### УДК 537.29

## REGULATIONS OF ELECTRIC FIELD OF THE HIGH-VOLTAGE COIL BY MEANS OF DIELECTRIC PROFILING

#### V. Brzhezytskyi, M. Laposha, I. Maslyuchenko, O. Protsenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnical Institute"

Key words:ABSTRACTElectric fieldThis article inInduced potentialthe coil by mElectric potentialframework wDielectric profilingmethod. TheSimplex methodregulation ofArticle history:of the inducedReceived 12.01.2016of an internalReceived in revised formare presented.02.02.2016±1 % and malAccepted 16.02.2016±1 % and malPotential of thecreation of costable in the estable in the e

brzhezitsky@mail.ru

This article investigates the regulations of electric field of the coil by means of profiling a surface of its dielectric framework with the application of a stepwise simplex method. The technique and algorithm for electric field regulation of the coil are offered. The results of distribution of the induced and electric potentials for the received profile of an internal surface of an insulating framework of the coil are presented. The received divergence of the induced and electric potentials does not exceed the admissible value of  $\pm 1$  % and makes  $\Delta \psi = -0.9858$  % of the maximum value of potential of the coil. The obtained results can be used for the creation of coils which value of inductance would be highly stable in the expanded ranges of frequencies.

# РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КОТУШКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОФІЛЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИКА

### В.О. Бржезицький, М.Ю. Лапоша, І.М. Маслюченко, О.Р. Проценко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

У статті досліджено регулювання електричного поля котушки за допомогою профілювання поверхні її діелектричного каркасу з використанням послідовного симплекс-методу. Запропоновано методику й алгоритм регулювання електричного поля котушки. Наведено результати розподілення індукованого й електричного потенціалів для одержаного профілю внутрішньої поверхні ізоляційного каркасу котушки. Одержане розходження індукованого та електричного потенціалів не перевищує допустимого значення  $\pm 1$  % і становить  $\Delta \psi = -0,9858$  % від максимального значення потенціалу котушки. Результати можуть бути використані для створення котушок, значення індуктивності яких були б високостабільними в розиирених діапазонах частот.

**Ключові слова:** електричне поле, індукований потенціал, електричний потенціал, діелектрик, профілювання, симплекс-метод.

**Постановка проблеми.** Однією з особливостей розвитку техніки високих напруг в останні 15—20 років є перехід до широкого застосування в дослі-

*— Scientific Works of NUFT 2016. Volume 22, Issue 2 — 173* 

дженнях різних методів розрахунку електричних полів. Це обумовлено, з одного боку, тим, що з'явилися можливості масового використання відповідної обчислювальної техніки, з іншого — різким зростанням вартості натурних високовольтних випробувань [1].

Подібні обставини виникають при розробці та виготовленні котушок індуктивності, які використовуються у високовольтних високочастотних фільтрах, схемах високих напруг і частот. При роботі котушок індуктивності на високих частотах їх ємнісні розподілені струми нейтралізують індуктивну складову струмів, що призводить до нестабільності характеристик котушок індуктивності в широкому діапазоні частот [2]. Для запобігання подібних явищ необхідно забезпечити узгодження розподілення електричного потенціалу в котушці з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу, при якому б забезпечувалась незалежна робота електричної та магнітної складових котушки індуктивності в розширеному діапазоні частот 50 Гц—10 МГц [3].

Аналогічні питання виникають при розробці котушок індуктивності, які використовуються в установках для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад [3]. До кола пов'язаних з цим питань належить регулювання розподілення електричного поля в ізоляційній конструкції котушки за допомогою профілювання границь розділу діелектриків, що є одним із ключових завдань у техніці високих напруг при створенні високовольтних установок і пристроїв [4].

При модернізації установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад за сучасними міжнародними стандартами [5] значна увага приділяється удосконаленню її індуктивних елементів, в зв'язку з чим виникає проблема регулювання електричного поля котушки за допомогою профілювання діелектрика.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання регулювання електричного поля за допомогою профілювання діелектрика має важливе значення не тільки для високовольтних котушок, а й для подільників напруги, отримані результати регулювання якого свідчать про високу ефективність і стабільність характеристик даного методу регулювання електричного поля [6].

