

**ОЦЕНКА НА РАДИОЧЕСТОТНИ ЕМИСИИ ОТ ЕЛЕКТРИЧЕСКА ДЪГА
С ПОМОЩТА НА РАДИАЛНА МАГНИТНА СОНДА****OBSERVATIONS OF ELECTRIC ARC RF-EMISSIONS
WITH RADIAL H-FIELD PROBE****Kliment Angelov**

Technical university of Sofia

Svetoslav Kremenski

Technical university of Sofia

Abstract

In this study an observation of RF-emissions caused by electric arc has been made. With specially designed and implemented radial H-field probe a number of tests were made. The purpose is to determine the spectral state in case of continuous electric arc with different currents compared to the background RF spectrum in case of absence of arc. The results can be useful in the process of designing of communication equipment that works near eventual powerful electric arc sources such as welding devices, railway and other electric transport vehicles, etc.

Keywords: Electric Arc, RF Spectrum, Welding Radiation, Electric Arc Emissions.

ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата дъга е интересен физичен феномен, който се състои в протичането на електричен ток през диелектрична и/или относително слабо проводяща при нормални условия веществена среда, която е във високо енергетично състояние, характеризиращо се със наличието на много йонизирани частици (плазма) [1]. Тя има сериозно *електромагнитно излъчване* (ЕМИ), което е в рамките на целия честотен спектър – от *свръхдълговълновия* (СДВ) обхват до колебания с дължина на вълната по-малка от няколко пикометра. Мощните електрически дъги, като например мълниите, са причинители на твърдо и меко *ултравиолетово* (UV) лъчение, Рентгенови лъчи (X-Ray) и един от малкото източници в природата, освен естествената радиоактивност, на радиация с гама лъчи [2][3][4].

В ежедневието на съвременния човек, електрическите дъги са чести събития, поради наличието навсякъде около него на системи, използващи електроенергията за различни цели – източник на енергия, пренос на информация и др. Докато някои от тях, като например искренето на прекъсвач за битово осветление, са доста слаби и не предизвикват сериозни ЕМИ, то други са значителни по сила, формират се при протичането на десетки и стотици амperi

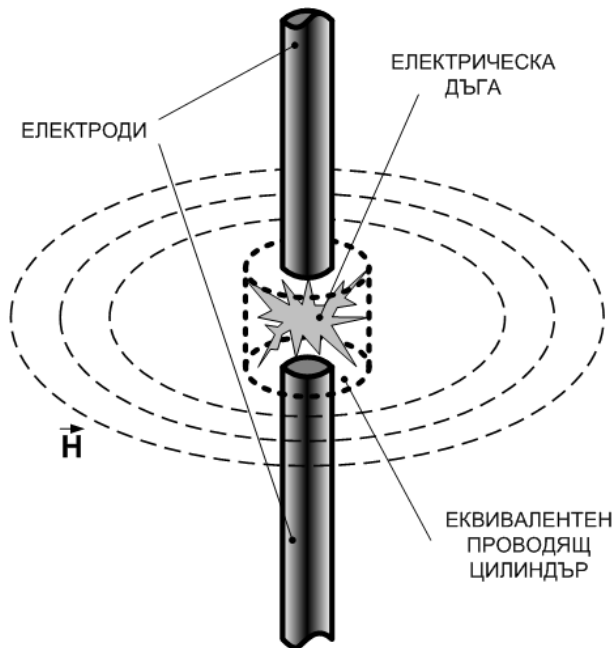
ток и имат големи ЕМИ. Една част от тези мощни електрически дъги са целенасочено формирани при конкретни индустриални процеси, каквито са електродъговото заваряване и електродъговите пещи, използвани в металургията. Друга част са инцидентно получени, каквото е например моментното искрене на пантографа на локомотивите, трамваите и др. електопревозни средства.

Поради факта че ЕМИ от електрическите дъги засяга и обхващат на съвременните комуникационни системи, изследването на подобни въпроси представлява интерес. В настоящата статия, с помощта на специално разработена радиална магнитна сонда, е направена оценка на ЕМИ от волтова дъга, поддържана с ток от порядъка на 100А, в обхвата 10 kHz ÷ 100 MHz, където работят някои съвременни комуникационни системи за железопътния транспорт.

