

РАЗРАБОТКА НА МНОГОЦЕЛЕВА СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ БАЗИРАНА НА ZIGBEE БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРНА МРЕЖА

Николай Манчев¹, Красен Ангелов^{1*}, Боян Карапенев¹, Иван Златев¹,
Dimitrios Kazolis²

¹Технически университет – Габрово, ул. Х. Димитър 4, Габрово, България

²Democritus University of Thrace, campus Kavala

кореспондиращ автор: kkangelov@tugab.bg

DEVELOPMENT OF A MULTI-PURPOSE MONITORING AND CONTROL SYSTEM BASED ON ZIGBEE WIRELESS SENSOR NETWORK

Nikolay Manchev¹, Krasen Angelov^{1*}, Boyan Karapenev¹, Ivan Zlatev¹,
Dimitrios Kazolis²

¹Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria

²Democritus University of Thrace, campus Kavala

*Corresponding author: kkangelov@tugab.bg

Abstract

Zigbee-based sensor networks are a flexible and functional communication solution for applications in the field of home and commercial building automation, industrial automation, personal healthcare systems, utility monitoring, etc. ZigBee-based sensor end devices form a wireless sensor network that uses a specialized wireless gateway to communicate with conventional 2G/3G/4G/Wi-Fi networks. This report discusses the development and research of a multi-purpose monitoring and control system based on ZigBee wireless sensor network. The system consists of three modules: a wireless IP network gateway for ZigBee, a wireless module with a common sensor interface, and a sensor board designed for the implementation of various applications. Main attention is paid to the development of the wireless gateway and the framework of the system for monitoring and controlling end devices in the sensor network.

Keywords: wireless sensor network; monitoring and control; ZigBee; home automation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Приложението на безжичните сензорни мрежи се е доказало като гъвкаво и ефективно решение в области като домашната автоматизация, сградната автоматизация, здравеопазването и др. [1-3]. Безжичната сензорна мрежа може да се използва за измерване на различни параметри като влажност, температура, интензитет на светлината, мониторинг и

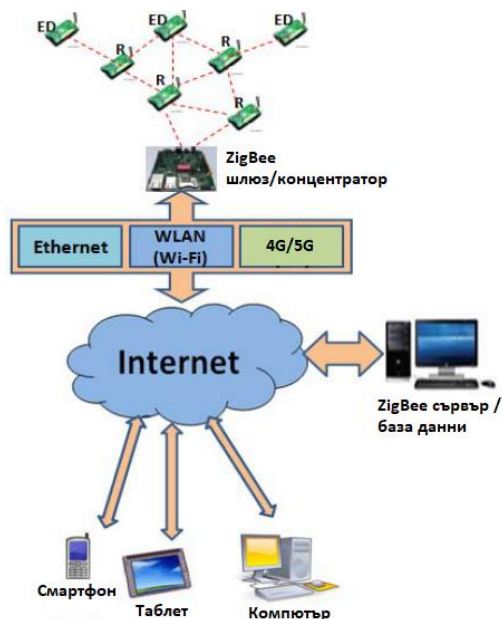
контрол на замърсяването, измерване на енергия, както и за управление на изпълнителни механизми, осветление, отопление, вентилация и климатизация и др. [1,4-6].

Осигуряването на достъп до данните от безжичните сензорни мрежи чрез IP базирани мрежи през Интернет улеснява достъпа до данните от сензорите по всяко време и навсякъде. Това осигурява

и достъп до състоянието на безжичната сензорна мрежа в реално време през на уеб-интерфейс, мобилни приложения и др., както и за дистанционното и управление и конфигуриране.

За ефективно свързване на безжичната сензорна мрежа и IP мрежата се използват различни софтуерни и хардуерни подсистеми. В настоящата разработка, базирана на ZigBee, се използва мултипротоколен шлюз, който е сърцето на системата, свързваща безжичната сензорна мрежа и IP базираната мрежа. Това е безжична система с поддръжка на 4/5G, Wi-Fi и ZigBee безжични протоколи, реализирана като едноплатково решение. Тя поддържа операционна система Android. Приложението за Android, работещо на нея, позволява наблюдение и контрол на уеб транзакциите за достъп до безжичните сензорни мрежи.

