

УДК 621.311.1: 621.316.1

**ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ
С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТОЙ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ТЕКСТИЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION
THE TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLTAGE POWER CABLE
OF INCREASED FREQUENCY IN TEXTILE INDUSTRY**

*С.В. ФЕДОСОВ, А.М. СОКОЛОВ, А.В. ГУСЕНКОВ, В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Т.Е. ШАДРИКОВ, А. ТАНКОЙ
S.V. FEDOSOV, A.M. SOKOLOV, A.V. GUSENKOV, V.D. LEBEDEV, T.E. SHADRIKOV, A. TANKOY*

(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет)
(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State Power University)

E-mail: avgus@ispu.ru; vd_lebedev@mail.ru; sam@vetf.ispu.ru; Pr3d37@gmail.com;

Разработана методика численно-аналитического расчета температурного поля изоляции высоковольтного силового кабеля, работающего в составе электротехнического комплекса повышенной частоты. В расчетах используется несинусоидальное напряжение, которое представляется как сумма гармоник с применением разложения в ряд Фурье, и учитывается нагрев внутренних слоев изоляции вследствие диэлектрических потерь. Предложенная методика позволяет учитывать нелинейный характер изменения различных параметров изоляции кабеля в зависимости от различных факторов (температура, частота, гармонический состав и т.д.). Методика дает возможность получить посредством расчета распределение температуры в поперечном сечении высоковольтного кабеля для обоснованного определения предельно-допустимых эксплуатационных показателей в условиях текстильного производства; она проста и удобна в практическом применении.

The developed method of numerical-analytical calculation of the temperature field in insulation of the high voltage power cable operating at high voltage and increased frequency (10...15 kHz) power transmission described. The non-sinusoidal voltage, which represented as a sum of harmonics with application of a decomposition in Fourier series used for calculations. The method takes into account the heating of internal layers of the insulation due to dielectric loss. The proposed method allows taking into account the nonlinear character of changes of various

parameters of the cable insulation depending on various factors (temperature, frequency, harmonic composition, etc.). The method allows determining reasonably the limiting current loads of high-voltage cable in a high-frequency power transmission.

Ключевые слова: рабочее напряжение, высоковольтная кабельная линия, переменное напряжение, повышенная частота, полупроводниковый преобразователь напряжения, диэлектрические потери, тангенс угла диэлектрических потерь, температурное поле, численно-аналитический метод расчета.

Keywords: operation voltage, HV power cable, AC voltage, increased frequency, VSC, TD, temperature field, the numerical-analytical method of calculation.

Возможность создания и применения высоковольтных кабельных линий в составе электрических сетей переменного тока промышленного электроснабжения с нетрадиционными параметрами токов и напряжений (повышенная или пониженная частота напряжения, трапециевидальная форма осциллограммы напряжения) [1...3] определяет необходимость разработки новых и совершенствования существующих конструкций кабелей высокого напряжения. Такие кабели могут применяться для создания на предприятиях текстильной отрасли систем электроснабжения нового поколения, имеющих существенно лучшие эксплуатационные показатели [4]. Одной из важнейших характеристик работы высоковольтной кабельной линии повышенной частоты является установившийся температурный режим, который, как известно, определяет предельную величину электрического тока, протекающего по жиле кабеля, и передаваемой потребителю электрической мощности [5].

Применение напряжения с нетрадиционными параметрами токов и напряжений обуславливает наличие высших гармонических составляющих в форме действующего напряжения на изоляцию высоковольтных кабельных линий повышенной частоты. Частота рабочего напряжения в таких системах может составлять от 5 до 20 кГц, что приводит к необходимости учитывать возрастающее на несколько порядков значение диэлектрических потерь в изоляции кабеля, а также значительное влияние на величину этих потерь различных факто-

ров (частота напряжения, температура, напряженность электрического поля в изоляции, вид изоляционного материала и др.) [5]. В этих условиях целесообразна постановка задачи по разработке универсальной методики расчета температурного поля в изоляции кабельной линии, которая учитывает все перечисленные выше факторы и нелинейный характер изменения различных показателей электротехнических материалов кабельной линии (удельное электрическое сопротивление материала токоведущих элементов, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости материала изоляции, интенсивность теплоотдачи с поверхности кабеля и др.).

