

УДК621.315.2.027.8

А.К.ШИДЛОВСКИЙ, академик НАН Украины, А.А.ЩЕРБА, член-корр. НАН Украины, А.Д.ПОДОЛЬЦЕВ, докт. техн. наук, И.Н.КУЧЕРЯВАЯ, канд. техн. наук (Ин-т электродинамики НАН Украины), В.М.ЗОЛОТАРЕВ (ЗАО "Завод "Южкабель")

## Индукционный нагрев сегментированной токопроводящей жилы силового кабеля на этапе его изготовления

*В работе исследуются электромагнитные и тепловые процессы в сегментированной токопроводящей жиле (типа "Милликен") сверхвысоковольтного силового кабеля с большим поперечным сечением (сечение жилы более  $1000 \text{ мм}^2$ ) при непрерывном движении в переменном магнитном поле цилиндрических индукторов. Рассматриваются особенности проявления поверхностного эффекта и эффекта близости в изолированных сегментах жилы в диапазоне изменения частоты 50–2400 Гц. Анализируются закономерности распределения температуры в сегментированной жиле и условия ее нагрева до заданной температуры  $80\text{--}120^\circ\text{C}$ .*

*У роботі досліджуються електромагнітні та теплові процеси в сегментованій струмопровідній жилі (типу "Мілікен") надвисоковольтного силового кабеля з великим поперечним перерізом (переріз жили більше  $1000 \text{ мм}^2$ ) при безперервному русі в змінному магнітному полі циліндричних індукторів. Розглядаються особливості прояву поверхневого ефекту та ефекту близькості в ізольованих сегментах жилы в діапазоні змінення частоти 50–2400 Гц. Аналізуються закономірності розподілення температури в сегментованій жилі і умови нагріву до заданої температури  $80\text{--}120^\circ\text{C}$ .*

**Введение.** Мировые тенденции современного развития кабельных передающих и распределительных электрических сетей направлены на внедрение силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Такой изоляционный материал обладает хорошими диэлектрическими свойствами — низкой величиной диэлектрической проницаемости и фактора потерь, а также большим запасом термической стойкости.

В настоящее время энергосистемы Украины ориентированы на применение в распределительных сетях силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 330 кВ. Предпосылками для этого является наряду с высокими эксплуатационными показателями таких кабелей наличие отечественного производства, в частности, на ЗАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков). На харьковском кабельном заводе производятся силовые кабели со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение до 110 кВ, а в ближайшей перспективе планируется освоить серийный выпуск кабелей на напряжение 220 и 330 кВ.

Особенностью силовых кабелей на сверхвысокое напряжение (220 и 330 кВ) является большое поперечное сечение жилы —  $1000\text{--}3000 \text{ мм}^2$ . Для уменьшения электрических потерь в жилах такого сечения применяется их сегментирование согласно патенту Милликена [4,6]. Жилы типа "Милли-

кен" состоят из нескольких (обычно 3–5) многопроволочных сегментов, изолированных друг от друга и скручиваемых в процессе изготовления с целью обеспечения транспозиции и более равномерного распределения тока между сегментами. В качестве примера на рис. 1 показана конструкция одного из таких кабелей с жилой, состоящей их пяти изолированных сегментов.

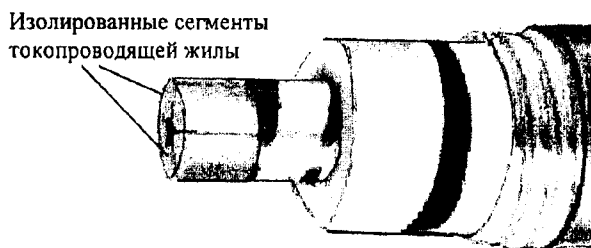


Рис. 1

В технологическом процессе изготовления силовых кабелей непосредственно перед наложением полимерной изоляции необходимо обеспечить нагрев движущейся жилы до температуры  $80\text{--}120^\circ\text{C}$ . Для этих целей могут использоваться установки индукционного нагрева. Один из возможных вариантов исполнения такой установки с тремя длинными цилиндрическими проходными индукто-

рами, внутри которых со скоростью  $v_z$  движется сегментированная токопроводящая жила, показан на рис. 2. В качестве источника питания здесь используется либо трехфазная сеть (в случае нагрева на промышленной частоте 50 Гц), либо тиристорный преобразователь частоты, обеспечивающий нагрев на более высокой частоте — 1000 Гц, 2400 Гц и выше. В силу сложной структуры поперечного сечения жилы и наличия изоляционных промежутков между сегментами методика расчета электромагнитных и тепловых процессов в сегментированных жилах имеет ряд особенностей, что не позволяет использовать известные методики, описанные, например, в [3, 5].

