

20. *Petrov B.M.* Odnovolnovyy sposob izmereniya chastoty vrashcheniya interferometra. Patent na izobretenie, № RU2554316 ot 2015 [Single-wave method for measuring the rotation frequency of the interferometer. Patent for invention, No. RU2554316 dated 2015].
21. *Senior T.B.A., Volakis J.L.* Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics. Bath, England: Bookcraft, 1995.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Титова Дарья Евгеньевна – Передовая инженерная школа ЮФУ; e-mail: dtitova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89094408014; научный сотрудник.

Titova Daria Evgen'evna – Advanced Engineering School, Southern Federal University; e-mail: dtitova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094408014; researcher.

УДК 621.315.611

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-251-266

Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков, М.Н. Дубяго, О.В. Качелаев

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена расчету напряженности электромагнитного поля (ЭМП) в изоляционном материале силового кабеля (СК). Исследовано магнитное поле одиночного образца кабеля марки АПвПу-10 1х240/70. Приведены теоретические сведения для расчета напряженности электростатического осесимметричного поля на основе решения интегральных уравнений Фредгольма в кусочно-однородной линейной полимерной изоляции с включениями. Построены модели для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). При прохождении ЭМП через различные материалы, заполняющие включение наблюдается поглощение энергии волн этими веществами. На основе проведенного моделирования с применением программы Comsol выполнен анализ ЭМП на границе раздела диэлектрических сред между сферическим микровключением и основной изоляцией. Показано, что в твердых диэлектриках, проводниках поглощение ЭМП значительно. Если волна встречает какой-либо проводник, то большая часть ее энергии поглощается им. Наличие в изоляции неоднородностей (дефектов) на границах раздела изоляция – неоднородность вызывает скачки напряженности электрического поля ϵ_1/ϵ_2 , ϵ_2/ϵ_3 . Проведено моделирование и анализ распределения напряженности электрического поля в области дефекта и установлено, что с увеличением $S_{\text{деф}}$ амплитуда всплеска магнитной индукции (B) на первой границе дефекта возрастает. На второй границе наоборот. С увеличением $S_{\text{деф}}$ глубина провала индукции (B) увеличивается. Однако при сохранении общей картины величины провалов при различных типах заполнения включения различны: – наибольший градиент наблюдается при заполнении водой, наименьшие при заполнении углерод плюс сшитый полиэтилен (С+СПЭ). Таким образом это может являться диагностическим параметром качества изоляции СК. Результаты работы представляют интерес при решении комплекса задач, связанных с различными аспектами электромагнитной совместимости, и надежности функционирования электроэнергетических систем.

Электроэнергетическое оборудование; полимерные изоляционные материалы; диэлектрическая проницаемость; распределение напряженности электрического поля; неразрушающие методы диагностики; анализ.

N.K. Poluyanovich, D.V. Burkov, M.N. Dubyago, O.V. Kachelaev

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN CABLE SYSTEMS WITH INSULATION FROM POLYMER MATERIALS

The article is devoted to the calculation of the electromagnetic field strength (EMF) in the insulating material of a power cable (SC). The magnetic field of a single sample of the APvPu-10 1x240/70 cable was investigated. Theoretical information is given for calculating the strength of an electrostatic axisymmetric field based on the solution of Fredholm integral equations in a

piecewise homogeneous linear polymer insulation with inclusions. Models are constructed for calculating and analyzing the intensity distribution of inhomogeneous electric fields in a dielectric medium with inclusions of different areas and with different electrophysical parameters (filling). When the EMF passes through various materials filling the inclusion, the absorption of wave energy by these substances is observed. Based on the simulation performed using the Comsol program, the analysis of EMF at the interface of dielectric media between spherical micro-inclusion and the main insulation was performed. It is shown that in solid dielectrics, conductors, EMF absorption is significant. If a wave meets any conductor, then most of its energy is absorbed by it. The presence of inhomogeneities in the insulation at the insulation – inhomogeneity interface causes jumps in the electric field strength $\varepsilon_1/\varepsilon_2$, $\varepsilon_2/\varepsilon_3$. The simulation and analysis of the electric field voltage distribution in the defect region were carried out and it was found that with increasing S_{def} , the amplitude of the magnetic induction surge (B) at the first boundary of the defect increases. On the second border, the opposite is true. With increasing S_{def} , the depth of the induction failure (B) increases. However, while maintaining the overall picture, the values of dips with different types of filling inclusions are different: – the greatest gradient is observed when filling with water, the smallest when filling with carbon plus cross-linked polyethylene (C + SPE). Thus, it can be a diagnostic parameter of the quality of the insulation of the IC. The results of the work are of interest in solving a complex of problems related to various aspects of electromagnetic compatibility and reliability of functioning of electric power systems.

Electric power equipment; polymer insulating materials; dielectric permeation; electric field strength distribution; non-destructive diagnostic methods; analysis.

Введение и постановка задачи. В силовых кабелях в условиях воздействия электрического поля старение полиэтилена (ПЭ) определяется наличием неоднородностей, образованием низкомолекулярных продуктов (в том числе и воды) на технологической стадии изготовления при сшивке полиэтиленовой изоляции и увлажнении в процессе эксплуатации. Такие дефекты являются конструктивными, технологическими и эксплуатационными неоднородностями, которые приводят к локальному изменению напряженности электрического поля [1]. Любая неоднородность приводит к локальному повышению напряженности поля и развитию дендритов, которые являются источником частичных разрядов в изоляции и приводят, в конечном итоге, к преждевременному пробою кабеля.

Вопросам построения моделей для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной формы, взаимным расположением и с разными электрофизическими параметрами посвящен ряд работ [2, 3].

Численные расчеты выполняются с использованием пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов [4]. Так, расчеты, выполненные в [4], показывают, что коэффициент неоднородности электрического поля (отношение максимального значения напряженности поля в расчетной области к среднему значению напряженности во всей изоляции) возрастает более чем в три раза (с 20 до 87) при увеличении диаметра водяного включения в 10 раз (с 5 до 50 мкм). В [1] на основе разработанной математической модели с применением пакета прикладных программ Comsol Multiphysics получено распределение напряженности электрического поля в изоляции с гетерогенными включениями разных наполнений. Исследованы закономерности увеличения максимальной напряженности электрического поля в диэлектриках при увеличении размеров электропроводящих включений и уменьшении расстояния между ними вдоль поля.