Температурное поле в изоляции кабеля определяется процессом теплопереноса в материале, который в общем случае описывается дифференциальным уравнением параболического типа в частных производных [5...7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [a(T)\nabla T] + \frac{q_v}{c(T)\rho(T)}, \quad (1)$$

где $a(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)c(T)}$ – коэффициент температуропроводности материала изоляции, m^2/s ; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot K)$; $c(T)$ – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$; $\rho(T)$ – плотность материала изоляции, $кг/м^3$ (все указанные параметры в общем случае зависят от темпера-

туры); $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Га-

милтона; Q_v – объемная плотность мощности тепловыделения, в произвольной точке изоляции, Вт/м³, которая рассчитывается по формуле [5], [7]:

$$q_v = E^2 2\pi f \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где f – частота переменного рабочего (синусоидального) напряжения, Гц; E – напряженность электрического поля в этой точке (эффективное значение), В/м; ϵ_0 , Ф/м, и ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции кабеля; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

В высоковольтных кабельных линиях повышенной частоты целесообразно [3], [4] применение коаксиального специализированного кабеля типа КВСП-М или радиочастотного кабеля РК-75, представляющего из себя медную жилу со слоем изоляции вокруг нее, экраном (оплеткой) и защитной оболочкой (рис. 1 – коаксиальный кабель: 1 – токоведущая жила; 2 – изоляция; 3 – токопроводящая оплетка; 4 – защитное (диэлектрическое) покрытие; U – рабочее напряжение; $T_{ж}$ и $T_{нар}$ – температура жилы и температура на поверхности оплетки кабеля, К).

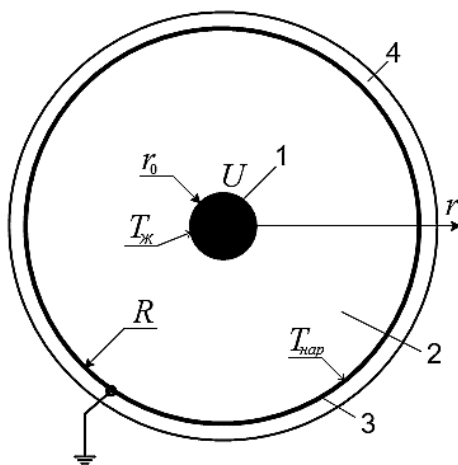


Рис. 1

Нагрев кабеля обусловлен потерями мощности в жиле $P_{ж}$ и в изоляции $P_{из}$, по-

гонные значения которых, Вт/м, определяются по формулам [5]:

$$P_{ж} = R_{ж} I^2 = \frac{(1+k) \rho_{20}}{F_{ж}} [1 + a_0 (T_{ж} - 293)] I^2, \quad (3)$$

$$P_{из} = U^2 2\pi f C \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

где погонная емкость одножильного кабеля, Ф/м, (рис. 1) определяется по формуле [4], [6]:

$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln(R/r_0)}, \quad (5)$$

$R_{ж}$ – погонное значение активного сопротивления жилы кабеля, Ом/м, R и r_0 – радиусы изоляции и жилы, м (рис. 1), $F_{ж} = \pi r_0^2$ – площадь поперечного сечения жилы, мм²; U и I – эффективные значения рабочих напряжения, В, и тока, А, в жиле, $k = 0,015 \dots 0,03$ – коэффициент укрутки, ρ_{20} и a_0 – удельное электрическое сопротивление при температуре 293°К (20°С), то есть при нормальных условиях, и температурный коэффициент увеличения сопротивления материала жилы (для меди: $\rho_{20} = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, $a_0 = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$)

Согласно [5] для подавляющего большинства высоковольтных кабелей промышленной частоты справедливо соотношение $P_{из} \ll P_{ж}$ и, как правило, нет необходимости учитывать величину $P_{из}$ при определении температурных характеристик. При использовании рабочего напряжения с повышенной частотой, в сотни раз превышающей промышленную, происходит пропорциональное увеличение $P_{из}$ согласно (4), что требует учета этой составляющей. Кроме этого, необходимо учесть изменение различных показателей изоляционного материала.