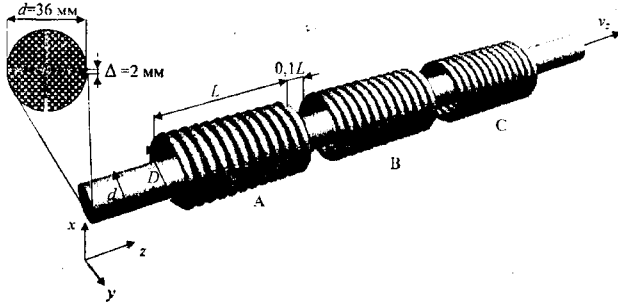


Рис. 2

Целью настоящей работы является разработка математической модели и методики численного расчета электромагнитных и тепловых процессов в сегментированной токопроводящей жиле с большой площадью поперечного сечения (1000—3000 мм<sup>2</sup>) при ее непрерывном движении в переменном магнитном поле цилиндрических индукторов, а также исследование основных закономерностей распределения джоулевых потерь и температуры в объеме сегментированной жилы, что необходимо для выбора требуемых параметров индукционной установки и источника питания.

**Численный расчет электромагнитных и тепловых процессов в сегментированной жиле.**

*Расчет электромагнитных процессов в сегментированной жиле.* Рассматривается случай использования длинного индуктора. Это позволяет анализировать электромагнитные процессы в двумерной постановке, рассматривая поле в плоскости  $xOy$

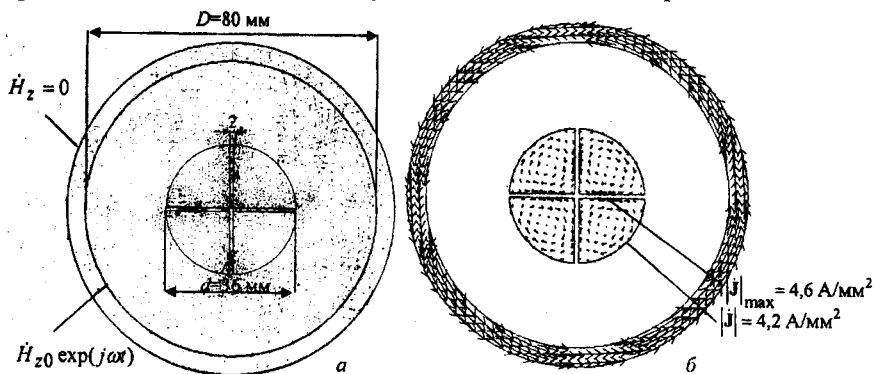


Рис. 3

(рис. 2). При расчете магнитного поля движение жилы не учитывается, что справедливо в приближении малых значений магнитного числа Рейнольдса —  $Re_m = \mu_0 \sigma L v_z \ll 1$ , где  $\sigma$  — электропроводность материала жилы. Рассматривается случай, когда материал жилы (например, алюминий) является токопроводящим и немагнитным. Контактное сопротивление между алюминиевыми проволоками в каждом сегменте предполагается равным нулю. При необходимости учет значения этого сопротивления можно выполнить, если величину электропроводности в уравнении для электромагнитной задачи заменить предварительно вычисленным эффективным значением.

Расчетная область электромагнитной задачи показана на рис. 3, а.

Полевою задачей будем рассматривать для комплексного вектора напряженности магнитного поля, имеющего единственную  $z$ -составляющую —  $\mathbf{H} = (0, 0, H_z)$ .

Для вектора  $\mathbf{H}$  из системы уравнений Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}, \quad \nabla \cdot \mu_0 \mathbf{H} = 0$$

получим следующее основное дифференциальное уравнение

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

В качестве источника поля задается значение напряженности на внутренней поверхности индуктора  $H_{z0} \exp(j\omega t)$ , что эквивалентно заданию поверхностной плотности тока в индукторе. На внешней поверхности индуктора поле полагается равным нулю (рис. 3, а).

Решение дифференциального уравнения (1) с указанными граничными условиями выполнялось численно методом конечных элементов с помощью программного пакета Comsol 3.3 [7].

После нахождения распределения поля  $\mathbf{H}$  по сечению жилы, значения вектора плотности электрического тока  $\mathbf{J}$  и мощности джоулевых потерь  $q$  в каждой точке поперечного сечения определяются

на основании следующих выражений:

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

Кроме того, для дальнейшего решения тепловой задачи может быть вычислено среднее значение джоулевых потерь по сечению сегмента (имеет одинаковое значение для каждого сегмента)  $q_{\text{ср}} = \int_S q dS$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения сегмента.

*Расчет нагрева жилы при движении в магнитном поле индукторов.* Тепловая задача решается в трехмерной постановке в неподвижной системе координат, связанной с индукторами. В этом случае при постоянной скорости движения жилы температурное поле является трехмерным и стационарным (независящим от времени). В силу существующей симметрии в качестве трехмерной расчетной области для тепловой задачи выбирается один сегмент, который показан на рис. 3, а с нанесенной объемной конечно-элементной сеткой. После решения такой тепловой задачи проводился более точный расчет поля температуры во всем объеме сегментированной жилы с учетом неравномерного распределения джоулевых потерь по ее сечению, найденному из решения электромагнитной задачи.

