

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ КАБЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЯ ДО 330 кВ С ТВЕРДОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Досліджено неоднорідні електричні поля й граничні електрофізичні процеси в шитій поліетиленовій ізоляції кабелів надвисокої напруги з урахуванням сукупного впливу об'ємних гетерогенних мікроеключень з різними розмірами, конфігураціями й відстанями між ними. Показано, що зменшення відстані між струмопровідними мікроеключеннями може викликати істотне збільшення величин локальних напруженостей електричного поля й напружених мікроб'ємів в ізоляції, інтенсифікуючи таким чином порогові електрофізичні процеси, що викликають старіння ізоляції. Досліджено також електротеплові процеси в сегментованій жилі кабелів при її високочастотному індукційному нагріванні в процесі виробництва кабелів надвисоких напруг.

Исследованы неоднородные электрические поля и пороговые электрофизические процессы в сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей сверхвысокого напряжения с учетом совокупного воздействия объемных гетерогенных микровключений с разными размерами, конфигурациями и расстояниями между ними. Показано, что уменьшение расстояния между токопроводящими микровключениями может вызывать существенное увеличение величин локальных напряженностей электрического поля и напряженных микрообъемов в изоляции, интенсифицируя таким образом пороговые электрофизические процессы, вызывающие старение изоляции. Исследованы также электротепловые процессы в сегментированной жиле кабелей при ее высокочастотном индукционном нагреве в процессе производства кабелей сверхвысоких напряжений.

Введение. Мировой тенденцией развития энергетики является преимущественное использование кабелей с твердой полимерной изоляцией в электрических сетях от среднего до сверхвысокого напряжения (СВН), что обуславливает необходимость модернизации кабельной промышленности [1–10]. Так, компания Okonite (США), производящая еще несколько лет назад в большом объеме кабели с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) на средние напряжения и маслонеполненные кабели высокого давления на напряжения до 345 кВ, это производство уже свернула [2]. Даже в консервативной Великобритании выпуск кабелей с ПБИ оставили лишь в небольших объемах для высокого напряжения постоянного тока. Но и для этой узкой области в Европе и Японии уже созданы эффективные кабели с изоляцией из так называемого "сшитого" полиэтилена (СПЭ) [11, 12]. В Украине и странах СНГ потребление кабелей пока опережает производство кабелей со СПЭ изоляцией, что поддерживает их экспорт из других стран и производство технически устаревших кабелей с ПБИ.

Известно, что СПЭ изоляция кабелей также подвержена процессам деградации, интенсивность которых определяется множеством физико-химических воздействий [4, 5, 9–19]. Причем во влажных условиях эксплуатации «водные триинги» (электрохимическая деструкция) в изоляции возникают при более низких напряженностях ЭП, чем при сухих. Объединяясь, водные триинги создают условия для возникновения электродендритов, частичных разрядов и сквозных пробоев изоляции. Для повышения стойкости СПЭ изоляции к развитию водных триингов известны два подхода [2–4, 10]. В Северной Америке в 80-х годах XX века разработали специальные химические добавки и создали так называемый «триингостойкий сшитый полиэтилен» (ТСПЭ), который показал такие хорошие свойства, что к 2000 году в кабелях среднего напряжения стали применять только ТСПЭ [4]. В Европе пошли по пути разработки особенно чистого технологического продукта и разработали изоляцию на основе наноструктурной модификации полиэтилена и сополимера этилена с алкилакрилатом, которую назвали «сополимерный сшитый полиэтилен» (ССПЭ) [10]. Со временем начали создавать СПЭ изоляцию с характеристиками, возможными для успешного применения в кабелях высокого и сверхвысокого напряжений [2–4]. Известная европейская компания «Майллефер»

уже разрабатывает оборудование для производства сверхвысоковольтных кабелей на наклонных и вертикальных технологических линиях вулканизации полимерной изоляции [20]. Линии производства таких кабелей созданы в ЕС, Японии и США, но в каждой линии реализованы свои научные подходы и технологические "ноу-хау". Известны заводы, купившие несколько лет назад оборудование для производства кабелей на напряжения 110...330 кВ и до сих пор не сумевшие разработать свою технологию их промышленного выпуска.

