

Маслюченко И. Н.

## ПРИМЕНЕНИЕ СОЛЕНОИДАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБМОТОК ДЛЯ РАСЧЕТА ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Обоснована необходимость модификации известного метода средних геометрических расстояний для расчета индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов. Приведены расчетные выражения для индуктивности рассеяния силовых трансформаторов, полученные на основании использования соленоидальных моделей обмоток. Теоретические материалы статьи апробированы результатами проведенного эксперимента. Предложено расчетное выражение индуктивности рассеяния с использованием относительных размеров обмоток.*

**Ключевые слова:** индуктивность рассеяния, силовой трансформатор, обмотка, эксперимент, магнитопровод, соленоид.

### 1. Введение

Вопросы электромагнитного поля рассеяния являются традиционно наиболее сложными в теории силовых трансформаторов. В основополагающем издании [1] им посвящено 6 из 12 глав фактических материалов по электромагнитным расчетам трансформаторов и реакторов. Среди вопросов электромагнитного поля рассеяния трансформаторов особо выделяется задача расчета индуктивности рассеяния — важнейшего параметра, определяющего, практические характеристики силовых трансформаторов. Несмотря на обилие публикаций по данному вопросу, начиная с [2], до настоящего времени нет надежных рекомендаций по инженерным расчетам индуктивности рассеяния силовых трансформаторов.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Следует отметить, что развитие существующих методов и программ расчетов полей [3], принципиально, позволяет решить задачу расчета индуктивности рассеяния силовых трансформаторов на основе учета трехмерного распределения напряженности электрического и магнитного полей в их конструкциях. Однако это требует чрезмерного количества исходных данных, а также процедур программирования.

В работе [4] разработан перспективный метод трехмерного моделирования неоднородных электрических полей в открытых областях с применением метода поглощающих граничных условий. Однако, для расчета индуктивности рассеяния силовых трансформаторов, необходимо его распространение и на область магнитных полей.

В [5] рассмотрены особенности регулирования величины электромагнитной силы в магнитодинамических установках с помощью тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением, однако вопросы магнитного рассеяния индуктивно-связанных контуров в этой работе не рассматривались.

В [6] проведен анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ, при этом учтено совместное действие электрических и магнитных полей для прямолинейной геометрии проводников. Вместе с тем, результаты данной работы не могут быть непосредственно использованы для обмоток силовых трансформаторов.

В [7] разработан метод экспериментального определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора. Однако в данной работе предлагается определение индуктивности рассеяния для каждой отдельной обмотки трансформатора (с последующим их суммированием). Такой подход изначально не учитывает магнитную связь взаимодействия двух обмоток, что приводит к недопустимой погрешности расчетов измерения.

В связи с этим, а также допустимой погрешностью инженерных расчетов 5–10 %, является оправданным [1] поиск упрощенных моделей для расчета индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов, использующих особенности их пространственно-ориентированной конструкции.

В большинстве случаев обмотки силовых трансформаторов изготавливаются методом цилиндрической намотки на соответствующих станках, в связи с чем их обычно представляют (для расчета индуктивности рассеяния [8]) в виде цилиндров с равномерным заполнением витков. Приближенным к кругу выбирают также сечение стержня магнитопровода трансформатора [8].

Еще одной особенностью силовых трансформаторов (для расчета конфигурации магнитного поля рассеяния) является известное условие [1] равенства нулю суммарной магнитодвижущей силы обмоток  $i_1 w_1 + i_2 w_2 = 0$ , где  $i_1$ ,  $i_2$  — значения токов и  $w_1$ ,  $w_2$  — количества витков соответствующих обмоток. Данное обстоятельство обуславливает резкое затухание напряженности магнитного поля рассеяния в окрестности его активной части, в связи с чем, можно считать, что на значение индуктивности рассеяния силового трансформатора не

оказывает существенного влияния форма ярма, высота стержня магнитопровода и другие детали.

Вместе с тем, даже при таких упрощающих допущениях расчет индуктивности рассеяния обмоток требует использования специализированного программного обеспечения [3]. В связи с этим, в последних публикациях по расчетам индуктивности рассеяния [9, 10] уделяется значительное внимание применению так называемого метода СГР (метода средних геометрических расстояний), который не требует специализированного программного обеспечения и применим для практического использования. Основной проблемой в применении данного метода является определение средних геометрических расстояний для различных участков прямоугольных сечений обмоток [10], а также неясность с выбором в данном случае так называемой средней длины витка. Кроме того, в подобных исследованиях, обычно, «не доходят» до экспериментальной проверки расчетных результатов.