Дифференциальное уравнение теплопроводности в объеме сегмента, учитывающее перенос тепла за счет механизмов конвекции и диффузии, имеет следующий вид [1]:

$$\rho C \mathbf{V} \cdot \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T) + q_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где  $\rho, C, \lambda$  — соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность материала,  $\mathbf{V} = (0, 0, v_z)$  — скорость движения жилы вдоль координаты  $z$ ,  $q_{\text{ср}}$  — зависящая от пространственной координаты мощность джоулевых потерь, выделяемая в проводниках жилы в зоне расположения индукторов и определяемая из решения электромагнитной задачи.

Задавались следующие граничные условия для тепловой задачи: на входе в индуктор температура на торце сегмента равна температуре окружающей среды  $T_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$ ; на боковых поверхностях сегмента — условие теплоизоляции, а на наружной поверхности — теплоотдача в окружающую среду по закону [2]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = (5,6 + 4\nu) (T - T_{\text{окр}}).$$

Здесь  $\nu$  — скорость движения воздуха на поверхности жилы, которая полагалась равной скорости движения жилы.

На выходе из индуктора на торце сегмента задавался конвективный перенос тепла, т.е. равенство

нулю производной температуры по внешней нормали.

Решение дифференциального уравнения (2) с указанными граничными условиями выполнялось численно методом конечных элементов с помощью программы Comsol 3.3 [7].

#### Анализ результатов компьютерных расчетов.

*Электромагнитные процессы.* Анализируются электромагнитные процессы в алюминиевой жиле, находящейся в магнитном поле трех цилиндрических многовитковых индукторов, выполненных из медной водоохлаждаемой трубки. Основные размеры в поперечном сечении этих элементов показаны на рис. 2 и 3, а. Указанный диаметр жилы соответствует площади ее поперечного сечения —  $1000 \text{ мм}^2$ , что является тем значением, начиная с которого рекомендуется выполнять сегментирование жилы. Напряженность магнитного поля на внутренней поверхности индуктора принимается равной  $H_{z0} = 10^5 \text{ А/м}$  (амплитудное значение), на наружной поверхности —  $H_z = 0$ . Материал изоляционных промежутков между сегментами — электрокартон, электропроводность которого полагается равной нулю.

Расчетное распределение вектора плотности электрического тока при частоте 50 Гц в поперечном сечении жилы и индуктора показано на рис. 3, б. Из-за наличия четырех изолированных сегментов в жиле, плотность тока в ней образует четыре вихревые структуры, причем максимальная плотность локализована не на наружной (как в случае сплошной жилы), а на внутренних поверхностях сегментов, что является проявлением эффекта близости между сегментами. Так, согласно рис. 3, б, значение плотности тока на наружной поверхности сегмента меньше его максимального значения на внутренней поверхности приблизительно на 10%. Это обстоятельство наиболее наглядно показано на рис. 4, а, где показано распределение плотности тока по сечению жилы при частоте 50 Гц. Такому распределению соответствует неравномерное распределение джоулевого тепла (показано на рис. 4, б), обеспечивающее нагрев жилы.

Распределение магнитного поля  $|H_z|$  по сечению сегментов при различной частоте тока в индукторе показано на рис. 5. Видно, что при 50 Гц поле распределено практически равномерно по глубине сегментов, а в случае частоты 2400 Гц существенно проявляется скин-эффект.

Распределение плотности тока  $\mathbf{J}$  и джоулевых потерь  $q$  по сечению сегментированной жилы при различной частоте тока в индукторе показано на рис. 6. Рис. 7 представляет частотные зависимости максимальных значений плотности тока  $|\mathbf{J}|_{\text{max}}$  и джоулевых потерь  $q_{\text{max}}$ , а также среднего по сечению жилы значения джоулевых потерь  $q_{\text{ср}}$ . Как следует из анализа полученных данных, при  $f < 500 \text{ Гц}$ , когда скин-эффект проявляется слабо, с ростом частоты