Статистическая модель определения степени разрушения изоляционного слоя. Наиболее вероятные формы возникновения дефекта – эллиптическая, распределенная по радиусу кабеля, т.к. дефекты изоляции, которые приводят к пробою, обычно представляют собой дендритные образования – структурные каналы в изоляции, заполненные жидкостью, твердыми примесями или газами. Для воз-

никновения напряженности электрического поля выше пробивной, принятой 6 кВ/мм для состаренного кабеля, необходимо разрушить около 78 % изоляции по радиусу, согласно картине электрического поля и распределению напряженности электрического поля в области дефекта, рис.1,б. Вероятности пробоя изменяется по закону распределения Вейбулла, которое выражается формулой:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

где k – коэффициент формы, λ – коэффициент масштаба.

Для математического расчета остаточного ресурса изоляции кабелей требуется знать функцию вероятности пробоя в зависимости от степени разрушения материала. Для распределения Вейбулла она имеет вид:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

1. Заполнение неоднородностей изоляционного материала. Полиэтиленовая изоляция по своей морфологии является неоднородной, гетерогенной средой, т.к. содержит, прежде всего, аморфную и кристаллическую фазы, свойства которых отличаются. Требования к однородности изоляции кабелей среднего и высокого напряжения достаточно высоки [5–11]. Размер допустимых примесей не должен превышать 200 и 100 мкм для кабелей класса напряжения 6-35 кВ. Диэлектрическая проницаемость играет ключевую роль в понимании физических процессов, происходящих внутри материалов, и ее исследование помогает разрабатывать новые технологии, приборы и оборудование. Относительная диэлектрическая проницаемость полиэтиленовой (ПЭ) изоляции $\epsilon_2 = 2,28$.

Во время вулканизации полиэтилена возникает большое количество микрополостей (включений) диаметром 1-30 мкм (производственные включения). Такие микропоры могут возникнуть из-за несовершенного (неравномерного) распределения наполнителя в полимерной матрице.

При сшивании с помощью полифункциональных групп максимальный размер микропустот составляет 200 мкм при том же количестве в единице объема, которые могут быть частично заполнены влагой (водные включения). Влага не образуется в процессе реакции сшивания, а образуется в течение последующих технологических реакций. В изоляции всегда имеются небольшие количества воды в виде растворов или гомогенно распределенные по толщине (0.02-0.5%). Вода проникает в изоляцию также в процессе эксплуатации из электропроводящих слоев и внешней среды; увлажнение возникает также в результате теплопередачи. Если изоляция из сшитого полиэтилена окружена водой, то водяные пары диффундируют в изоляцию и насыщают ее в тем большей степени, чем выше ее температура. Например, при температурах 25, 55 и 90°C насыщение изоляции водой достигается соответственно при 25, 55 и 450 л/млн. Размер молекулы воды составляет порядка $2,5 \text{ \AA} = 0,25 \text{ нм}$. В результате совместного действия воды, микродефектов, напряженности электрического поля и температуры (термомеханических напряжений) на полиэтиленовую изоляцию в ней развиваются водные тринги – окисленные участки изоляции с суб- и микропустотами, заполненные водой. Полиэтиленовая изоляция способна растворить определенное количество влаги: коэффициент растворимости в зависимости от плотности при температуре 20°C варьируется от 1,66 до 11,2 кг/(м³·Па) [5].

Под действием электрического поля высокополярная молекула воды за счет сил, возникающих при электрофорезе, притягивается к местам с повышенной напряженностью (микропоры, пористые загрязнения, микротрещины). В результате образуются местные скопления воды, по своей структуре близкие к пере-

насыщенным водным растворам. Наличие водных включений сферической формы приводит к возрастанию напряженности в 5-10 раз. Водные триинги (ВТ) зарождаются уже при напряженностях (Е), равных 2–3 кВ/мм. Уже при средней напряженности электрического поля, превышающей 2МВ/м, следует учитывать возможность быстрого образования ВТ.

Диэлектрическая проницаемость воды это функция $\epsilon = f(t; ВВ; М)$, где t – время, ВВ – вид воды, М – наличие солей. Вода обладает электрической проводимостью, то при этом возникает ряд специфических электрофизических эффектов, наиболее важным из которых является эффект Фарадея. Он состоит в возбуждении в движущейся проводящей среде электрического и вторичного магнитного полей. Относительная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды – 80. В реальности в ней всегда присутствуют те или иные растворенные соли, а значит - отрицательные и положительные ионы. В переменных электрических полях диэлектрическая проницаемость воды уменьшается с ростом частоты приложенного поля, достигая значения 4-5 для частот больше 10-12 Гц.

Воздушные включения. При производстве кабеля толщина воздушных включений в изоляции не должна превышать 0,5 мм. В изоляции высоковольтных кабелей воздушные включения недопустимы, т.к. в них могут развиваться частичные разряды при нормальных условиях эксплуатации или перенапряжениях. ЧР приводят к быстрой деградации полимерной изоляции [9], т.к. под действием разрядов в полимерах развиваются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя. Развитие дендритов приводит к пробоям изоляции. При наличии сферических включений, наполненных воздухом, напряженность на поверхности включения не превышает среднее значение 2 кВ/мм для силовых кабелей среднего напряжения. При средней напряженности электрического поля, превышающей 2 МВ/м, следует учитывать возможность быстрого образования триингов.

