

## Измерване параметрите на електростатичното поле на плоски диелектрици по безконтактен метод

Стефан Стефанов, Иван Милев, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

**РЕЗЮМЕ.** Интензитетът на електростатичното поле е универсален параметър за оценка на степента на електризация.

В доклада е описан принципът на действие на устройство за безконтактно измерване на интензитета на електростатичното поле на наелектризиран плосък диелектрик. Изведени са аналитични изрази за влиянието на сензора, внесен в електростатичното поле, върху точността на измерването.

Посочен е начинът за еталониране на измервателния уред.

### MEASUREMENT BY A NON-CONTACT METHOD OF THE ELECTROSTATIC FIELD PARAMETERS OF FLAT DIELECTRICS

**ABSTRACT.** The electrostatic field strength is a universal parameter for electrification degree evaluation.

The action principle of a device for non-contact measurement of the electrostatic field strength of electrified flat dielectric is described in the paper. Analytical expressions about the influence of the introduced in the electrostatic field sensor on the measurement accuracy are worked out.

The measurement instrument calibration method is specified.

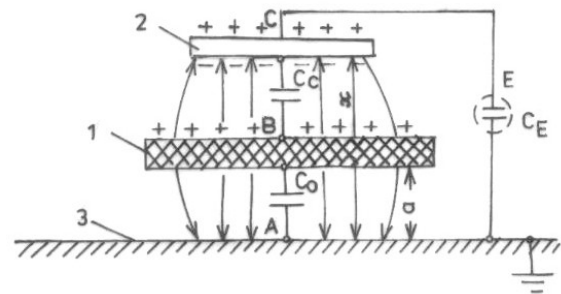
Съществуват различни методи за защита от статично електричество. Изборът на всеки един от тях зависи от конкретните условия, като преди всичко трябва да се оцени степента на електризация. Универсален параметър за оценка на степента на електризация е интензитетът на електростатичното поле. В редица случаи определянето на този параметър е силно затруднено. Така например при плоските диелектрици плътността на електростатичните заряди е неравномерно разпределена по цялата им повърхност. По тази причина потенциалът може да се дефинира точно само в дадена точка или област, след което се определя една обобщена стойност за цялата повърхнина. Освен това потенциалът зависи от разположението на диелектрика спрямо околните заземени конструкции, тъй като е функция на електрическия капацитет на диелектрика спрямо земя.

В настоящия доклад се предлага безконтактен метод за измерване на интензитета на електростатичното поле, който е лесно реализируем и е възможно да се постигне висока точност при измерването. Същността на метода се състои в измерване на индуцирания заряд на сензор, внесен в електростатичното поле, който заряд е пропорционален на измервания интензитет. Следва да се отбележи, че при измерване на интензитета зарядът трябва да бъде неизменен, за да не се изменя енергията на електростатичното поле.

Ако се приеме, че наелектризираният диелектрик 1 е зареден равномерно и повърхността му е екипотенциална, измерването на интензитета на електростатичното поле може да се извърши по безконтактен метод чрез електрометър Е с измервателна сонда (сензор) 2, съгласно показаната на фиг. 1. схема. На фиг. 1 с 3 е означена заземената проводяща повърхнина, спрямо която се отчита разпределеният капацитет  $C_0$  на заредения диелектрик спрямо земя, с  $C_C$  е означен капацитетът на плоския кондензатор, образуван между повърхността на

сензора и на заредения диелектрик, а с  $C_E$  – капацитетът на електрометъра.

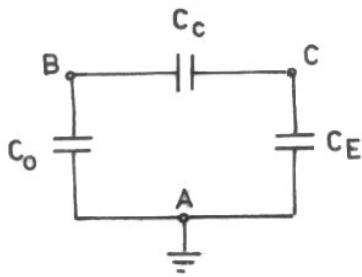
В качеството на електрометър може да бъде използван всеки измервателен апарат на напрежение с входно съпротивление не по-малко от  $10^{12} \Omega$  [1]. Най-простият от тях е волтметър от електростатичната система. Капацитетът на измервателния уред обикновено е известен. Капацитетът на съединителните проводници в повечето случаи може да се пренебрегне или непосредствено да се измери.