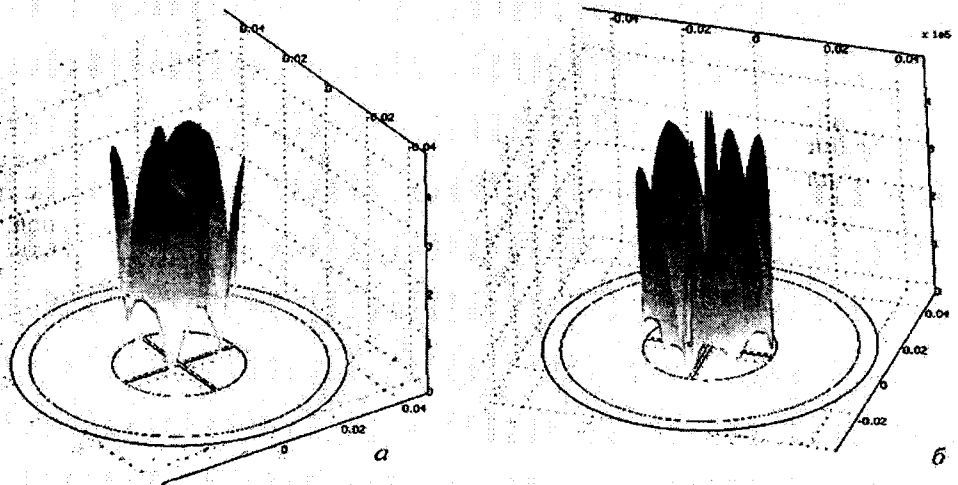


Рис. 4

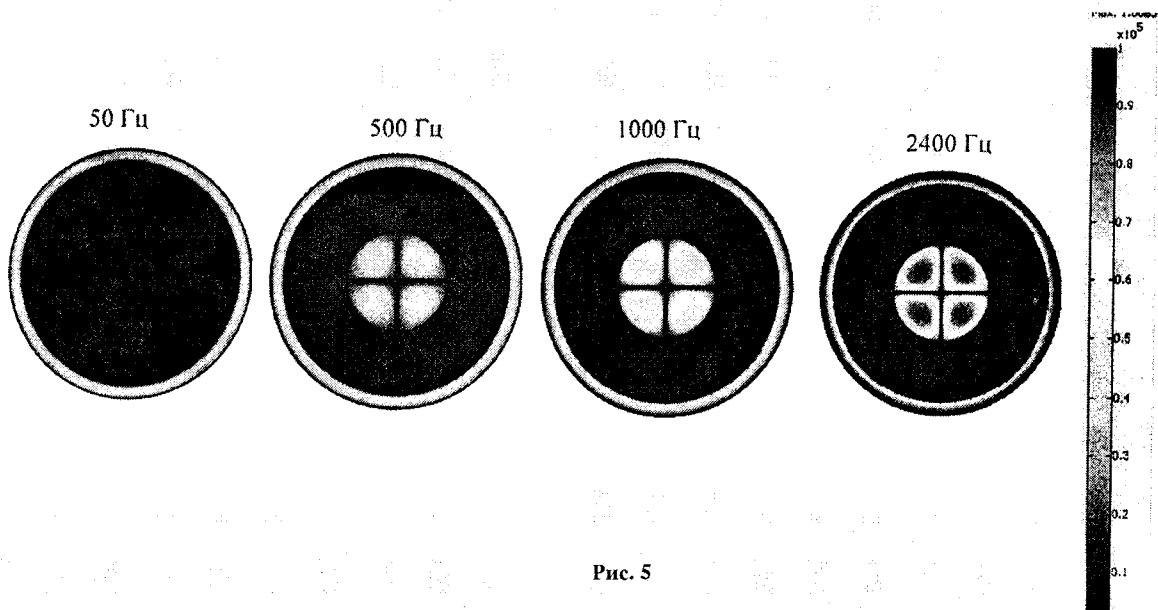


Рис. 5

ты эти величины изменяются соответственно по эмпирическому закону  $|\mathbf{j}|_{\max} = k_j f^{0,87}$  и  $q_{\max} = k_q f^{1,73}$ . При условии  $f \geq 500$  Гц начинает сказываться эффект близости между сегментами и скин-эффект. В результате этого закон изменения от частоты указанных величин изменяется и определяется следующими выражениями:  $|\mathbf{j}|_{\max} = k'_j f^{0,47}$  и  $q_{\max} = k'_q f^{0,92}$ . Полученные зависимости могут использоваться при анализе эффективности индукционного нагрева алюминиевых сегментированных жил сечением приблизительно  $1000 \text{ мм}^2$ .

*Тепловые процессы.* Решение тепловой задачи

выполнялось при длине каждого индуктора  $L = 0,1$  м, скорости движения жилы  $v_z = 0,04$  м/с (рис. 2) и для различной частоты тока в индукторе (значения частоты указаны на рис. 6) и соответственно значений  $q_{\text{ср}}$ , показанных на рис. 7.

Результаты компьютерных расчетов показаны на рис. 8, где наряду с конечно-элементной сеткой, выбранной для расчетов, (рис. 8, а) показано распределение температуры на поверхности сегмента для  $f = 2400$  Гц,  $v_z = 0,04$  м/с (рис. 8, б) и вдоль его длины для различных значений частоты тока в индукторе (рис. 8, в).