Софтуерната архитектура включва специални функции и техники за ефективна обработка на WSN данни между ZigBee безжична персонална мрежа и уеб сървъри [1,2]. В тази имплементация уеб страниците могат да взаимодействат с WSN устройствата, използвайки FCM (Firebase Cloud Messaging) техника за предаване на съобщения [7].



Фиг. 1. Цялостна архитектура на платформата за сензорни мрежи, базирана на ZigBee

Целта на настоящия доклад включва също така представяне на създаването на безжична сензорна мрежа като казус в сценарий за домашна и сградна автоматизация и свързването им към IP базирана мрежа, както е показано на фиг. 1.

Представен е цялостния хардуерен дизайн на системата; методологията, разработена за свързване на безжичната сензорна мрежа Zigbee с мрежата; пример за уеб-базиран графични потребителски интерфейси за наблюдение и управление на WSN.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А) Хардуерна архитектура и реализация

Проектирани са два основни хардуерни елемента интегрирани в цялостната архитектура, показана на фиг. 1:

- Шлюз/Координатор
- Крайно устройство/Рутер

• Шлюз/Координатор

Шлюз/координаторът е базиран на стандартна висококачествена система на чип с нискоенергийно ядро и ядро за обработка на сигнали, като системата поддържа множество IP мрежови интерфейси като WLAN, 2G/3G/4G и Ethernet, заедно с стандартна вградена системавърху-чип (SoC) за IEEE802.15.4/Zigbee [8]. Системата има много опции за периферно свързване чрез интерфейси като SPI, I2C, UART, USB, SD/MMC и др. Налични са и мултимедийни интерфейси като DVI-D, 24-битово паралелно RGB видео и аналогово S-видео и аудио. Добра контролна/мониторна конзола може да се оформи с помощта на LCD дисплей с тъчскрийн/клавиатура и мишка. Интерфейсът за SD/MMC карта се използва като външно устройство за зареждане и локално хранилище за регистриране на данни. Шлюз/координаторът е показан на фиг. 2.

Шлюз/координаторът използва следните хардуерни компоненти:

- Процесор, базиран на 720MHz ARM Cortex-A8 с интегрирано 520MHz DSP ядро; PoP модул памет, съдържащ

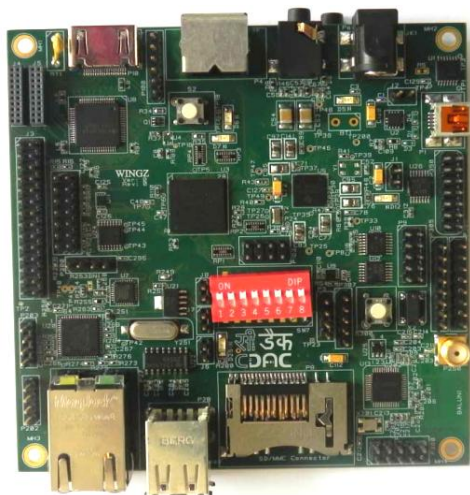
256MB SDRAM и 512MB NAND Flash; интегрирани високоскоростни USB, многоканален SPI, бърз I2C, UART, SDIO и MMC контролери; поддържа на множество операционни системи, като за разработка в базирана на Android.

- IEEE802.15.4/ZigBee модул с интегриран 2.4GHz IEEE802.15.4 RF трансивър. Този модул е независимо програмируем и е свързан с процесора на приложенията чрез UART. Той е конфигуриран със ZigBee протоколния стек, за да действа като ZigBee мрежов координатор.

- WLAN (Wi-Fi) модул.

- 3G/4G модул – клетъчен интерфейс за данни. Въпреки че има USB и UART интерфейси, USB се използва както за управление, така и за пренос на данни. Устройството е конфигурирано и управлявано с помощта на AT команди от хост системата.