В Украине (на ЗАО «Завод «Южкабель», г. Харьков) в 2006 г. впервые в СНГ освоен выпуск кабелей со СПЭ изоляцией на напряжение до 110 кВ [1, 7, 8]. Уровень частичных разрядов в изоляции кабелей выпуска 2006-08 гг. не превышал 3 пКл (при требованиях Стандарта МЭК – до 10 пКл [21]), что обеспечивает повышенную их надежность по сравнению с известными аналогами. В 2008-09 гг. на указанном предприятии с участием Института электродинамики НАН Украины (г. Киев), НТУУ «Киевский политехнический институт» и НТУ «Харьковский политехнический институт» создана наклонная линия производства кабелей со СПЭ изоляцией на напряжения до 330 кВ. В настоящее время ведутся работы по оптимизации технологических режимов линии и диагностики производимых кабелей СВН.

Постановка задачи и обсуждение результатов исследований. Сохранение высоких показателей у кабелей СВН невозможно достичь увеличением толщины изоляции, так как с повышением напряжения в k раз объем изоляции надо увеличивать в $>k^2$ раз, что недопустимо [6, 9, 16]. Повышать ее свойства необходимо таким образом, чтобы можно было повысить рабочую напряженность ЭП в $\approx 5,2$ раза (по сравнению с кабелями на напряжения до 35 кВ) и в $\approx 2,3$ раза (по сравнению с кабелями на напряжения до 110 кВ) [2]. Признано, что основными источниками локальной концентрации напряженности электрического поля (ЭП) до критических значений, при которых возникают разрушающие изоляцию пороговые электрофизические процессы, являются микродефекты в изоляции размерами более 50 мкм [14, 15, 18, 19]. Более точные требования отечественной и международной нормативно-технической документации к допустимым размерам микродефектов в СПЭ изоляции кабелей среднего напряжения приведены в табл. 1, а кабелей высокого и сверхвысокого напряжений – в табл. 2 [2].

Таблица 1

Допустимые размеры дефектов в СПЭ изоляции кабелей среднего напряжения

| <i>Тип дефекта</i> | <i>ТУ 16.К71-335-2004</i> | <i>Стандарт США ANSI/ICEA S-94-649-2004</i> | <i>CELENEC HD 620 SI: 1996</i> |
|----------------------------------|---------------------------|--|--------------------------------|
| Выступ электропроводящего экрана | ≤ 80 мкм | ≤ 76 мкм | ≤ 100 мкм |
| Полость изоляции | ≤ 200 мкм | ≤ 76 мкм, ≤ 30 $1/дюйм^3$ | ≤ 180 мкм |
| Инородные включения в изоляции | ≤ 200 мкм | ≤ 127 мкм, ≤ 15 $1/дюйм^3$ | ≤ 180 мкм |
| | | Частицы термически деструктированного полиэтилена ≤ 254 мкм | |

Таблица 2

Допустимые размеры дефектов в СПЭ изоляции кабелей высокого и сверхвысокого напряжений

| <i>Тип дефекта</i> | <i>ТУ 16.К71-335-2006 (110 кВ)</i> | <i>Стандарт США ANSI/ICEA S-94-649-2004</i> | <i>CELENEC HD 620 SI: 1998</i> |
|----------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Выступ электропроводящего экрана | ≤ 60 мкм | ≤ 60 мкм | ≤ 125 мкм |
| Полость изоляции | ≤ 60 мкм | ≤ 51 мкм ≤ 30 $1/дюйм^3$ | ≤ 75 мкм $\leq 20/1500$ $мм^3$ |
| Инородное включение в изоляции | ≤ 80 мкм | ≤ 127 мкм ≤ 10 $1/дюйм^3$ | ≤ 150 мкм $\leq 10/1500$ $мм^3$ |