Данные рис. 8 показывают следующее:  
— температура возрастает вдоль длины сег-

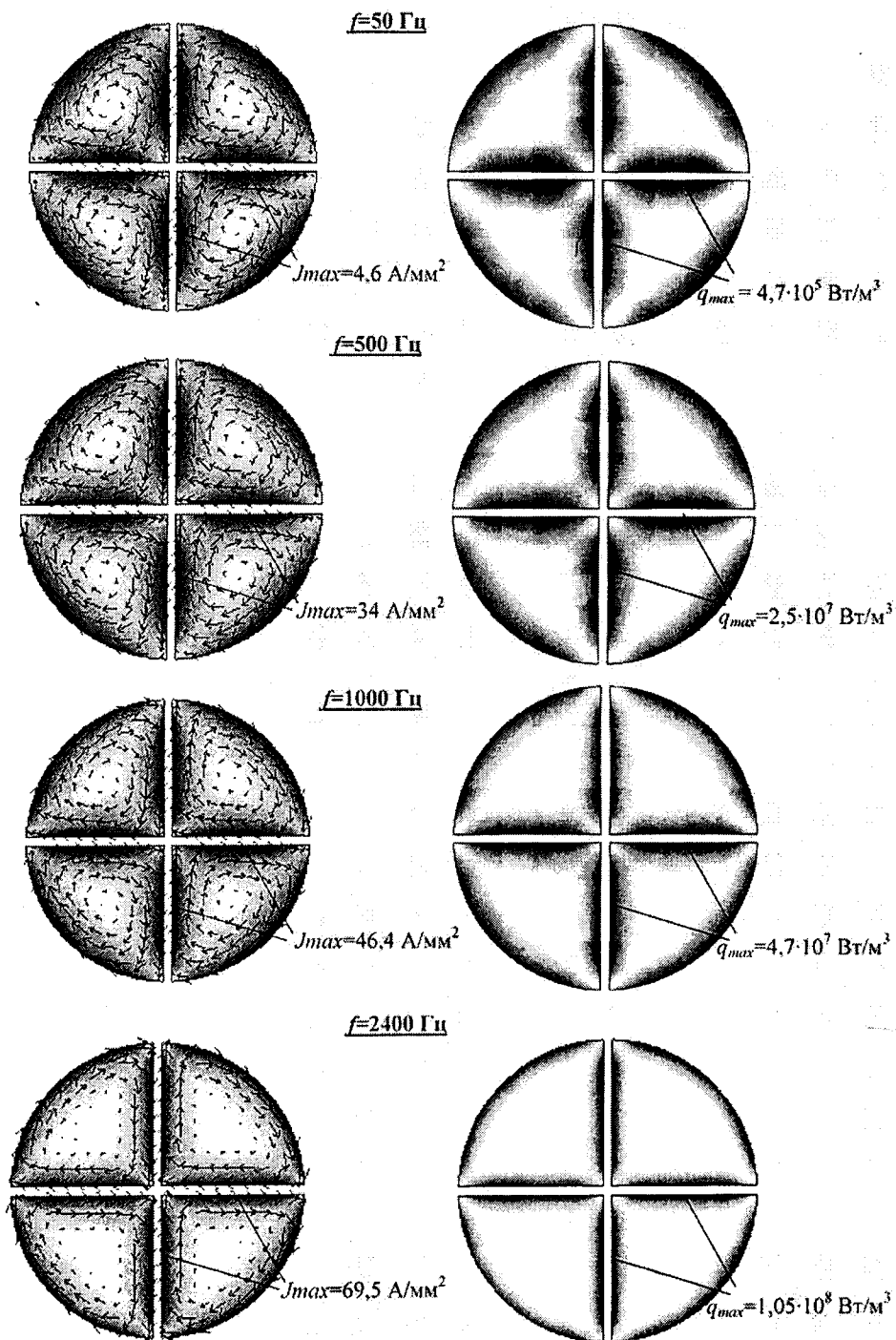


Рис. 6

мента приблизительно по линейному закону;

— при выбранных значениях всех параметров только индуктор с частотой тока 2400 Гц обеспечивает нагрев до температуры в требуемом интервале 80—120<sup>0</sup>С. При более низкой частоте и при неизменном значении ампер-витков индуктора снижается величина джоулевых потерь, а отсюда и величина максимальной температуры жилы на выходе из последнего индуктора;

— использование индукционного нагрева на

промышленной частоте 50 Гц возможно только при значительном снижении скорости движения жилы или значительном удлинении индукторов. Следует заметить, что для жил большего сечения, например, 3000 мм<sup>2</sup> (а не 1000 мм<sup>2</sup>, как рассматривается в данной работе), требуемый нагрев возможен на промышленной частоте.