Таким образом, в современных практических инженерных расчетах индуктивности рассеяния силовых трансформаторов существует проблема применения метода СГР, а также его экспериментального подтверждения.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования является расчетное определение индуктивности рассеяния силовых трансформаторов.

Цель исследования — разработка совокупности предложений (метода) практического расчета индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов на основании модифицированного метода СГР.

Задачи исследования:

- обоснование необходимости и конкретная разработка модификации метода СГР, свободной от перечисленных выше недостатков;
- получение конкретных расчетных выражений (формул) модифицированного метода СГР;
- экспериментальная проверка результатов расчетов индуктивности рассеяния модифицированным методом СГР.

### 4. Разработка метода практического расчета индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов, а также его экспериментальная проверка

Проведение исследований базируется на разработках научной школы кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НТУУ «Киевский политехнический институт» [11], к которой относит себя и автор данной статьи.

В большинстве случаев сечения обмоток силовых трансформаторов представляют собой прямоугольники, высота которых приблизительно в 10 и более раз больше «толщины» обмоток. В этом случае достаточно учитывать [12]

средние диаметры обмоток ( $D_1, D_2$ ) и считать, что они представлены «тонкими» соленоидами с теми же, что и на практике, количествами витков, а так же стандартными размерами (обмоток).

Это позволяет однозначно снять вопрос о средней длине витка, так как в этом случае, безусловно:

$$\pi D_{\text{ср}} = \pi \frac{(D_1 + D_2)}{2}. \quad (1)$$

Далее, представление обмоток тонкими соленоидами позволяет получить «готовое» выражение (2) для погонной индуктивности рассеяния соленоидальных обмоток в общем случае (даже с учетом насыщения стали магнитопровода [12]), где  $2K, 2N$  (рис. 1) высоты соленоидальных обмоток 1,2;  $a, d$  — их расстояния до цилиндрической поверхности стержня магнитопровода. При этом обмотки приведены к равному количеству витков  $w = w_1 = w_2$  аналогично [13]. Параметр  $\chi$  учитывает насыщение магнитопровода  $\chi = \frac{1}{\mu + 1}$ , где  $\mu$  —

относительное значение магнитной проницаемости стали.

$$L_{\text{пор}} = \frac{\mu_0}{2\pi} w^2 \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{4} \ln \frac{[(K+N)^2 + (a+d)^2]^{\frac{(K+N)^2 - (a+d)^2}{KN}}}{[(K-N)^2 + (a+d)^2]^{\frac{(K-N)^2 - (a+d)^2}{KN}}} + \\ & + \frac{1}{4} \ln \frac{[(K+N)^2 + (a-d)^2]^{\frac{(K+N)^2 - (a-d)^2}{KN}}}{[(K-N)^2 + (a-d)^2]^{\frac{(K-N)^2 - (a-d)^2}{KN}}} + \\ & + \frac{1}{2} \left( \frac{a^2}{K^2} - 1 \right) \ln [4(a^2 + K^2)] + \\ & - \frac{1}{2} \left( \frac{d^2}{N^2} - 1 \right) \ln [4(d^2 + N^2)] - \frac{a^2}{K^2} \ln 2a - \frac{d^2}{N^2} \ln 2d - \\ & - \ln 2K - \ln 2N + \frac{a+d}{KN} \times \\ & \times \left[ (K+N) \operatorname{arctg} \frac{K+N}{a+d} - (K-N) \operatorname{arctg} \frac{K-N}{a+d} \right] + \\ & + \frac{a-d}{KN} \left[ (K+N) \operatorname{arctg} \frac{K+N}{a-d} - (K-N) \operatorname{arctg} \frac{K-N}{a-d} \right] - \\ & - 2 \frac{a}{K} \operatorname{arctg} \frac{K}{a} - 2 \frac{d}{N} \operatorname{arctg} \frac{N}{d} - \\ & - \chi \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{[(K+N)^2 + (a+d)^2]^{\frac{(K+N)^2 - (a+d)^2}{KN}}}{[(K-N)^2 + (a+d)^2]^{\frac{(K-N)^2 - (a+d)^2}{KN}}} + \right. \\ & + \left( \frac{a^2}{K^2} - 1 \right) \ln [4(a^2 + K^2)] + \\ & + \left( \frac{d^2}{N^2} - 1 \right) \ln [4(d^2 + N^2)] - \\ & - 2 \frac{a^2}{K^2} \ln 2a - 2 \frac{d^2}{N^2} \ln 2d + \\ & + 2 \frac{a+d}{KN} \left[ (K+N) \operatorname{arctg} \frac{K+N}{a+d} - (K-N) \operatorname{arctg} \frac{K-N}{a+d} \right] - \\ & \left. - 4 \frac{a}{K} \operatorname{arctg} \frac{K}{a} - 4 \frac{d}{N} \operatorname{arctg} \frac{N}{d} \right] \end{aligned} \right] \quad (2)$$

