

**ПРЕЦИЗНО ИЗМЕРВАНЕ НА ИНДУКТИВНОСТИ И
КАПАЦИТЕТИ В РАДИОЧЕСТОТНИ СХЕМИ****М. Томов¹, П. Когнас², Б. Арсов³, С. Садинов⁴**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. Tomov¹, P. Kogias², B. Arsov³, S. Sadinov⁴**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, borisar-
sov45@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 проб-

лем 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

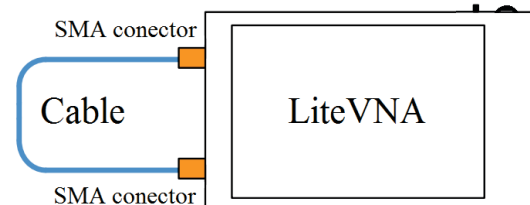
За провеждане на настоящото изследване са използвани основно два измервателни уреда. Единият е стандартен RLC (фиг.1а) измервателен мултиметър, който се използва за измерване на индуктивности, капацитети и съпротивления и който служи за сравнителна база за измерването с втория уред – портативен векторен 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.



Фиг. 1. Измервателни уреди:
а) RLC; б) LiteVNA

В случаи на еднопортови устройства (двуполусници) 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 50Ω чисто активен товар [7].



Фиг. 2. Калибриране „THROUGH“ на Векторен мрежов анализатор LiteVNA

В случаите, когато се измерват параметри на двупортово устройство (четириполусник) 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 μ_0 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:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (3)$$

Където μ_0 е диелектричната проницаемост на вакуума, μ_0 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].

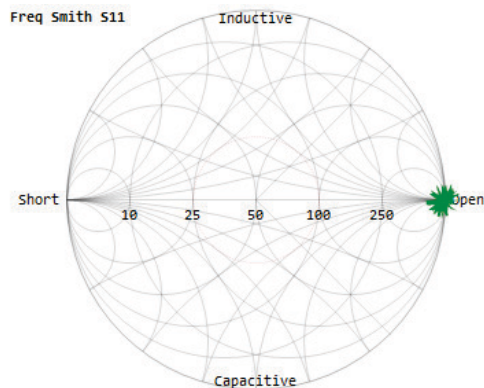
За представената тук методология на измерване е избран честотен диапазон от 20 MHz около работна честота от 50 MHz, т.е. долна гранична честота: 40 MHz и горна гранична честота 60 MHz.

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 защитващи 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 защитването на измервания елемент в подходящите точки за галваничен контакт съгласно горните разсъждения.

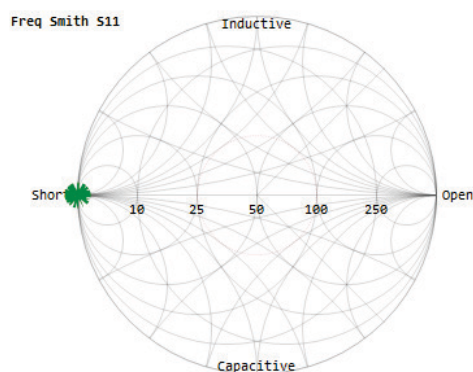


Фиг. 3. Калибриране към отворена верига

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 защитване от електродите. Резултатът от това калибриране е показан на фиг. 4.

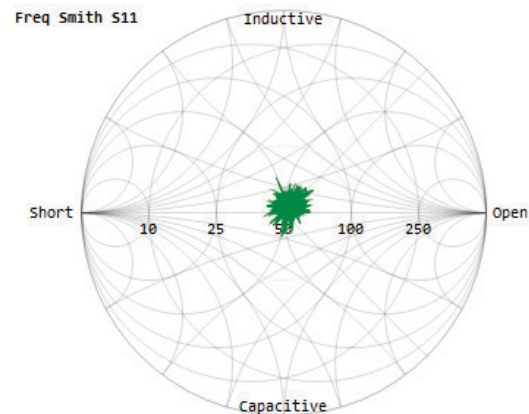
За калибриране към чисто активен товар 50Ω , се използва еталонен безиндуктивен резистор с активно съпротивление 50Ω . Защитването на електродите за клемите на резистора става максимално близко до корпуса му за да бъде обхванат паразитния капацитет, който съществува между клемите на всеки градивен елемент.

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 50Ω 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 $40\text{MHz}-60\text{MHz}$, 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 $R=900 \Omega$, дебелина на медния проводник $d=0.13 \text{ mm}$, диаметър на сърцевината на бобината: $D=12\text{mm}$.

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 галванични 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 Analysis- 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.