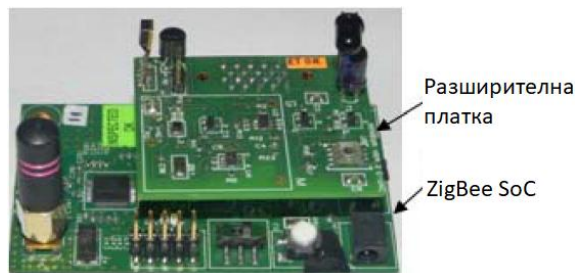
- Вграден USB Hub/Ethernet контролер.



Фиг. 2. Шлюз/координатор – безжичен IP мрежов шлюз за Zigbee

• Крайно устройство/Рутер

Използван е безжичен сензорен чип, базиран на IEEE802.15.4 MAC и PHY слоеве. Той се състои от ZigBee SoC с вграден RF трансивър като основен компонент и други периферни устройства – фиг. 3. Той може да бъде програмиран със ZigBee стек, за да действа като крайно устройство или рутер.



Фиг. 3. Крайно устройство/рутер – ZigBee SoC с вграден RF трансивър

- ZigBee SoC – използвана е общодостъпна готова търговска ZigBee SoC система за 2,4 GHz, с вътрешна 8KB RAM и 128KB програмна флаш памет и периферни интерфейси като SPI, I2C, UART и GPIO.

- Разширителна платка – външно свързващ се модул, който съдържа различни по вид сензори за отчитане на параметрите на околната среда, като напр. температура, влажност и светлина.

Б) Софтуерна архитектура и реализация

Безжичният IP мрежов шлюз за Zigbee е подходяща вградена хардуерна платформа, която поддържа операционни системи Android и Linux. Устройството се използва за изпращане на Zigbee данните, получени от ZigBee крайните устройства, до отдалечен сървър, използвайки RESTful уеб услуги [9]. Представянето на функционалността на Zigbee шлюз и Zigbee мрежата към TCP/IP4-базирано приложение се постига чрез уеб-базиран протокол REST (Representational State Transfer), SOAP (Simple Object Access Protocol) и GRIP (Gateway Remote Interface Protocol) [10,11,12].

В този дизайн е използван REST архитектурен стил за представяне на структурирани данни към хост или клиентско приложение, използвайки XML (Extensible Markup Language) или JSON (Java Script Object Notation) документи [11,12]. Заявката, насочена към шлюза от уеб-базираните клиенти, може да бъде команда, която се изпълнява специално

на самия шлюз или се препраща към адресирания Zigbee краен възел чрез радио интерфейса на шлюза за изпълнение на отдалечения възел. REST архитектурата използва HTTP POST, GET, PUT, DELETE методи за свързване на Zigbee данните към външната IP мрежа. REST приложението, базирано на Android, се използва за обработка на входящите Zigbee данни и изпращането им до отдалечения сървър/база данни, използвайки HTTP протокол. Устройството разполага и с LCD сензорен екран и графичен потребителски интерфейс за Android, който може да се използва за управление и въвеждане в експлоатация на Zigbee мрежата.

Хост процесорът на шлюза ще комуникира със Zigbee координатора (ZigBee SoC) през серийния порт. Използват се два вида пакети: команден пакет и пакет с отговор/данни.

– Командният пакет ще бъде изпратен от хост процесора до ZigBee SoC подчиненото устройство, което е ZigBee координатор. Този пакет ще съдържа информацията за командата, която ще бъде изпълнена на координатора. След изпълнение на командата резултатът със статуса ще бъде изпратен до хост процесора, използвайки Response пакет.

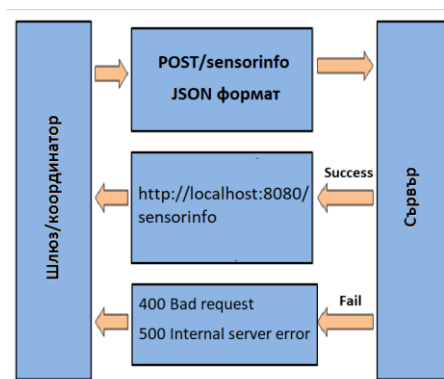
– Пакетът „Отговор/Данни“ е пакет, изпратен от координиращото устройство до хост процесора. Той ще бъде използван за изпращане на специфични за сензора данни, получени от крайните устройства на координатора, до хост процесора. Този пакет може да се използва и за потвърждение на командата, изпратена от хост процесора. Идентификаторът на групата се използва за разграничаване на различните видове WSN параметри, изпращани от крайните устройства.