У [7] застосовано метод моделювання електричного поля для розрахунку максимальної напруженості та розподілення електричного потенціалу всередині сферичних пустот, які знаходяться в твердому діелектрику. Також у [7] досліджено ефект числа та розміру порожнин, відстані між електродами, діелектричної проникності й розташування порожнин в електричному полі.

У [8] за допомогою методу моделювання визначено розподіл електростатичного поля всередині діелектричних порожнистих тіл різних форм, результати якої були порівняні з результатами, отриманими за допомогою прикладного програмного забезпечення.

Розробки, запропоновані у [6—8], не можуть бути безпосередньо використані для регулювання електричного поля високовольтної котушки за допомогою профілювання діелектрика з урахуванням узгодження розподілення, індукованого магнітним полем, та електричного потенціалів за умовами [9]. Зважаючи на це, питання регулювання електричного поля котушки за допомогою профілювання діелектрика, розглянуте в даній статті, є актуальним. **Метою статті** є дослідження електричного поля котушки у випадку профілювання її ізоляційної конструкції і порівняння розподілення електричного та індукованого потенціалів котушки.

Викладення основного матеріалу. Розрахунок розподілення індукованого потенціалу проводиться на основі методу, який описано в [9], для «рівностороннього» соленоїда із загальною висотою H = 140 мм, діаметром  $2R_1 = 140$  мм і максимальним заданим (умовно) індукованим магнітним полем котушки потенціалом  $\psi_1 = 100$  В.

У результаті розрахунків, проведених у програмному середовищі Mathcad, було отримано залежність розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці, яка представлена на рис. 1 [9].



Рис. 1. Розподілення індукованого магнітним полем котушки потенціалу залежно від висоти *h* (рис. 2) соленоїдальної котушки

Для регулювання електричного поля проводився підбір профілю ізоляційного каркасу котушки, розрахункова модель якої представлена на рис. 2 та має такі параметри:

- *U*<sub>в.е.</sub> = 100 В — електричний потенціал верхнього електрода;

- *U*<sub>н.е.</sub> = 0 В — електричний потенціал нижнього електрода;

-  $R_1 = 70$  мм — зовнішній радіус ізоляційного каркасу котушки;

- *H* = 177 мм — загальна висота конструкції;

- *d<sub>m</sub>* = 378 мм — максимальний діаметр металевих кільцевих електродів;

- *R* = 9,5 мм — радіус округлення металевих кільцевих електродів.

- матеріал ізоляційного каркасу котушки — капролон (відносна діелектрична проникність  $\varepsilon_{\rm B} = 3,15$ );

- матеріал ізоляційних з'єднуючих кілець — капролон (відносна діелектрична проникність  $\varepsilon_{\rm B} = 3,15$ );

- матеріал металевих кільцевих електродів — Д16.

Між точками *С*, *D* зовнішньої циліндричної поверхні каркасу котушки виконана виточка канавки глибиною 0,3 мм для намотки обмотки соленоїда.

— Scientific Works of NUFT 2016. Volume 22, Issue 2 —



Рис. 2. Розрахункова модель котушки: 1 — ізоляційний каркас котушки; 2 — металеві кільцеві електроди; 3 — ізоляційні з'єднуючі кільця

Процес профілювання (пошук контуру внутрішньої поверхні) ізоляційного каркасу котушки проводиться таким чином: спочатку задаються (вузлові) точки внутрішньої поверхні ізоляційного каркасу котушки в системі r0z з координатами (r = 40 мм, z = 159 мм, r = 40 мм, z = 0), які з'єднуються прямою AB. Вибір вузлових точок здійснюється з урахуванням можливості технологічних засобів обробки заготовки ізоляційного каркасу котушки. На прямій AB розміщується 11 точок (по координаті z) з рівномірною розбивкою AB по висоті та проводиться пошук оптимуму за послідовним симплексним методом (ПСМ) розв'язання задач пошукової оптимізації з використанням двох факторів для кожної *i*-точки: координат  $r_i$  та  $z_i$  шуканої точки поверхні [10]. Слід зауважити, що використовується 18 факторів, оскільки пошукова оптимізація відбувається для 9 проміжних точок з координатами  $r_i$  та  $z_i$  (перша й 11-та точки збігаються з точками A, B).

Далі задаються початкові значення факторів оптимізації так, щоб вершини з відповідними даними дослідів утворювали регулярний симплекс [11] в *k*-факторному просторі.

Координати вершин у цьому випадку описуються матрицею виду [11]:

Наукові праці НУХТ 2016. Том 22, № 2

де *k* — кількість факторів; *i* — поточний номер фактора.

