclusion discusses future opportunities for its application in the educational process.*

**Keywords:** IO-Link, sensor interface, industrial communication, sensor interface

## ВЪВЕДЕНИЕ

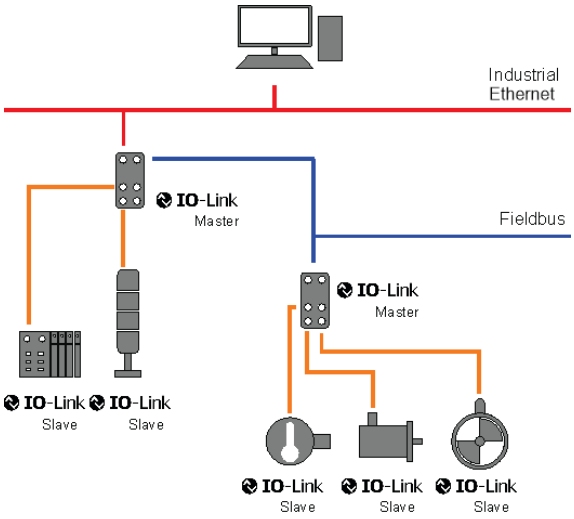
В съвременното си развитие индустриалната автоматизация налага използването на все повече сензори и актуатори. Това изискване често среща значителни лимитации. Ако разгледаме стандартните начини за обмен на аналогови данни със сензори и актуатори (0-10V, 4-20mA и т.н.) или пренос на данни с паралелен цифров интерфейс (пр. код на Грей при инкрементални енкодери) ще се срещнем със значителни проблеми при проектиране на съоръженията: Аналоговите сензори и актуатори изискват специализирани кабели и терминали за тяхното свързване. Ситуацията не е по различна при устройствата с паралелен цифров интерфейс. Използването на устройства със сериен цифров интерфейс представлява решение на голяма част от проблемите, като осигурява подобряване на надеждността на обменяната информация, като в същото време може да намали разходите за използвани кабели.
IO-Link представлява индустриален стандарт за мрежови комуникации (IEC 61131-9)[1], който осигурява двупосочна комуникация по установената от дълго време трипроводна кабелна връзка (+24V; 0V; Signal) за сензори и актуатори без допълнително изискване за окабеляване. Последното развитие на интерфейса позволява и безжично свързване за обмен на данни (IO-Link Wireless), както и използването му в устройства за машинна безопасност (IO-Link Safety).

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### Описание на IO-Link

Съгласно системното описание на IO-Link [2][3] стандартна IO-Link система може да включва следните базови компоненти: IO-Link master устройство; IO-Link устройство (сензор, клапан или друг

вид актуатор); Неекраниран три или пет проводен кабел; Устройство за разработка, конфигурация и параметризиране на IO-Link.




***Фиг. 1.*** *Примерна схема на IO-link система*

IO-Link master устройството установява връзка с подчинените устройства и предава данни между тях и системата за автоматизация.

IO-Link представлява серийна двупосочна point-to-point връзка за пренос на сигнали и захранване във всякакви мрежи и полеви интерфейси.

Всеки порт на IO-Link master устройството поддържа следните операционни режими на работа:

IO-Link - в този режим портът се използва като комуникационен;

DI - в този режим портът се използва като стандартен цифров вход;

DQ - в този режим портът се използва като стандартен цифров изход;

Deactivated - Може да се използва при портове на master устройството, които не са необходими в настоящото приложение.

Поддържат се три скорости на трансфер на данни:

COM1 - 4.8kbaud; COM2 - 38.4kbaud; COM3 - 230.4kbaud (опционална съгласно спецификация V1.0).

Всяко подчинено устройство може да поддържа само една от посочените скорости за обмен на данни. Съгласно спецификация V1.1 master устройството трябва да поддържа и трите скорости и да се адаптира автоматично към скоростта на подчиненото устройство.

IO-Link комуникацията оперира на нива от 24V. което определя нейната стабилност и шумозащитеност. Ако предаването на данни пропадне, кадъра ще се повтори още два пъти. Едва след провала на втория опит IO-Link master устройството детектира комуникационна грешка и подава информация на устройството за автоматизация от по-високо ниво.

Типовете данни в IO-Link се класифицират като: Процесни обекти данни (PDO) - циклични данни; Статус – циклични данни; Данни за устройството - ациклични данни; Събития - ациклични данни.

Процесните данни се предават циклично от устройството към master в кадър от данни, чийто размер е специфичен за устройството. В зависимост от устройството са възможни до 32 байта данни.

Всеки порт има стойност за статус - квалификатор на порта (PortQualifier). Стойността на статуса показва валидността или невалидността на данните. Тази стойност се предава циклично заедно с процесните данни.

Данните за устройството могат да бъдат параметри, идентификационни или диагностични данни.

Те се обменят ациклично при заявка от IO-Link master устройството. Данните за устройството могат да бъдат четени или записвани.

При настъпване на събитие подчиненото устройство сигнализира наличието на такова на мастър устройството, след което мастър устройството го прочита. Събитията могат да бъдат съобщения за грешки, аларми, данни за поддръжка и др.

**Специализирана интегрална схема L6362A**

Интегралната схема представлява IO-Link трансивер, разработван от фирмата ST Microelectronics.. Съгласно предоставената от производителя документация

[2] схемата може да оперира при захранващо напрежение от 7 до 36 волта и поддържа и трите скорости на обмен, дефинирани в стандарта (COM1, COM2, COM3). Изходните пинове на схемата могат да бъдат конфигурирани и свързани като страна-ниско (в изходната верига е свързан само пин OUTL), страна-високо (в изходната верига е свързан само пин OUTH) или пуш-пул (в изходната верига са свързани и двата пина) и може да управлява капацитивни, резистивни и индуктивни товари. Може да бъде свързан към сензорна схема с индустриална среда с работно напрежение 24V. Схемата е снабдена със защити от обърната полярност, късо съединение в изходната верига и пренапрежение.

Захранващото напрежение на схемата се подава между пиновете VCC и GND. Обхвата на захранващото напрежение може да бъде от 7 до 36V.

Пиновете IN1 и IN2 са входове на трансивера и контролират нивото на изходните пинове OUTH и OUTL. Когато схемата е в пуш-пул режим (OUTH и OUTL са свързани заедно в изходната верига), сигнала постъпва на IN2. IN1 трябва да бъде свързан към Vdd или GND с цел уточняване на полярността на сигнала и избягване на претоварване на схемата. В случай че схемата работи в режим “страна-ниско” (само OUTL е свързан) или “страна-високо” (само OUTH е свързан), сигнала се подава на IN1, а IN2 може да бъде свързан към Vdd или GND в зависимост от желания поляритет.

Пинът EN/DIAG се използва за да контролира изходното стъпало на пиновете OUTH и OUTL. Когато този пин е в ниско логическо ниво изходната верига е изключена. Този пин е вътрешно свързан към транзистор с отворен дрейн, който се използва за диагностични цели и трябва да се управлява през последователен резистор. В случай на грешки транзисторът се включва.

Пинът OUT I/Q показва статуса на приемната линия (I/Q) той се превключва от ниво GND до ниво VDD и трябва да бъде свързан към вход на микроконтролер.

Пинът SEL се използва за определяне на изходното напрежение VDD на линейния регулатор. Този пин не може да остане несвързан. В случай, че пинът SEL бъде свързан към GND напрежението на изхода на линейния регулатор ще бъде 3.3V. Ако бъде свързан към VDD, напрежението ще бъде 5V.

Пинът VDD представлява изхода на линейния регулатор, вграден в интегралната схема. Той може да осигури ток до 20mA за захранване на микроконтролер или външна схема. Цялата система може да бъде захранена от вградения линеен регулатор при условие, че консумацията на системата не надхвърля 20mA. В случай на по-голяма консумация системата трябва да бъде захранена от външен регулатор, а вграденият линеен регулатор да захранва само вътрешната логика на интегралната схема.

Пинът OL има структура с отворен дрейн и е с ниско активно ниво. Отвореният дрейн се активира в случай на претоварване на схемата (ограничение по ток). Може да се използва от микроконтролера за детекция на IO-Link заявка за събуждане.

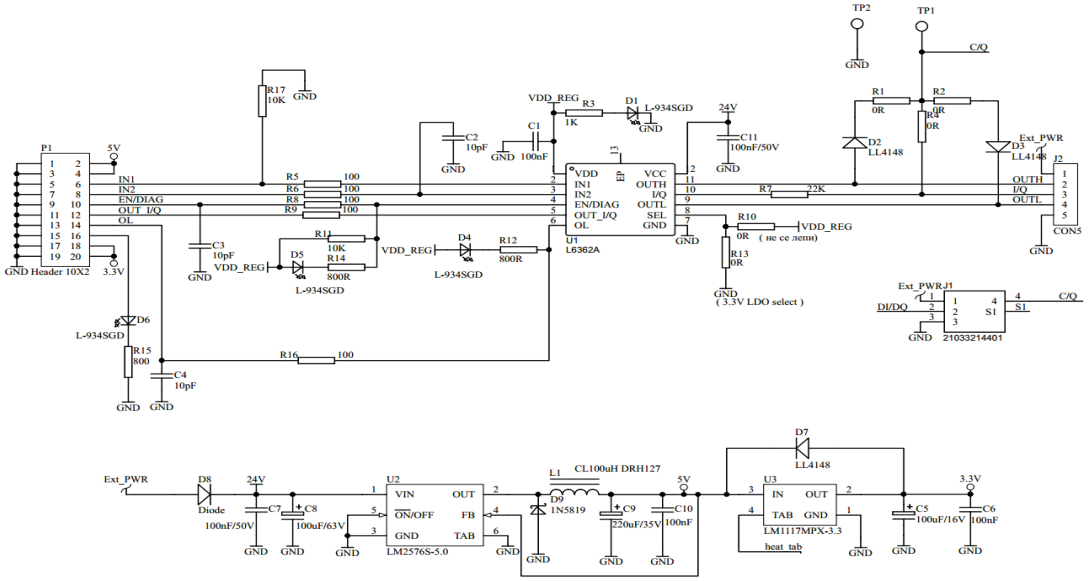
Пиновете OUTH и OUTL представляват изходи съответно за страна-високо и страна-ниско на изходната верига.

Пинът I/Q представлява вход на вградения приемник.

Логическите нива, постъпващи на този пин се прехвърлят към пин OUT I/Q съгласно конфигурираните напреженови нива схемата. В режим IO-Link OUTH и OUTL трябва да бъдат свързани към товара. Пинът I/Q също трябва да бъде свързан към товара, но през резистор 22kΩ. В случай, че не се използва пинът може да се остави несвързан, но се препоръчва свързването му към GND с цел подобряване на устойчивостта срещу електромагнитни смущения.

**Схема на експерименталната платка**

Разработената принципна схема е показана на фигура 2. В платката са добавени импулсен регулатор LM2576 и линеен регулатор LM1117, чрез които да се осигурят необходимите захранвания на приемния микроконтролер и останалата периферия. Конекторът P1 се използва за връзка с приемния микроконтролер и периферията. Изходът на схемата, както и захранването се осъществява през специализирания конектор M12. С цел наблюдение на логическите нива на пиновете OUTH, OUTL и I/Q чрез логически анализатор или осцилоскоп е поставен конектора CON5.




