

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕГМЕНТИРОВАННОЙ ЖИЛЕ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

**И.Н. Кучерявая**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Изучаются электромагнитные процессы в токопроводящей сегментированной жиле (типа "Милликен") силового кабеля на напряжение 330 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, находящегося в магнитном поле цилиндрического индуктора. Расчетным путем исследуются особенности проявления поверхностного эффекта и эффекта близости в пяти изолированных сегментах жилы сечением 1600 мм<sup>2</sup> для различных значений частоты в диапазоне 50...2400 Гц. Библ. 13, рис. 5.*

**Ключевые слова:** сегментированная жила, высоковольтный кабель, индукционный нагрев, скин-эффект, компьютерное моделирование

В последнее десятилетие в области развития кабельной техники достигнут значительный прогресс, позволивший широко использовать кабельные линии для передачи электроэнергии. В энергосистемах многих стран мира применяются исключительно кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такой изоляционный материал обладает уникальными свойствами – высокой электрической прочностью, низкой повреждаемостью, длительным сроком службы, экологической совместимостью. К настоящему времени созданы, испытаны и активно вводятся в эксплуатацию кабели с номинальным напряжением 110...500 кВ [6]. Такие сверхвысоковольтные кабели используются при организации глубоких вводов в центральные районы крупных городов, в энергетических системах между узлами электрической сети (например, между подстанциями или между генерирующим оборудованием и распределительной подстанцией), а также в сочетании с воздушными линиями электропередачи. Использование участков кабелей вместо воздушных линий позволяет значительно уменьшить потери электроэнергии.

Впервые среди стран СНГ производство кабелей со сшитополиэтиленовой изоляцией на сверхвысокое напряжение (220, 330 кВ) было запущено на кабельном заводе "Южкابل" (г. Харьков) [9]. На сегодняшний день сверхвысоковольтные кабели украинского производства

проходят испытания на соответствие международным стандартам качества [7].

Отличительной особенностью кабелей, рассчитанных на напряжение выше 110 кВ и имеющих сечение жилы более 1000 мм<sup>2</sup>, является использование согласно патенту Н.Милликен [10]