Уточненный расчет температурного поля сегментированной жилы. Решение трехмерной тепловой задачи (2) с указанными выше граничными

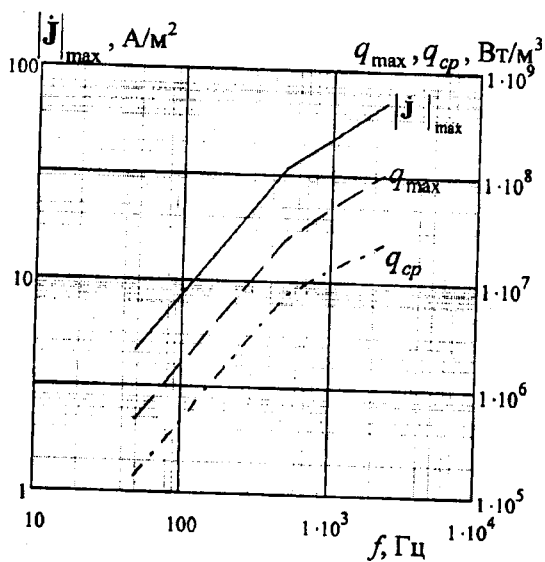


Рис. 7

условиями проводилось для всех четырех сегментов токопроводящей жилы. В отличие от предыдущих результатов, в задаче учитывалось неравномерное распределение джоулевых потерь  $q(x, y)$  по сечению жилы, найденное из предварительного решения электромагнитной задачи. Длина рассчитываемого участка жилы выбиралась, как и в упрощенной тепловой задаче, равной 0,5 м. Длина индуктора — 0,32 м. Положение начала индуктора задавалось на расстоянии 0,1 м от системы отсчета. Полагалось, что частота тока индуктора составляет  $f=2400$  Гц, а жила протягивается со скоростью  $v=0,04$  м/с.

На рис. 9 показано использованное для тепловых расчетов и соответствующее выбранным параметрам индуктора распределение мощности джоулевых потерь в ряде поперечных сечений вдоль длины жилы и в отдельном поперечном сечении из этого ряда — на вставке слева рис. 9. Величина предварительно определенных джоулевых потерь задавалась в области сегментов жилы только на участке расположения индуктора. Максимальное значение  $q_{\max} = 1,05 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>, что также показано на рис. 6. Для такого случая рассчитанные распределения температурного поля в различных сечениях по длине жилы показаны на рис. 10. Здесь же на вставке слева показано изменение температуры вдоль отмеченной линии *AB*. Как видно, нагрев конечных участков жилы происходит до 87°С. В сравнении с упрощенным тепловым расчетом, проведенным выше для одного сегмента жилы, полученное значение температуры несколько ниже (рис. 8б, в). Это объясняется учетом в уточненном расчете электроизоляционных промежутков из электрокартона между сегментами.

Интерес представляет выяснение характера распределения температуры по сечению жилы и тем самым степени равномерности ее нагрева индукционным способом. На рис. 11 показаны распределения температурного поля по сечению жилы на расстоянии: а) 0,25 м и б) 0,345 м от нулевой координаты. На графиках справа отражен характер изменения температуры вдоль отмеченной здесь линии *AB*. Показано, что на начальных секциях нагрева температура в сегментах распределена не-