Матрицю реальних значень факторів  $A_{x_i}$  для проведення експерименту можна сформувати з виразу [11]:

$$A_{x_i} = x_{i,k+1} \cdot \Delta A_i + A_{0i} , \qquad (2)$$

де  $\Delta A_i$  — крок зміни *i*-го фактора;  $A_{0i}$  — середнє значення *i*-го фактора.

Визначення значення функції відгуку  $\Delta \psi = \psi_2 - \psi_1$  грунтується на порівнянні залежностей розподілення електричного потенціалу  $\psi_2$  між двома металевими кільцевими електродами по прямій *CD*, числові значення якого зможна знайти за допомогою програмного середовища Comsol Multiphysics [12] при заданні профілю внутрішньої поверхні каркасу котушки з координатами точок, розрахованими за (2), та розподілення індукованого потенціалу  $\psi_1$ , яке представлено на рис. 1.

Після проведення визначення значення функції відгуку  $\Delta \psi = \psi_2 - \psi_1$  в 21 точці на прямій *CD* (з відстанню між ними 7 мм) при h = 0; 7; 14; 21...140 (мм) проводиться зіставлення отриманих її значень з допустимим граничним значенням  $|\Delta \psi| \le 1$  В.

Вершина симплексу, що відповідає максимальному одержаному значенню функції відгуку  $\Delta \psi$  (якщо воно перевищує 1 В), відкидається і будується новий симплекс шляхом додавання однієї нової вершини до решти вершин [11]. Коефіцієнти  $x_{i,k+1}$  для визначення координат нової вершини визначаються за формулою:

$$x_{i,k+1} = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k} x_i - x_i^* , \qquad (3)$$

де  $\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i$  — середнє значення координат усіх вершин симплексу, крім

вершини з максимальним значенням функції відгуку  $\Delta \psi$ ;  $x_i$  — координати вершини з максимальним значенням функції відгуку  $\Delta \psi$ .

У результаті проведення серії оптимізаційних розрахунків були визначені координати точок внутрішньої поверхні ізоляційного каркасу котушки, які наведені в табл. 1.

№ точки	$r_i$ , MM	$Z_i$ , MM	
1	40,0	0,0	
2	40,0	11,0	
3	46,0	17,0	
4	60,0	20,9	
5	60,0	116,2	
6	56,0	117,5	
7	44,0	127,0	
8	40,0	141,0	
9	39,0	145,0	
10	38,0	157,0	
11	40,0	159,0	

Таблиця 1. Координати точок внутрішньої поверхні ізоляційного каркасу котушки

177

На рис. З наведений одержаний профіль внутрішньої поверхні каркасу котушки, який забезпечує узгодження розподілення індукованого й електричного потенціалів котушки та характеризується максимальним значенням функції відгуку  $\Delta \psi = -0.9858$  В (для h = 119 мм).



Рис. 3. Оптимізований профіль внутрішньої поверхні каркасу котушки

У табл. 2 подано розрахункові значення індукованого  $\psi_1$  та електричного  $\psi_2$  потенціалів, залежності яких представлено на рис. 4.

№ п/п	<i>h</i> , мм	$\psi_1, \mathbf{B}$	ψ2, Β	$\Delta \psi = \psi_2 - \psi_1, \mathbf{B}$
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	7,0	3,72307	3,39647	-0,3266
3	14,0	7,99940	8,21494	0,2155
4	21,0	12,6415	13,2312	0,5897
5	28,0	17,5601	18,3372	0,7771
6	35,0	22,6887	23,4982	0,8095
7	42,0	27,9771	28,7005	0,7234
8	49,0	33,3849	33,9385	0,5536
9	56,0	38,8778	39,2098	0,332
10	63,0	44,4255	44,5131	0,0876
11	70,0	50,0	49,8473	-0,1527
12	77,0	55,5744	55,2112	-0,3632
13	84,0	61,1221	60,6021	-0,52
14	91,0	66,6150	66,0128	-0,6022
15	98,0	72,0228	71,4167	-0,6061
16	105,0	77,3112	76,7140	-0,5972
17	112,0	82,4398	81,6970	-0,7428
18	119,0	87,3584	86,3726	-0,9858
19	126,0	92,0006	91,0277	-0,9729
20	133,0	96,2779	95,9506	-0,3273
21	140,0	100,0	100,0	0,0

Таблиця 2. Розрахункові значення індукованого і електричного потенціалів

У першій колонці табл. 2 вказані порядкові номери точок на прямій *CD*. У другій колонці таблиці вказана відстань *h* між шуканою точкою й точкою *C*.