ИЗЛОЖЕНИЕ

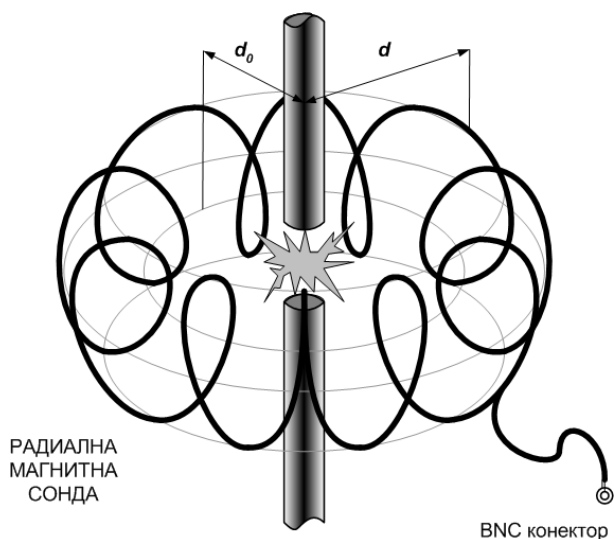
Съпътстващият електрическата дъга плазмен канал може да се разгледа като еквивалентен на проводник за електрическия ток, протичащ между двата електрода, формиращи волтовата дъга. Този канал притежава свои параметри, като с най-общо приближение може да се

разглежда като цилиндър (фиг. 1). По този начин той се явява естествено продължение на електродите и посоката на основните протичащи токове съвпада с оста на този цилиндър. Възбуденото магнитно поле, според правилото на дясната ръка, ще бъде със силови линии лежащи в равнина, перпендикулярна на оста на цилиндъра.



Фиг. 1. Еквивалентен вид на електрическа дъга

При така описаното разпределение на магнитното поле е възможно то да се оценява с помощта на радиална магнитна сонда, като показаната на фиг.2. Тя може да се реализира с коаксиален кабел с характеристично съпротивление 50Ω , което би осигурило добро съгласуване към входа



Фиг. 2. Радиална магнитна сонда

на спектрален анализатор. Кабелът прави спираловидно обхождане на повърхнината на тороид, като активното му жило в края е свързано с ширмовката в началото. Радиалното разпределение на получения соленоид позволява да се постигне усредняване на излъчването в напречната равнина на плазмения канал, предизвикано от електрическата дъга. От друга страна, наличието на повече навивки води до повишаване чувствителността на сондата, като при n на брой навивки индуцираното от магнитното поле напрежение би било[5]:

$$U(f) = 2\pi f \cdot B(f) \cdot S \cdot n . \quad (1)$$

Във формула (1) с f е означена честотата на токовата съставка $I(f)$ създаваща магнитната индукция $B(f)$, а S е площта на радиалното сечение на една навивка на тороидалния соленоид. За магнитната индукция е в сила зависимостта[5]:

$$B(f) = \frac{\mu_0 I(f)}{2\pi d} , \quad (2)$$

където d е разстоянието от оста на електродите до центъра на напречното сечение на тороидалния соленоид (приема се, че оста на електродите минава през центъра на тороида - вж. фиг. 2).

За опростяване на практическото реализиране на радиалната магнитна сонда, всяка една от навивките на соленоида се приема да се изпълнява с еднаква дължина L . При достатъчно големи стойности на n може да се пренебрегване промяната на площта, следствие на триизмерното изкривяване, и може да се запише:

$$S = \frac{L^2}{4\pi} , \quad (3)$$

а за разстоянието d :

$$d = d_0 + \frac{L}{2\pi} . \quad (4)$$

В горната формула (4) с d_0 е означен вътрешният радиус на тороида.

В таблица №1 са дадени основните параметри на реално реализирана радиална магнитна сонда за провеждане на експериментални изследвания. На фиг. 3 е показана снимка на нейния общ изглед.

Таблица № 1. Основни параметри на реализирана радиална магнитна сонда за експериментални изследвания

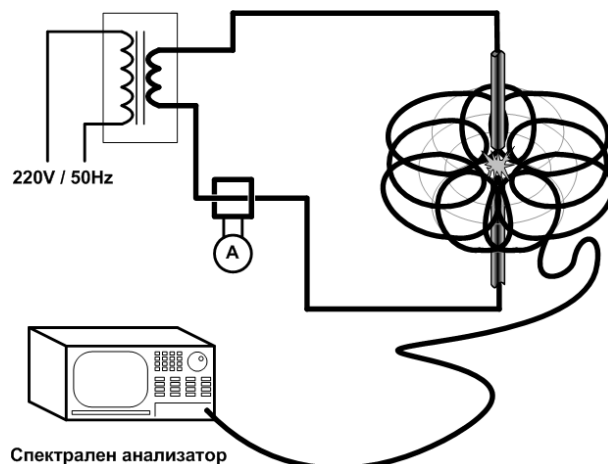
Параметър	Означение	Стойност	Мерна единица
Брой навивки	n	10	-
Дължина на навивката	L	1	m
Среден радиус на тороидалния соленоид	d	0,55	m
Вътрешен радиус на тороидалния соленоид	d_0	0,395	m
Площ на напречното сечение на една навивка	S	0,0796	m ²