Научные публикации [1–5, 10–15, 18, 19] и требования отечественной и международной нормативно-технической документации [2, 20, 21] ориентированы на исследования структурной неоднородности и фазового состава СПЭ изоляции кабелей СВН с учетом лишь размеров, конфигурации и свойств среды отдельных дефектов. Такой подход предполагает разработку моделей для анализа локальных областей концентрации ЭП без учета дополнительного совокупного (синергетического) его возмущения с близко расположенными микродефектами в локальных областях изоляции, которое исследовалось в работах [6, 9, 16, 19]. В указанных моделях используются следующие допущения [15, 18, 22–24]:

- размеры дефектов являются гораздо меньшими, чем расстояния между ними и соответственно размеры области расчета неоднородного электромагнитного поля (ЭМП);
- размеры расчетной локальной области можно выбирать такими, чтобы в ней находилось не более одного микродефекта изоляции;
- критерием изменения шага расчетной сетки в локальной области может быть радиус кривизны границы раздела различных сред в этой области.

На таких моделях были получены результаты численного расчета распределения ЭП в СПЭ изоляции кабелей среднего и высокого напряжений, которые хорошо согласуются с данными табл. 1 и 2. В то же время расчеты ЭП в СПЭ изоляции кабелей СВН плохо согласуются как с данными табл. 2, так и с практическими результатами. Согласно расчетам разрушающие изоляцию электрофизические механизмы начинают возникать при меньших напряженностях ЭП чем описано в работах [1–5, 10–15, 17, 18, 21–24].

Поэтому целью данной работы было выявление новых электрофизических механизмов дополнительного возмущения ЭП в локальных микрообластях изоляции, их анализ и оптимизация степени проявления таких механизмов в СПЭ изоляции, разработка новых требований к ее структурным и фазовым неоднородностям, а также оптимизация режимов индукционного подогрева сегментированной токопроводящей жилы при изготовлении кабелей СВН.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научные задачи:

- с использованием изложенных в [6, 9, 16, 19] принципов создана новая математическая модель, позволяющая исследовать трехмерные поля в СПЭ изоляции кабелей СВН с учетом возникновения в ней совокупности многофазных микровключений с различными размерами, конфигурациями, средами и взаимным расположением;
- разработан критерий изменения шага расчетной сетки, учитывающий изменение градиента напряженности поля независимо от механизма дополнительного его возмущения [6, 9];
- выявлено и обосновано новое электрофизическое явление дополнительного совокупного (синергетического) возмущения электрического поля в твердой полимерной изоляции с близко расположенными микродефектами, размеры которых могут быть гораздо меньше общепринятых (близко расположенными названы дефекты, расстояния между которыми меньше их размеров);
- разработаны новые критерии качества СПЭ изоляции, суть которых состоит в недопустимости как критических размеров отдельных дефектов и микровыступов, так и критических размеров скоплений близко расположенных дефектов самых малых размеров;
- определены оптимальные режимы индукционного нагрева сегментированной жилы кабеля СВН на этапе экструзионного нанесения на нее и модификации СПЭ изоляции.

Расчет электрического поля в СПЭ изоляции кабелей СВН. Учитывая низкую частоту изменения напряжения, тока и ЭМП, а также электрические и магнитные свойства СПЭ изоляции, можно принять допущения [16], позволяющие решать задачу расчета ЭМП в квазистационарном приближении. Тогда для расчета в изоляции комплексных скалярного потенциала $\dot{\phi}$, векторов напряженности ЭП $\dot{\mathbf{E}}$ и плотности полного тока $\dot{\mathbf{J}}$, равного сумме токов смещения и проводимости, можно использовать уравнения

$$\nabla \cdot [-(\gamma + i\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}) \nabla \dot{\phi}] = 0, \quad \dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi}, \quad \dot{\mathbf{J}} = (\gamma + i\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon})\dot{\mathbf{E}},$$

где γ – удельная проводимость изоляции; $\hat{\epsilon} = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ – ее комплексная диэлектрическая проницаемость, реальная составляющая ϵ_1 которой позволяет учитывать возникающие при поляризации емкостные токи, а мнимая составляющая $i\epsilon_2$ – диэлектрические потери.