Оценка слабых мест. В кабельных изделиях с пластмассовой изоляцией имеются и могут образовываться включения (воздушные, газовые и СПЭ) различных форм и размеров. Минимальное значение электрической прочности изоляции определяется прочностью слабых мест, к которым относятся различные включения. Электрическая прочность включений связана с их геометрическими размерами и внутренним заполнением. Для оценки слабых мест выполним расчет напряженности электрического поля, возникающего во включении определенного размера и в определенной толщине изоляции. Напряженность внутри включения рассчитывается по формуле:

$$E_B = \frac{U_H}{r_B \cdot \epsilon_B \cdot \left[\frac{1}{\epsilon_d} \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_{ж}}\right) + \frac{1}{\epsilon_B} \cdot \ln\left(\frac{r_B \Delta_B}{r_B}\right) + \frac{1}{\epsilon_d} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_B + \Delta_B}\right) \right]}$$

где $\epsilon_B = 1.00057$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, $\epsilon_d = 2.28$ – диэлектрическая проницаемость ПЭ.

При толщине поры $\Delta_B > 0,5$ мм напряженность поля в поре становится выше электрической прочности воздуха, что приведет к пробоям изоляции.

2. Уравнения для расчета напряженности осесимметричного поля. Кабели напряжением 6-35 кВ выпускаются, как правило, в одножильном исполнении, рис. 1. Коаксиальная конструкция кабелей [11] в одножильном исполнении имеет осевую симметрию и состоит из: токопроводящей жилы; трехслойной изоляции, включая полупроводящий экран по жиле, полимерную изоляцию, полупроводящий экран по изоляции; медного экрана; защитной полимерной оболочки, рис. 1.

В основе численного метода расчета напряженности поля лежат интегральные уравнения Фредгольма первого и второго рода (метод вторичных источников) для осесимметричного поля [6]. Для неизвестной плотности поверхностных зарядов $\sigma(M)$ осесимметричного тела при размещении точки Q на поверхности токопроводящей жилы, потенциал U которого задан, интегральное уравнение Фредгольма первого рода имеет вид:

$$\frac{1}{\pi\epsilon_0} \int \frac{K(k) * R_M * \sigma(M)}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} * dL_M = U, \quad (1)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода;

$k = \sqrt{\frac{4R_Q * R_M}{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}}$ – аргумент полного эллиптического интеграла первого рода $K(k)$; R_Q, R_M – радиус-векторы точек Q (где ищется потенциал) и M (где размещен кольцевой заряд; R_M – радиус кольцевого заряда); Z_Q – высота точки Q ; Z_M – высота кольцевого заряда над осью радиусов R (рис. 1 [7]).

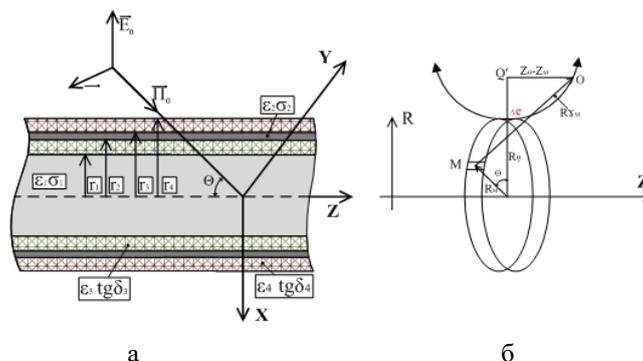


Рис. 1. Падение ЭМ волны на экранированный кабель

Поверхность осесимметричного тела является результатом вращения образующей L вокруг оси симметрии OZ (рис. 1,б): при вращении отрезка ΔL вокруг оси образуется элементарный круговой пояс. Плотность поверхностного заряда σ кругового пояса в силу осевой симметрии одна и та же по длине окружности. Заменяя в (1) интеграл конечной суммой

$$\frac{1}{\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{K(k_{ij}) * R_j * \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} \quad (2)$$

и записывая (2) N раз, помещая каждый раз точку i в новое место, получим систему линейных алгебраических уравнений, решив которую можно найти искомые плотности поверхностных зарядов $\sigma(M_j)$ [индексом i обозначена точка пространства, где ищется потенциал, а индексом j – точка, где находится кольцевой заряд]. В матричной форме система линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{A} * \bar{\sigma} = \bar{U}. \quad (3)$$

Коэффициенты a_{ij} СЛАУ (3) определяются по формулам:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\pi\epsilon_0} * \frac{K(k_{ij}) * R_j * \sigma(M_j)}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln\left(\frac{16 * R_j}{\Delta L_j / e}\right) * \Delta L_j & \forall i = j \end{cases}$$

При работе кабеля под переменным напряжением частоты 50 Гц постоянная времени τ саморазряда кабеля, определяемая емкостью и сопротивлением высококачественной неполярной полиэтиленовой изоляции, больше полупериода приложенного напряжения $\tau \gg 1/(2f)$. В такой изоляции объемные заряды не успевают накапливаться, и напряженность поля распределяется в соответствии со значениями диэлектрических проницаемостей: $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_3 E_3$.

При наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться скачки напряженности электрического поля $\varepsilon_1/\varepsilon_2$, $\varepsilon_2/\varepsilon_3$, рис. 1. Расчет поля в кусочно-однородной диэлектрической среде с относительными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 сводится к расчету поля в однородной среде с дополнительными вторичными источниками расположенными так, чтобы на границе раздела диэлектрических сред для нормальных составляющих, претерпевающих излом, выполнялось условие: $\varepsilon_1 \cdot E_{1n} = \varepsilon_2 \cdot E_{2n}$ [6, 7]. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода для связанных зарядов на границе диэлектрических сред для осесимметричного поля имеет вид:

$$\frac{\sigma(Q)}{2\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \int n_R dE_R + n_Z dE_Z = 0, \quad (5)$$

где n_R , n_Z – компоненты вектора нормали к образующей в точке Q; dE_R , dE_Z – радиальная и осевая компоненты вектора напряженности поля в i -й точке при единичной поверхностной плотности заряда j -го пояса ($\sigma_j = 1$ Кл/м²)

$$dE_R = \frac{\Delta L_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} * \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} * k^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{k}{2} K(k) * \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - \\ - K'(k) * \left[1 - \frac{k^2}{2} \left(\frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \end{array} \right\};$$

$$dE_Z = \frac{\Delta L_M}{4\pi\varepsilon_0 R_Q} * \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} * [K(k) + k * K'(k)], \quad (6)$$