***Фиг. 2**. Принципна схема на експерименталната платка*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е представена разработката на експериментален модул за IO-Link комуникация. Приложението на IO-Link е все по-голямо в индустриалната автоматизация, като добавените възможности за безжична връзка и за приложение за машинна безопасност допълнително увеличават популярността му. Разработения модул може да бъде използван за тестове и разработка на различни сензори и актуатори. Също така е възможно приложението му в различни учебни дисциплини, микроконтролери, сензори и периферни устройства.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] International Standard IEC61131-9, webstore.iec.ch/en/iec_catalog/product/preview/?id=L3B1Yi9wZGYvcHJldmlldy9pbmZvX2llYzYxMTMxLTl7ZWQyLjB9Yi5wZGY=

[2] IO-Link system description, https://io-link.com/share/Downloads/At-a-glance/IO-Link_System_Description_eng_2018.pdf

[3]Joachim R. Uffelmann, Peter Wienzek, Myriam Jahn, IO-Link: The DNA of Industry 4.0, Vulkan Verlag GmbH, 2019, ISBN-10 : 3835673904

[4]IO-Link communication transceiver device , https://www.st.com/en/interfaces-and-transceivers/l6362a.html

# ТЕХНИКИ ПРОТИВ ИНТЕГРАЛНО НАСИЩАНЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПИД РЕГУЛАТОР В ПРОСТРАНСТВО НА СЪСТОЯНИЯТА

**Георги Михалев**
*Технически университет - Габрово, ул. "Хаджи Димитър" №4, гр. Габрово, България*
**кореспондиращ автор: gimihalev@mail.bg*

# ANTI-WINDUP TECHNIQUES IN STATE-SPACE FORM OF PID CONTROLER

**Georgi Mihalev**
*Technical University of Gabrovo, 4 "Hadji Dimitar" Str, Gabrovo, Bulgaria;*
**Corresponding author: gimihalev@mail.bg*

**Abstract**
The paper discusses the design and research of a PID controller in state space form. Some of the main advantages and disadvantages of this type of controller are examined. The issue of integral windup is presented in detail, along with some of the key anti-windup techniques and strategies in the control of technological systems. Detailed block diagrams and some functional dependencies of the implemented anti-windup techniques are provided. Simulation models for PID control of a vibrating conveyor have been implemented. The obtained results are graphically presented. An analysis and comparison based on the quality of the achieved control are performed.

**Keywords:** Integrator windup, Anti-windup techniques, State-space PID.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Класическите регулатори са ключов елемент в управлението на процесите в промишлените обекти. Несъмнено основно място заема пропорционално-интегрално-диференциалния (ПИД) регулатор, който има широко приложение в индустрията. При добра настройка, трите параметъра на ПИД регулатора са тясно свързани с качеството на управление на повечето промишлени обекти.

В последно време нарастването на сложността на индустриалните процеси, прави ефективността на управлението с класически ПИД регулатор незадоволително, поради специфичната му структура[1]. Поради тази причина все повече модерни техники за управление, като LQG[2], робастни H∞[3] и μ[4] регулатори, регулатори базирани на размита логика и ИНМ[5,6], адаптивни регулатори[7] и др., се опитват да изместят ПИД управлението.

Въпреки по-добрата производителност и качество на управлението което предлагат, съвременните регулатори не заемат голям дял. Това основно се дължи на факта, че ПИД регулатора е по-икономически изгоден, имайки предвид определени производствени ограничения, като например невъзможността за спиране на работния процес за тестове и настойка. Това е една от основните причини ПИД регулаторите да се използват в 90% от управляваните процеси[8]. В системите с обратна връзка голям дял заемат и различни хибридни варианти на ПИД регулаторите[9,10], като се търсят и нови методи за настойка[11].

Тази тенденция не променя един от основните недостатъци на ПИД регулаторите, а именно проблема с интегралното насищане. С използването на сложни математични модели на реални процеси, и покачване на изискванията към качеството на регулиране, централно място

намират и стратегиите или техниките за справяне с интегралното насищане. В повечето съвременни реализации на ПИД закони за управление анти-интегралното насищане е задължителна функционалност.

В текущата статия се разглежда реализация на ПИД регулатор в пространство на състоянията (State-Space PID), влиянието на ограничението на управляващия сигнал върху интегралното насищане и приложението на различни техники за справянето с този проблем. Представя се сравнение на някои от тях при използването на ПИД закон за управление в State-Space форма, чрез реализирането им в симулационни схеми за управление на линеен вибрационен транспортьор.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Тъй като промишлените обекти представляват реални физически системи, състоящи се от сложни, нелинейни и свързани обекти, в тях протичат сложни физически процеси, чиито параметри се изменят по неопределен начин. При управлението на такива процеси традиционните методи за управление — класическите регулатори, може да не осигурят желания резултат. Следователно, има смисъл да се използват нетрадиционни методи, към които на първо място спадат регулаторите производни на ПИД.

Един такъв регулатор е така наречения State-Space PID (SSPID), които в общия смисъл представлява абсолютен ПИД регулатор, но представен в много рядко срещана форма в научната литература. Тази форма на ПИД регулатора се счита за „липсващото звено“ между класическото и модерното управление с обратна връзка [12,13,14].

Реализацията на ПИД регулатора в тази форма, не решава проблема с интегралното насищане.

Интегралното насищане е често срещан проблем, който възниква при ПИД регулаторите, когато интегралната част натрупва значителна грешка по време на периоди, когато изпълнителният механизъм е наситен или ограничен. Това може да доведе до нежелано поведение на системата, като голямо пререгулиране, дълги времена за установяване или неустойчивост. Проблемът с интегралното насищане се появява, когато управляващият сигнал (изходът на PID регулатора) надвишава максималните или минималните допустими стойности на изпълнителния механизъм, но интегралната част продължава да натрупва грешка, което води до забавено възстановяване, когато управляващият сигнал отново се върне в допустимите граници.

Основните причини за получаване на интегрално насищане са:

- Насищане на изпълнителния механизъм – получава се ограничаване на управляващия сигнал, тъй като изпълнителния механизъм не може да отговори на целия диапазон на изхода на контролера.
- Период на натрупване на грешка-когато системата е в състояние на голяма грешка. Например при стартиране, интегралната част може да натрупа прекомерно количество грешка, дори когато изпълнителният механизъм вече е на своя лимит.

Последиците от възникване на интегрално насищане се изразяват в три основни критерия за качеството на проектираното управление:

- Пререгулиране
- Времетраене на преходния процес
- Устойчивост

И при трите ще се наблюдава негативна промяна.

## ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПИД РЕГУЛАТОР В ПРОСТРАНСТВО НА СЪСТОЯНИЯТА

Пропорционално-Интегралния-Диференциален (ПИД) закон за управление може да се представи в пространство на състоянията, чрез дуална структура базирана на наблюдател, която е подробно представена в [12]. Тази форма на представяне запазва качествата на ПИД

регулатора, като относително простата структура и лесна настройка.

Идеалния ПИД регулатор има предавателна функция във вида:

$$K_{PID}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p, \qquad (1)$$

където $K_p, K_i$ и $K_d$ са пропорционалния, интегралния и диференциалния коефициент на регулатора. ПИД регулатора може да бъде изразен като закон за управление с обратна връзка по състояние:

$$u(t) = K_d\big(\dot{r}(t) - \dot{y}(t)\big) + K_p\big(r(t) - y(t)\big) + K_i\int_0^t\big(r(\tau) - y(\tau)\big)d\tau = \overline{K_o}\big(\bar{r}(t) - x(t)\big), \qquad (2)$$

където u(t) е управляващия сигнал, y(t) е изходът на системата, а r(t) е заданието. Тогава векторите $\bar{r}(t), x(t)$ и $\overline{K_o}$ ще имат вида:

$$\bar{r}(t) = \begin{bmatrix}\dot{r}(t) & r(t) & \int_0^t r(\tau)d\tau\end{bmatrix}^T,$$
$$x(t) = \begin{bmatrix}\dot{y}(t) & y(t) & \int_0^t y(\tau)d\tau\end{bmatrix}^T,$$
$$\overline{K_o} = [K_d \quad K_p \quad K_i], \qquad (3)$$

където $x(t)$ е вектор на състоянието, а $\overline{K_o}$ образува матрицата на обратната връзка.

За да се получи вектора на състоянието се използва наблюдател. При синтеза на наблюдателя не се използва модела на обекта, а каноничната форма на Бруновски[]. Така набюдателя представлява двойна интегрална система с :

$$\ddot{y} = u(t), x_1 = \dot{y} \text{ и } x_2 = y \qquad (4)$$

и матрици в пространство на състоянието които са :

$$\overline{\mathrm{A}} = \begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix} \text{ и } \bar{C} = [0 \quad 1]. \qquad (5)$$

Така за наблюдателя се получава:

$$\begin{bmatrix}\dot{\bar{x}}_1\\ \dot{\bar{x}}_2\end{bmatrix} = (\bar{A} - \bar{L}\bar{C})\begin{bmatrix}\bar{x}_1\\ \bar{x}_2\end{bmatrix} + \bar{B}u + \bar{L}y, \qquad (6)$$

където $\bar{L} = [\bar{\beta}_1 \quad \bar{\beta}_2]^T$ е матрицата на наблюдателя.

Тъй като вектора на състоянието съдържа три променливи, то се прави разширяване на модела с дефиниране на ново състояние $\dot{\bar{x}}_3 = \bar{x}_2$.

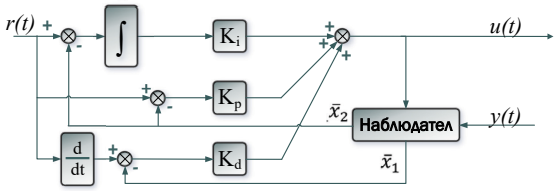
Формата на ПИД регулатора в пространство на състоянията ще има следния вид:

$$\begin{cases}\dot{\bar{x}} = (\overline{\mathrm{A}}_\mathrm{e} - \bar{L}_o\bar{C}_e)\bar{x} + \bar{B}_e u + \bar{L}_o y\\ u = \overline{K}_o(\bar{r} - \bar{x})\end{cases} \qquad (7)$$

където:

$$\overline{\mathrm{A}}_\mathrm{e} = \begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}, \bar{B}_e = \begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}, \qquad (8)$$
$$\bar{C}_e = [0 \quad 1 \quad 0] \text{ и } \bar{L}_o = [\bar{\beta}_1 \quad \bar{\beta}_2 \quad 1]^T$$

По този начин ПИД регулатора е моделно независим и всички свойства на затворената система ще се дължат само на него. На фиг. 1 е показана блоковата схема на регулатора.




***Фиг. 1*** *Блок схема на SSPID регулатор*

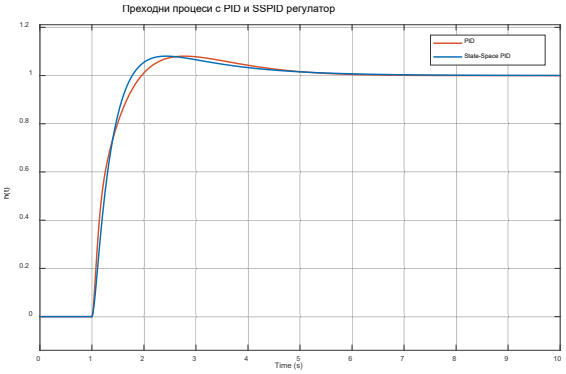
В практиката идеалния ПИД регулатор не се използва директно, а се реализира т.н. реален ПИД. Тогава SSPID регулатора апроксимира идеалния ПИД регулатор.

Стойностите на коефициентите на SSPID регулатора се получават при прилагане на някой от досега известните методи за настройка. По отношение на наблюдателя, то той може да бъде настроен по стандартния начин с поставяне на полюсите в една посока $-\bar{\omega}_0$, като:

$$\bar{\beta}_1 = \bar{\omega}_0{}^2, \bar{\beta}_2 = 2\bar{\omega}_0 (9)$$

Обикновено се избира $\bar{\omega}_0 = 2N/T_d$.

На фиг. 2 е показано примерно сравнение на реален ПИД и SSPID регулатор при еднаква настройка.




***Фиг. 2** Преходни процеси с PID и SSPID регулатор*

От фиг. 2 се вижда, че при еднакви коефициенти двата регулатора дават приблизително еднакви преходни процеси за даден обект. Разликите в графиките се дължат на това, че SSPID регулатора апроксимира реалния PID.

## ПОДХОДИ ЗА ИНТЕГРАЛНО АНТИНАСИЩАНЕ

В научната литература са известни много техники против интегрално насищане при използването на ПИД регулатори. Някои от тях показват висока ефективност и са предпочитани при повечето реализации. При представяне на подходите против интегрално насищане се разглежда реалната ситуация, при която управляващия сигнал *u(t)* е ограничен (например поради техническите характеристики на изпълнителния елемент). В този случай включването на този статичен нелинеен елемент в контура на управление се описва с:

$$sat(u) = \begin{cases} u_{min}, & \text{ако } u < u_{min} \\ u, & \text{ако } u_{min} \le u \le u_{max} \\ u_{max}, & \text{ако } u > u_{max} \end{cases} \quad (10)$$

По-долу ще се разгледат някои класически подходи при решаването на този проблем.