Фиг. 3. Снимка на реализирана радиална магнитна сонда за експериментални изследвания

При реализиране на експериментите за източник на електрическа дъга е използван мощен трансформатор, който може продължително да захранва плазмения

канал с променливо напрежение с честота 50Hz. Класическият агрегат за променливотоково електродъгово заваряване е с подходящи параметри за осигуряване на необходимия ток. На фиг. 4 е показана схема на експерименталния стенд, а в таблица №2 са поместени данни за токовете, които се поддържат от агрегата в работен режим и при чисто късо съединение (съответно с и без електрическа дъга между електродите). Захранването на електрическата дъга с напрежение с промишлена честота поставя теста до условия, близки освен до тези на класическото електродъгово заваряване, така и до някои реални случаи, като например искренето на пантографите на локомотивите. Напрежението в тяхната контактна мрежа е 25kV/50Hz, а токът може да достигне до няколко килоампера [6].



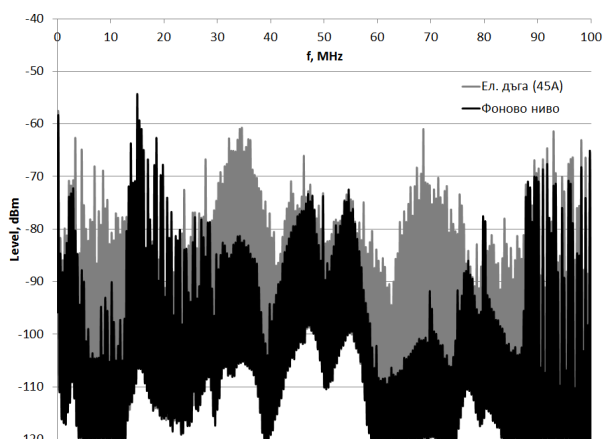
Фиг. 4. Схема на експерименталния стенд

Таблица № 2. Поддържани в плазмения канал токове

Ниво на вариране на тока	1	2	3
Ток на късо съединение (без електрическа дъга)	50A	120A	280A
Работен ток (с електрическа дъга)	45A	70A	130A

На фиг. 5 са показани отчетените спектри в честотния обхват 10kHz ÷ 100MHz в случай на поддържана електрическа дъга с ток 45A и при липса на смущаващи излъчвания. По този начин тази спектрална картина, която включва в себе

си само далечни излъчвания, се явява като фоново ниво, което е прието за референтно при сравнителното изследване.



Фиг. 5. Спектрални картини при електрическа дъга с ток 45А в канала и липса на излъчване

Диапазонът на анализ е избран в понискочестотната област поради следните основни причини:

- за да се намали резонансният характер на радиалната магнитна сонда е необходимо тя да е с по-малки размери на контурите, от дължината на вълната за изследваните честоти. Трябва да се отбележи, че сондата се явява затворен контур и в равнината на торида, но тя е разположена успоредно на магнитните силови линии на породеното от електрическата дъга ЕМИ и индукцията следва да е минимална;

- измерванията се правят в близката зона както на сондата, така и на източника, въпреки че установяването на втората е само по себе си трудна задача.

Според зависимостта [7][8]:

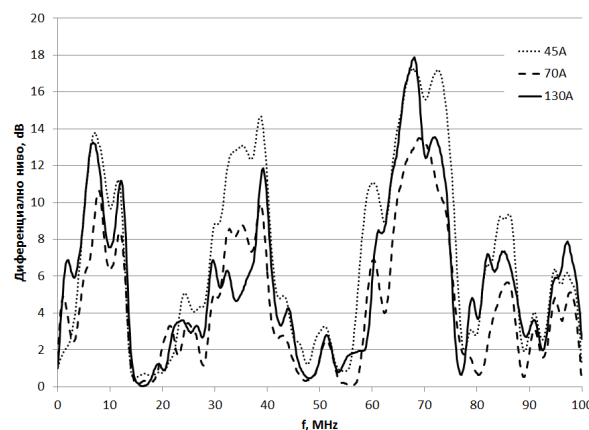
$$d < \frac{2.D^2}{\lambda} \quad (5)$$

е необходимо да се знае максималният размер D на излъчващия обект, който в случая не може точно да се дефинира;

- в изследвания обхват действат важни комуникационни системи, като евробализите [9][10] при железопътния транспорт, чиято работа може да бъде повлияна от подобен тип интерференции.