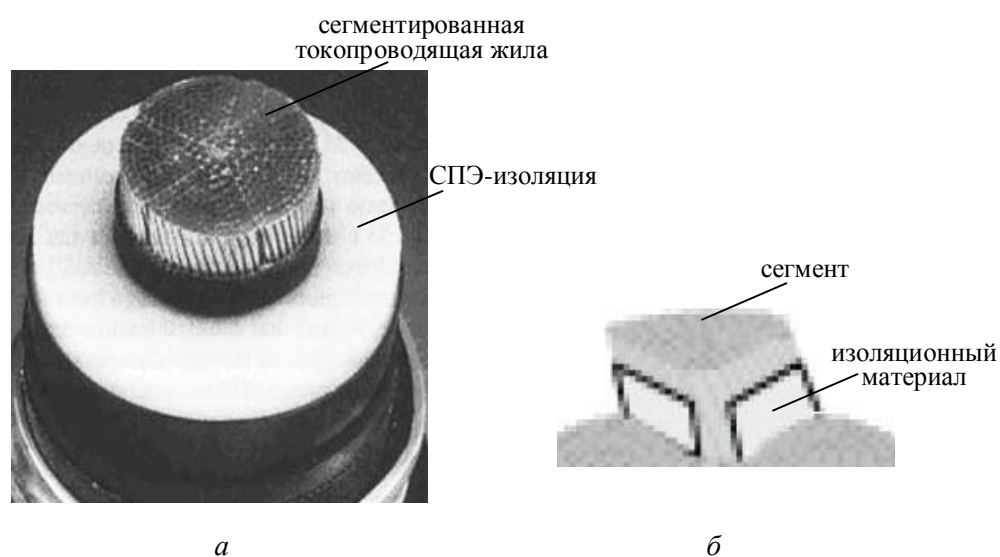


Рис. 1

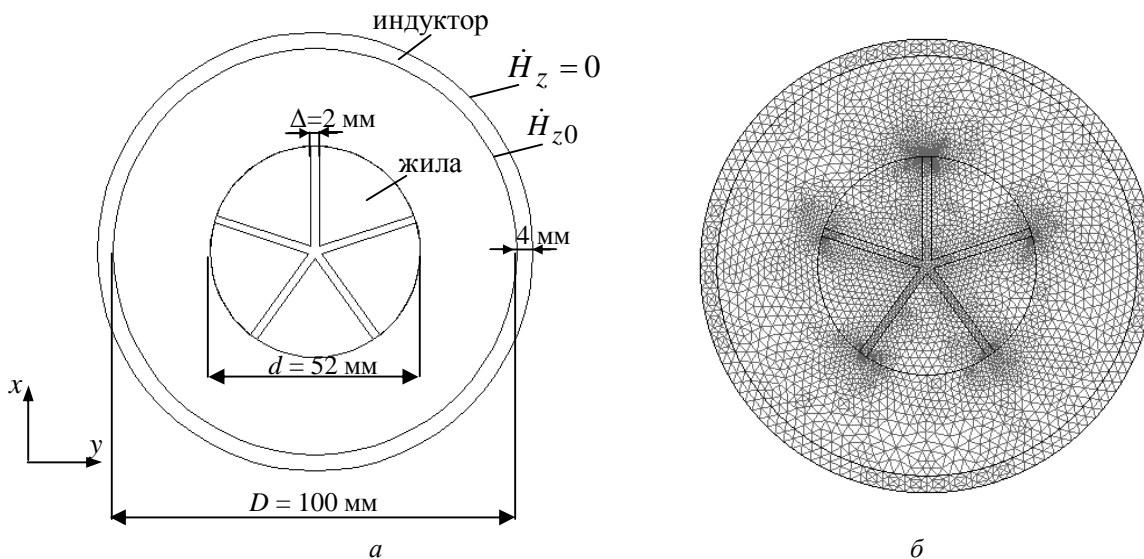


Рис. 2

сегментированных жил. Токпроводящие цилиндрические жилы в таком случае изготавливаются из нескольких многопроволочных проводников секторного сечения, электрически изолированных друг от друга. Один из силовых кабелей с жилой типа "Милликен", состоящей из пяти сегментов, показан на рис. 1 а. На рис. 1 б дан фрагмент конструкции сегмента жилы кабеля.

В процессе эксплуатации кабельных линий из-за проявления скин-эффекта и эффекта близости ток концентрируется на приповерхностных участках токпроводящих жил кабелей, центральные же части жил испытывают меньшую нагрузку. В милликеновском проводнике, благодаря наличию нескольких (как правило, от 3-х до 6-ти) сегментов небольшого сечения, снижается проявление поверхностного эффекта и эффекта близости, электрический ток более равномерно распределяется по сечению каждого сегмента [2, 11].

Подобная ситуация наблюдается, когда кабель находится во внешнем магнитном поле. Такой случай реализуется, к примеру, при индукционном нагреве конструктивных элементов кабеля. В частности, индукционный нагрев токпроводящей жилы является одной из основных операций в технологическом процессе производства кабеля для повышения скорости вулканизации сшитого полиэтилена и производительности технологической линии изготовления кабеля [1, 8].

Изучение электромагнитных процессов и определение распределения поля и плотности тока в токпроводящей жиле кабеля являются важной задачей, представляющей собой необходимый этап в решении вопросов, связанных с обеспечением требуемого уровня нагрева для достижения качественного исполнения кабельной конструкции.

Анализ электромагнитных процессов в сегментированных жилах с использованием аналитических выражений проводился в более ранних работах [4, 13]. Влияние частоты на протекание электромагнитных процессов в кабелях изучено в статье [12]. Электромагнитные процессы в кабельной линии, состоящей из трех кабелей с сегментированными жилами при протекании в них заданного тока, рассчитаны и проанализированы в работе [3].

Настоящая работа посвящена исследованию методом компьютерного моделирования электромагнитных процессов в пятисегментной токпроводящей жиле кабеля с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. Жила имеет большое поперечное сечение ( $1600 \text{ мм}^2$ ) и находится в переменном магнитном поле цилиндрического индуктора. Особенностью решения задачи по сравнению с работами других авторов являются применение метода конечных элементов для решения полевой задачи и установление основных закономерностей в распределении магнитного поля и плотности тока в сегментированной жиле с учетом возможного изменения частоты тока в индукторе в пределах 50...2400 Гц.