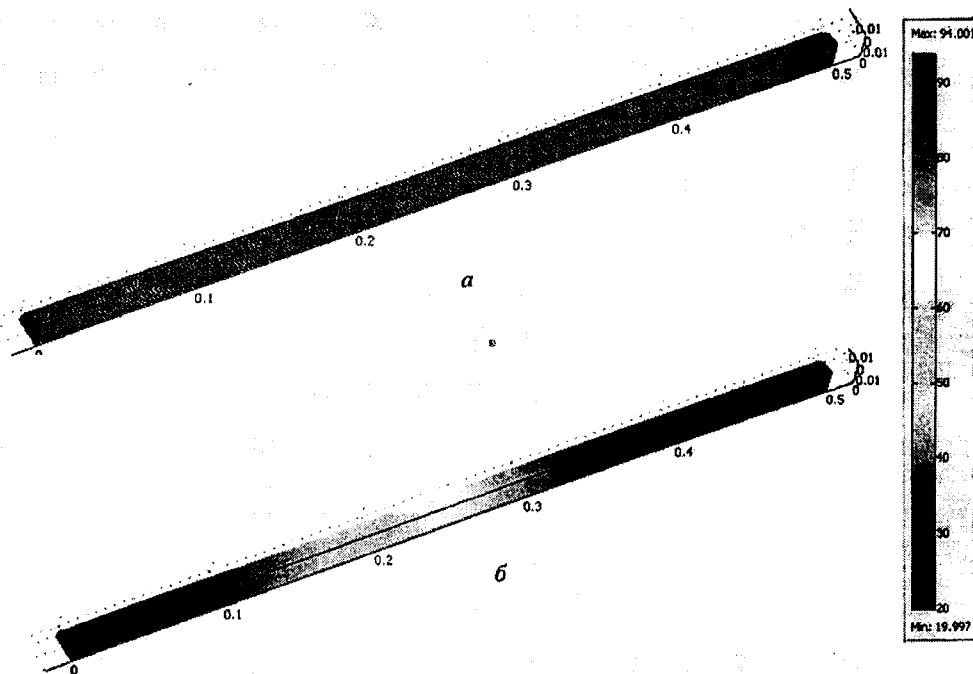


Рис. 8, а, б

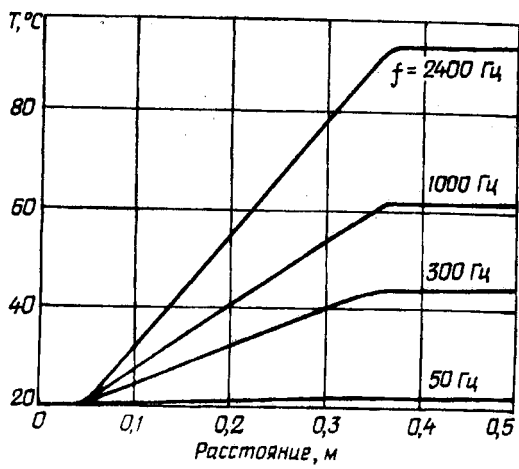


Рис. 8, в

равномерно (рис. 11, а). Боковые поверхности испытывают больший нагрев в сравнении с центральными зонами сегментов. В то же время изоляционные промежутки почти не нагреваются. Для конечных секций нагрева наблюдается практически равномерное распределение температуры в сегментах жилы (рис. 11, б), что является следствием длительного нагрева при достаточно малой скорости движения жилы. Более низкая температура имеет место в электрокартоне.

Полученные численные значения температуры жилы позволяют в первом приближении путем простого пересчета выбрать требуемые параметры индуктора и тока в его проводниках, например, для случая увеличения скорости движения жилы.