где $K'(k)$ – производная функции полного эллиптического интеграла первого рода по параметру k ; k'_{RQ} – производная параметра k по радиальной координате точки Q; k'_{ZQ} – то же самое по осевой координате точки Q. Производная функции полного эллиптического интеграла первого рода $K'(k)$ вычисляется путем дифференцирования аналитического приближения к $K(k)$:

$$K(k) \approx a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) * \ln \frac{1}{m}, \quad m = 1 - k^2;$$

$$K'(k) \approx \left[a_1 + 2 * a_2 m + (b_1 + 2b_2 m) * \ln \frac{1}{m} + (b_0 + b_1 m + b_2 m^2) * m \left(-\frac{1}{m^2} \right) \right] * (-2k),$$

где $a_0 = 1,3862944$; $a_1 = 0,1119723$; $a_2 = 0,0725296$; $b_0 = 0,5$; $b_1 = 0,1213478$; $b_2 = 0,0288729$; $a_1 = 0,4630151$; $a_2 = 0,1077812$; $b_1 = 0,2452727$; $b_2 = 0,0412497$ [5].

Уравнение (5) сводится к СЛАУ вида:

$$\bar{B} * \bar{\sigma} = 0, \quad (7)$$

в которой элементы матрицы коэффициентов определяются как

$$b_{ij} = \begin{cases} -\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} * (n_R dE_R + n_Z dE_Z) & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} & \forall i = j \end{cases}. \quad (8)$$

Плотность поверхностных зарядов на границах раздела сред с учетом неоднородности диэлектрика определится в результате решения составной на основе (3) и (7) СЛАУ вида:

$$\bar{A} * \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (9)$$

где σ – матрица-столбец неизвестных расчетных плотностей вторичных зарядов, Кл/м²; U – матрица-столбец, первые $N_e/2$ членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на токопроводящей жиле, а вторые $N_e/2$ – на заземленном экране и остальные $N_d = N_e + 1 : N$ на границах раздела диэлектрических сред – равны нулю; A – квадратная матрица коэффициентов, элементы которой a_{ij} и b_{ij} находятся по формулам (4) и (8), вытекающих из интегральных уравнений Фредгольма первого рода для узлов, лежащих на электродах, и второго рода – для узлов, лежащих на границе раздела диэлектрических сред (в данном случае изоляции и сферических включений). После решения СЛАУ (9) напряженность электрического поля (нормальная составляющая) находится по формулам:

$$E_{i\perp} = \begin{cases} \sigma_i / \varepsilon_0; & i = 1 \div N_e; \\ \varepsilon_i / (2\varepsilon_0) * (1 + I * \beta); & i = N_e + 1 \div N \end{cases} \quad (10)$$

где $\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ – параметр, связанный с разностью диэлектрических проницаемостей по направлению нормали к границе раздела сред.

3. Исходные данные. Объект исследования кабель из сшитого полиэтилена, рис. 2.

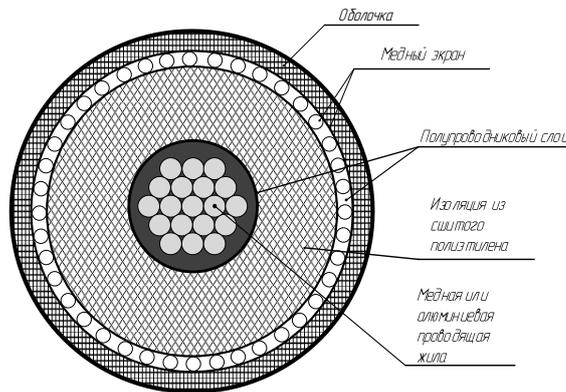


Рис. 2. Послойное расположение материалов СПЭ кабеля

В табл. 1, приведены расчетные параметры одножильного кабеля АПВПУ 1х240/25-10.

Таблица 1

Расчетные параметры одножильного кабеля АПВПУ 1х240/25-10

Номинальное сечение жилы (сечение экрана), мм ²	Число проволок, шт.	Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение, мм ²	Диаметр провода, мм	Наружный диаметр Кабеля 10 кВ	Толщина наружной изоляции
240 (25)	19	4	238,7	20,0	35,8	3

Толщина полупроводящего слоя, мм: 0,3–0,9; сечение медного экрана 70 мм², диаметр экрана 55 мм.

В табл. 2, представлены физические свойства материалов кабеля.

Таблица 2

Физические свойства материалов кабеля

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная электропроводность, См/м	ТКС	Относительная диэлектрическая проницаемость, д.е.	Удельная теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Проводники						
Алюминий	2700	$3,3 \cdot 10^7$	0,0044	–	221	860
Медь	8900	$5,6 \cdot 10^7$	0,0041	–	380	385
Сталь	7850	$2,1 \cdot 10^7$	0,0088	–	58	457
Диэлектрики						
Сшитый полиэтилен	920-960	$10^{-14} \div 10^{-15}$	–	2,2÷2,4	0,3÷0,4	2000
Полупроводящий слой	920-960	$10^{-4} \div 10^{-5}$	–	2,2÷2,4	0,3÷0,4	2000
ПВХ-пластикат	1400	10^{-17}	–	3,2÷3,6	0,19	2140
Воздух	1,15	–	–	1	–	1006

4. Моделирование физических процессов. 4.1. Распределение напряженности электрического поля по толщине однородной сшитой полиэтиленовой изоляции в одножильном высоковольтном силовом кабеле [12, 13] идеальной коаксиальной конструкции. При работе кабеля под переменным напряжением частоты 50 Гц постоянная времени τ саморазряда кабеля, определяемая емкостью и сопротивлением высококачественной неполярной полиэтиленовой изоляции больше полу-периода приложенного напряжения $\tau \gg 1/(2f)$. Электрическая прочность при переменном напряжении составила 6 МВ/м. При наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция– неоднородность будут наблюдаться скачки напряженности электрического поля $\epsilon_1/\epsilon_2, \epsilon_2/\epsilon_3$. Однако наиболее часто для характеристики магнитных свойств веществ используют относительную магнитную проницаемость μ_r . Таким образом, связь между напряженностью и магнитной индукцией будет иметь следующий вид

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества, B – магнитная индукция, μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества.