Для получения универсального и простого метода расчета температурного поля изоляции высоковольтных кабелей повышенной частоты целесообразно применять, как показали предварительные расчетные оценки [7], методику численно-аналитического расчета, которая иллюстрируется

рис. 2 (расчетная модель коаксиального кабеля: $q_{s,m}$ – плотность теплового потока с поверхности кабеля (последнего слоя), Вт/м²). В этом случае объем изоляции

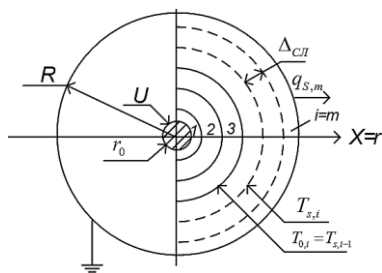


Рис. 2

В основе расчета лежит предположение, что при достаточно малой толщине слоя $\Delta_{cл}$ распространение теплового потока и температурное поле в слое будут соответствовать картине одномерного температурного поля (рис. 3 – одномерная картина теплопереноса в плоском слое: q_s – плотность теплового потока на выходе из слоя в направлении координаты X ; T_s и T_0 – температура на внешней и внутренней поверхности слоя; T_x – текущее значение температуры при изменении координаты X в пределах толщины слоя $\Delta_{cл}$; ∂x – бесконечно малый отрезок вдоль оси X ; Y и Z – координаты вдоль поверхности плоского слоя). Задача расчета температурного поля в этом случае, исходя из краевых условий уравнения (1): $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$, $q_s = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial x}$ и

$T_x = T_s$ при $x = \Delta_{cл}$, $T_x = T_0$ при $x = 0$ (рис. 3) и в предположении, что плотность объемного тепловыделения по всему объему слоя остается неизменной $q_v = \text{const}$, имеет простое решение [6], [7]:

$$T_x = T_s + \frac{q_s}{\lambda 2 \Delta_{cл}} (\Delta_{cл}^2 - x^2). \quad (6)$$

Полагая $x = 0$ ($0 \leq x \leq \Delta_{cл}$), из формулы (6) получаем уравнение, которое связывает значения температуры на внешней и внутренней поверхности слоя (рис. 3):

$$T_0 = T_s + \frac{q_s \Delta_{cл}}{\lambda 2}. \quad (7)$$

(рис. 1, поз. 2) в поперечном сечении разбивается на m слоев (рис. 2), расположенных концентрически относительно жилы кабеля. Для удобства вычислений толщина слоев $\Delta_{cл}$ выбирается одинаковой.

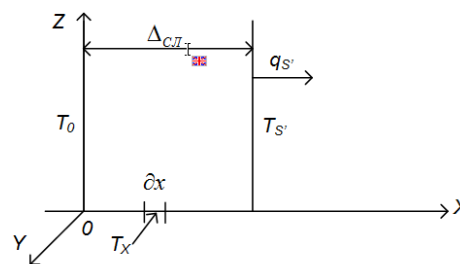


Рис. 3

Исходными параметрами расчета являются температура окружающего воздуха T_b , °K, температура на поверхности кабеля $T_{s,m} = T_{нар}$, °K, и число слоев m (рис. 2). Это дает возможность определить толщину одного слоя:

$$\Delta_{cл} = \frac{(R - r_0)}{m}. \quad (8)$$

К числу исходных сведений относится также знание закона изменения во времени несинусоидального рабочего напряжения $U(t)$, В, воздействующего на изоляцию кабеля, и разложения $U(t)$ в ряд Фурье [8], [9]:

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t), \quad (9)$$

где U_k – амплитуда k -й гармоники, В; $f_k = k f_1 = \frac{k}{T_1}$ и $\omega_k = 2\pi f_k$ – частота и угловая частота k -й гармоники; $k = 1, 3, 5, 7, \dots$ – кратность гармоники (присутствуют только нечетные гармоники, так как кривая напряжения симметрична относительно оси времени [8], [9]); $f_1 = f$ – частота первой гармоники (частота воздействующего напряжения), Гц.