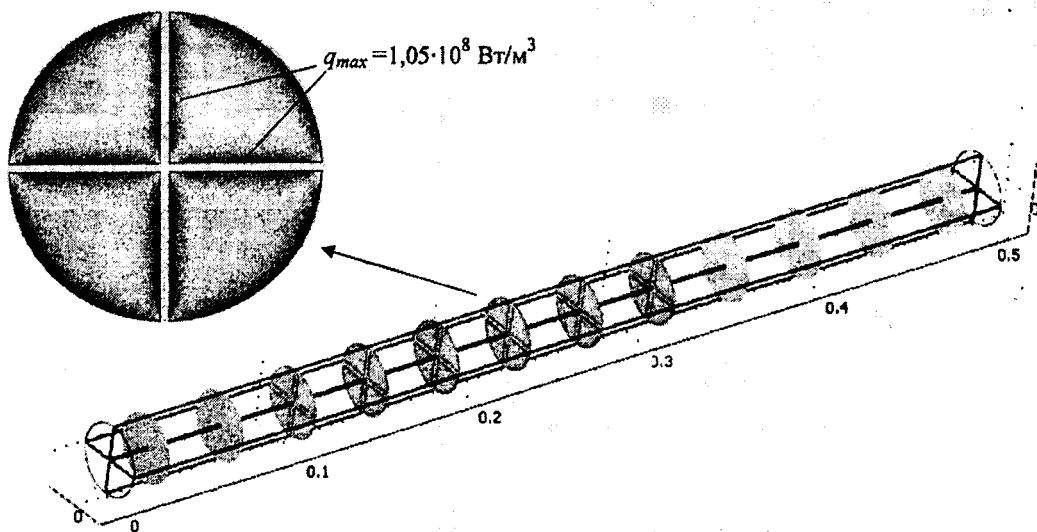


Рис. 9

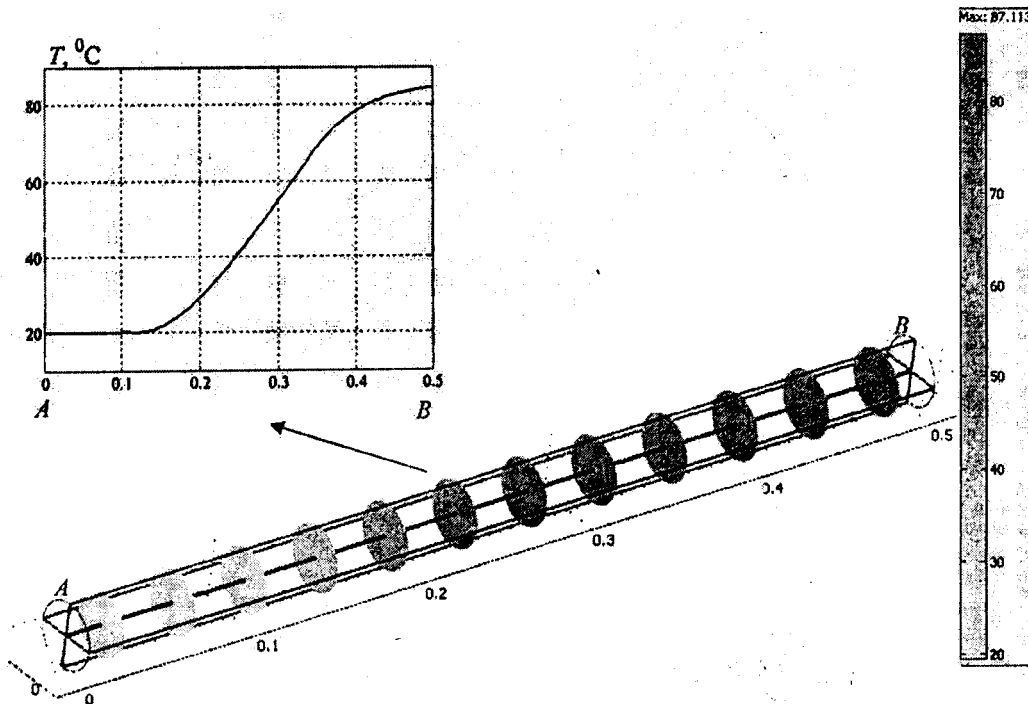


Рис. 10

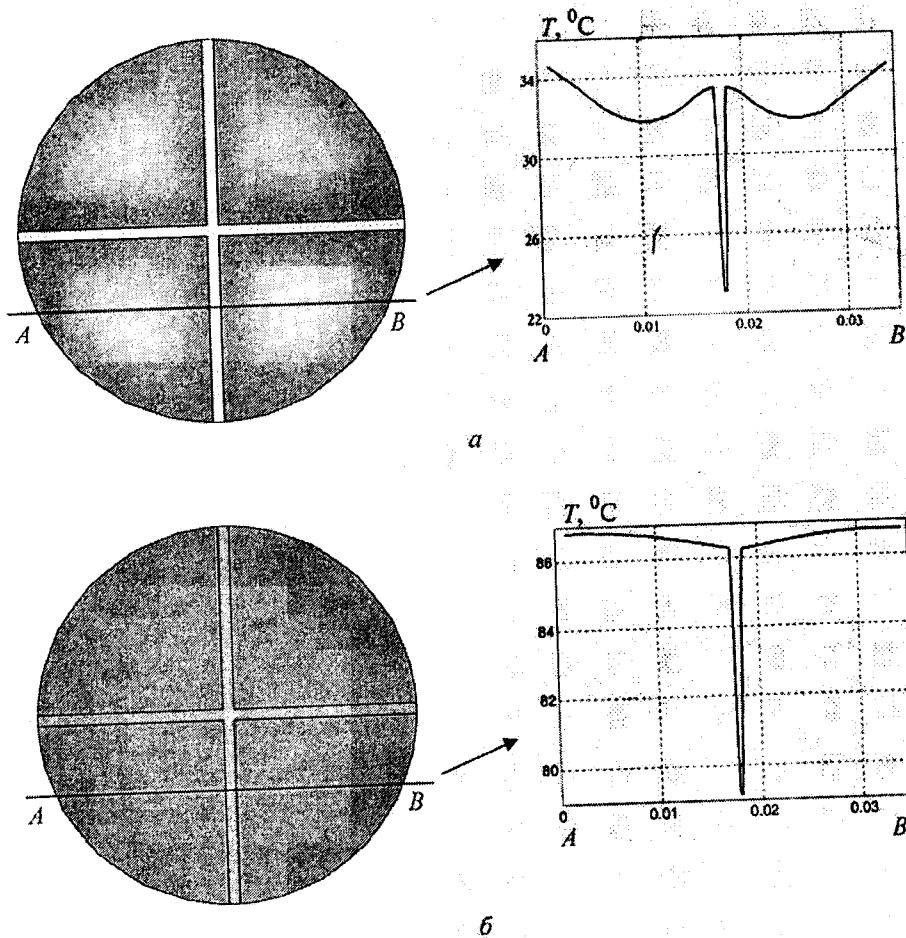


Рис. 11

### Выводы.

В работе приведена математическая модель и методика численного расчета методом конечных элементов электромагнитного поля и уровня нагрева сегментированной токопроводящей жилы (типа Милликен) силового кабеля большого поперечного сечения (более  $1000 \text{ мм}^2$ ) при непрерывном движении в переменном магнитном поле цилиндрических индукторов. Необходимость предварительного нагрева жилы продиктована требованиями технологического процесса изготовления силовых кабелей. Приведены картины поля, отражающие особенности проявления поверхностного эффекта и эффекта близости в сегментах жилы в диапазоне изменения частоты 50—2400 Гц. В частности, показано, что максимальное значение плотности тока и джоулевых потерь локализовано не на поверхности каждого сегмента, а на его боковых гранях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на неравномерное распределение джоулевых потерь по сечению жилы, ее на-

грев достаточно равномерен. На основании проведенных исследований определены требуемые параметры индукторов и источника питания, при которых обеспечивается нагрев жилы до заданной температуры в интервале 80—120<sup>0</sup>С.

1. Карташев Э.М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. — М.: Высшая школа, 1979. — 415 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1985. — 520 с.
3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
4. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 232 с.
5. Установки индукционного нагрева. / Ред. А.Е.Слухоцкого. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 326 с.
6. Milliken H. Electrical Cable. / Patent Publication 1933, US № 475094.
7. www.comsol.com

Надійшла 22.07.2008