Фиг. 1.

Внасянето на сензора в електрическото поле на диелектрика води до деформиране на полето и до преразпределение на заряда между капацитетите  $C_0, C_C, C_E$ .

На фиг. 2 е показана еквивалентна схема на системата, която представлява паралелно включени към  $C_0$ , между точките А и В, на двата последователно свързани капацитети  $C_C$  и  $C_E$ .



Фиг. 2.

Първоначалният заряд на диелектрика, преди доближаване на сензора към него, се определя с израза:

$$q_0 = C_e \cdot U,$$

където  $C_e = C_0 + \frac{C_C \cdot C_E}{C_C + C_E}$  е еквивалентният капацитет на системата спрямо земя, а  $U$  е напрежението между заредения диелектрик и земя.

Зарядът на диелектрика, измерен чрез сензора се определя с израза:

$$q_E = C_E \cdot U_E,$$

където  $U_E = U \cdot \frac{C_C}{C_C + C_E}$  е напрежението между изводите на електрометъра, а  $C_E$  е неговият капацитет.

За отношението на двата заряда се получава:

$$\frac{q_0}{q_E} = \frac{C_0}{C_E} + \frac{C_0}{C_C} + 1,$$

откъдето 
$$q_E = q_0 \frac{1}{\frac{C_0}{C_E} + \frac{C_0}{C_C} + 1} \quad (1)$$

За еднородна и изотропна среда интензитетът на електростатичното поле и повърхностната плътност на заряда, от гледна точка на тяхното измерване, са тъждествени, поради което равенство (1) добива вида:

$$E_E = E_0 \frac{1}{\frac{C_0}{C_E} + \frac{C_0}{C_C} + 1}, \quad (2)$$

където  $E_0$  е първоначалният интензитет на полето на наелектризирания диелектрик преди внасянето на сензора за измерване, а  $E_E$  е измереният интензитет посредством внесенния в полето сензор.

Входният капацитет на волтметрите от електростатичната система, използвани като електрометри, (например тип С 502 – руско производство) се изменя от 25 до 40 пF, а входното им съпротивление е  $10^{10} \Omega$  [2].

В такъв случай капацитетът на измервателния уред е много по-голям от този на заредения диелектрик спрямо

земя ( $C_E \gg C_0$ ) т.е.  $\frac{C_0}{C_E} \approx 0$ , при което уравнение (2) добива вида

$$E_E \approx E_0 \frac{1}{\frac{C_0}{C_C} + 1}. \quad (3)$$

При въвеждане на параметъра 
$$K = \frac{1}{\frac{C_0}{C_C} + 1} = \frac{C_C}{C_0 + C_C},$$

се получава:

$$E_E = k \cdot E_0. \quad (4)$$

В зависимост от разположението на диелектрика спрямо земя са характерни следните три случая:

а. Наелектризираният диелектрик е разположен на голямо разстояние от заземената повърхност (фиг. 1), при което може да се приеме, че електростатичното поле е еднородно. В този случай а)  $x$ , при което  $C_0 \ll C_C$ , а  $k \approx 1$ . В този случай от (4) следва, че

$$E_E \approx E_0. \quad (5)$$

б. Наелектризираният диелектрик е разположен в близост до заземената повърхност, т.е. а)  $x$ , при което  $C_C \ll C_0$ , а  $k = 0$ . От (4) следва, че  $E_E = 0$ .

В този случай електростатично поле от външната страна на заземената повърхност не съществува.