На фиг. 4 е представена комуникацията между шлюз/координатора (безжичният IP мрежов шлюз за Zigbee) и сървър, използвайки REST.

Всяка информация за Zigbee крайно устройство, което е част от WSN, се моделира с помощта на обектно-ориенти-

ран подход. Java обектите с различна категория WSN информация се конвертират в JSON формат. Конвертираните в JSON данни след това ще бъдат изпратени до сървъра, използвайки HTTP POST и PUT методи, като се използва уникален URI за всяка категория WSN данни. По-долу са показани примери, където 192.168.61.102:8080 е адресът на сървъра, /zgd е пътят до всички ресурси, а /sensorinfo е пътят до интересувания ресурс:

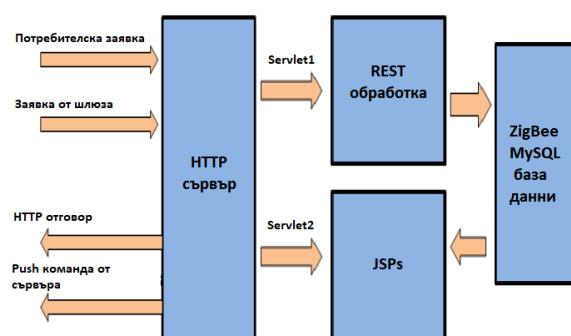
```
http://192.168.61.102:8080/zgd/addressinfo
http://192.168.61.102:8080/zgd/sensorinfo
http://192.168.61.102:8080/zgd/simpledescriptorinfo
```



Фиг. 4. Комуникация между шлюз/координатора и сървър

На фиг. 5 е показана комуникацията между компоненти на Zigbee сървъра и RESTful софтуера за уеб обработка [13]. Сървърът ще получи HTTP заявката както от потребителите, така и от шлюза. Ако заявката е от шлюза, тогава ще се извика *servlet1* и ще се изпълни REST методът, свързан с конкретния входящ URI, за по-нататъшна обработка на Zigbee данните. След това те ще бъдат съхранени в базата данни MySQL за постоянно съхранение на WSN данните [14]. Всички потребителски заявки ще бъдат обработени от *servlet2*, който ще рендира Zigbee уеб страниците на потребителите, за да наблюдават и контролират различните параметри, свързани с WSN. Сървърът също така получава командите, изпратени от потребителите чрез уеб страниците, и изпълнява *push*

механизма на сървъра, за да изпрати командата към Android приложението на шлюза.



Фиг. 5. Архитектура на софтуера от страна на сървъра с база данни

Разработена е пълноценна MySQL база данни за постоянно съхранение на различни данни, специфични за безжичните сензорни възли. Всяка от тях ще се съхранява в специални таблици в базата данни. По-долу са изброени някои от данните, които ще бъдат събирани от безжичните сензорни възли.

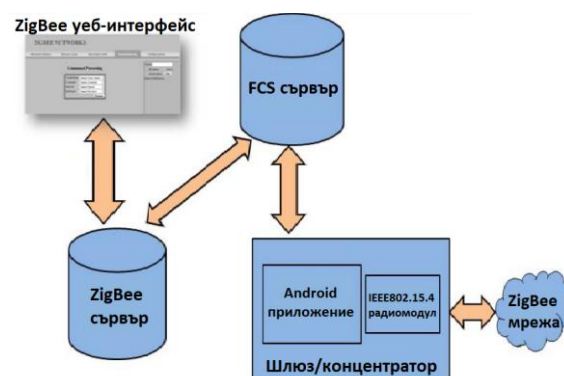
- информация за сензора;
- информация за адреса;
- информация за батерията;
- информация за дескриптора.