**Условно интегриране**

Методът на условното интегриране се състои в изключване(или ограничаване) на интегралната част, когато управляващият сигнал достигне своите граници. Това означава, че интегралната част се нулира или спира да се увеличава или намалява, когато управляващия сигнал достигне своята максимална или минимална допустима стойност. Тогава за интегралната съставяща може да се запише:

$$I(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } u_{min} \le u \le u_{max} \\ K_i \int_0^t e(\tau)d\tau, & \text{при} u(t) = u_{min}, u_{max} \end{cases} \quad (11)$$

**Обратно изчисление**

При методът на обратно изчисление, интегралната част на PID регулатора се коригира така, че да предотврати прекомерното натрупване на интегрална грешка. Това се постига чрез сравнение на изхода на регулатора *u(t)* с реалното изходно ограничение *v(t)* на изпълнителния механизъм. Когато изходът на регулатора достигне границите на изпълнителния механизъм (наситеност), разликата между желаното и реалното действие се използва за коригиране на интегралната част, като често се използва и коригиращ коефициент, които позволява по-бързото възстановяване на системата.

$$I(t) = \begin{cases} K_i - K_w\big(u(t) - v(t)\big) \int_0^t e(\tau)d\tau, & \text{при } u(t) \ne v(t) \\ K_i \int_0^t e(\tau)d\tau, & \text{при } u(t) = v(t) \end{cases}, \quad (12)$$

където $K_w$ е допълнителен компенсиращ коефициент.

**Интегрално прогнозиране на състоянието**

За да се избегне интегралното насищане, техниката с интегрално прогнозиране на състоянието, предсказва каква ще бъде грешката при бъдещото интегриране на системата и коригира интегралната част въз основа на тази прогноза. Това става чрез определяне на прогнозна стойност за интегралната част, която зависи от ограничението на управляващия сигнал. Корекцията се представя, чрез:

$$I(t) = \begin{cases} \omega_i(I_{est}(t) - I(t)), & \text{при } u(t) \ne v(t) \\ K_i \int_0^t e(\tau)d\tau, & \text{при } u(t) = v(t) \end{cases}, \quad (13)$$

като:

$$I_{est} = \frac{1}{T_i}\left(\frac{1}{k_t}\left(\dot{e} + \frac{1}{\tau_m}e\right) + v\right) \quad (14)$$

където $\tau_m$ и $k_t$ са коефициенти на ниско честотния филтър, а $\omega_i$ определя времето за установяване на интегратора в прогнозираното състояние.

**Подход базиран на наблюдатели**

Подходите базирани на наблюдатели се разделят основно на два подвида. При единия наблюдателя се използва за оценка на състоянията, като се реализира логика за прогнозиране на динамиката на системата, като по този начин интегралната част може да се ограничи при нужда. При втория вариант ефектът от насищането се моделира като смущение внесено в основния контролер, а спомагателен регулатор базиран на синтез на наблюдател се използва за минимизиране на грешката между изходния сигнал на регулатора и входния сигнал към системата. Образува се компенсатор с динамика описвана от:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bsat(v) + L(y - C\bar{x}) \qquad (15)$$
$$v = K\bar{x} + Hr$$

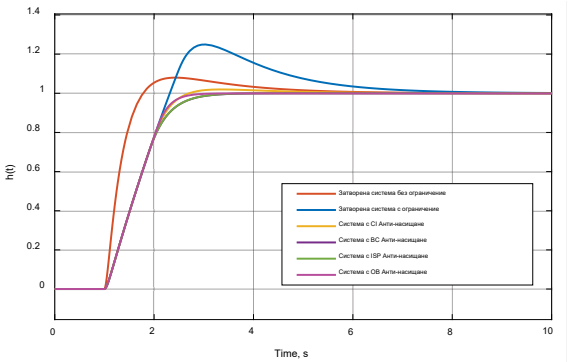
където *A,B,C* са матриците на системата, *L* – матрицата на наблюдателя, *K* – матрицата на спомагателния регулатор, а *H* е входен филтър.

## СИМУЛАЦИОННИ РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗИ

Описаните подходи за решаване на проблема с интегралното насищане са реализирани в среда на Matlab/Simulink. Разглеждания ПИД регулатор в пространство на състоянието е реализиран в паралелна форма, а по отношение на обекта за управление е избран линеен вибротранспортьор представен като едномасова трептяща система.

При този обект са налице и двете възможности за появата на интегрално насищане при използването на ПИД регулатор – както при стартиране на системата, тъй като тя работи в режим на резонанс, така и от физическото ограничение на прилаганата от електромагнита сила. За настройка на ПИД регулатора е използван метод базиран на предавателни функции, при избор на технически допустимо време на преходния процес и средно ниво робастност. Получените стойности за коефициентите са предадени на SSPID регулатора, а наблюдателя е настроен съгласно зависимостите (9).

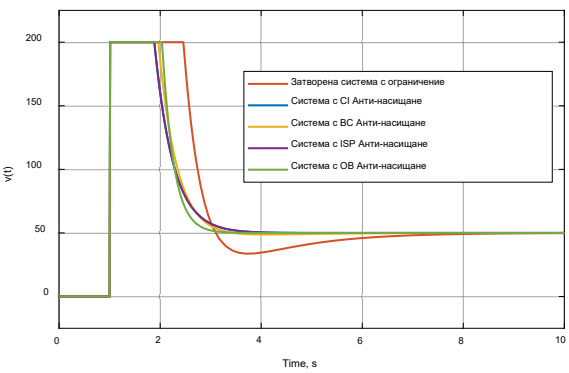
Описаните по-горе техники против интегрално насищане са сравнени по преходни характеристики на затворената система. На фиг. 3 са показани преходните процеси на системата с техниките: условно интегриране (CI), обратно изчисление (BC), интегрално прогнозиране на състоянието (ISP) и базирана на наблюдател(OB).



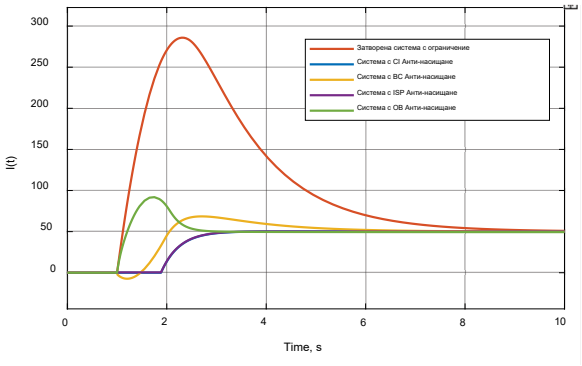

***Фиг. 3** Преходни процеси на затворената система с анти-насищане*

На фиг. 3, 4 и 5 са показани преходните процеси, управляващ сигнал и сигнал от интегратора за затворените системи с различните анти-насищащи техники.

От показаните графики ясно се вижда ефекта от интегралното насищане – преregулирането е над 20%,а преходния процес е по-дълъг с 3.5s.




***Фиг. 4.** Управляващ сигнал на затворената система с анти-насищане*




***Фиг. 5.*** *Състояние на интегралната съставяща на затворената система с анти-насищане*

С въвеждането на анти-насищащи стратегии и при четирите подхода се наблюдава подобряване на качествата на системата. Най-добри резултати се получават, чрез въвеждането на техниката базирана на наблюдател, която се реализира особено лесно имайки предвид формата на ПИД регулатора(State-space PID). При използването на тази техника преходния процес е в рамките на 3s, а пререгулиране на практика няма. За сравнение най-лошия резултат е при използването на условното интегриране при което преходния процес затихва за 4.8s., а пререгулирането е до 0.5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е разгледана реализацията на PID регулатор в пространство на състоянията и проблемът с интегралното насищане, който възниква при ограничаване на управляващия сигнал. Анализирани са различни подходи за справяне с интегралното насищане, включително условно интегриране, обратно изчисление, интегрално прогнозиране на състоянието и методи, базирани на наблюдатели. Посредством симулационни експерименти е направено сравнение на различните техники по отношение на качеството на преходния процес, пререгулирането и времето за установяване на системата.

Резултатите показват, че най-добри характеристики на управлението се постигат с техниката, базирана на наблюдател, с която се постига минимално пререгулиране и кратко време на преходния процес. Това потвърждава ефективността на този подход, особено при сложни динамични системи, където интегралното насищане може да доведе до значителни отклонения в качеството на управление. Въпреки че останалите техники също водят до подобрения, анализа на резултатите показва, че наблюдателният подход предлага най-добър баланс между лесна реализация и висока производителност. В резултат от направения анализ се потвърждава необходимостта от интеграция на антинасищащи стратегии в съвременните реализации на PID регулатори, с цел подобряване на управлението на сложни промишлени процеси.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Vagia, Marialena, ed. *PID Controller Design Approaches: Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*. BoD–Books on Demand, 2012.

[2] Chakravarty, Sourish, et al. "A simulation-based comparative analysis of PID and LQG control for closed-loop anesthesia delivery." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 15898-15903.

[3] Wadawa, Boaz, et al. "Robustification of the H∞ controller combined with fuzzy logic and PI&PID-Fd for hybrid control of Wind Energy Conversion System Connected to the Power Grid Based on DFIG." *Energy Reports* 7 (2021): 7539-7571.

[4] Modabbernia, Mohammadreza, et al. "Robust control of automatic voltage regulator (AVR) with real structured parametric uncertainties based on H∞ and μ-analysis." *ISA transactions* 100 (2020): 46-62.

[5] Nethaji, G., and J. Kathirvelan. "Performance comparison between PID and Fuzzy logic controllers for the hardware implementation of traditional high voltage DC-DC boost converter." *Heliyon* 10.17 (2024).

[6] Hermassi, Mahdi, et al. "Adaptive neuro fuzzy technology to enhance PID performances within VCA for grid-connected wind system under nonlinear behaviors: FPGA hardware implementation." *Computers and Electrical Engineering* 117 (2024): 109264.

[7] Beck, Bradley RG, Joanne Tipper, and Steven Su. "Comparison of Constant PID

Controller and Adaptive PID Controller via Reinforcement Learning for a Rehabilitation Robot." *2022 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC)*. IEEE, 2022.

[8] Heong, A. Kiam, Gregory Chong, and Li Yun. "PID control system analysis, design, and technology." *IEEE transactions on control systems technology* 13.4 (2005): 559-576.

[9] Li, Zhijun, Hangwei Zhang, and Wen Tan. "Comparison of PI/PID/PIDD2 Controllers for Higher Order Processes." *IFAC-PapersOnLine* 58.7 (2024): 340-345.

[10] Hägglund, Tore, and José Luis Guzmán. "Give us PID controllers and we can control the world." *IFAC-PapersOnLine* 58.7 (2024): 103-108.

[11] Ounis, W., et al. "Analog real time tunable and configurable fractional order PID controller realization." *IFAC-PapersOnLine* 58.12 (2024): 353-358.

[12] Tan, Wen, Wenjie Han, and Jiaohu Xu. "State-space PID: a missing link between classical and modern control." *IEEE Access* 10 (2022): 116540-116553.

[13] Thomsen, Sönke, Nils Hoffmann, and Friedrich Wilhelm Fuchs. "PI control, PI-based state space control, and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads—A comparative study." *IEEE transactions on industrial electronics* 58.8 (2010): 3647-3657.

[14] Madsen, Jennifer M., Leang-San Shieh, and Shu-Mei Guo. "STATE-SPACE DIGITAL PID CONTROLLER DESIGN FOR MULTIVARIABLE ANALOG SYSTEMS WITH MULTIPLE TIME DELAYS." *Asian Journal of Control* 8.2 (2006): 161-173.