**Постановка задачи и ее решение.** Рассматривается однофазный силовой кабель с сегментированной жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена (рис. 1). Материал жилы – алюминий является токопроводящим и немагнитным. Контактное сопротивление между алюминиевыми проволоками в каждом из пяти сегментов предполагается равным нулю.

Задача решается в двумерной постановке в поперечном сечении кабеля для декартовой системы координат (рис. 2 а). Учитываются следующие элементы расчетной области: пять сегментов токопроводящей жилы диаметром  $d$ , разделенные изоляционным промежутком из электротехнического картона толщиной  $\Delta$ ; многovitковый индуктор с внутренним диаметром  $D$ , выполненный из медной трубки с водяным охлаждением (см. рис. 2 а).

Электромагнитные процессы рассматриваются в частотной области посредством описания комплексными величинами. Полевая задача формулируется для векторной комплексной величины напряженности магнитного поля, имеющей единственную ненулевую  $z$ -составляющую –  $\dot{\mathbf{H}} = (0, 0, \dot{H}_z)$ .

Для вектора  $\dot{\mathbf{H}}$  из системы уравнений Максвелла  $\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \sigma \dot{\mathbf{E}}$ ,  $\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\omega\mu_0 \dot{\mathbf{H}}$ ,  $\nabla \cdot \mu_0 \dot{\mathbf{H}} = 0$  записывается основное дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\nabla \times (\sigma^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{H}}) = -j\omega\mu_0 \dot{\mathbf{H}}. \quad (1)$$

В качестве источника поля задается значение напряженности на внутренней поверхности индуктора  $\dot{H}_{z0}$ , на внешней поверхности индуктора выбирается условие магнитной изоляции – значение поля здесь полагается равным нулю (см. рис. 2 а).

Решение дифференциального уравнения (1) с указанными граничными условиями выполняется численно методом конечных элементов с помощью программного пакета Comsol 3.3 [5].

После определения поля  $\dot{\mathbf{H}}$  по сечению жилы значения вектора плотности электрического тока  $\dot{\mathbf{J}}$  и мощности джоулевых потерь  $q$  в каждой точке расчетной области вычисляются на основании следующих выражений:

$$\dot{\mathbf{J}} = \nabla \times \dot{\mathbf{H}}, \quad q = |\dot{\mathbf{j}}|^2 / \sigma.$$

Значения джоулевых потерь по сечению кабеля могут быть использованы для дальнейшего решения тепловой задачи.

**Результаты компьютерных расчетов.** Размеры элементов расчетной области и ее конечно-элементное разбиение показаны на рис. 2 а и б соответственно. Указанный диаметр токопроводящей жилы соответствует площади ее поперечного сечения – 1600 мм<sup>2</sup>. Как известно, сегментирование жилы выполняется при сечении более 1000 мм<sup>2</sup>. Напряженность