Выражения напряженности для магнитного поля, создаваемого прямым проводом с током:

$$H = \frac{I}{2\pi b},$$

где I – ток протекающий по проводнику, b – расстояние от центра провода до точки, в которой считается напряженность магнитного поля.

Индукция магнитного поля бесконечно длинного проводника

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

r_0 – расстояние от проводника до точки где измеряем магнитную индукцию.

Средняя рабочая напряженность электрического поля составляет 2 и 6 кВ/мм для кабелей среднего и высокого напряжения соответственно. При таких значениях напряженностей электрического поля вероятность разрыва связей в полиэтиленовой изоляции маловероятна. В структуре изоляции возникают нано размерные субмикротрещины, накопление которых приводит к образованию микротрещин. Для полиэтилена, как и других полимерных материалов, характерна внутримолекулярная и межмолекулярная пористость (от 1 до 5 нм). В термопластичном полиэтилене количество микропустот составляет, в среднем, до 10^4 в 1 мм^3 при максимальном размере до 80 мкм [5].

4.2. Влияние среды на распространение ЭМВ. При распространении ЭМВ в среде происходит потеря энергии [14, 15], обусловленные диэлектрическими потерями (на запаздывание – поляризацией молекул вещества в переменном магнитном поле). Диэлектрические потери характеризуются эквивалентной удельной проводимостью. Потери зависят от среды. Поглощающую среду характеризуют отношением амплитуд плотностей токов проводимости и смещения $d\text{пр} / d\text{см}$. Если отношение Р к бесконечности, то среда приближается к идеальному проводнику, а при приближении к 0 - к идеальному диэлектрику. Реально суммарный ток в средах состоит из двух составляющих – тока проводимости и тока смещения.

При прохождении ЭМП через различные вещества наблюдается поглощение энергии волн этими веществами [16]. Очень мало поглощение в неионизированном воздухе. В твердых диэлектриках, проводниках поглощение радиоволн значительно. Если волна встречает какой-либо проводник, то большая часть ее энергии поглощается им. Объясняется это тем, что волна приводит в движение электроны проводника и создает в нем ток высокой частоты. На образование его и расходуются энергия волны.

Диэлектрики также поглощают энергию волн. Поле волны создает в молекулах диэлектриков смещение электронов – ток смещения. Он является током высокой частоты, т. е. представляет собой колебание электронов внутри молекул. Токи смещения вызывают нагревание диэлектрика, на что расходуются энергия.

4.3 Моделирование распространения поля. Для получения численных результатов [17, 18] по ЭМ полю в основной изоляции СКЛ [19–22], проводилось численное моделирование распространения поля с помощью программы COMSOL. А именно, построение моделей для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). Моделирование ЭМП проводилось при заполнении дефекта различными материалами (воздух, вода, спекшийся ПЭ). Площадь дефекта $R_{\text{деф}}$: $0,1*0,05$; $0,2*0,1$; $0,25*0,15$; $0,3*0,2$; $0,35*0,25$; $0,4*0,3$; $0,45*0,35$; $0,5*0,4$; $0,55*0,45$ мм. Расстояние от жилы до центра дефекта $r=0,5$; $r=1$; $r=1,5$; $r=2$; $r=2,5$.

Таблица 3

Параметры вещества, заполняющего включение

Заполнении дефекта	Отн. магн. прониц μ_r , Гн/м	Относит диэл. проницаем ϵ_r	Удельная проводимость δ , См/м
Вода, H_2O	0.999992	4	$5,5*10^{-6}$
Воздух, N_2, O_2	1	1	0
Углерод+СПЭ ($-CH_2-CH_2-$) + 2С	1,02	1,2	1800
СПЭ + углерод, ($-CH_2-CH_2-$) + С	1,05	1,7	1200
Спеч СПЭ, ($-CH_2-CH_2-$) ₂ + С	1,02	2	900
Углерод С	1	1	3000

СПЭ чистый δ (См/м) = $1*10^{-15}$

Линии магнитного поля на включении представлены на рис. 3 для одного из случаев. Неоднородность заполнена водой и расположена на расстоянии 0,5 мм от жилы.

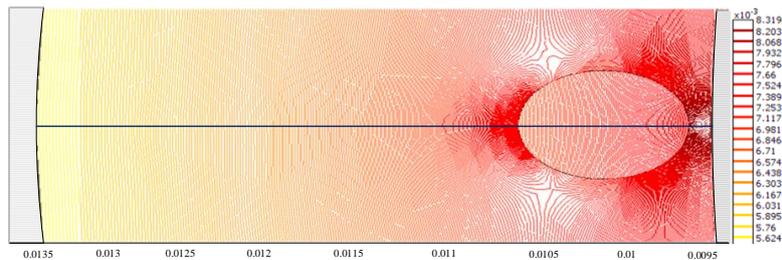


Рис. 3. Линии магнитного поля при моделировании в COMSOL. Заполнение – вода. Удаление от жилы 0.5 мм. Размер дефекта 0.4x0.3 мм

На рис. 4 приведены зависимости изменения индукции $B(r)$ от площади включения, при его заполнении водой и углеродом плюс СПЭ.

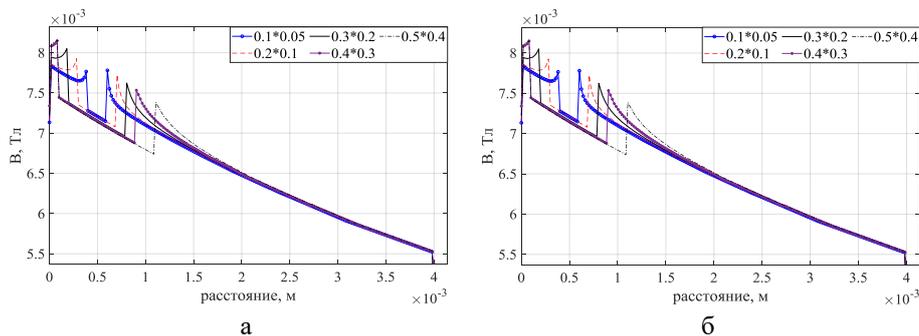


Рис. 4. Зависимости изменения индукции $B(r)$ от площади включения, при: а – заполнение включения – вода; б – заполнение включения С+СПЭ

На рис. 5 приведены зависимости изменение напряженности $H(r)$ от площади включения, при его заполнении водой и углеродом плюс СПЭ.