# ПРОЕКТИРАНЕ НА СИНХРОНИЗАЦИОННА СИСТЕМА С АНТИ-СИНХРОНИЗАЦИЯ МЕЖДУ ДВЕ ХАОТИЧНИ СИСТЕМИ С ЕДНА НЕЛИНЕЙНОСТ

**Драгомир Чантов**

*Технически университет - Габрово, ул. "Х. Димитър" 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: dchantov@tugab.bg*

# DESIGN OF SYNCHRONIZATION SYSTEM WITH ANTI-SYNCHRONIZATION BETWEEN TWO CHAOTIC SYSTEMS WITH ONE NONLINEARITY

**Dragomir Chantov**

*Technical university of Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: dchantov@tugab.bg*

**Abstract**

*The topic of chaotic anti-synchronization as a subtype of the chaotic synchronization phenomenon is studied in this paper. By this type of synchronization, the aim is to design such a coupling between two chaotic systems, that the slave system to run in a "mirror"-like chaotic mode to the master system, i.e. the error functions, which must decline to zero to achieve anti-synchronization, are defined as sums, not differences, of the corresponding pairs of variables of the two systems. The second Lyapunov stability law is used to define the control functions.*

**Keywords:** chaos; chaotic anti-synchronization, Lyapunov stability.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Едно от съвременните направления в теорията на автоматичното управление и по-конкретно в частта й за анализ и синтез на нелинейни системи е управлението на хаотични системи. Тази категория задачи включва задачи за стабилизация на хаотични системи до нехаотично състояние, задачи за изкуствена хаотификация на нехаотични системи, както и задачи от областта на синхронизацията на хаотични системи [1-3]. Последната група задачи е особено популярна сред научната общност предвид различните приложения на явлението хаотична синхронизация, например за защитени комуникации и криптиране на данни.

Хаотичните системи са нелинейни системи със сложна динамика с елемент на случайност, характеризират се с поведение, близко до това на стохастичните системи, но същевременно се описват с детерминирани математични модели, често от нисък ред. При задачите за хаотична синхронизация се търси такъв тип връзка между две или повече хаотични системи, че динамиката им да бъде синхронизирана в определена форма, но да запазят хаотичния си характер. Най-популярният тип синхронизация е идентичната, при която след влизане в синхронен режим хаотичните системи извършват еднакви (идентични) хаотични движения. Ако се дефинират функциите на разсъгласуване като разлики между отделните двойки еднотипни променливи на двете системи, то при такъв тип синхронизация те ще клонят към нула.

Съществуват и други типове хаотична синхронизация, различни от идентичната. Принципно, ако между две хаотични

системи се постигне по-сложен тип синхронизация, това би дало по-големи възможности за защита на сигналите при използването на тези синхронизационни схеми в комуникационни системи за защитено предаване на данни. Такъв тип синхронизация е т.н. анти-синхронизация [4-6]. При нея хаотичната динамика на едната хаотична система в синхронизационната схема се явява „огледален" образ на динамиката на другата система, т.е. дефинират се функции на разсъгласуване, които са не разликите, а сумите от съответните двойки променливи на двете системи. Когато тези функции клонят към нула, между системите има анти-синхронизация. Целта е да се проектират такива управляващи функции към едната от двете хаотични системи, че това условие да бъде изпълнено.

В настоящия доклад се синтезира синхронизационна система между две еднотипни хаотични системи. Моделът на системите е от трети ред, с една нелинейност, предложен през 2024 г. С помощта на втория метод за устойчивост на Ляпунов са изчислени управляващи функции, които се прилагат по метода на „активно управление" към подчинената хаотична система и водят до стабилен режим на анти-синхронизация между двете системи в синхронизационната схема. Резултатите са тествани чрез компютърни симулации с програмния продукт Matlab.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

В [7] е предложен модел на хаотична система от т.н. „jerk" тип – модел с една нелинейност от трети ред, който се описва с уравненията:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -ax_1 + bx_2 - x_3 - x_1^2 x_2 - cx_3, \end{aligned} \tag{1}$$

където:

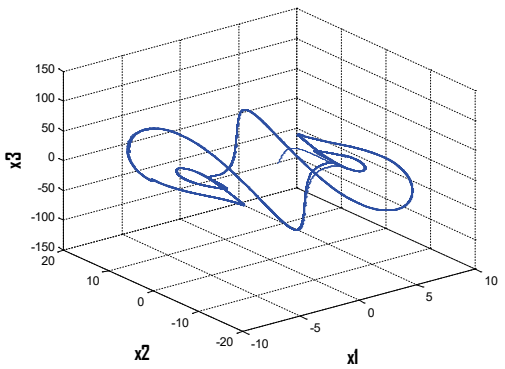
$$a = 2.5,\ b = 10,\ c = 0.4 \tag{2}$$

са константни параметри.

Хаотичната система, която ще бъде наричана модел на Yan-Wang-Li или YWL по имената на предложилите я автори, има проста структура със само седем члена, което я прави лесна за схемна реализация, с малък брой елементи и съответно по-ниска цена при практически реализации. В модела е налична само една нелинейност – от трети ред в третото уравнение на (1). Условието за наличието на хаос в една система е системата да е нелинейна и ако е непрекъсната, да е поне от трети ред, т.е. системата YWL е възможно най-опростена математическа конструкция, способна да генерира хаос. В същото време в [7] е установено, че системата (1) може да има много разнообразна динамика в зависимост от стойностите на параметрите и началните условия, изразяваща се в осем възможни комбинации от атрактори в пространството на състоянието $(x_1, x_2, x_3)$, например два атрактора от тип точка, комбинация от точка и граничен цикъл и т.н. Пет от тези комбинации включват наличие на хаотичен атрактор. При стойности на параметрите (2) и начални условия:

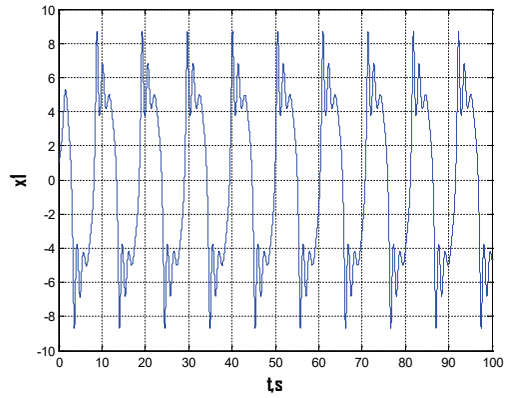
$$\begin{aligned} \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} x_1(0) & x_2(0) & x_3(0) \end{bmatrix}^T = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{3}$$

атракторът на системата е хаотичен и е показан на фиг. 1.




***Фиг. 1**. Хаотичен атрактор на модела на Yan-Wang-Li*

На фиг. 2 е показана времевата характеристика на една от системните променливи - $x_1(t)$. Динамиката на останалите променливи е подобна.

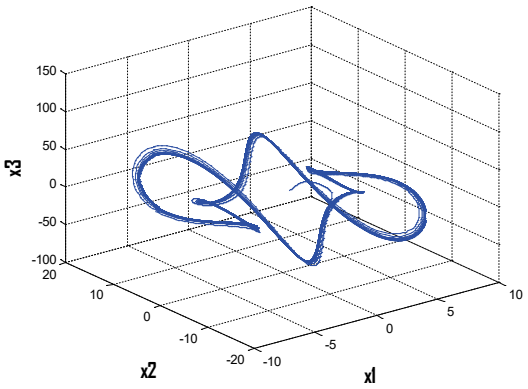



***Фиг. 2***. *Времева характеристика на една от системните променливи*

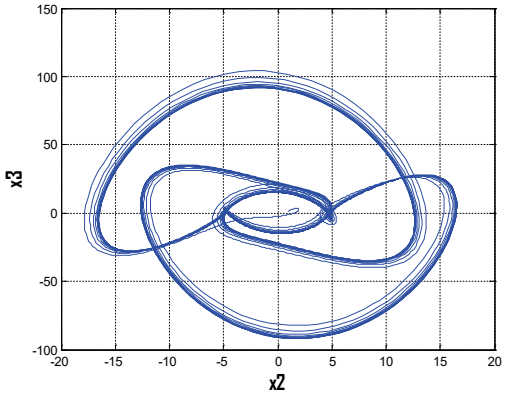
Както от фиг. 1, така и от фиг. 2 се вижда, че хаотичният атрактор на системата YWL има по-ограничен брой неустойчиви периодични орбити от по-голямата част от популярните хаотични модели и по-скоро наподобява сложен граничен цикъл. Авторът на настоящия доклад след серия експерименти по модифициране на първоначалния модел на системата (1) предлага модификация във второто уравнение на модела, в резултат на която системата придобива динамика, по-присъща на хаотичните системи:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3 - \underline{x_1}, \\ \dot{x}_3 &= -ax_1 + bx_2 - x_3 - x_1^2 x_2 - cx_3. \end{aligned} \qquad (4)$$

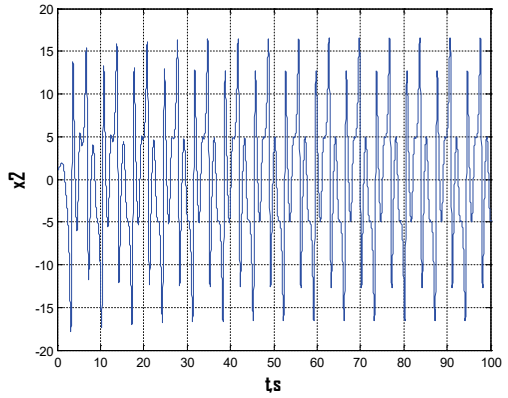
На фиг. 3 е показан атракторът на модела (4) в пространството на състоянието $(x_1, x_2, x_3)$, на фиг. 4 – проекцията на атрактора в една от фазовите равнини - $(x_3, x_2)$ , а на фиг. 5 – времевата характеристика $x_2(t)$. На фигурите се вижда по-големия брой орбити на атрактора спрямо оригиналния от фиг. 1, съответно – по-ясно изразеното хаотично състояние на системата.




***Фиг. 3***. *Хаотичен атрактор на модифициран модел на Yan-Wang-Li*




***Фиг. 4***. *Проекция на атрактора на модифицирания модел YWL в една от фазовите равнини*




***Фиг. 5***. *Времева характеристика на една от системните променливи на модифициран модел YWL*

На основата на модифицирания модел YWL (4) ще бъде синтезирана следната синхронизационна система, изградена от два идентични модела (4), наречени *MASTER* и *SLAVE*:

***MASTER***

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2,\\ \dot{x}_2 &= x_3 - x_1,\\ \dot{x}_3 &= -ax_1 + bx_2 - x_3 - x_1^2 x_2 - cx_3.\end{aligned} \tag{5}$$

***SLAVE***

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_1 &= \tilde{x}_2 + u_1,\\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 + u_2,\\ \dot{\tilde{x}}_3 &= -a\tilde{x}_1 + b\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1^2\tilde{x}_2 - c\tilde{x}_3 + u_3,\end{aligned} \tag{6}$$

където с $\tilde{x}_i$, $i = 1 \div 3$ са означени променливите на системата *SLAVE*.

Конфигурацията от две системи е от тип *MASTER – SLAVE*, тъй като първата система в схемата - (5) подава синхронизиращи сигнали, функции на променливите й на състоянието, към втората – (6), без да получава обратно сигнали от нея. С $u_i$, $i = 1 \div 3$ са означени управляващите функции към *SLAVE* системата, които съдържат променливи от *MASTER* системата. Наборът параметри на системата (6) е идентичен с този на системата (5), като стойностите им са тези от (2). Началните условия на системите в синхронизационната схема са различни. Началните условия на системата (5) са номиналните начални условия (3), а тези на системата (6) са:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}(0) &= \left[\tilde{x}_1(0) \quad \tilde{x}_2(0) \quad \tilde{x}_3(0)\right]^T = \\ &= \left[0.6 \quad 0.8 \quad 1.4\right]^T\end{aligned} \tag{7}$$

и са избрани на случаен принцип.

За реализиране на дефинираната цел за постигане на режим на анти-синхронизация в синхронизационната система, изградена от системите (5) и (6), е необходимо първо да се дефинират функциите на разсъгласуване между отделните двойки променливи на двете системи, които ще бъдат:

$$\begin{aligned}e_1 &= x_1 + \tilde{x}_1,\\ e_2 &= x_2 + \tilde{x}_2,\\ e_3 &= x_3 + \tilde{x}_3,\end{aligned} \tag{8}$$

При така дефинираните функции на разсъгласуване режим на анти-синхронизация ще има, ако:

$$\lim_{t\to\infty} e_i(t) = 0, \quad i = 1 \div 3, \tag{9}$$

което условие може да бъде изпълнено при синтез на подходящи управляващи функции $u_i$ към системата (6).