На границе раздела двух сред для тангенциальных и нормальных компонентов вектора $\dot{\mathbf{E}}$ (\dot{E}_{1r} , \dot{E}_{2r} , \dot{E}_{1n} и \dot{E}_{2n}), потенциала $\dot{\phi}$ и его производной $\partial\dot{\phi}/\partial n$ вдоль нормали к границе раздела сред использовались граничные условия:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1r} &= \dot{E}_{2r}, & (\gamma_1 + i\omega\hat{\epsilon}_1\epsilon_0)\dot{E}_{1n} &= (\gamma_2 + i\omega\hat{\epsilon}_2\epsilon_0)\dot{E}_{2n}, \\ \dot{\phi}_1 &= \dot{\phi}_2, & (\gamma_1 + i\omega\hat{\epsilon}_1\epsilon_0)\frac{\partial\dot{\phi}_1}{\partial n} &= (\gamma_2 + i\omega\hat{\epsilon}_2\epsilon_0)\frac{\partial\dot{\phi}_2}{\partial n}. \end{aligned}$$

Для численного расчета потенциала $\dot{\phi}$, напряженности $\dot{\mathbf{E}}$ и тока $\dot{\mathbf{J}}$ использовался метод конечных элементов, реализованный в программе COMSOL [26]. Среда внутри каждой ячейки принималась однородной, но в разных ячейках ее свойства могли изменяться согласно граничным условиям. Размеры расчетной области выбирались существенно больше размеров локальных областей изоляции, содержащих совокупность близко расположенных микровключений (независимо от размеров последних). Решение задачи проводилось в несколько этапов с использованием многоуровневой математической модели. Расчетная область выбиралась в виде параллелепипеда (см. рис. 1). На граничных поверхностях параллелепипеда, перпендикулярных ЭП, использовались условия Дирихле о задании потенциалов в направлении приложенного поля, на остальных поверхностях задавались условия Неймана: $\partial\dot{\phi}/\partial n = 0$ по нормали границы раздела сред. Если расчетная область выбиралась возле поверхности токопроводящей жилы (то есть в области наибольшей напряженности ЭП), то на грани параллелепипеда, совпадающей с поверхностью жилы, вводились один или несколько конусообразных микровыступов, характеризующих шероховатость этой поверхности.

Исследовалась также возможность наличия вблизи микровыступа объемного дефекта изоляции сложной формы (как показано на рис. 1) и наличия двух близко расположенных микродефектов размерами менее 50 мкм (как показано на рис. 2). Для оценки изменения величины напряженности ЭП в расчетной области использовался коэффициент неоднородности $k_H = |E_{max}|/|E_{cp}|$ (где $|E_{max}|$ – наибольшее значение напряженности ЭП на шаге расчетной сетки, $|E_{cp}|$ – ее среднее значение в расчетной области без наличия микровключений). Из рис. 2 видно, что при уменьшении расстояния между дефектами l коэффициент k_H увеличивается в единицы-десятки раз независимо от размеров микродефектов (определяющим при этом является во сколько раз величина l меньше размеров дефектов). Такое увеличение напряженности ЭП в изоляции может быть одним из основных механизмов повышения вероятности объединения нескольких микровключений в одно большего размера и соответственно повышения интенсивности старения изоляции кабелей СВН.