У третій, четвертій і п'ятій колонках наведені розрахункові значення індукованого потенціалу  $\psi_1$ , електричного потенціалу  $\psi_2$  та їх різниці  $\Delta \psi = \psi_2 - \psi_1$ .



Рис. 4. Залежності розподілення електричного та індукованого потенціалів

#### Висновки

1. Вперше показана можливість регулювання розподілення електричного поля в котушці індуктивності за допомогою профілювання її діелектричного каркасу.

2. Застосування послідовного симплекс-методу для профілювання внутрішньої поверхні діелектричного каркасу котушки забезпечує узгодження її електричного потенціалу з індукованим магнітним полем котушки потенціалом до ± 1 %.

3. Узгодження розподілення електричного та індукованого магнітним полем котушки потенціалу дозволяє розширити область стабільності її параметрів за частотою від 50 Гц до 10 МГц.

4. Одержані в статті результати можуть бути використані для побудови котушок, значення індуктивності яких були б високостабільними в розширених діапазонах частот.

### Література

1. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е.С. Колечицкий. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. — 168 с.

2. А. с. 1119182 СССР, МПК Н04В3/54. Высокочастотный заградитель / А.П. Райва, Московское производственное объединение «Электрозавод» им. В.В. Куйбышева. — 3475932; заявл. 23.07.82; опубл. 15.10.84, Бюл. № 38. — 4 с.

3. *Бржезицький В.О.* Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад / В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, М.Ю. Лапоша // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». — Харків, 2016. — № 1 (27). — С. 37—41.

4. *Бржезицький В.О.* Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник / А.В. Ісакова, В.В. Рудаков та ін., під ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. — Харків: НТУ «ХПІ» — Торнадо, 2005. — 925 с.

5. IEC 60437. Radio interference test on high-voltage insulators. — 1998. — 36 p.

6. Иерусалимов М.Е. Профилирование изоляционного остова высоковольтных делителей напряжения / М.Е. Иерусалимов, В.А. Бржезицкий, А.Р. Проценко, В.В. Захарченко // Изоляция высоковольтных электрофизических установок. — Томск, 1988. — С. 97—103.

— Scientific Works of NUFT 2016. Volume 22, Issue 2 ——

179

7. *Ghourab M.E.* Analysis of electric field distribution in cavities within solid dielectric materials / M.E. Ghourab, S.M. El-Makkawy // Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — 1994. — P. 155—160.

8. *Peric M*. Penetration of electric field into hollow dielectric bodies / M. Peric, S. Aleksic // Journal of Electronics & Electrical Engineering. — 2011. — Issue 116, № 10. — P. 19—24.

9. Бржезицький В.О. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці / В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, М.Ю. Лапоша // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». — Харків, 2015. — № 6/1 (26). — С. 50—54.

10. Дамбраускас А.П. Симплексный поиск / А.П. Дамбраускас. — Москва: Энергия, 1979. — 176 с.

11. Барабащук В.И. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабащук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; ред. Б.П. Креденцер. — Киев: Техника, 1984. — 200 с.

12. Офіційний сайт COMSOL Multiphysics [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.comsol.com/.

# РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАТУШКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

В.О. Бржезицкий, Н.Ю. Лапоша, И.Н. Маслюченко, А.Р. Проценко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

В статье исследованы методы регулирования электрического поля катушки с помощью профилирования поверхности ее диэлектрического каркаса с использованием последовательного симплекс-метода. Предложены методика и алгоритм регулирования электрического поля катушки. Приведены результаты распределения индуцированного и электрического потенциалов для полученного профиля внутренней поверхности изоляционного каркаса катушки. Полученное расхождение индуцированного и электрического потенциалов не превышает допустимого значения  $\pm 1$ % и составляет  $\Delta \psi = -0.9858$ % от максимального значения потенциала катушки. Результаты могут быть использованы для построения катушек, показатели индуктивности которых были бы высокостабильными в расширенных диапазонах частот.

**Ключевые слова:** электрическое поле, индуцированный потенциал, электрический потенциал, диэлектрик, профилирование, симплекс-метод.