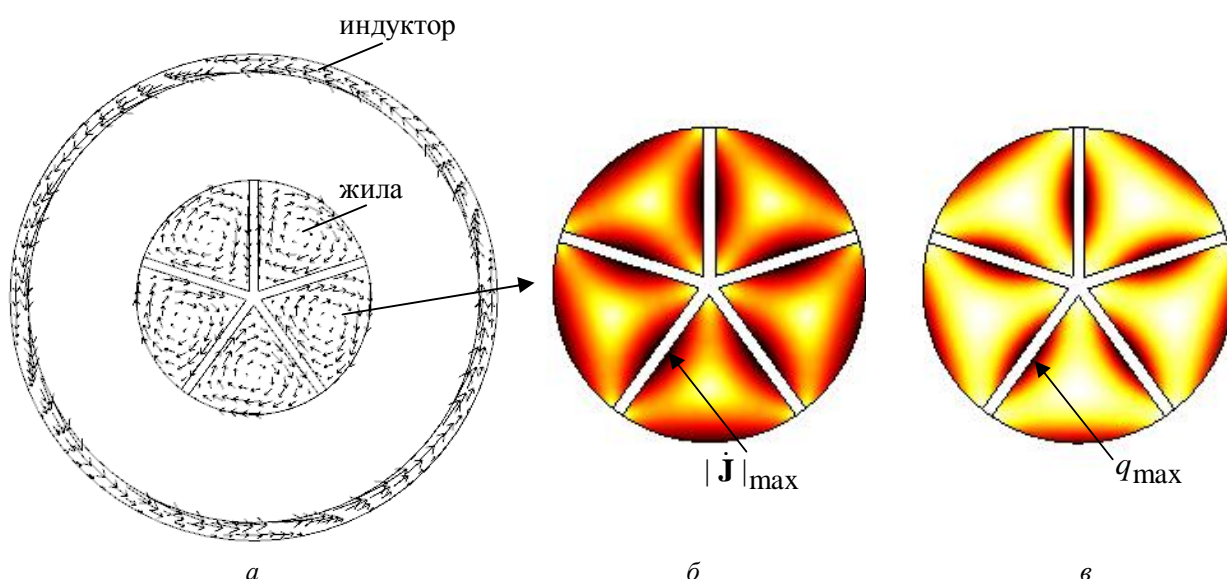


Рис. 3

магнитного поля на внутренней поверхности индуктора принимается равной  $H_{z0} = 10^5$  А/м, на наружной поверхности –  $H_z = 0$ . Электропроводность изоляционного материала между сегментами (электрокартона) предполагается равной нулю.

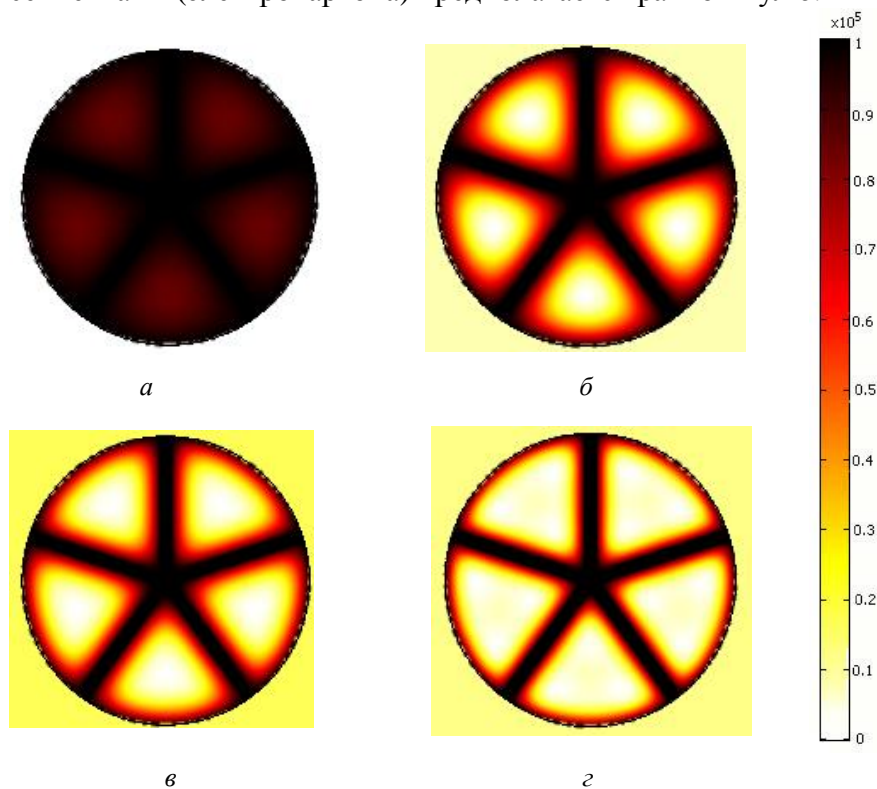


Рис. 4

Расчетные распределения вектора плотности электрического тока и джоулевых потерь при частоте 50 Гц в поперечном сечении жилы и индуктора показаны на рис. 3. Здесь вектор плотности тока представлен в виде стрелок (рис. 3 а), величина  $|\dot{\mathbf{J}}|$  и джоулевы потери  $q$  – в оттенках серого цвета (рис. 3 б, в). Их значения имеют вид  $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 5,9$  А/мм<sup>2</sup>,  $q_{\max} = 7,5 \cdot 10^5$  А/мм<sup>2</sup>. Из-за наличия пяти изолированных сегментов в жиле плотность тока в ней образует пять вихревых структур, причем максимальное значение плотности тока локализовано в центральной

части внутренних поверхностей сегментов, что является проявлением эффекта близости между сегментами. Такому распределению тока соответствует неравномерное распределение джоулевого тепла (рис. 3 в), обеспечивающее нагрев жилы в магнитном поле индуктора.