Кроме перечисленных выше сведений должны быть известны зависимости $\text{tg} \delta$ и ϵ изоляционного материала от температуры и частоты напряжения.

Знание амплитуды гармоники U_k позволяет определить эффективное значение

напряженности электрического поля этой гармоники, В/м, в любой точке изоляции (рис. 2) по формуле [5]:

$$E_k = \frac{U_k}{r\sqrt{2\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}}. \quad (10)$$

Плотность теплового потока на поверхности кабеля, Вт/м², (последнего слоя) может быть найдена как [5...7]:

$$q_{vk,m} = \left(\frac{U_k C}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r_m \sqrt{2}} \right)^2 2\pi f \epsilon\epsilon_0 \operatorname{tg}\delta = \frac{U_k^2 \pi f \epsilon_{k,m} \epsilon_0 \operatorname{tg}\delta_{k,m}}{r_m^2 \left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2} = \operatorname{const}, \quad (12)$$

где $r_m = R - \frac{\Delta_{\text{сл}}}{2}$ – среднее значение радиуса

слоя (рис. 2); $\operatorname{tg}\delta_{k,m}$ и $\epsilon_{k,m}$ – значения тангенса диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости изоляции, соответствующие частоте k -й гармоники и температуре m -го слоя.

Температура в начале последнего слоя, °К, (то есть в конце предпоследнего слоя) определяется с помощью формулы (7):

$$T_{O,m} = T_{S,m-1} = T_{S,m} + \frac{q_{S,m} \Delta_{\text{сл}}}{\lambda 2}, \quad (13)$$

$$\text{где } V_m = 2\pi r_m \Delta_{\text{сл}} \ell \quad (16)$$

– объем рассматриваемого слоя ($\ell=1$ м).

Полная мощность диэлектрических потерь в m -м слое, Вт/м, определяется суммированием по всем гармоникам:

$$q_m = \sum_{k=1}^{\infty} q_{k,m}. \quad (17)$$

При стационарном температурном состоянии высоковольтного кабеля вся мощ-

$$q_{S,m} = q_{\text{нап}} = \alpha_{\text{КОН}} (T_{\text{нап}} - T_B) = \alpha_{\text{КОН}} (T_{S,m} - T_B), \quad (11)$$

где $\alpha_{\text{КОН}} = 2,5(T_{S,m} - T_B)^{0,25}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности кабеля, Вт/(м²·°К).

Полагая, что в пределах одного слоя $\Delta_{\text{сл}}$ (например, m -го слоя – рис. 2) объемная плотность мощности тепловыделения, Вт/м³, имеет одинаковую величину, ее значение для напряжения k -й гармоники разложения (9), исходя из соотношений (2), (5) и (10), можно определить по формуле:

а также можно определить среднее значение температуры в слое:

$$\bar{T}_m = \frac{T_{O,m} + T_{S,m}}{2}. \quad (14)$$

По известным зависимостям [10] определяются $\operatorname{tg}\delta_{k,m} = f(\bar{T}_m; f_k)$ и $\epsilon_{k,m} = f(\bar{T}_m; f_k)$ и вычисляется $q_{vk,m}$ с использованием формулы (12), что позволяет определить мощность диэлектрических потерь k -й гармоники в слое в расчете на единицу длины кабеля ($\ell = 1$ м), Вт/м, следующим образом:

$$q_{k,m} = q_{vk,m} V_m = 2\pi r_m \Delta_{\text{сл}} q_{vk,m} = \frac{U_k^2 2\pi^2 \Delta_{\text{сл}} f_k \epsilon_{k,m} \epsilon_0 \operatorname{tg}\delta_{k,m}}{r_m \left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2}, \quad (15)$$