Всички данни се представят на потребителя чрез удобни за потребителя уеб страници, реализирани с помощта на Java Server Pages (JSP). Уеб страниците следва да съдържат различни важни и полезни панели за конфигуриране, управление и визуализация за потребителя и администратора на WSN. Някои от важните функции са:

- информация за сензорите от всички възлиза определен период от време;
- присъединяване / премахване на клъстери и отделни от устройства;
- настройки на аларми и известия;
- управление на изпълнителни механизми;
- графичен изглед на WSN и графики за поведението на мрежата.

Има два начина, по които ZigBee шлюза може да получава команди от сървъра: метод „изтегляне (pull) от сървъра“ или метод „изпращане (push) от

сървъра“. При метода „изтегляне от сървъра“, шлюзът трябва периодично да запитва сървъра и да получава (GET) командата, ако е налична. При втория метод, т.е. „изтегляне от сървъра“, самият сървър изпраща командите към шлюза, когато ги получава от различните потребители. Тук е използван методът „изтегляне от сървъра“, използвайки Firebase Cloud Messaging (FCM) технологията [7], при която сървър на приложения или Android приложение може да изпрати съобщение до друго Android приложение, използвайки правила и процедура за регистрация.



Фиг. 6. Комуникация между ZigBee шлюза и сървъра за приложения

Както е показано на фиг. 6, когато сървърът за приложения трябва да изпрати съобщение до Android-базираното приложение, той изпраща съобщението чрез HTTP POST до FCM сървърите. FCM сървърите насочват съобщението към устройството, т.е. към ZigBee шлюза. След като съобщението бъде получено, в приложението на шлюза се създава „намерение за излъчване“ (Broadcast Intent), което е регистрирано в FCM, за да получава съобщенията. След като съобщението или командата бъдат получени, те ще бъдат изпратени до ZigBee координатора за изпълнение.

В) Събиране и управление на данни от WSN, базирани на клъстери

Работата включва и наблюдение и управление на ZigBee устройства, базирани

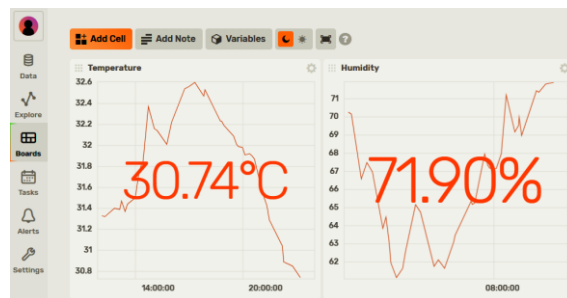
на клъстери. Подходът, базиран на клъстери [3], е полезен в сценарии на системи за домашна или сградна автоматизация, където се използват различни видове устройства, като сензори, осветление, задвижващи механизми, климатизация и др. Всеки клъстер ще разполага с конфигурируеми набори от команди, които могат да се използват за управление на Zigbee-съвместими устройства, показани на фиг. 7. Използвайки подхода, базиран на клъстери, можем също така да се осигури свързване между сензор и изпълнителен механизъм, за да се автоматизира необходимото действие, напр. ако клъстерно устройство от пожарен сензор е свързано с алармено клъстерно устройство, тогава всеки път, когато пожароизвестително устройство открие пожар, то автоматично ще го докладва на аларменото клъстерно устройство, използвайки Zigbee метод за комуникация чрез директно адресиране.



Фиг. 7. Клъстерно базирана Zigbee мрежа

Г) Управление и визуализация на данни

Според предназначението на безжичната сензорна мрежа и системата може да се разработят и подходящи веб-базирани графични потребителски интерфейси (GUI) за WSN. Тези GUI предоставят веб-базиран интерфейс за наблюдение и управление на цялата WSN мрежа. Пример за такъв, разработен към представената система, е показан на фиг. 8.