На рис. 4 показано распределение магнитного поля  $|\dot{H}_z|$  в поперечном сечении токопроводящей жилы для различных значений частоты тока в индукторе: а)  $f = 50$  Гц; б)  $f = 500$  Гц; в)  $f = 1000$  Гц; г)  $f = 2400$  Гц. Видно, что при частоте 50 Гц поле распределено практически равномерно по глубине сегментов, а в случае частоты 2400 Гц в значительной степени проявляется скин-эффект.

Более детально распределение плотности тока в сегментах жилы показано на рис. 5. Здесь величина плотности тока  $|\dot{\mathbf{J}}|$  отображена в оттенках серого цвета, а вектор  $\dot{\mathbf{J}}$  – стрелками для различных значений частоты: а)  $f = 50$  Гц при  $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 5,9$  А/мм<sup>2</sup>; б)  $f = 500$  Гц при  $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 33,6$  А/мм<sup>2</sup>; в)  $f = 1000$  Гц при  $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 44,8$  А/мм<sup>2</sup>; г)  $f = 2400$  Гц при  $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 63,5$  А/мм<sup>2</sup>. На вставке сверху показан характер изменения плотности тока  $|\dot{\mathbf{J}}|$  в объемном виде для частоты тока  $f = 50$  Гц (слева) и  $f = 2400$  Гц (справа). Проиллюстрировано усиление скин-эффекта с увеличением частоты  $f$  и тот факт, что максимальное значение плотности тока локализовано не на внешних поверхностях сегментов жилы, а в центральной зоне их боковых граней.

Полученные результаты работы вместе с разработанной компьютерной методикой расчета электромагнитных процессов в сегментированной жиле кабеля представляют собой предварительный этап для дальнейшего исследования тепловых процессов и определения приемлемых условий индукционного нагрева применительно к реализации технологии изготовления сверхвысоковольтных силовых кабелей.