Експериментално отчетените спектрални картини имат шумов характер и за количествена оценка на изменението им е необходимо да се направи плаващо усредняване на получените данни.

На фиг. 6 е показана диференциалната промяна на усреднената спектрална картина спрямо фоновото ниво за волтовите дъги, поддържащи трите отразени в таблица №2 работни тока през плазмения канал.



Фиг. 6. Диференциална промяна на усреднените спектрални картини

Забелязва се, че както при ток 45А, така при ток 130А в плазмения канал, внесените смущения от ЕМИ на електрическата дъга имат по-голямо ниво спрямо тези при ток 70А. В таблица №3 са отразени най-големите усреднени нива на внесени смущения и честоти, които се получават при трите работни тока в плазмения канал.

Таблица № 3. Максимални нива на внесени смущения

Ток в плазмения канал	Максимално ниво на внесените смущения	Честота, при която се отчита максимално ниво на внесените смущения
А	dB	MHz
45	17,28	68,0
70	13,49	69,2
130	17,88	68,0

Разликата в нивата на внесените смущения при малки и големи токове в плазмения канал спрямо тези при умерени токове може да се обясни със качеството на електрическата дъга. При малък ток тя е нестабилна и по-трудно поддържаща се, което води до увеличаване на ЕМИ, а при големи стойности на тока тя се получава твърде мощна, разширява се проводящият цилиндър и отново се наблюдава покачване на ЕМИ. Този ефект обаче би следвало да зависи от множество фактори, между които вида, и размерите на електродите. Конкретните експериментални изследвания са реализирани с масово използвани електроди $\varnothing 3,25$ mm, за които ток 70А се явява оптимален и качеството на дъгата позволява формиране на добър проводящ канал, който има по-ниски нива на ЕМИ.

От друга страна, от данните, изобразени на фиг. 6, е видно, че има голямо сходство в честотното разпределение на ЕМИ в изследвания обхват, независимо от тока в плазмения канал.

С помощта на експериментално получените данни може да се определи относителното токово разпределение в зададения за изследване честотен обхват. От приетите на входа на спектралния анализатор нива по мощност могат да се изчислят напреженията върху товарния импеданс, равен на характеристичния $Z_c = 50\Omega$, според зависимостта:

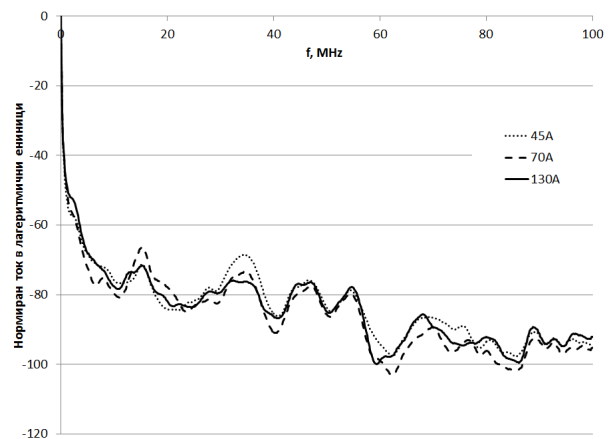
$$U(f) = \sqrt{P(f) \cdot Z_c} \quad (6)$$

където $P(f)$ е мощността, която е свързана с нивото по мощност $P_{dBm}(f)$ по формулата:

$$P(f) = 10^{\frac{P_{dBm}(f)}{10}} \quad (7)$$

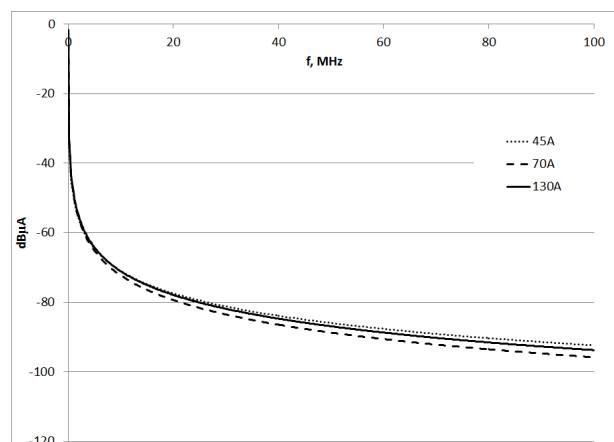
От полученото по (6) напрежение и чрез използване на зависимости (1) и (2) може да се получат токовете, разпределени по честоти. На фиг. 7 е показано такова разпределение в логаритмични единици за трите работни тока в плазмения канал, като предварително е извършено нормиране. Наблюдава се сходство в кривите, което потвърждава подобното токово

разпределение в електрически дъги с различни поддържащи токове в плазмения канал.