в. В общия случай, когато разстоянието  $x$  е съизмеримо с  $a$ , и капацитетът  $C_C$  е съизмерим с  $C_0$  то:

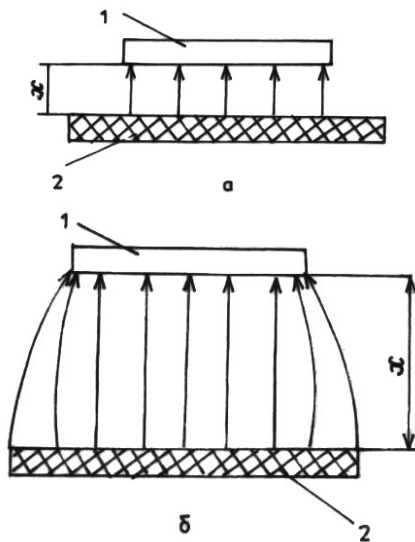
$$k = \frac{1}{\frac{C_0}{C_C} + 1} \text{ и } C_C = \frac{\epsilon_0 \cdot S_e}{x}, \text{ откъдето}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{C_0}{C_C} + 1 = \frac{C_0 x}{\epsilon_0 S_e} + 1. \quad (6)$$

В случая  $\epsilon_0$  е диелектричната константа, а  $S_e$  е ефективната повърхност на измервателния електрод (сензор), която зависи от разстоянието  $x$  до заредената повърхност.

На фиг. 3 е показана картината на линиите на електростатичното поле при различни стойности на разстоянието  $x$ , където: 1 е сензорът, а 2 – наелектризираният диелектрик. При малки разстояния  $x$  (фиг. 3а) ефективната повърхност на сензора е равна на геометричната му повърхност, т.е.  $S_e = S$ , а при големи разстояния  $S_e) S$  (фиг. 3б).

При кръгла форма на сензора  $S_e = k_e \cdot S$ , където  $S$  е повърхността на сензора, а  $k_e$  - коефициент на повърхностна ефективност.



Фиг. 3.

С приближение може да се запише, че  $S_e = \frac{\pi}{4}(d+x)^2$ , при което

$$k_e = \frac{\frac{\pi}{4}(d+x)^2}{\frac{\pi}{4}d^2} = \left(1 + \frac{x}{d}\right)^2, \quad (7)$$

където  $d$  е диаметърът на сензора с кръгла форма. При това равенство (6) добива вида:

$$\frac{1}{k} = \frac{C_0 \cdot x}{\epsilon_0 \cdot k_e \cdot S} + 1 = \frac{C_0 \cdot x}{\epsilon_0 S \left(1 + \frac{x}{\sqrt{\frac{4}{\pi} S}}\right)^2 + 1},$$

$$\text{или } \frac{1}{k} = \frac{C_0 \cdot x}{\epsilon_0 \frac{\pi d^2}{4} \left(1 + \frac{x}{d}\right)^2 + 1}. \quad (8)$$

Зависимостта  $\frac{1}{k} = f(x)$  при  $C_0 = const$  и  $d = const$  приема екстремална стойност, когато  $x = d$ , т.е.

$$\left(\frac{1}{k}\right)_{max} = \frac{C_0}{\epsilon_0 \pi d} + 1. \quad (9)$$

При спазване на условието  $x = d$  от (9) може да се определи коефициентът  $k$ , който има максимална стойност и е постоянен по големина. За този коефициент от (4) се определя интензитетът  $E_0$ .

Въз основа на изложения метод може да се разработи устройство за безконтактно измерване на интензитета на електростатичното поле, принципът на действие на което се състои в това, че индуктираният върху сензор заряд се

подава на преобразувател на сигнал, който се усилва и регистрира от стрелкови уред.

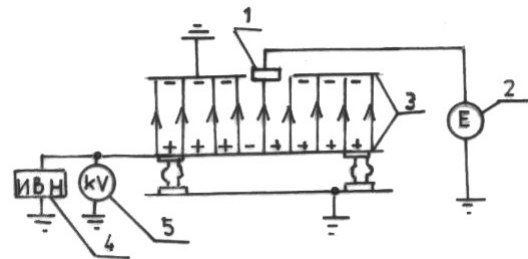
Еталонирането на уреда се извършва в хомогенно поле. Лабораторната постановка за еталониране на електрометри за определяне на интензитета по безконтактен път при плоски диелектрици се състои от плосък кондензатор с възможност за промяна на разстоянието между електродите му. Целта на еталониране на уреда е при зададено разстояние между електродите да се определи зависимостта между измерения интензитет  $E_E$  на полето и действителния  $E_0$ .