ность, определяемая соотношением (17), будет участвовать в общем тепловом потоке, идущем от жилы кабеля к его оболочке и далее в окружающую среду за счет теплоотдачи с поверхности согласно (11). Это означает, что плотность теплового потока на поверхности следующего, $(m-1)$ -го, слоя, Вт/м², будет меньше на величину, определяемую мощностью диэлектрических потерь в m -м слое, и может быть вычислена по формуле:

$$q_{S,m-1} = q_{S,m} - \frac{q_m}{F_m} = q_{S,m} - \frac{q_m}{2\pi r_m}, \quad (18)$$

$$\text{где } F_m = 2\pi r_m \ell = 2\pi r_m \quad (19)$$

– площадь поверхности m -го слоя в расчете $\ell = 1$ м. Это позволяет по аналогии с формулами (13) и (14) определить уже температуру на следующей границе между слоями (рис. 2) и среднюю температуру слоя, °К:

$$T_{O,m-1} = T_{S,m-2} = T_{S,m-1} + \frac{q_{S,m-1} \Delta_{cl}}{\lambda 2}, \quad (20)$$

$$\bar{T}_{m-1} = \frac{T_{O,m-1} + T_{S,m-1}}{2}.$$

Дальнейшие вычисления при последовательном изменении номера слоя от $i=m-1$ до $i=1$ выполняются с использованием однотипных соотношений, которые можно записать на основании рассмотренных выше формул. Например, с учетом (15)...(19) значение плотности теплового потока на поверхности двух соседних слоев, Вт/м², связаны соотношением:

$$q_{S,i-1} = q_{S,i} - \frac{\Delta_{cl} \varepsilon_0 \pi \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 f_k \varepsilon_{k,i} \operatorname{tg} \delta_{k,i}}{r_i^2 \left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2}, \quad (21)$$

где среднее значение радиуса слоя:

$$r_i = r_m - \Delta_{cl} (m-i). \quad (22)$$

Используя выражения (13), (14) и (20), можно записать общие выражения для определения значений температуры в произвольном слое, °К, (рис. 2):

$$T_{O,i} = T_{S,i-1} = T_{S,i} + \frac{q_{S,i} \Delta_{cl}}{\lambda 2}, \quad (23)$$

$$\bar{T}_i = \frac{T_{O,i} + T_{S,i}}{2}.$$

Результатом расчетов являются значения плотности теплового потока на поверх-

ности жилы кабеля $q_{жф}$, которое определяется на последнем шаге вычислений по формуле (21) при $i=1$, а также два массива значений размерностью $m+2$, состоящих из массива средних значений температуры

(23) в слое \bar{T}_i и соответствующего ему массива радиусов (22) размерностью m . Два остальных члена каждого массива – температура и ее координата на поверхности жилы ($T_{0,1}=T_{ж}; r_0$), а также температура и ее координата на поверхности кабеля ($T_{S,m}; R$). Эти массивы, кроме сведений о точных значениях температуры в различных точках изоляции кабеля, позволяют графически представить изменение температуры в поперечном сечении кабеля (рис. 1) в установленном режиме работы.

В процессе программно-алгоритмической реализации описанной процедуры вычислений в среде Matlab и выполненных расчетов были получены кривые распределения температуры по толщине изоляции, которые соответствуют предельным температурным условиям эксплуатации кабеля: $T_{ж}^{\max} = 70^\circ\text{C}$ (343°К) и $T_{в} = 40^\circ\text{C}$ (313°К) [5], и приведены на рис. 4 (изменение температуры по толщине изоляции кабеля типа РК-75 при различных значениях амплитуды рабочего напряжения повышенной частоты $f=13,3$ кГц: 1 – $U_m = 1$ кВ ($I_{\max} = 4,9$ А); 2 – $U_m = 5$ кВ ($I_{\max}=3,64$ А); 3 – $U_m = U_m^{\max} = 7,413$ кВ ($I_{\max}=0$ А); 4 – напряжение $U_m = 10$ кВ $> U_m^{\max}$).