Фиг. 7. Нормирано токово разпределение в плазмения канал в изследвания честотен обхват

На фиг. 8 са показани логаритмични апроксимации на нормираните токови разпределения в зададения честотен диапазон за трите работни тока, поддържани в плазмения канал.



Фиг. 8. Апроксимации на нормираното токово разпределение

Аналитичният израз на тези апроксимации в общ вид се дава със следната формула:

$$I(f)_{[dB\mu A/A]} = a \ln(f_{[MHz]}) - b \quad (8)$$

като честотата f се задава в MHz, а токовото разпределение $I(f)$ се получава в dBμA/A. В таблица №4 са отразени стойностите на коефициентите a и b за конкретните токове, поддържани в

плазмения канал на електрическата дъга по време на експерименталните изследвания. Те бяха проведени в лабораторни условия на територията на Технически университет – София.

Таблица № 4. Стойности на коефициентите a и b от формула (8)

Ток в плазмения канал	a	b
45А	-9,291	49,579
70А	-10,220	48,725
130А	-9,869	48,289

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От получените експериментални данни, както и от прякото наблюдение на процесите при провеждане на тестовете, могат да се обособят редица изводи и констатации, по-важните от които са:

- реализираната радиална магнитна сонда позволява измерването на ЕМИ в близката зона на електрическа дъга;

- отчетено е силно намаляващо с покачване на честотата токово разпределение, предизвикващо ЕМИ, в диапазона 10kHz ÷ 100MHz;

- Наблюдава се зависимост на ЕМИ от качеството на електрическата дъга, като както при по-големи, така и при по-малки токове, хранващи плазмения канал, ЕМИ се увеличават;

- Качеството на електрическата дъга, респективно ЕМИ, зависят от параметрите на електродите, токът хранващ плазмения канал, околната среда и т.н.;

- Целесъобразно е да се проведат следващи изследвания за определяне на ЕМИ в зависимост от качеството на електрическата дъга.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Perry, W.F., Electrostatic Discharge, ABB Research Center Baden-Daetwil, Switzerland, Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press Inc., San Diego, Ca, 1995.
- [2] Perez R., Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press Inc., San Diego, Ca, 1995.
- [3] Базелян Е.М., Ю.П Райзер, Физика молнии и молниезащита, Физматлит, Москва, 2001.
- [4] Prostack, Sergio (April 11, 2013). "[Scientists Explain Invisible 'Dark Lightning'](#)". Sci-News.com. Retrieved July 9, 2013.
- [5] Фархи, С., С. Папазов, Теоретична електротехника, Техника, 1990, част 1.
- [6] Подсистема електрозахранване на тягов подвижен състав 25kV,50Hz. Контактна система. Токоснематели. Механично взаимодействие между токоснемателите и контактната мрежа, Техническа спецификация ТС-ЖИ 007/2006, Железопътна инфраструктура, 18.10.2006г.
- [7] Antenna Measurement Theory, Introduction to Antenna Measurement, Reprinted with the permission of ORBIT/FR Inc., www.orbitfr.com
- [8] Foegelle M. D., Antenna Pattern Measurement: Concepts and Techniques, Reprinted from Compliance Engineering, Annual Reference Guide 2002 • Copyright © 2002 Canon Communications LLC
- [9] Hatsukade S., A. Yamanaka, Calculation of Interference between Railway Traction Inverters and Balises, EMC'14, Tokyo, 2014.
- [10] ETSI EN 302 608 V1.1.1 (2007-12)

При реализирането на експерименталните изследвания в настоящата статия е използвана измервателна апаратура, предоставена от ТЕКОМА ENGINEERING Ltd, придобита с подкрепата на Оперативна програма „Развитие на конкурентоспособността на българската икономика“ 2007-2013, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейски фонд за регионално развитие и Националния бюджет на Република България по договор BG161PO003-1.1.05-0226-C0001.

Авторът, д-р маг. инж. Климент Н. Ангелов е главен асистент в катедра РКВТ при ФТК, ТУ-София. За контакти: kna@tu-sofia.bg.

Авторът, Светослав Кременски е редовен студент по специалност „Комуникационна техника“ към ФТК, ТУ-София.