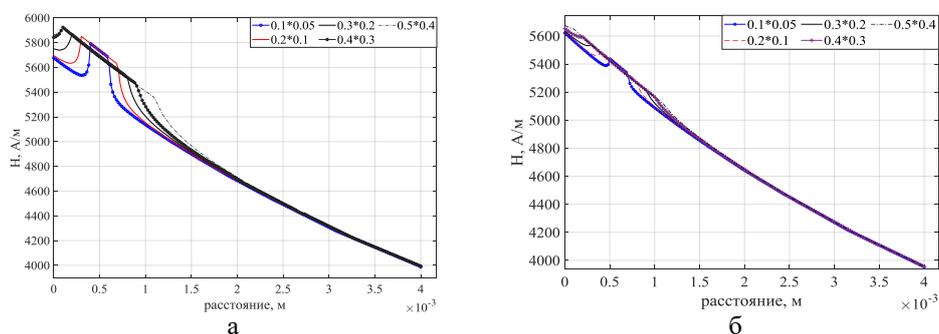


Рис. 5. Зависимости изменение напряженности $H(r)$ от площади включения, при: а – заполнение включения вода; б – заполнение включения С+СПЭ

Амплитуда скачков по индукции (В) и напряженности (Н) с различными материалами заполнения дефекта, и размерах дефекта $0,1*0,05$ мм, приведена в табл. 4, 5 (соответственно).

Таблица 4

Амплитуда скачков по индукции (В)

Материал заполнения включения	Первый скачок		Второй скачок	
	Расстояние, м	Значение, Тл	Расстояние, м	Значение, Тл
Вода (H_2O)	0,0003819	0,007766	0,000603	0,007781
Воздух (N_2, O_2)	0,0003819	0,007697	0,000603	0,007711
С+СПЭ ($-CH_2-CH_2-$) n +С	0,0004824	0,007505	0,0007035	0,007424

Таблица 5

Амплитуда скачков напряженность (Н)

Материал заполнения включения	Первый скачок		Второй скачок	
	Расстояние, м	Значение, А/м	Расстояние, м	Значение, А/м
Вода (H_2O)	0,000402	5790	0,0005829	5689
Воздух (N_2, O_2)	0,000402	5739	0,0005829	5638
С+СПЭ ($-CH_2-CH_2-$) n +С	0,0005025	5504	0,0006834	5408

На рис. 6 приведены зависимости изменение индукции $B(m)$ от расстояния до дефекта, при различных материалах заполняющих включение

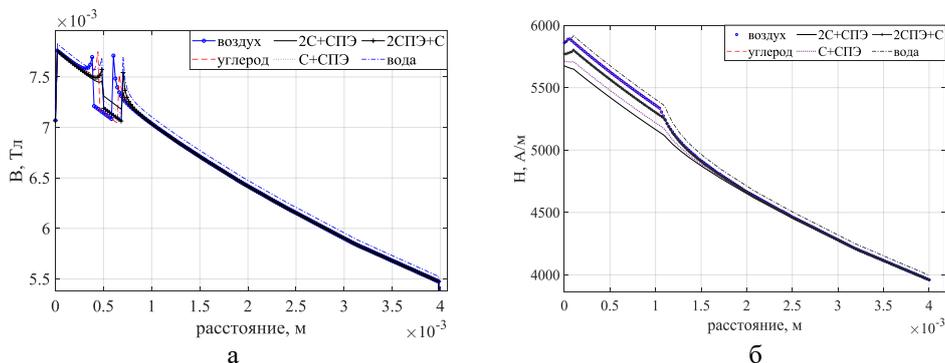


Рис. 6. Зависимости изменение индукции $B(m)$ от расстояния до дефекта, при: а – размер включения $0,1*0,05$ мм; б – размер включения $0,5*0,4$ мм

На рис. 7 приведены зависимости изменение напряженности (H) от расстояния до дефекта, при различных материалах заполняющих включение

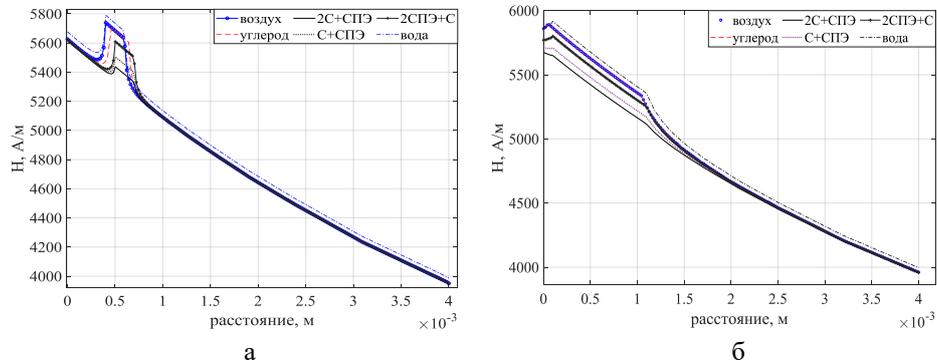


Рис. 7. Зависимости изменение напряженности (H) от расстояния до дефекта, при: а–размер дефекта $0.1*0.05$ мм; б–размер включения $0.5*0.4$ мм

Таким образом, получены модели проведен расчет и анализ распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями с разными электрофизическими параметрами выполнено в программе Comsol. С увеличением $S_{\text{деф}}$ амплитуда всплеска магнитной индукции (B) на первой границе дефекта возрастает. На второй границе наоборот. С увеличением $S_{\text{деф}}$, глубина провала (B) увеличивается. Однако при сохранении общей картины величины провалов при различных типах заполнения включения – различны: – наибольшие при заполнении водой, а наименьшие при заполнении С+СПЭ.