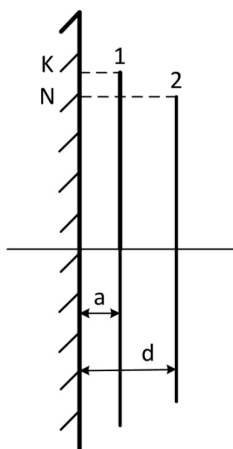


Рис. 1. Геометрия соленоидальных обмоток 1 и 2 (в сечении)

Для экспериментальной проверки полученных выражений на кафедре ТЭВН НТУУ «КПИ» была изготовлена экспериментальная модель соленоидальных обмоток с диаметром магнитного стержня  $D_c = 46$  мм и соответствующими диаметрами соленоидов  $D_I = 72$  мм,  $D_{II} = 90$  мм,  $D_{III} = 120$  мм,  $D_{IV} = 186$  мм. Для каждого соленоида высота однослойной обмотки выбиралась из ряда 45 мм, 90 мм, 135 мм. Общее число вариантов всех обмоток составляло 12. Для измерения индуктивности рассеяния пар обмоток использовалась схема противовключения [14] (рис. 2), избавленная от вклада омических потерь напряжения при протекании по исследуемым обмоткам тока, при этом экспериментальное значение индуктивности рассеяния пар обмоток, приведенное к одному витку, вычислялось по формуле:

$$L_{\sigma'_{\text{экс}}} = \frac{U_{PV2}}{\omega I_{PA} w^2}, \tag{3}$$

где  $\omega = 2\pi f = 100\pi$ ;  $w = w_i = w_j$  — количества витков исследуемых пар обмоток;  $U_{PV2}$ ,  $I_{PA}$  — показания соответствующих приборов схемы.

Расчетные значения схемы  $L_{\sigma'_{\text{расч}}}$  вычислялись по формуле:

$$L_{\sigma'_{\text{расч}}} = \pi \left( \frac{D_1 + D_2}{2} \right) L_{\text{лог}}(a; d; K; N). \tag{4}$$

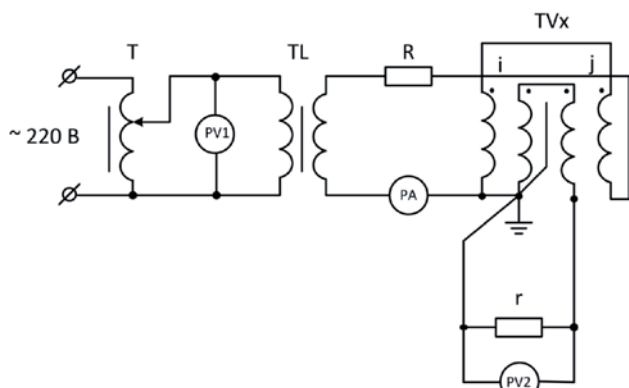


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения индуктивности рассеяния обмоток трансформатора

Полученные данные расчетных и экспериментальных значений индуктивности рассеяния обмоток трансформатора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений индуктивности рассеяния обмоток трансформатора