Градуировъчните характеристики на уреда се получават чрез построяване на зависимостта  $E_E = k \cdot E_0$ .

Моделирането на наелектризиран диелектрик с помощта на проводяща повърхнина не позволява да се възпроизведе картината на полето от зарядите на статично електричество, тъй като повърхността на диелектрика не е еквипотенциална, обаче за практически цели такава градуировка осигурява получаването на резултати от измерванията с достатъчна точност.

Схемата на лабораторната постановка е представена на фиг. 4. Съставните елементи в нея са: 1 – сензор; 2 – електрометър; 3 – електроди на плосък кондензатор; 4 – източник на високо напрежение; 5 – киловолтметър.

При еталонирането е необходимо заземяване на металните части на постановката и на измервателния уред, а електродът, на който се подава напрежение, трябва да бъде надеждно изолиран. Необходимо условие при еталонирането е спазване на определено разстояние между сензора на уреда и изолираната метална плоча, на която се подава напрежение.



Фиг.4.

Друго важно условие е да има подобие в повърхностния контур на обекта и на металното устройство (плоча за плоските диелектрици, сфера при сферичните и т.н.).

Също така токът на късо съединение в случай на допир до изолираното метално устройство да бъде по-малък от 1 mA с оглед електробезопасността на постановката.

При еталонирането на уреда напрежението на източника се изменя в съответствие с обхвата на измервателния уред и се фиксират съответните показания на електрометъра при различни разстояния до сензора.

При наличие на изчислителни данни за стойностите на  $E_0$ ,  $E_E$  и  $k$  при различни стойности на  $x$  и  $C_0$  определени по описания вече метод, не е необходимо опитно еталониране на уреда.

Големината на интензитета  $E_0$  служи за оценка на енергията на искровия разряд при определен капацитет.

$$\text{Енергията } W = \frac{q_0^2}{2C_0} = \frac{(\epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S)^2}{2C_0}. \quad (10)$$

При измерване интензитета на движещи се заредени тела (транспортни ленти) се поставя допълнително ограничаващо условие относно времеконстантата на затихване на уреда за получаване на по-точни измервания:

$$\tau = C_V R_V \left( \frac{2\ell}{v} \right), \quad [3] \quad (11)$$

където  $C_V$  е входящият капацитет на уреда, F;

$R_V$  -входното съпротивление на уреда,  $\Omega$

$\ell$  -ширината на лентата, m;

$v$  -скорост на лентата, m/s.

Към доклада могат да се направят следните изводи:

1. Предлага се безконтактен метод за измерване на интензитета на електростатичното поле на заредени плоски диелектрици, като е изследвана зависимостта между измервания интензитет  $E_E$  и интензитета на полето  $E_0$  преди внасяне на сензора в него. Изследвано е влиянието на капацитета между повърхността на сензора и повърхността на заредения диелектрик

$C_C$  и на капацитета на измервателния уред  $C_E$  върху точността на измервания интензитет  $E_E$ .

2. Изведен е аналитичен израз за коефициента  $k$  в уравнение  $E_E = k \cdot E_0$ . Доказано е, че този коефициент зависи, както от разпределения капацитет на заредения диелектрик спрямо земя  $C_0$ , така и от диаметъра  $d$  на сензора с кръгла форма, което пряко влияе върху точността на измервания интензитет  $E_E$ .
3. Предложена е методика за градуиране на измервателен уред за измерване на интензитета на електростатичното поле на плосък зареден диелектрик.

## Литература

- Максимов Б. К., В. А. Обух. *Защита от статическое электричества*. М., 1982.
- Илюнин К. К., Д. И. Леонтьев, Л. И. Набебина и др. *Справочник по электроизмервателным приборам*. ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Л., 1983.
- Толстомятов В. Н., В. Дядова. *Особенности при измерването на нивото на статичното наелектризиране при производство на листови и рулонни материали*., Энергетика, кн. 9, 1978.