От (8) и (9) се вижда, че при анти-синхронизация между двете хаотични системи

$$x_i = -\tilde{x}_1, \; i = 1 \div 3 \; , \tag{10}$$

т.е. хаотичните движения на едната системата ще бъдат „огледални” на тези на другата.

Синтезът на управляващите функции $u_i$ в (6) ще бъде реализиран по метода на активно управление с използване на втория метод за устойчивост на Ляпунов. Според него, ако се намери функция $V(e)$, наречена функция на Ляпунов, която отговаря на следните условия:

$$V(\mathbf{e}) > 0, \forall e \neq 0, \tag{11}$$

$$V(\mathbf{e}) = 0, \forall e = 0, \tag{12}$$

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} < 0, \forall e \neq 0 \tag{13}$$

то точката в пространството на състоянието на системата от разсъгласуването $\mathbf{e} = \left[e_1 \quad e_2 \quad e_3\right] = \mathbf{0}$ ще бъде устойчива. Изпълнението на това условие съответства на постигане на анти-синхронизация между системите при функции на разсъгласуване (8).

Обикновено за удовлетворяване на условията (11) и (12) се избира квадратична функция от типа:

$$V(\mathbf{e}) = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2). \qquad (14)$$

Производната на функцията $V(\mathbf{e})$ е:

$$\frac{dV(\mathbf{e})}{dt} = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3. \qquad (15)$$

Производните на функциите на разсъгласуването $e_i$ според (8) ще бъдат:

$$\dot{e}_i = \dot{x}_i + \dot{\tilde{x}}_i, \quad i = 1 \div 3 \qquad (16)$$

и съответно могат да бъдат получени при сумирането на двойките уравнения на системите (5) и (6):

$$\begin{aligned}
\dot{e}_1 &= x_2 + \tilde{x}_2 + u_1 \\
\dot{e}_2 &= x_3 - x_1 + \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 + u_2 \\
\dot{e}_3 &= -ax_1 + bx_2 - x_3 - x_1^2 x_2 - cx_3 + \\
&- a\tilde{x}_1 + b\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1^2\tilde{x}_2 - c\tilde{x}_3 + u_3,
\end{aligned} \qquad (17)$$

или с отчитане на (8):

$$\begin{aligned}
\dot{e}_1 &= e_2 + u_1 \\
\dot{e}_2 &= e_3 - e_1 + u_2 \\
\dot{e}_3 &= -ae_1 + be_2 - e_3 - ce_3 \\
&- x_1^2 x_2 - \tilde{x}_1^2\tilde{x}_2 + u_3,
\end{aligned} \qquad (18)$$

Тогава, ако управляващите функции $u_i$ се синтезират във вида:

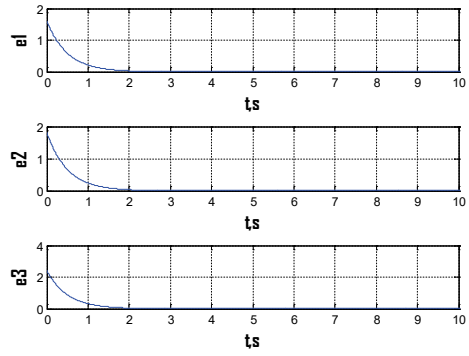
$$\begin{aligned}
u_1 &= -e_2 - k_1 e_1, \\
u_2 &= -e_3 + e_1 - k_2 e_2, \\
u_3 &= ae_1 - be_2 + e_3 + ce_3 + x_1^2 x_2 + \tilde{x}_1^2\tilde{x}_2 - k_3 e_3,
\end{aligned} \qquad (19)$$

то след заместването им в (18) ще се получат изразите:

$$\dot{e}_i = -k_i e_i, \quad i = 1 \div 3 \qquad (20)$$

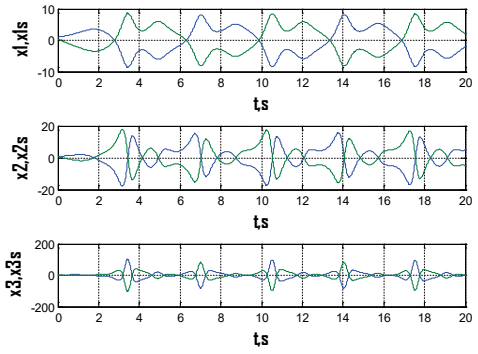
При заместването на изразите (20) в (15) и избор на положителни константи $k_i$ се получава отрицателно определена функция, която удовлетворява условието (13) и с това и последното условие за постигане на анти-синхронизация между системите (5) и (6) се изпълнява.

Синхронизационната система (5)-(6) с управляващи функции (19) е симулирана с избор на коефициенти $\forall k_i = 2$. На фиг. 6 са показани функциите на разсъгласуване $e_i$ (8).



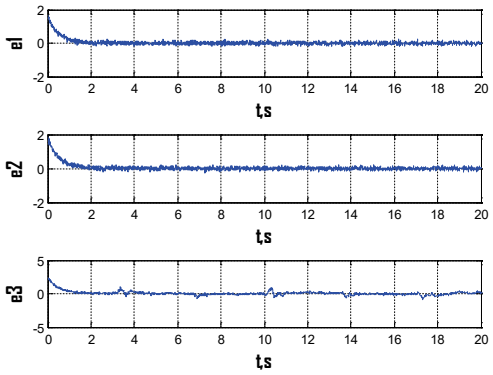

***Фиг. 6**. Функции на разсъгласуване*

Вижда се, че след кратък преходен процес функциите на разсъгласуване се установяват в 0, т.е. системите от синхронзационната схема влизат в режим на анти-синхронизация. Този режим се илюстрира нагледно, ако се наблюдава съвместната динамика на отделните двойки променливи на двете системи $x_i(t), \tilde{x}_i(t)$, която е показана на фиг. 7.




***Фиг.7**. Съвместна динамика на двойките променливи при анти-синхронизация*

При конкретна физическа реализация на синхронизационната схема е възможно сигналите от *MASTER* системата $x_i$, които участват в управляващите функции към *SLAVE* системата да са зашумени. На фиг. 8 са показани функциите $e_i$ при адитивно зашумяване на променливите $x_i$ с бял Гаусов шум с дисперсия $\sigma^2 = 0.005$. Въпреки шума системите остават в режим на анти-синхронизация.




***Фиг. 8**. Функции на разсъгласуване при зашумени свързващи сигнали*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена е модификация на новооткрит хаотичен модел, при която атракторът на системата има по-ясно изразен хаотичен характер. На основата на така модифицирания модел на Yan-Wang-Li е проектирана синхронизационна схема между два идентични модела от предложения тип. Между двете хаотични системи е постигната анти-синхронизация, която е по-сложен тип синхронизирано движение и намира приложение за защитени комуникации. Управляващите функции са изчислени с помощта на втория метод за устойчивост на Ляпунов.

## ЛИТЕРАТУРА


[1] Boccaletti, S., J. Kurths, G. Osipov, D. Valladares, C. Zhou, The synchronization of chaotic systems, Physics Reports 366 (2002), pp.1-101.

[2] Carroll, T., L. Pecora, Synchronizing chaotic circuits, IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, Vol.38, No.4, 1991, pp.453-456.

[3] Pecora, L., T. Carroll. Synchronization in chaotic systems. Physical Review Letters, Vol.64, No.8, 1990, pp.821-824.

[4] Feng, J. *et.al.* Anti-synchronization of two different hyperchaotic systems with fully uncertain parameters. Computational Intelligence and Security, 2009.

[5] Ren, L., C. Peng. Adaptive coexistence of synchronization and anti-synchronization for a class of switched chaotic systems. Processes 2023 11(2) 530.

[6] Chen, D. *et. al.* Chaotic synchronization and anti-synchronization for a novel class of multiple chaotic systems via a sliding mode control scheme. Nonlinear Dyn (2012) 69:35-55.

[7] Yan, S., J. Wang, L. Li. Analysis of a new three-dimensional jerk chaotic system with transient chaos and its adaptive backstepping synchronuous control. Integration 98 (2024) 102210.

# ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН МОДЕЛ НА СЕНЗОР ЗА ВЛАЖНОСТ НА ОСНОВАТА НА ПИЕЗОТРАНСФОРМАТОР С НАНЕСЕН СЛОЙ ВЛАГОАДСОРБИРАЩО ПОКРИТИЕ

**Недю Недев**

*Технически университет Габрово, Хаджи Димитър 4, Габрово, България*

**кореспондиращ автор: nnedev@tugab.bg*

# ELECTROMECHANICAL MODEL OF A HUMIDITY SENSOR BASED ON A PIEZO TRANSFORMER WITH AN APPLIED MOISTUREABSORBING COATING

**Nedyu Nedev[1]**

*Technical university Gabrovo, Hadji Dimitar 4 str., Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: nnedev@tugab.bg*

**Abstract**

*Humidity sensors find applications in various fields of human activity. Their operation is based on different physical phenomena, with one approach being based on surface acoustic waves. This report presents an electromechanical model of a humidity sensor developed on the basis of a piezo transformer with an applied moisture-absorbing coating. A relationship for the sensor's conversion coefficient has been obtained. Comparative results from experimental studies and theoretical calculations are presented, showing the influence of the supply voltage frequency and relative humidity on the sensor's conversion coefficient.*

**Keywords:** piezo transformer; electromechanical model; humidity sensor

## ВЪВЕДЕНИЕ

Измерването и контрол на влажност на различни материали е наложително в редица производства, земеделието, медицината и др.области на човешката дейност.

За целта се използват сензори работещи на основата на различни физични явления.

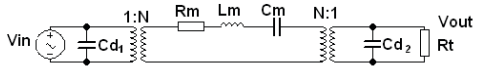
Едно от направленията, в които се работи е разработването на сензори за влажност е на базата на повърхностни акустични вълни (ПАВ).

Повърхностните акустични вълни (ПАВ), са механични трептения, създадени под действието на пиезоефекта [1-3]. Тези вълни се разпространяват в близост до повърхността на пиезоелемент като затихват във вътрешността му. За използване на сензорите на основата на ПАВ като сензори за влажност, към тях се добавя слой от влагочувствително вещество - най-често това са полимерни материали [4-8].

В настоящия доклад се представя електромеханичен модел на сензор за влажност на основата на пиезо трансформатор с нанесен влагоадсорбиращ слой.

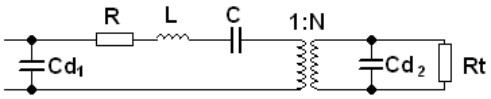
## ИЗЛОЖЕНИЕ

Като електромеханична система, пиезотрансформаторът може да се представи с еквивалентна заместваща схема. Съгласно [9] заместващата схема има вида, показан на фиг. 1.




***Фиг.1.*** *Еквивалентна заместваща схема на пиезотрансформатор*

В тази схема посредством електрически елементи се представят механичните свойства на ПТ като се използва електромеханичната аналогия. Елементът *Rm* представя загубите, *Lm* - масата и *Cm* - еластичността на ПТ. $Cd_1$ и $Cd_2$ са статични капацитети на възбудителната и генераторната секция. С N е означен еквивалентният електромеханичен коефициент на трансформация. За улесняване работата по пресмятане на параметрите на ПТ се използва опростена заместваща схема [9-13], представена на фиг. 2.




***Фиг.2*** *Опростена заместваща схема на ПТ*

Веригата е изградена от последователен RLC-контур. Този контур описва механичните трептения, разпространяващи се в ПТ. Входният и изходният капацитети $Cd_1$ и $Cd_2$ представят изолационните свойства на ПТ. Стойностите на елементите в схемата могат да бъдат пресметнати като се използват следните зависимости [10-12]:

$$Cd_1 = \frac{\pi*(D-d-b)^2*\varepsilon_{33}^T*\left(1-\frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T-S_{11}^E}\right)}{4*t}, \quad (1)$$

$$Cd_2 = \frac{\pi*(d-b)^2*\varepsilon_{33}^T*\left(1-\frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T-S_{11}^E}\right)}{4*t}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\sqrt{2*\rho*S_{11}^{E^3}}*t}{16*r*Q_m*d_{21}^2}, \quad (3)$$

$$L = \frac{\rho*S_{11}^{E^3}*t}{8*\pi*d_{21}^2}, \quad (4)$$

$$C = \frac{16*r^2*d_{31}^2}{\pi*S_{11}^E*t}, \quad (5)$$

където $t$ е дебелината на пиезотрансформатора; $\rho$ - плътността на материала, от който е изготвен пиезотрансформаторът; $d_{31}$- пиезоелектрическата константа; $\varepsilon_{33}^T$- диелектричната константа на материала; *Qm* - механичен качествен фактор; $S_{11}^E$ - константата на еластичност; *D*, *d* и *b* - параметри на ПТ.