Конфигурация пар обмоток	№ п/п	Размеры высот обмоток (2K/2N, мм)	Расчетное значение индуктивности рассеяния обмоток $L_{\sigma'_{\text{расч}}}$ (в $10^{-7}$ Гн)	Эксперимент (в $10^{-7}$ Гн), $L_{\sigma'_{\text{экс}}}$	Погрешность расчета индуктивности рассеяния, $\Delta$ %
I-II	1	135/135	0,204	0,207	-1,449
	2	90/90	0,299	0,314	-4,777
	3	45/45	0,556	0,592	-6,081
	4	135/90	0,313	0,320	-2,188
	5	135/45	0,859	0,870	-1,264
	6	90/45	0,647	0,660	-1,970
III-IV	1	135/135	1,212	1,190	1,849
	2	90/90	1,659	1,620	2,407
	3	45/45	2,640	2,559	3,165
	4	135/90	1,513	1,420	6,549
	5	135/45	2,156	2,250	-4,178
	6	90/45	2,232	2,330	-4,206
I-III	1	135/135	0,609	0,633	-3,791
	2	90/90	0,869	0,902	-3,659
	3	45/45	1,491	1,509	-1,193
	4	135/90	0,730	0,800	-8,750
	5	135/45	1,451	1,350	7,481
	6	90/45	1,367	1,360	0,515
I-IV	1	135/135	1,730	1,701	1,705
	2	90/90	2,337	2,304	1,432
	3	45/45	3,574	3,432	4,138
	4	135/90	1,940	2,040	-4,902
	5	135/45	3,030	2,900	4,483
	6	90/45	3,158	3,100	1,871
II-III	1	135/135	0,421	0,426	-1,174
	2	90/90	0,603	0,603	0,000
	3	45/45	1,059	1,050	0,857
	4	135/90	0,550	0,580	-5,172
	5	135/45	1,100	1,100	0,000
	6	90/45	0,984	1,070	-8,037
II-IV	1	135/135	1,550	1,517	2,175
	2	90/90	2,089	2,049	1,952
	3	45/45	3,188	3,107	2,607
	4	135/90	1,771	1,640	7,988
	5	135/45	2,632	2,530	4,032
	6	90/45	2,757	2,730	0,989

В первой колонке приведены конфигурации используемых пар соленоидальных обмоток (по их диаметрам  $D_I$ ;  $D_{II}$ ;  $D_{III}$ ;  $D_{IV}$ ).

Высота второй обмотки всегда была равной или меньше первой, что отражает тот факт, что вторая обмотка, которая обычно является высоковольтной, более удалена (по сравнению с первой) от заземленных частей ярма.

## 5. Обсуждение результатов разработки метода расчета индуктивности рассеяния трансформатора, а также его экспериментальной проверки

Сходимость результатов экспериментальных и расчетных значений индуктивности рассеяния обмоток трансформатора может быть оценена погрешностью

$$\Delta = \frac{L_{\sigma' \text{ расч}} - L_{\sigma' \text{ эксп}}}{L_{\sigma' \text{ эксп}}} \cdot 100 \% \text{ (правая колонка табл. 1). Значение}$$

погрешности расчетного определения индуктивности рассеяния трансформатора согласно табл. 1 находятся в диапазоне  $-8,75 \% \leq \Delta \leq 8 \%$ , что подтверждает соответствие предлагаемого расчетного метода определения индуктивности рассеяния трансформатора практике.

Следует отметить, что в экспериментальной модели трансформатора соотношения диаметров обмоток и их высот были весьма различными и изменялись в более широких пределах, чем это соответствует практике трансформаторостроения [8].

Предложенная модификация, снимающая традиционно спорные вопросы, связанные с прямоугольными сечениями обмоток в методе СГР, подтверждена экспериментально.

Данная модификация метода СГР может быть применена для более сложных вариантов расположения обмоток трансформаторов, при этом уже отдельные части обмоток могут быть заменены соответствующими соленоидами [15].

С целью упрощения формулы (2) в нее были внесены представления параметров  $N = nK$ ;  $a = \alpha K$ ;  $d = \beta K$ , где  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  — относительные величины. В этом случае формула (2) упрощается и приводится к более удобному для вычислений виду:

$$L_{\text{пог}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega^2 \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{4} \ln \frac{K^2 \left[ (1+n)^2 + (\alpha+\beta)^2 \right]^{\frac{(1+n)^2 - (\alpha+\beta)^2}{n}}}{K^2 \left[ (1-n)^2 + (\alpha+\beta)^2 \right]^{\frac{(1-n)^2 - (\alpha+\beta)^2}{n}}} + \frac{1}{4} \ln \frac{K^2 \left[ (1+n)^2 + (\alpha-\beta)^2 \right]^{\frac{(1+n)^2 - (\alpha-\beta)^2}{n}}}{K^2 \left[ (1-n)^2 + (\alpha-\beta)^2 \right]^{\frac{(1-n)^2 - (\alpha-\beta)^2}{n}}} + \\ & + \frac{1}{2} (\alpha^2 - 1) \ln [4K^2 (\alpha^2 + 1)] + \frac{1}{2} \left( \frac{\beta^2}{n^2} - 1 \right) \ln [4K^2 (\beta^2 + n^2)] - \\ & - \ln 2K \left( \alpha^2 + \frac{\beta^2}{n^2} + 2 \right) - \ln n - \alpha^2 \ln \alpha - \frac{\beta^2}{n^2} \ln \beta + \\ & + \frac{\alpha + \beta}{n} \left[ (1+n) \arctg \frac{1+n}{\alpha + \beta} - (1-n) \arctg \frac{1-n}{\alpha + \beta} \right] + \\ & + \frac{\alpha - \beta}{n} \left[ (1+n) \arctg \frac{1+n}{\alpha - \beta} - (1-n) \arctg \frac{1-n}{\alpha - \beta} \right] - 2 \left( \alpha \cdot \arctg \frac{1}{\alpha} + \frac{\beta}{n} \arctg \frac{n}{\beta} \right) - \\ & \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{K^2 \left[ (1+n)^2 + (\alpha+\beta)^2 \right]^{\frac{(1+n)^2 - (\alpha+\beta)^2}{n}}}{K^2 \left[ (1-n)^2 + (\alpha+\beta)^2 \right]^{\frac{(1-n)^2 - (\alpha+\beta)^2}{n}}} + (\alpha^2 - 1) \ln [4K^2 (\alpha^2 + 1)] + \right. \\ & \left. - \chi + \left( \frac{\beta^2}{n^2} - 1 \right) \ln [4K^2 (\beta^2 + n^2)] - 2\alpha^2 \ln 2K\alpha - 2 \frac{\beta^2}{n^2} \ln 2K\beta + \right. \\ & \left. + 2 \frac{\alpha + \beta}{n} \left[ (1+n) \arctg \frac{1+n}{\alpha + \beta} - (1-n) \arctg \frac{1-n}{\alpha + \beta} \right] - 4 \left( \alpha \cdot \arctg \frac{1}{\alpha} + \frac{\beta}{n} \arctg \frac{n}{\beta} \right) \right] \end{aligned} \right] \quad (5)$$

Тогда с использованием формул (4), (5) может быть получено выражение для расчета индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора в законченном виде с применением одного размерного параметра — высоты 1-ой обмотки (2К) и остальными безразмерными величинами. Это позволит, в дальнейшем, исследовать индуктивность рассеяния трансформаторов для построения соответствующей теории подобия.

## 6. Выводы

1. Обоснована целесообразность применения соленоидальной модели в модифицированном методе СГР для расчета индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов и определены ее расчетные выражения.

2. Впервые проведено экспериментальное подтверждение применимости модифицированного метода СГР.

3. Приведена упрощенная формула для расчетов погонной индуктивности обмоток в модифицированном методе СГР с использованием относительных размеров обмоток.

## Литература

1. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. — М.: Энергия, 1981. — 392 с.
2. Rogowski, W. Über das Streufeld und den Streuinduktionskoeffizienten eines Transformators mit Scheibenwicklung und geteilten Endspulen [Text] / W. Rogowski. — Berlin, 1909.
3. FEMLAB: Version 2.3. User's guide and introduction [Text]. — COMSOL, Inc., 2003. — Vol. 1. — 432 p.
4. Резинкина, М. М. Трехмерное моделирование неоднородных электрических полей в открытых областях с применением метода поглощающих граничных условий [Текст] / М. М. Резинкина, А. А. Щерба, Ю. В. Перетятко // Технічна електродинаміка. — 2007. — № 5. — С. 7–10.
5. Щерба, А. А. Особенности регулирования величины электромагнитной силы в магнитодинамических установках с помощью тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением [Текст] / А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, Н. А. Ломко, В. И. Шеховцов // Технічна електродинаміка. — 2005. — № 1. — С. 61–65.
6. Шидловский, А. К. Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ [Текст] / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, В. М. Золотарев // Технічна електродинаміка. — 2008. — № 6. — С. 7–13.
7. Михеев, Г. М. Методы определение индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора [Электронный режим] / Г. М. Михеев, В. М. Шевцов, Т. Г. Иванова // Вестник ЧГУ. — 2009. — № 2. — Режим доступа: \www/URL: http://cyberleninka.ru/article/n/metody-opredeleniya-induktivnosti-rasseyaniya-obmotok-silovogo-transformatora

8. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст]: учеб. пос. / П. М. Тихомиров. — 5-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 529 с.
9. Кантор, В. В. К расчету индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов [Текст] / В. В. Кантор // Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал. — 2009. — № 4. — С. 51–55.
10. Кантор, В. В. Расчет индуктивности рассеяния сложных обмоток трансформаторов методом средних геометрических расстояний [Текст] / В. В. Кантор // Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал. — 2011. — № 5. — С. 23–29.
11. Бржезицкий, В. А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.05; 05.14.12 / В. А. Бржезицкий; КПИ. — К., 1992. — 513 с.
12. Бржезицкий, В. А. К расчету взаимной индуктивности обмоток, расположенных на ферромагнитном стержне [Текст] / В. А. Бржезицкий, А. В. Найдовский, А. Н. Безмен // Электромеханика. — 1989. — № 1. — С. 45–54.
13. Петров, Г. Н. Электрические машины [Текст]: учеб. / Г. Н. Петров. — М.: Энергия, 1974. — Ч. 1. — 240 с.
14. Зихерман, М. Х. Об электромагнитном рассеянии обмоток трансформаторов [Текст] / М. Х. Зихерман // Электричество. — 1983. — № 9. — С. 60–69.
15. Бржезицкий, В. А. К расчету параметров индуктивности рассеяния обмоток различных форм поперечного сечения [Текст] / В. А. Бржезицкий // В кн.: Математическое моделирование в энергетике. — К.: Наукова думка, 1992. — С. 92–94.

#### ЗАСТОСУВАННЯ СОЛЕНОЇДАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ОБМОТОК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Обґрунтовано необхідність модифікації відомого методу середніх геометричних відстаней для розрахунку індуктивності розсіювання обмоток силових трансформаторів. Наведено розрахункові вирази для індуктивності розсіювання силових трансформаторів, отримані на підставі використання соленоїдальних моделей обмоток. Теоретичні матеріали статті апробовані результатами проведеного експерименту. Запропоновано розрахунковий вираз індуктивності розсіювання з використанням відносних розмірів обмоток.

**Ключові слова:** індуктивність розсіювання, силовий трансформатор, обмотка, експеримент, магнітопровід, соленоїд.

*Маслюченко Ігорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: masluchenko@yandex.ru.*

*Маслюченко Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Masluchenko Igor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: masluchenko@yandex.ru*

УДК 621.315.1

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47757

Троценко Є. О.

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Адаптовано метод еквівалентних зарядів для розрахунку напруженості електростатичного поля під одноланцюговими та дволанцюговими біполярними лініями електропередачі постійного струму. Метод дозволяє розраховувати напруженість електростатичного поля під повітряними лініями постійної напруги за умови відсутності коронного розряду на проводах лінії в сухих кліматичних умовах.*

**Ключові слова:** лінія електропередачі постійного струму, біполярна лінія, напруженість електричного поля, метод еквівалентних зарядів.

### 1. Вступ

В останні роки у світі знову відновився інтерес до передачі електричної енергії на постійному струмі. Головним чином тому, що лінії електропередачі постійного струму високої та надвисокої напруги виявляються більш економічними при передачі великої кількості електричної енергії на великі відстані ніж відповідні лінії електропередачі змінного струму [1]. Ця технологія не нова і була відома ще на початковому етапі розвитку електроенергетики, коли відбувалась боротьба між прихильником постійного струму Томасом Едісоном та прихильниками змінного струму Джорджем Вестінгаузом та Ніколою Тесла. Тоді у цій конкурентній боротьбі, як відомо, перемогли останні, і дотепер у світі для виробництва електричної енергії, передачі її на

відстань та споживання використовується в основному змінний струм.

Прогрес у створенні ліній високої та надвисокої напруги постійного струму став можливим завдяки появі у другій половині минулого століття високовольтних тиристорів та біполярних транзисторів з ізолюваним затвором, які дозволили створювати ефективні статичні перетворювачі, розраховані на великі струми та напруги. Відтоді постійний струм використовується тільки для передачі електричної енергії, а її виробництво і розподілення залишається на змінному струмі. Потужні статичні перетворювачі використовуються як випрямлячі та інвертори. Випрямляч установлюється на відправному кінці передачі для перетворення змінного струму в постійний, а інвертор установлюється на прийомному кінці для перетворення постійного струму в змінний.