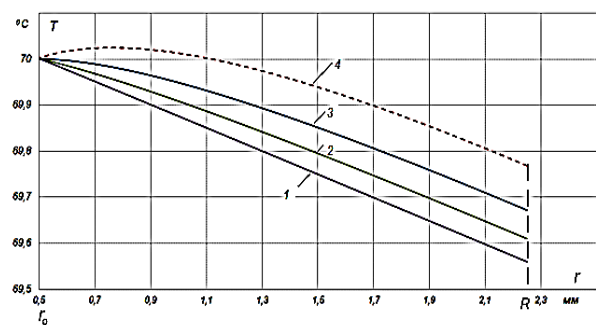


Рис. 4

Приведенные зависимости (рис. 4) подтверждают высказанное выше предположение о сильном влиянии диэлектрических

потерь в изоляции на установившийся температурный режим высоковольтного кабеля с повышенной частотой рабочего напряжения. Они позволяют сделать вывод, что по мере увеличения амплитуды рабочего напряжения U_m наблюдается снижение предельно допустимого тока в жиле кабеля I_{\max} , вплоть до того, что при некотором значении U_m^{\max} теплоотвод от жилы кабеля прекращается и достигается $I_{\max} = 0$ (кривая 3). На рис. 4 представлена для сравнения кривая 4 изменения температуры для $U_m > U_m^{\max}$, которую следует считать гипотетической, так как для ее реализации требуется наличие теплоотвода от жилы кабеля. Технически это возможно, однако в этом случае необходимо считаться с тем, что опасный для изоляции нагрев будет возникать не на поверхности жилы, а в толще изоляционного материала.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика численно-аналитического расчета температурных характеристик высоковольтного кабеля повышенной частоты является универсальным, удобным, простым инструментом исследования установившихся температурных режимов кабельных линий и соответствует усилиям других исследователей в решении подобных задач [11], [12]. Использование методики на практике не требует от пользователя глубокой профессиональной подготовки, что выгодно отличает ее от существующих примеров сложного и громоздкого численного расчета температурных полей методом конечных элементов (МКЭ) [13]. Эта методика является основой для определения предельно допустимых эксплуатационных параметров высоковольтных кабельных линий повышенной частоты.

2. Существующих сведений о влиянии на величину $\text{tg}\delta$ и ϵ различных факторов (температуры, частоты напряжения, напряженности электрического поля и др.) явно недостаточно для эффективного применения предложенной методики. Требуется проведение всесторонних исследований характеристик

электроизоляционных материалов с целью устранения указанных пробелов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики // Энергетик. – 2014, №3. С. 46...49.
2. Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Бочаров Ю.Н., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики // Энергетик. – 2014, №4. С.15...18.
3. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. О возможности и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений // Энергетик. – 2015, №4. С.29-32.
4. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Митькин Ю.А., Соколов А.М. Перспективы создания высоковольтных систем электроснабжения промышленных предприятий на основе полупроводниковых преобразователей напряжения // Мат. Междунар. научн.-техн. конф.: Состояние и перспективы развития электротехнологии (17 Бенардосовские чтения). – Иваново, 2012. С. 112...114.
5. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холдный С.Д. Основы кабельной техники / Под ред. И.Б.Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006.
6. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010.
7. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. Температурные режимы работы силового высоковольтного кабеля в электропередаче повышенной частоты // Тр. VI Междунар. научн.-техн. конф.: Электроэнергетика глазами молодежи, 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2-х т. Т 1. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 2015. С.618...620.
8. Осипов Ю.М. Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей. – Ч.2. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
9. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. Применение разложения в ряд Фурье при расчете режимов работы полупроводникового преобразователя // Мат. Междунар. научн.-техн. конф.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии, (XVIII Бенардосовские чтения). – 2015. Т.1. С. 120...123.
10. Справочник по электротехническим материалам. – В 3-х т. Т.1 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Федосов С.В., Акулова М.В., Кокиаров С.А., Метелева О.В. Теоретические основы тепломассопереноса в перспективных технологиях производ-

ства материалов текстильной и строительной отраслей промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 6. С. 170...175.