Като са използвани зависимостите (1) - (5) са пресметнати параметрите на електрическите компоненти, участващи в опростената заместваща схема на дисков пиезотрансформатор, изготвен от пиезокерамика SPZT-8, с диаметър *D*=30mm и дебелина *t*=2.5mm.

Коефициентът на преобразуване на ПТ се представя със следната зависимост [13]:

$$G_v = \frac{1}{\sqrt{\left(1+\frac{C_{d2}}{C}-\omega LC_{d2}+\frac{R}{R_t}\right)^2+\left(\omega\left(RC_{d2}+\frac{L}{R_t}\right)-\frac{1}{\omega CR_t}\right)^2}} \quad (6)$$

където $\omega$ е ъгловата честота, а *Rt* е съпротивлението на товара, включен към ПТ.

Като сензорен елемент за измерване на влажност ПТ ще изменя своята маса вследствие на добавянето на масата на адсорбираните от сорбционния слой водни молекули. Допълнително внесената маса ще се прояви като нова последователно включена индуктивност *Li* в заместващата схема на ПТ. Индуктивността на заместващата схема на сензорния елемент ще се получи като сума от *L* и *Li*:

$$L_s = L + L_i \quad (7)$$

На базата на експерименталните данни, получени при изследване на реалните пиезотрансформаторни сензори за влажност, е синтезиран моделът на изменение на *Li* при изменение на относителната влажност:

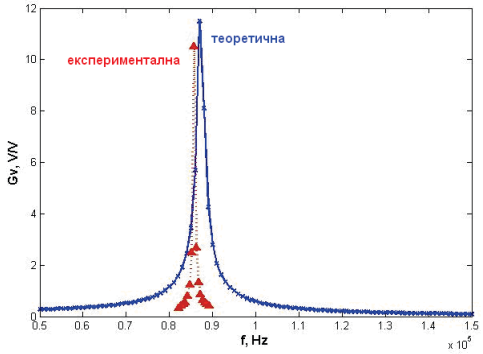
$$L_i = \frac{L}{-0.0103(RH)^2+0.2824(RH)+85.22} \quad (8)$$

където влажността *RH* се задава в относителни единици.

След заместване на (7) в (6) се получава зависимостта за коефициента на преобразуване на пиезотрансформаторния сензорен елемент за влажност:

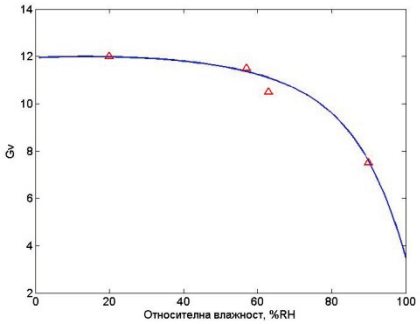
$$G_{vs} = \frac{1}{\sqrt{\left(1+\frac{C_{d2}}{C}-\omega L_s C_{d2}\right)^2+\left(\omega\left(RC_{d2}+\frac{L_s}{R_t}\right)-\frac{1}{\omega CR_t}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1+\frac{C_{d2}}{C}-\omega(L+L_i)C_{d2})^2+(\omega\left(RC_{d2}+\frac{(L+L_i)}{R_t}\right)-\frac{1}{\omega CR_t})^2}} \quad (9)$$

Като са използвани стойностите на константите на пиезокерамиката, зададени от производителя, в среда MATLAB е извършена симулация за определяне на зависимостта на *Gvs* от честотата и от относителната влажност. На фиг. 3 са представени теоретично изчислената графична зависимост на изменение на коефициента на преобразуване при изменение на честотата на възбуждане на ПТ и получената зависимост от експерименталните изследвания.




***Фиг.3*** *Изменение на коефициента на преобразуване при изменение на честотата на възбуждане на ПТ*

Тъй като пиезотрансформаторът работи най-ефективно в резонансен режим, то и коефициентът на преобразуване на сензорния елемент е най-висок при резонансен режим, което се потвърждава от направените изчисления. Увеличаването на влажността води до промяна на параметъра *Li*. При задаване на резонансната честота на работа теоретично е определен коефициентът на преобразуване при изменение на влажността на околната среда. Получената графична зависимост, както и точки от експерименталната характеристика са представени на фиг.4




***Фиг.4.*** *Теоретично определен коефициент на преобразуване на ПТ сензорен елемент и точки от експерименталните изследвания при изменение на относителната влажност*

От получените резултати се установява, че допълнително внесената маса в резултат на адсорбцията на водни молекули от сензорния елемент променя еквивалентната индуктивност в заместващата му схема, което води до намаляване на коефициента на преобразуване.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен е електромеханичен модел на сензорен елемент за влажност на основата на пиезотрансформатор с нанесен слой влагоадсорбиращо вещество.

Получена е зависимостта за коефициента на преобразуване на сензорния елемент,

Като са използвани стойности на константите на използваната пиезокерамика е извършена симулация за определяне на зависимостта на изменение на коефициента на преобразуване на сензорния елемент от честотата и относителната влажност.

Резултатите показват, че допълнително внесената маса в резултат на адсорбцията на водни молекули от сензорния елемент променя еквивалентната индуктивност в заместващата му схема, което води до намаляване на коефициента на преобразуване.

*Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Djekson R.G., Novejshie datchiki, Moskva: Tehnosfera, 2007.- pp.384 ISBN 978-5-94836-111-6.

[2] Hribšek M.F., D. V. Tošić, M.R. Radosavljević, Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering, FME Transactions 2010;.38(1):11-18

[3] Bill Drafts, Acoustic Wave Technology Sensors, Ieee Transactions On Microwave Theory And Techniques 2001;49(4): 795-802.

[4] Buvailo A., Y.Xing, J.Hines, E.Borguet, Thin polymer film based rapid surface acoustic wave humidity sensors, Sensors and Actuators B 2011; 156: 444–449, doi:10.1016/j.snb.2011.04.080.

[5] Wen Wang, Xiao Xie, Shitang He, Optimal Design of a Polyaniline-Coated Surface Acoustic Wave Based Humidity Sensor, Sensors 2013; 13: 16816-16828; doi:10.3390/s131216816.

[6] R. Rimeika1, Rotomskis R., Poderys V., Čiplys D., Sereika A., Shur M. S., Impact of ambient humidity on surface acoustic wave attenuation and velocity in hematoporphyrin – on - LiNbO3 structure, ULTRAGARSAS (ULTRASOUND) 2008; 63(3), ISSN 1392-2114.

[7] Yawen Dou, Cuiping Li, Wensen Luo, Lirong Qian, Litian Wang, Dan Li, Hongji Li, Mingji Li,Surface acoustic wave relative humidity sensor based on GO/TiO2 sensitive film,Sensors and Actuators A: Physical 2024; 365:114906, ISSN 0924-4247, https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114906.

[8] Yunpeng Su, Cuiping Li, Mingji Li, Hongji Li, Sheng Xu, Lirong Qian, Baohe Yang, Surface acoustic wave humidity sensor based on three-dimensional architecture graphene/PVA/SiO2 and its application for respiration monitoring, Sensors and Actuators B: Chemical 2020; 308: 127693, ISSN 0925-4005, https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127693

[9] Kuo-Tsai Chang,Hsuang-Chang Chiang, Kuo-Sheng Lyu, Effeccts of electrode layouts on voltage gain characteristics for ring-shaped piezoelectric transformers, Sensors and Actuators 2008; A 141:166-172

[10] Baker E.M, W.Huang, D.Chein, F.Lee, Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent lamp ballast applications, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS 2005;20 (N5): 1213-1220.

[11] A.Sherif A.,M.Meddad, S.Belkhiat, Radial piezoelectric transformer stady, IJ-STA 2008 Special Issue, CEM:.566-579.

[12] Peerasaksophol M., S.Srilomsak, P.Laoratanakul, T.Kulworawanichpong, Ring-dot piezo-electric ballast for 36 W fluorescent lamp, ICAEE 2011, p.169-173.

[13] Laoratanakul P. Characteristics of radial-mode piezoelectric transformers, Materials Forum 2007;31:152-155.

# МОДЕЛИРАНЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА СЕРВО ЗАДВИЖВАНЕ DM S2006MD

**Станимир Йорданов*, Георги Михалев, Христина Стойчева, Елена Монова**

*Технически университет - Габрово, гр. Габрово, България, sjjordanov@tugab.bg*
** Кореспондиращ автор: sjjordanov@tugab.bg*

# MODELING AND IDENTIFICATION OF THE DM S2006MD SERVO DRIVE

**Stanimir Yordanov*, Georgi Mihalev, Hristina Stoycheva, Elena Monova**

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria;*
** Corresponding author: sjjordanov@tugab.bg*

**Abstract**

*The article presents a mathematical description of the DM S2006MD servo drive, and a Simulink model based on it has been created. Identification of the previously unknown parameters of the drive has been carried out. Experiments were conducted with both the model and the actual motor, and the results were compared.*

**Keywords:** servo drive, modeling, identification.

## ВЪВЕДЕНИЕ

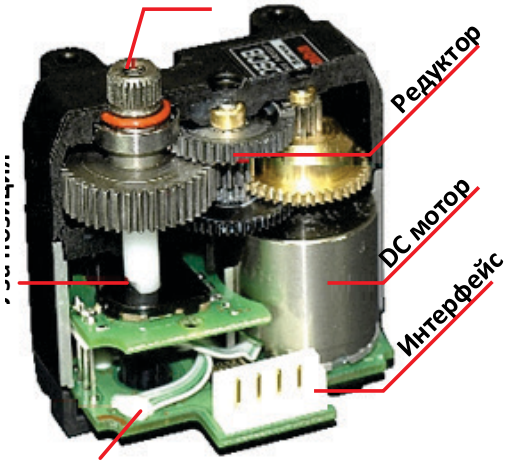
Съвременното развитие на автоматизацията на технологичните процеси се характеризира с усложняване на задачите за автоматично регулиране, значително увеличаване на броя на настройваните параметри, усъвършенстване на съществуващите и създаване на нови функционални елементи за системи с непрекъснато и дискретно действие, както и с повишаване на динамичната точност на регулирането, включително чрез използване на микропроцесорна техника [1]. Сред новите решения най-голям интерес представляват регулаторите, изградени на основата на ПИД закона за управление, поради техните добре известни предимства [2–4].

В този контекст възниква необходимостта от решаване на задачата за параметрична идентификация и оптимизация, тоест определяне на оптималните настройки на параметрите на регулатора спрямо избран критерий [3].

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Има много видове двигатели, налични за различни приложения, като DC двигатели, серво мотори и стъпкови двигатели. Серво моторите обаче са известни със своята бърза работа, висок въртящ момент и точно въртене. Според [5] серво задвижването е движеща се система с обратна връзка, която позволява точно да се контролира движението и позволява да се използват различни алгоритми на движение.

Сервомотора е електромагнитно устройство, използващо механизъм за отрицателна обратна връзка, за да преобразува електрически сигнал в контролирано движение. По принцип сервозадвижванията се държат като задвижващи механизми, които осигуряват прецизен контрол върху скоростта, ускорението и линейното или ъглово положение. Състои се от четири компонента(фиг. 1): DC двигател, сензор за позиция, зъбна предавка (редуктор) и управляваща верига




***Фиг. 1**. Устройство на DC серводвигател*

Зъбният механизъм е свързан с двигателя и осигурява обратна връзка към сензора за положение. Наличието на сензор за положение гарантира точността при отработването на заданието.

При постоянно токовите двигатели (ПТД) скорост и мощността могат да бъдат управлявани с помощта на наречени широчинно-импулсна модулация (PWM). Някои серво мотори имат допълнителни функции като вградени контролери и комуникационни интерфейси, което ги прави адаптивни и лесни за интегриране в сложни системи.

Предмет на настоящото изследване е сервозадвижването DM S2006MD.