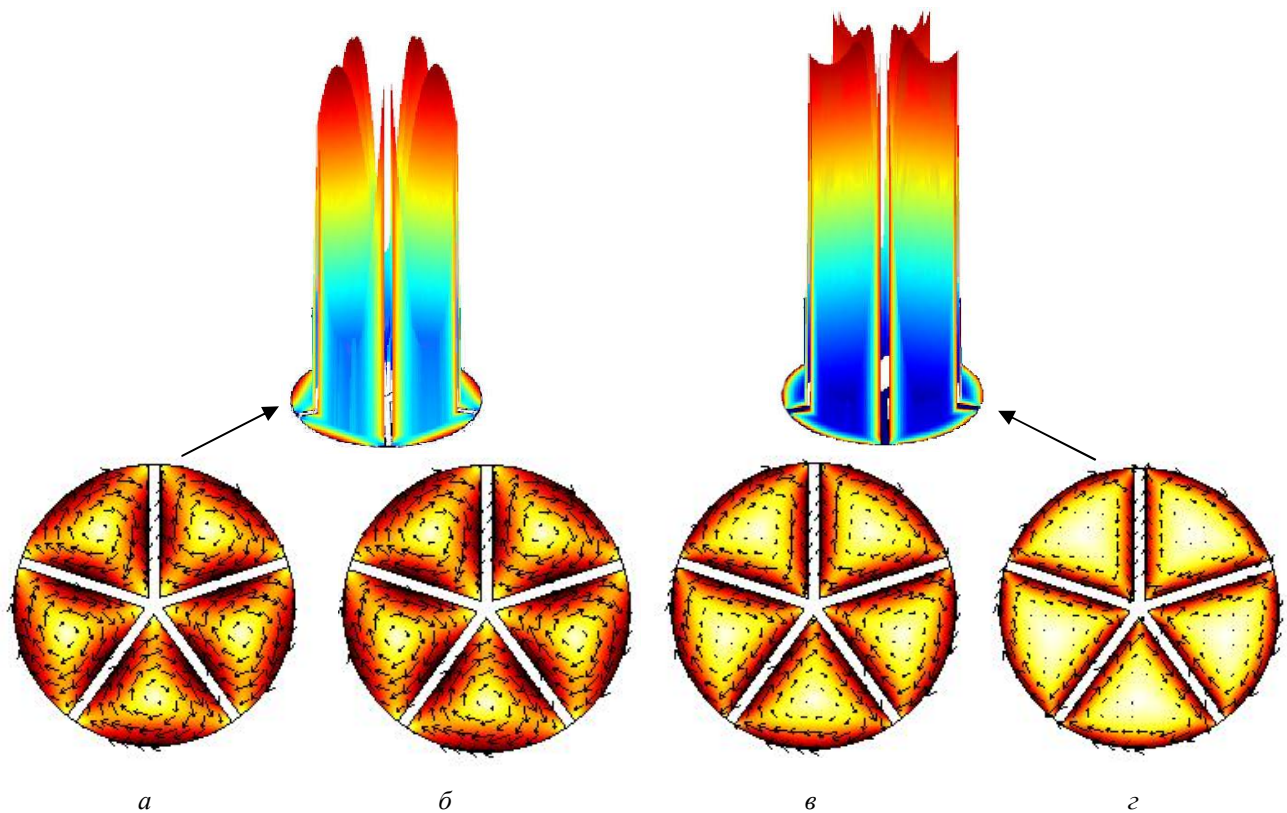


Рис. 5

1. Зимин Л.С., Гамаюнов О.Л. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок при производстве оболочки кабеля // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 47–50.
2. Лету Ф. Токопроводящие жилы высокого качества для высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей (типа "Милликен") // Кабели и провода. – № 1 (308). – 2008. – С. 18–21.
3. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Анализ электромагнитных процессов в сегментированных токопроводящих жилах силовых кабелей на напряжение 330 кВ // Техн. электродинамика. – № 6. – 2008. – С. 7–13.
4. Benato R. Multiconductor analysis of underground power transmission systems: EHV AC cables. // Electric Power Systems Research. – Vol. 79, Is. 1. – 2009. – P. 27–38.
5. Comsol Multiphysics, version 3.3 – <http://www.comsol.com>
6. Delby B., Bergman G., Ericsson A., Karlstrand J. High-voltage XLPE performance cable technology. – Special Report 0985. ABB review. – 6 p.
7. <http://www.kp-info.ru/publicationint.php?id=819>
8. [http://www.ruscable.com/news/2005/03/15/effektivnaya\\_sistema/](http://www.ruscable.com/news/2005/03/15/effektivnaya_sistema/)
9. <http://www.yuzhcable.com.ua>
10. Milliken H. Electrical Cable. Patent Publication 1933, US #475094.
11. Moore G.F. Electric cables handbook. – 3-d edition. – BICC Cables Ltd. – 2004. – 612 p.
12. Steinbrich K. Reduction of operating frequency for power cables // European Transactions on Electrical Power. – Vol. 12, Is. 3. – 2007. – P. 235–238.
13. Suzuki H., Kanaoka M. Theoretical investigation on skin effect factor of conductor in power cables // IEEEJ Trans. on Power and Energy. – Vol. 126, Is. 8. – 2006. – P. 807–820.

УДК 621.315.2

І.М. Кучерява, канд. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Дослідження електромагнітних процесів у сегментованій жилі силового кабеля при індукційному нагріванні**  
 Вивчаються електромагнітні процеси в струмопровідній сегментованій жилі (типу "Мілікен") силового кабеля на напругу 330 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену, що знаходиться в магнітному полі циліндричного індуктора. Розрахунковим

шляхом досліджуються особливості прояву поверхневого ефекту та ефекту близькості в п'яти ізольованих сегментах жили перерізом  $1600 \text{ мм}^2$  для різних значень частоти в діапазоні  $50 \dots 2400 \text{ Гц}$ . Бібл. 13, рис. 5.

**Ключові слова:** сегментована жила, високовольтний кабель, індукційний нагрів, скін-ефект, комп'ютерне моделювання.

**I.M. Kucheryava**

Institute of electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Investigation of electromagnetic processes in Milliken type conductor of power cable in induction heating**

*In this work, the electromagnetic processes taking place in segmental wire conductor (Milliken type conductor) of 330 kV power cable with cross-linked insulation in magnetic field of cylindrical inductor are studied. By computational way, the peculiarities of skin effect and proximity effect in five segments of the cable conductor having  $1600 \text{ мм}^2$  cross-section are considered within the wide frequency range –  $50 \dots 2400 \text{ Hz}$ . References 13, figures 5.*

**Key words:** Milliken type conductor, high-voltage cable, induction heating, skin effect, computer modeling.

Надійшла 13.10.2010

Received 13.10.2010