12. Алоян Р.М., Петрухин А.Б., Федосеев В.Н. Возможность внедрения экологической и энергосберегающей технологии в текстильной энергетике // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 2. С. 188...192.

13. Горобец А.Н. Разработка метода расчета тепловых режимов высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Тр. VI Междунар. научн.-техн. конф. – В 2-х т. Т 1. – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 2015. С. 436...441.

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Yu.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj elektroenergetiki // Energetik. – 2014, №3. С. 46...49.

2. Fedosov S.V., Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov Yu.N., Sokolov A.M. Principy organizacii sovremennoj elektroenergetiki // Energetik. – 2014. №4. С.15...18.

3. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.E. O vozmozhnosti i celesoobraznosti fizicheskogo modelirovaniya elektroperedachi s netradicijnyimi parametrami ispolzueмых tokov i napryazhenij // Energetik. – 2015, №4. S.29-32.

4. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Mitkin Yu.A., Sokolov A.M. Perspektivy sozdaniya vysokovoltnyh sistem elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij na osnove poluprovodnikovyh preobrazovatelej napryazheniya // Mat. Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf.: Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotehnologii (17 Benardosovskie chteniya). – Ivanovo, 2012. S.112...114.

5. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Holodnyj S.D. Osnovy kabelnoj tehniki / Pod red. I.B.Peshkova. – М.: Izdatelskij centr «Akademiya», 2006.

6. Fedosov S.V. Teplomassopereenos v tehnologicheskikh processah stroitelnoj industrii. – Ivanovo: IPK "PressSto", 2010.

7. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.E. Temperaturnye rezhimy raboty silovogo vysokovoltnogo kabelya v elektroperedache povyshennoj chastoty // Tr. VI Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf.: Elektroenergetika glazami molodezhi, 9 – 13 noyabrya 2015, Ivanovo. – V 2-h t. Т 1. – Ivanovo: Ivanovskij gos. energetich. un-t, 2015. S. 618...620.

8. Osipov Yu.M. Chastotnyj i vremennoj analiz stacionarnyh i perehodnyh harakteristik linejnyh elektricheskikh cepej. – Ch.2. – SPb: SPbGITMO (TU), 2002.

9. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.E. Primenenie razlozheniya v ryad Fure pri raschete rezhimov raboty poluprovodnikovogo preobrazovatelya // Mat. Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf.: Costoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplo tehnologii, (HVIII Benardosovskie chteniya). – 2015. Т.1. S. 120...123.

10. Spravochnik po elektrotehnicheskim materialam. – V 3-h t. Т.1 / Pod red. Yu.V. Korickogo i dr. – 3-e izd., pererab. – М.: Energoatomizdat, 1986.

11. Fedosov S.V., Akulova M.V., Koksharov S.A., Meteleva O.V. Teoreticheskie osnovy teplomassopereenosа v perspektivnyh tehnologiyah proizvodstva materialov tekstilnoj i stroitelnoj otraslej promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2015, № 6. S. 170...175.

12. Aloyan R.M., Petruhin A.B., Fedoseev V.N. Vozmozhnost vnedreniya ekologicheskoy i energosberegayushej tehnologii v tekstilnoj energetike // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2016, № 2. S. 188...192.

13. Gorobec A.N. Razrabotka metoda rascheta teplovyh rezhimov vysokovoltnyh kabelej s izolyaciej iz sshitogo polietilena // Tr. VI Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. – V 2-h t. Т 1. – Ivanovo: Ivanovskij gos. energetich. un-t, 2015. S. 436...441.

Рекомендована кафедрой автоматизации и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 02.04.18.