Проведение натурального эксперимента по распространению ЭМП внутри изоляционного материала не представляется возможным. Поэтому проведено сравнение полученных нами результатов с известными результатами моделирования. Так, в работе [23] посвященной исследованию поля в изоляции с включениями, заполненными только водой и воздухом, расположенными близко к экрану, и моделировалось только электростатическое поле.

Заключение. Исследовано магнитное поле одиночного образца кабеля марки АПвПу-10 $1 \times 240/70$ при различных: расстояния неоднородности (включения) от жилы, при различном заполнении неоднородности. На основе проведенного моделирования с применением программы Comsol выполнен анализ ЭМП на границе раздела диэлектрических сред между сферическим микровключением и основной изоляцией. Построены модели для расчета и анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с включениями разной площади и с разными электрофизическими параметрами (заполнением). Установлено, что при наличии в изоляции неоднородностей на границах раздела изоляция – неоднородность будут наблюдаться всплески напряженности электрического поля ϵ_1/ϵ_2 , ϵ_2/ϵ_3 . Так в области раздела диэлектрических сред между однородной изоляцией и включением воды в большей степени наблюдается искажение поля. С увеличением геометрии включения (a^*b) в изоляционном материале (от $0,1*0,05$ до $0,5*0,4$ мм). Увеличение площади включения (с $0,0157$ мм² до $0,628$ мм²) привело: – к росту магнитной индукции и напряженности ЭМП в среднем на десять процентов (рис. 3,а,б); – градиент первого скачка магнитной индукции (B) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), увеличивается в несколько раз. Градиент второго скачка магнитной индукции (B) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ),

уменьшается на порядок; – градиент первого скачка напряженности (Н) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), уменьшается в несколько раз. Градиент второго скачка напряженности (Н) на включении, при различном заполнении включения (воздух, вода, плотный СПЭ), увеличивается примерно в два раза. Таким образом, это может являться диагностическим параметром качества изоляции СКЛ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-29-00370.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Щерба А.А., Щерба М.А.* Моделирование и анализ электрического поля в диэлектрической среде, возмущенного проводящими микровключениями разных размеров и конфигураций // *Техническая электродинамика*. – 2010. – № 6. – С. 3-9.
2. *Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.М.* Моделирование электрических полей и расчет объемов с критической напряженностью в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и СИП // *Техническая электродинамика*. – 2008. – № 2. – С. 113-119.
3. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М.* Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов // *Техническая электродинамика*. – 2006. – № 4. – С. 116-120.
4. *Щерба А.А., Перетятко Ю.В.* Моделирование неоднородных электрических полей в высоковольтной твердой полимерной изоляции с гетерогенными микровключениями // *Вестник национального университета "Львовская политехника"*. – 2007. – № 597. – С. 123-129.
5. *Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г.* Вычислительные эксперименты для расчета напряженности осесимметричного электростатического поля в кусочно-однородной изоляции со сферическими включениями // *Электротехника и электромеханика*. – 2014. – № 5. – С. 67-72.
6. *Тозони О.В.* Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. – 295 с.
7. *Набока Б.Г.* Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учеб. пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – К.: ИСДО, 1995. – 120 с.
8. *Полуянович Н.К., Тибейко И.А.* Эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. – Таганрог: ЮФУ, 2014.
9. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
10. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
11. *Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y.* The influence of the electro-magnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks // *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*. – С. 9590839.
12. *León F., Anders G.J.* Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2008. – Vol. 23, No. 2. – P. 537-543.
13. *Li H.J.* Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating // *IEEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.* – 2005. – Vol. 152, No. 6. – P. 849-854.
14. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 3 (205). – С. 51-62.
15. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
16. *Poluyanovich N.K., Shurykin A.A., Dubyago M.N.* Evaluation of the Cable Line Resource from the Aaging Degree of Its Insulating Material // *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*. – 2021. – P. 1165-1169.

17. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Анализ и выбор методики в решении задач интеллектуализации систем прогнозирования термофлуктуационных процессов в кабельных сетях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 52-66.
18. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Азаров Н.В., Огреничев А.В.* Нейросетевой метод в задачах прогнозирования электропотребления в электроэнергетической системе // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 114-118.
19. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 3. – P. 619-626.
20. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
21. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Бурьков Д.В.* Нейросетевая многоэтапная система прогнозирования ресурса силовой кабельной линии // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 11. – С. 20-26.
22. *Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M.* Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence // Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021. – 2021. – P. 455-459.
23. *Поляков Д.А.* Мониторинг остаточного ресурса изоляции кабельных линий 6(10) кВ из шитого полиэтилена: дисс. ... канл. тех. наук. – Омск, 2017. – 148 с.

REFERENCE

1. *Shcherba A.A., Shcherba M.A.* Modelirovanie i analiz elektricheskogo polya v dielektricheskoy srede, vozmushchennogo provodyashchimi mikrovklyucheniyami raznykh razmerov i konfi-guratsiy [Modeling and analysis of an electric field in a dielectric medium perturbed by conducting microinclusions of different sizes and configurations], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2010, No. 6, pp. 3-9.
2. *Shcherba A.A., Peretyatko Yu.V., Zolotarev V.M.* Modelirovanie elektricheskikh poley i raschet ob'emov s kriticheskoy napryazhennost'yu v polimernoy izolyatsii vysokovol'tnykh kabeley i SIP [Modeling of electric fields and calculation of volumes with critical tension in polymer insulation of high-voltage cables and SIP], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2008, No. 2, pp. 113-119.
3. *Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Podol'tsev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M.* Matematicheskaya model' i metodika chislennogo rascheta neodnorodnogo elektricheskogo polya i nagreva polietilenovoy izolyatsii vysokovol'tnykh silovykh kabeley pri vozniknovenii dendritnykh mikrokanalov [Mathematical model and method of numerical calculation of inhomogeneous electric field and heating of polyethylene insulation of high-voltage power cables in the occurrence of dendritic microchannels], *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2006, No. 4, pp. 116-120.
4. *Shcherba A.A., Peretyatko Yu.V.* Modelirovanie neodnorodnykh elektricheskikh poley v vysokovol'tnoy tverдой polimernoy izolyatsii s geterogennymi mikrovklyucheniyami [Modeling of inhomogeneous electric fields in high-voltage solid polymer insulation with heterogeneous microinclusions], *Vestnik natsional'nogo universiteta "Lvovskaya politekhnika"* [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"], 2007, No. 597, pp. 123-129.
5. *Besprozvannykh A.V., Kessaev A.G.* Vychislitel'nye eksperimenty dlya rascheta napryazhennosti osesimmetrichnogo elektrostaticheskogo polya v kusochno-odnorodnoy izolyatsii so sfericheskimi vklyucheniyami [Computational experiments for calculating the strength of an axisymmetric electrostatic field in piecewise homogeneous insulation with spherical inclusions], *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [Electrotechnics and Electromechanics], 2014, No. 5, pp. 67-72.
6. *Tozoni O.V.* Metod vtorichnykh istochnikov v elektrotekhnike [Method of secondary sources in electrical engineering]. Moscow: Energiya, 1975, 295 p.