Серводвигателят DM-S2006MD е известен със своята стабилност и точност, което го прави подходящ за използване в различни приложения, изискващи прецизен контрол на движението, като манипулатори, сгъваеми рамена и малки роботи, изискващи висока точност на движение.

Технически характеристики на серво задвижването DM S2006MD са:

- Работно напрежение: 4.8V~7.4V
- Скорост: 0.18 sec/60deg (6v) 0.16sec/60deg (7.2v)
- Въртящ момент: 17.8kg.cm (6v) 21.5kg.cm (7.2v)
- Размер: 40mmX20mmX38.5mm
- Тегло: 56gram
- Ъгъл на завъртане: 360°.

**Моделиране на серво задвижване DM S2006MD**

Динамичните модели описват неустановените режими на работа на обекта и неговите промени във времето.

Серво задвижванията DM S2006MD често се използват в такива динамични модели. За да бъдат използвани в динамични модели, е необходимо да се познават всички параметри на серво задвижванията, което ще улесни компютърното моделиране на бъдещия механизъм, съставен от тези устройства.

За постигане на поставената цел е необходимо последователно да се решат следните задачи:

- преглед на методите за идентификация на параметрите;
- съставяне на математическо описание на серво задвижването;
- проектиране и сглобяване на установка за идентификация на параметрите;
- провеждане на експериментални изпитвания;
- оценка на математическия модел на серво задвижването.

**Математическо описание на постояннотоков двигател**

Съгласно [7], електромагнитният въртящ момент на двигател с постоянен ток се изчислява по формула (1)

$$M_d = I_a . K_t \qquad (1)$$

където $K_t$ е коефициентът на пропорционалност между електромагнитния въртящ момент и тока на котвата, наречен константа на въртящия момент на двигателя, Nm/A;

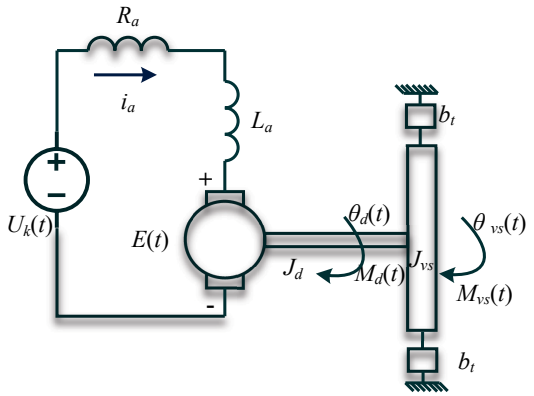
$I_a$ – токът на котвата, ротора, А.

Според законите на електромагнитната индукция: за всеки затворен контур индуцираната електродвижеща сила (ЕДС) е равна на скоростта на промяна на магнитния поток, преминаващ през този контур, взета със знак минус. В проводник, който се движи в магнитно поле, възниква електродвижеща сила. Сумарната ЕДС на намотките на котвата Е, чрез колектора и четките, се прилага към външните изводи на двигателя. В режим на

работа на двигателя, ЕДС е насочена срещу външното напрежение $U_a$, подадено на котвата от източника на захранване. ЕДС е причинена от промяната на токовете в намотките.

$$\mathrm{E} = \omega_\mathrm{a} L_{12} i_\mathrm{a} = p_\mathrm{p} L_{12} i_\mathrm{a} \omega_1 = K_w \cdot \omega_1 \quad (2)$$

където $K_w$ е коефициентът на пропорционалност между скоростта и ЕДС, наречен постоянен ЕДС на двигателя; $\omega_1$ – ъглова скорост на въртене на вала на двигателя, rad/s; $i_a$ – ток на възбуждане, A; $L_{12}$ – индуктивност на възбудителните. На фиг. 1 е показва електрическата верига на двигателя.




***Фиг. 2**. Електрическата верига на ПТД*

Тази схема се характеризира със следните параметри: активно съпротивление на котвата $R_a$ и индуктивност на котвата $L_a$. Роторът с инерционен момент $J_d$ се задвижва от едновременното действие на електромагнитния въртящ момент на двигателя $M_d$ и момента на външните сили $M_{vs}$, приложени към вала на двигателя.

Диференциалните уравнения за описание на ПТД са съставени въз основа на законите на физиката. За електрическа верига се използва вторият закон на Кирхоф: алгебричната сума на спадовете на напрежението във всички клонове, принадлежащи към всяка затворена верига, е равна на алгебричната сума на ЕДС на клоновете на тази верига:

$$\mathrm{U_a} = \mathrm{R_a}.\mathrm{I_a} + \mathrm{L_a}\frac{dI_a}{dt} + \mathrm{E} \quad (3)$$

където $R_a$ е съпротивлението на намотката на котвата, Ω; $L_\mathrm{a}$ е индуктивността на намотката на котвата, H. По този начин уравнения (1) и (3) образуват система от механични характеристики на ПТД.

$$\left| \begin{array}{c} U_a = R_a.I_a + L_a\frac{dI_a}{dt} + E \\ M_d = I_\mathrm{a}.K_t \end{array} \right. \quad (4)$$

Коефициентите $R_\mathrm{a}$ и $I_\mathrm{a}$ характеризира падането на напрежението върху активното съпротивление на веригата на котвата в съответствие със закона на Ом, а членът $L_a\frac{dI_a}{dt}$ отразява наличието на ЕДС на самоиндукция, възникваща в намотката при промяна на тока в котвата. Природата на електромагнитните явления в двигателите с постоянен ток е такава, че ако се използва системата единици SI, тогава стойностите на коефициентите $K_w$ и $K_m$ са числено равни. Често двигателят работи при постоянен поток $\Phi = \mathrm{const}$, при което уравненията на механичната характеристика на двигателите с постоянен ток се линеаризират и след преобразувания математическото описание на динамичните процеси в двигателя се представя в следния вид:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2}.M_d - \frac{L_a}{K_w^2}.\frac{dM_d}{dt} \quad (5)$$

Като се има в предвид, че $M_d = I_a.K_t$, уравнение (5) приема формата:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2}.I_a - \frac{L_a}{K_w}.\frac{dI_a}{dt} \quad (6)$$

При постоянен поток и при $\frac{dM_d}{dt} = \frac{di_\mathrm{a}}{dt} = 0$ уравнението придобива вида:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w}.\mathrm{I_a} = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2}.\mathrm{M_d} \quad (7)$$

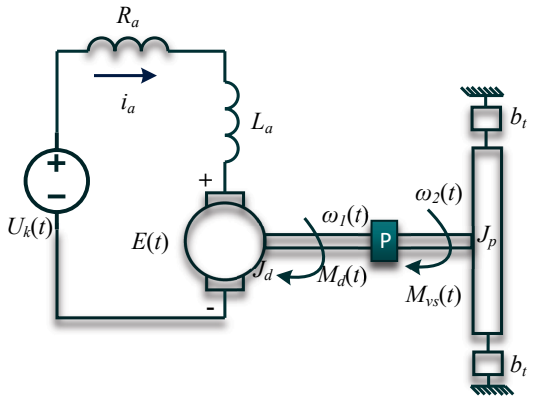
При $\Phi = const$ електромеханичните и механичните характеристики на двигателя са линейни. Диференциалното уравнение, характеризиращо процесите в механичната част на двигателя, се съставя на базата на втория закон на Нютон:

$$\mathrm{J_a}\frac{d\omega_d}{dt} + \mathrm{M_{vs}} = \mathrm{M_d} \quad (8)$$

където $M_{vs}$ е моментът на външните сили, действащи спрямо оста на въртене на вала на двигателя, N·m; $J_a$ - общ инерционен момент на арматурата и товара, kg/m$^2$.

**Математическо описание на двигател с постоянен ток с редуктор**

Редукторът е механизъм, който предава и преобразува въртящия момент, с една или повече механични предавки. Редукторът се използва за преобразуване на висока ъглова скорост на въртене на входящия вал в по-ниска скорост на изходящия вал, като при това увеличава въртящия момент. На фиг. 3 е показана електрическа схема с редуктор.




***Фиг.3*** *Електрическа верига на двигател с постоянен ток с редуктор*

В повечето случаи валът на сервозадвижването с постоянен ток е свързан с редуктор, чието предавателно число, съгласно [8], е:

$$K_p = \frac{\omega_1}{\omega_2} \qquad (9)$$

където:$\omega_2$ – ъгловата скорост (на задвижваното звено) на изходния вал след редуктора, rad/s; $\omega_1$ – ъгловата скорост (на задвижващото звено) на вала на двигателя, rad/s.

Тогава уравнение (8) придобива следния вид написано по отношение на външните сили:

$$\mathrm{J}_n \frac{d\omega_2}{dt} + \mathrm{b_t}\omega_2 = \mathrm{K_p M_d} - \mathrm{M_{vs}} \qquad (10)$$

където $J_n = K_p^2 J_a + J_p$ е инерционния момент на натоварването на редуктора, kg.m$^2$; $b_t$ – коефициент на вискозно триене.

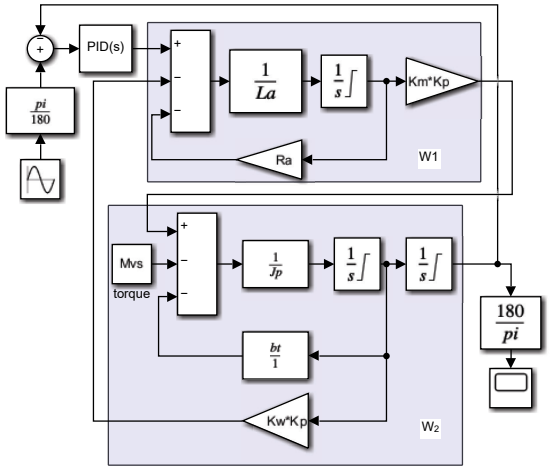
Моделът отчита само вискозното триене; хлабината и сухото триене не се вземат предвид. Като се вземе предвид формула (10), системата от уравнения (4) може да бъде допълнена:

$$\begin{cases} U_a = R_a.I_a + L_a\frac{dI_a}{dt} + E \\ J_n\frac{d\omega_2}{dt} + \mathrm{b_t}\omega_2 = \mathrm{K_p M_d} - \mathrm{M_{vs}} \\ M_d = I_{\mathrm{a}}.K_t \end{cases} \qquad (11)$$

За да се изследват процесите с помощта на Matlab Simulink се използва структурно представяне на математическия модел на ПТД. За целта се пренаписват уравненията от формула (11) по отношение на производните:

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{U_a - R_a.I_a - E}{L_a} \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{\mathrm{K_p M_d} - \mathrm{b_t}\omega_2 - \mathrm{M_{vs}}}{J_n} \end{cases} \qquad (12)$$

На фиг. 5 показва опростен Simulink модел на серво задвижването с редуктора и вграден ПИД регулатор.



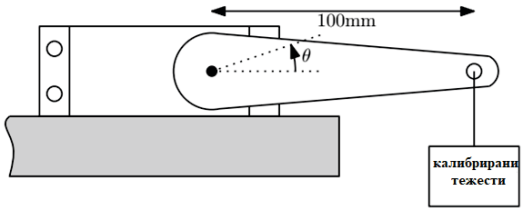

***Фиг. 4.*** *Опростен Simulink модел на серво задвижване с редуктор и ПИД регулатор*

**Измерване на параметрите на сервозадвижването**

За да се състави пълно математическо описание на системата, базирано на системи от уравнения (13) и съответстващ компютърен модел, разработен в програмата Matlab с помощта на библиотеката Simulink, е необходимо да се намерят всички липсващи параметри на системата, като например: съпротивление $R_{\mathrm{a}}$, индуктивност $L_{\mathrm{a}}$ ток на котвената намотка $I_{\mathrm{a}}$. Също така трябва да се намери приложеното натоварване към вала на редуктора, еквивалентният момент на

инерция на вала на редуктора и на вала на двигателя, който е част от системата за електрозадвижване.

Моментът на инерция на стенда (фиг. 5) се изчислява спрямо центъра на масите на платформата. За да се приведе към оста на въртене се използва теоремата на Щайнер [9].