Фиг. 8. Веб-базиран графичен потребителски интерфейс за безжичната сензорна мрежа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всички разгледани системни компоненти са проектирани за поддръжка на наблюдение и управление в реално време, използвайки безжични технологии. Предложеното решение може да предостави опции за управление и конфигуриране локално на ниво устройство. Проектираният хардуер на шлюза има възможност за локално регистриране на данни, използвайки интерфейс за SD карта памет. Веб-базираното въвеждане в експлоатация и свързване на възлите е проектирано съгласно спецификацията на протокола ZigBee.

В доклада са разгледани хардуерния дизайн, проектирането на безжичен мултипротоколен шлюз и софтуерната рамка, позволяващи наблюдение и управление на крайни устройства/рутери и др. в сензорни мрежи. Разработената платформа е генерична и независима от приложната област и позволява свързване от всяко място и по всяко време към данни от разположени на място сензорни мрежи чрез интернет. Съществуващите хардуерни платформи и софтуерна рамка могат да бъдат направени енергийно съобразени. Като бъдеща работа следва да се разработят и добавят механизми за самоподдържащи се мрежови елементи от крайни устройства, рутери, шлюзове и др., включващи събиране на енергия от слънчева, топлинна и вибрационна енергия, където е приложимо, за захранване на тези устройства и оптимизиран софтуер за ефективно използване на тази налична енергия.

Благодарности: този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Разработка и изследване на интелигентни методи за мониторинг и управление на IoT/5G-базирани комуникационни платформи и приложения“, договор НИП2025-17/2025 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Wu, K. Chen, L. Wang, K. Ren and M. Han, "Overview of Wireless Sensor Network Technology and its Applications," 2025 IEEE 12th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2025, pp. 44-48, doi: 10.1109/ITAIC64559.2025.11163274.
- [2] S. Shankar, G. Deepika, G. Devi, S. Ramesh, S. Srivastava and S. S. Kumar, "Development of Efficient Wireless Sensor Network for IoT Applications," 2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN), Salem, India, 2023, pp. 1419-1424, doi: 10.1109/ICPCSN58827.2023.00237.
- [3] Q. Zhang, X. Li, X. Li, R. Ma, Z. Wang and L. Dang, "Design of Wireless Sensor Network in Intelligent Distribution Network," 2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Lanzhou, China, 2022, pp. 227-232, doi: 10.1109/AEES56284.2022.10079327.
- [4] Y. Liang and X. Luo, "Design of Smart Home System Based on ZigBee Technology," 2024 IEEE First International Conference on Data Intelligence and Innovative Application (DIIA), Nanning, China, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/DIIA62678.2024.10871311.
- [5] M. Zhou, H. Yang, X. Xu and G. Ju, "A smart home lighting system based on ZigBee communication," 2021 International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDS), Hangzhou, China, 2021, pp. 218-221, doi: 10.1109/ISPDS54097.2021.00049.
- [6] H. Khujamatov, B. Maxkamov, N. Akhmedov and A. Lazarev, "Development of a security system based on Zigbee devices," 2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICISCT55600.2022.10147017.
- [7] "Firebase Cloud Messaging" <https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging>
- [8] IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4) IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4) <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [9] F. D. Stefani, P. Gamba, E. Goldoni, A. Savioli, D. Silvestri and F. Toffalini, "REnvDB, a RESTful Database for Pervasive Environmental Wireless Sensor Networks," 2010 IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Genoa, Italy, 2010, pp. 206-212, doi: 10.1109/ICDCSW.2010.56.
- [10] ZigBee Alliance, Understanding ZigBee Gateway: How ZigBee extends an IP network, Sept. 2010.
- [11] B. Burke. RESTful Java with JAX-RS. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2009.
- [12] Leonard Richardson and Sam Ruby. RESTful Web Services. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2009.
- [13] I. Kandov, G. Goranov, A. Aleksandrov and J. Kanev, "Web based system for control and measure parameters of sensor network," 2014 Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET), York, UK, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITHET.2014.7155672.
- [14] I. Kandov, A. Aleksandrov and G. Goranov, "The Use of Different SQL Servers for Resource Optimization on Mobile Sensor Systems," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513666.