7. *Naboka B.G.* Raschety elektrostatocheskikh poley v elektroizolyatsionnoy tekhnike: ucheb. posobie dlya studentov elektroenergeticheskikh spetsial'nostey [Calculations of electrostatic fields in electrical insulation technology: a textbook for students of electric power specialties]. K.: ISDO, 1995, 120 p.
8. *Poluyanovich N.K., Tibeyko I.A.* Eksploatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Operation and repair of power supply systems of industrial enterprises]. Taganrog: YuFU, 2014.
9. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
10. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Metod selektsii signala ChR s pomoshch'yu Veyvlet-preobrazovaniya [Method of selection of the CR signal using the Wavelet transform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 99-104.
11. *Poluyanovich N.K., Burkov D.V., Dubyago M.N., Shurykin A.A., Kosenko E.Y.* The influence of the electro-magnetic field on the neural network monitoring of insulation materials for electric cable networks, *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2021*, pp. 9590839.
12. *León F., Anders G.J.* Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, Vol. 23, No. 2, pp. 537-543.
13. *Li H.J.* Estimation of Soil Thermal Parameters from Surface Temperature of Underground Cables and Prediction of Cable Rating, *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 2005, Vol. 152, No. 6, pp. 849-854.
14. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Prognozirovanie resursa kabel'nykh liniy s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the resource of cable lines using the method of artificial neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (205), pp. 51-62.
15. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh.* Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and forecasting of insulating materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
16. *Poluyanovich N.K., Shurykin A.A., Dubyago M.N.* Evaluation of the Cable Line Resource from the Aaging Degree of Its Insulating Material, *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*, 2021, pp. 1165-1169.
17. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Analiz i vybor metodiki v reshenii zadach intellektualizatsii sistem prognozirovaniya termoflukuatsionnykh protsessov v kabel'nykh setyakh [Analysis and choice of methodology in solving the problems of intellectualization of forecasting systems of thermal fluctuation processes in cable networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 52-66.
18. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Azarov N.V., Ogrenichev A.V.* Neyrosetevoy metod v zadachakh prognozirovaniya elektropotrebleniya v elektroenergeticheskoy sisteme [Neural network method in the tasks of forecasting electricity consumption in the electric power system], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2022, No. 1, pp. 114-118.
19. *Anders G.J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M.* Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp. 619-626.
20. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
21. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Bur'kov D.V.* Neyrosetevaya mnogoetapnaya sistema prognozirovaniya resursa silovoy kabel'noy linii [Neural network multi-stage system for predicting the power cable line resource], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2021, No. 11, pp. 20-26.

22. *Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M.* Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence, *Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 455-459.
23. *Polyakov D.A.* Monitoring ostatochnogo resursa izolyatsii kabel'nykh liniy 6(10) kV iz sshitogo polietilena: diss. ... kanl. tekhn. nauk [Monitoring of the residual insulation life of 6(10) kV cable lines made of cross-linked polyethylene: cand. of eng. sc. diss.]. Omsk, 2017, 148 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Бурьков Дмитрий Владимирович – e-mail: bdv-76@yandex.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; ст. преподаватель.

Качелаев Олег Вадимович – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; магистрант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Burkov Dmitry Vladimirovich – e-mail: bdv-76@yandex.ru; phone: +79281758225; the department of electric technics and mechatronics; associate professor.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; senior lecturer.

Kachelaev Oleg Vadimovich – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; undergraduate.

УДК 621.396.674

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-266-274

И.А. Алшимайсаве

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ВНУТРЕННЯЯ ВСЕНАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА 2 × 2 МИМО ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ 2G, 3G, 4G И 5G

Многочастотные и широкополосные системы связи превратились в популярную тему исследований в результате растущего спроса на высокоскоростную передачу данных и сосуществования нескольких типов сетей связи. Диаграмма направленности всенаправленных антенн обеспечивает эффективную передачу и прием от мобильного объекта, что делает их удобными для ряда устройств беспроводной связи, а также способными работать с дополнительными отдельными полосами частот. Внедрение широкополосной антенны может быть важно для систем мобильной связи, поддерживающих 2G, 3G, 4G и будущие приложения 5G. Были опубликованы многочисленные исследования широкополосных антенн 5G, поскольку сеть 5G обеспечивает большую пропускную способность данных, большую надежность и меньшее энергопотребление для своей обширной пользовательской базы. Технология МИМО превратилась в ключевую технологию для приложений 5G благодаря преимуществам, включающим увеличение пропускной способности канала, повышение производительности передачи и приема сигналов, установку больших антенн в небольшом пространстве и многое другое. Недавно было предложено несколько разновидностей антенн 5G МИМО для смартфонов. В этом исследовании предлагается широкополосная антенна 2 × 2 МИМО для внутренних систем связи GSM/3G/LTE/5G. Данная антенна создает всенаправленные диаграммы направленности за счет использования двух ан-