***Фиг. 5** – Стенд за идентификация на параметрите на двигателя*

Моментът на инерция на стенда се изчислява по формулата:

$$J = J_c + \mathrm{m}.d^2 \qquad (13)$$

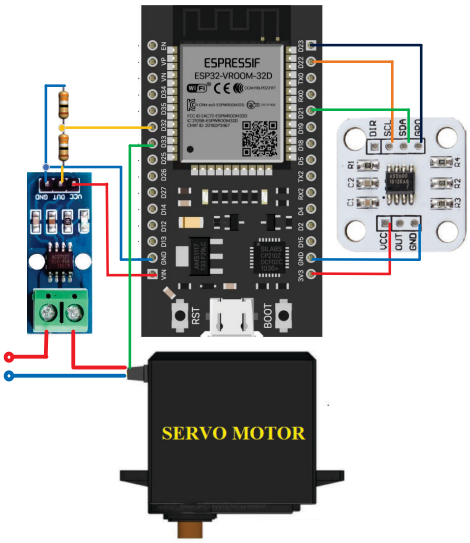
където: $J$ – момент на инерция на тялото спрямо произволна неподвижна ос, kg/m²; $J_c$ – момент на инерция спрямо центъра на масите, kg/m²; $m$ – масата на тялото, kg; $d$ – разстоянието между осите, m.

Изчисленият инерционен момент е:

$J_p = 0{,}0009068\ kg.m^2$.

**Измерване на тока на котвата**

За измерване на тока $I_a$, преминаващ през котвената намотка на сервозадвижването, е използвана следната електрическа схема (фиг. 6).




***Фиг. 6** – Електрическа схема на стенда за идентификация на параметрите на двигателя*

Съгласно схемата, двигателят е свързан през сензора за ток ACS712. Модулът е базиран на ACS712ELCTR-30A интегрална схема с висока точност (bi-directional Hall-effect current sensor) и служи за измерване на ток от -30A до +30A. Изхода на сензора е свързан към GPIO33 на ESP32-VROOM-32D. Микроконтролера ESP32 разполага с 15 аналогови входа с 12-битова резолюция.

В микроконтролера е реализиран нискочестотен филтър (НЧФ). Според дефиницията на НЧФ, през него преминават сигнали с честота под честотата на среза, която се определя по формула:

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} \qquad (14)$$

където $\tau = R.C$ е времевата константа на веригата.

Срязващата честотата е $f = 1.5$ kHz, а коефициентът на усилване $K_u = 15$.

Експериментът е проведен при подадено напрежение на двигателя от 1 V, при което е получената средна стойност на тока в намотка на котвата е $I_a = 0.0087$ A

**Определяне на електродвижещото напрежение**

Електродвижещото напрежение (ЕДН) се определя по формулата:

$$E = K_w.\omega_1 \qquad (15)$$

За да се определи ъгловата скорост $\omega_1$, към оста на серводвигателя бе закрепен магнит срещу който бе монтиран ротационен енкодер AS5600 12bit свързан с ESP32 по I2C интерфейс.

Експеримент беше извършено, когато към двигателя беше приложено напрежение $U_k = 4.8V$. По този начин бяха взети показания от сензора, резултатите бяха обработени в средата на Matlab.

Средната стойност на скоростта е скорост $\omega_1 = 1129.4\ rad/s \approx 179.77$rev/s. Според формула (4), при работа на постоянен токов двигател в установен режим $\frac{dI_a}{dt} = 0$, коефициентът $K_w$, се изчислява по формулата (16), където шунтиращото съпротивление е в Ω.

$$K_w = \frac{U_a - (R_a + R_{\text{ш}}) \cdot I_a}{\omega_1} \qquad (16)$$

където:$U_a$ е напрежението на котвата; $\omega_1$ е ъгловата скорост;- $R_a$ е съпротивлението на котвената намотка; $R_{ш}$ е шунтовото съпротивление; $I_a$ е токът на котвата.

Замествайки измерените стойности на тока на котвата $I_a = 0.0087$ A, скоростта на въртене на двигателя и съпротивлението на котвената намотка $R_a = 4.3789\ \Omega$, може да се получи коефициентът на пропорционалност между скоростта и ЕДС $K_w = 0.0042\ V.\text{s/rad}$. Тогава ЕДС на двигателя ще бъде равно на $E = K_w.\omega_1 = 4.7532\ V$

В установен режим, коефициентът на вискозно триене на редуктора $b_t$ може да се изчисли по следната формулата:

$$b_t = \frac{K_p \cdot M_d}{\omega_2} \quad (17)$$

Скоростта на вала след редуктора $\omega_2$ бе определена по аналогичен метод, както при скоростта на вала на серводвигателя.

Средната стойност на скоростта е

$$\omega_2 = 5.82\ rad/s \approx 0.925\ rev/s.$$

Тогава предавателното отношение на редуктора $K_p = 194.05$, което съответства на стойността, посочена в техническите му характеристика. Замествайки намерените стойности във формула (17), коефициентът на вискозно триене на редуктора е: $b_t = 0.0583$

Измервания на блокиращия въртящ момент

**Определяне на блокиращият въртящ момент**

Блокиращият въртящ момент $\tau_s$ описва натоварването върху сервомотора в точката, в която скоростта на въртене става нула, което води до блокиране на мотора. Той носи информация за масата, която може да бъде преместена от мотора на определено разстояние и е полезен за оценка на очакваната производителност под натоварване.

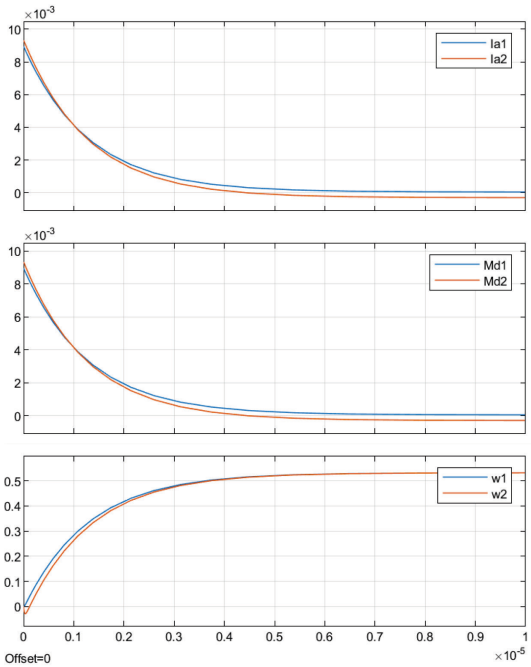
За измерване на базовия блокиращ момент на сервомеханизма бяха използвани калибрирани тежести, които се прикрепяха към свързано със сервото рамо (Фиг. 6). Рамото е с дължина 100 mm, което позволява използването на тежести с по-малка маса за постигане на блокиране. Допълнителните тежести се добавят през стъпка от 10 g, до момента в който моторът достигне точката на блокиране и не може повече да премества рамото в зададената зона θ показана на фиг. 6. Измерванията са проведени при напрежения от 4 V и 6 V, за да се провери линейността на $k_T$ и да се осигури верификация на модела в установен режим.

След измерване на блокиращия въртящ момент $\tau_s$, се изчислява константата на въртящия момент $k_T$ на мотора. Познаването на $k_T$ улеснява изчисляването на пиковия въртящ момент, като се използва пиковият ток $I_p$, измерен при застопорен мотор, за да се елиминира обратната ЕДС и да се получи точна оценка на натоварването.

$$\tau_p = I_p k_T \quad (18)$$

**Оценка на модела на серводвигателя**

За верификация на Simulink модела на серводвигателя бяха проведени експерименти при различни честоти и различни входни хармонични сигнали, идентични за модела и реалния серводвигател. Изследванията са направени при модел без симулиран товар и с товар. Резултатите от експериментите са показани на фиг. 7.

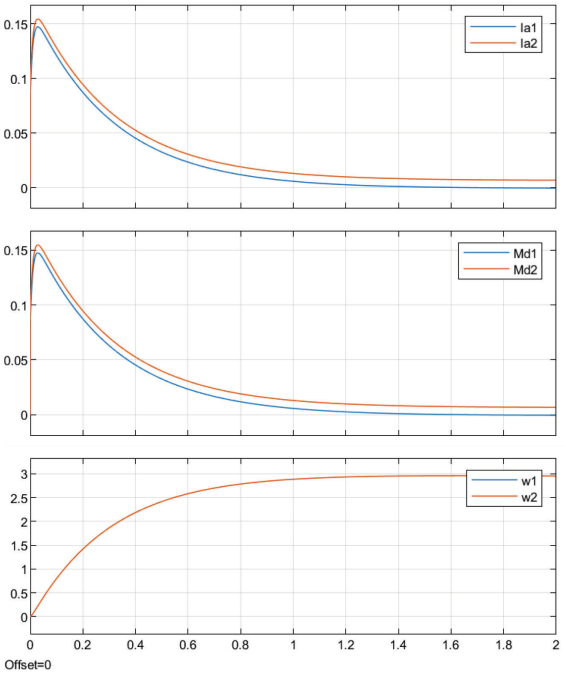



*Фиг. 7 – Симулационни изследвания на модела при подаване на единично входно въздействие*

От графиките е видно, че при наличие на товар двигателя консумира по-голям ток ($I_{a2}$). За да се установи коя част от серводвигателя е описана неточно – системата за управление или постояннотоковият двигател с редуктор, в средата на Simulink беше проведен експеримент с подаване на напрежение $U_a = 2.8\,\text{V}$, съответстващо на това, подавано на постояннотоковия двигател при измерване на преминаващия през него ток на котвата.

При анализа на направените изследвания се констатира, че средната стойност на тока е $I_\text{a} = 0.0087\,\text{A}$, докато при модела на серводвигателя е $I_\text{a} = 0.009\,\text{A}$. Следователно, параметрите на системата за управление не са напълно точно определени. Параметрите на ПИД регулатора са определени чрез метода на най-малките квадрати, който както е известно, дава приблизителни стойности на търсените параметри.

На фиг. 8 е показан графикът на движението на серводвигателя, когато на установката е закрепен товар с маса 50 g и включен регулатор.




***Фиг. 8** – Движение на серводвигателя с товар и ПИД регулатор*

Както се вижда от фиг. 9, синята линия представлява движението без товар а червената – движението при натоварване с 20 грама. Основната разлика е в амплитудата: с товар амплитудата е по-малка в повдигнато положение и по-голяма в спуснато положение в сравнение с движението без товар.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено математическо описание на серво задвижването DM S2006MD и е създаден Simulink модел, базиран на него. Определени и измерени са следните характеристики на серводвигателя DM-S2006MD: индуктивност, съпротивление на котвената намотка, момент на инерция на вала на постояннотоковия двигател, въртящ момент на изходния вал на серводвигателя и консумирана мощност.

Разработен е стенд за идентификация на параметрите на сервомотор с постояннотоков двигател, базиран на микроконтролер ESP32. Синтезиран е математически модел на серводвигателя DM-S2006MD въз основа на измерените параметри. На базата на тези параметри са проведени експерименти с модела и с реалния двигател, последвани от сравнение.

Въз основа на резултатите от сравнението може да се заключи, че разликата между модела и серво задвижването се дължи основно на непълното математическо описание на серво задвижването.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Harprit Singh Sandhu, Running Small Motors with PIC Microcontrollers, McGraw Hill TAB; 1st edition (August 13, 2009)

[2] William S. Levine, The Control Handbook Control System Fundamentals, Second Edition,CRC press, 2011

[3] Tsyganov A.V., Bulychov O.I., Tsyganova Yu.V. *Parallel Hybrid Algorithms for the Parameter Identification Problem in Stochastic Linear Systems.* Ulyanovsk State University, 2011.

[3] Karel J. Keesman, *System Identification. An Introduction*, Textbook, Springer, 2011

[5] Riazollah Firoozian, *Servo Motors and Industrial Control Theory (Mechanical*

*Engineering Series),* Part of: Mechanical Engineering,Springer, Aug 6, 2014
[6] Austin Hughes and Bill Drury, *DC Motors, Speed Controls, Servo Systems: An Engineering Handbook,* Springer, 2013
[7] Klyuchev V.I., *Theory of Electric Drives.* - Moscov: "Energoatomizdat", 2001. – 105 p.
[8] Lee, S.H., *Modeling, identification and control of a DC-Servomotor*, Polytechnic Institute of New York University – N.Y., 2008. – 2 c.
[9] Beer, F.P., Johnston, E.R., Cornwell, P.J., *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, McGraw-Hill, 2012