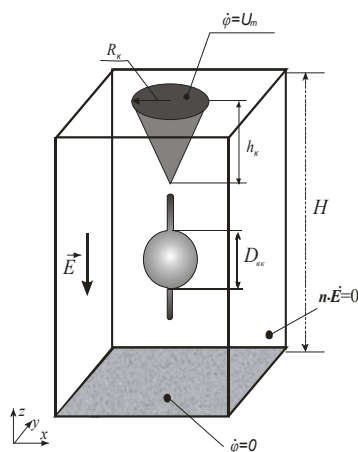


Рис. 1

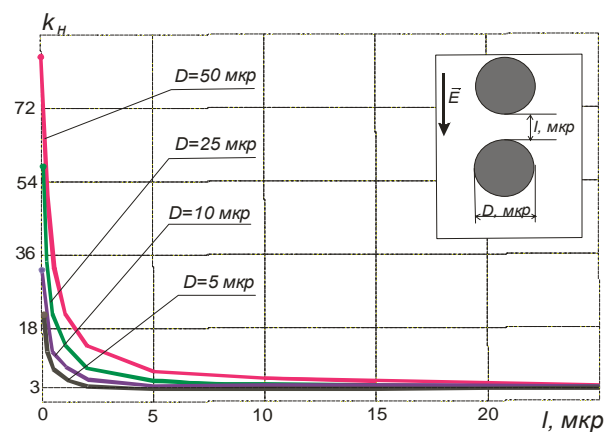


Рис. 2

Одной из важных характеристик, определяющих интенсивность деструкции изоляции, является наличие в ней локальных микрообъемов с критической напряженностью ЭП, при которой могут возникать пороговые электрофизические процессы. Такие объемы называют напряженными [16]. Для расчета напряженных объемов в полимерной изоляции ВВК и СИП была разработана математическая модель, в которой использовалась функция *step-function*:

$$flc2hs(x, scale) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x \geq 0, \end{cases}$$

где *scale* – область перехода от 0 до 1.

Аналогично была сформулирована функция $f(E)$:

$$f(E) = \begin{cases} 1, & E_1 \leq E \leq E_2; \\ 0, & \text{все оставшиеся значения.} \end{cases}$$

Такая функция вычислялась как $f(E) = flc2hs(E - E_1, 0) - flc2hs(E - E_2, 0)$. Это позволило рассчитывать напряженный объем согласно выражению

$$V_{n.o.} = \int_V f(E) dV,$$

где V – весь расчетный объем изоляции.

На рис. 3 представлены изменения величин напряженных объемов V и коэффициента k_n при различных пороговых значениях напряженности ЭП: $E_{1n} = 1,5E_0$; $E_{2n} = 2E_0$; $E_{3n} = 2,5E_0$.

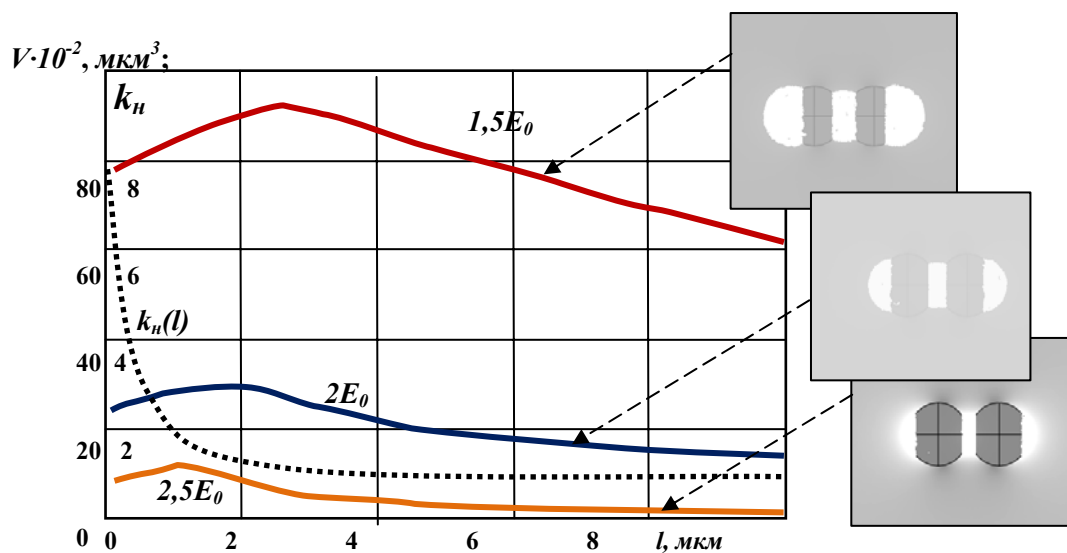


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что при уменьшении расстояния между микровключениями, величина напряженных объемов увеличивается до максимальных значений, а затем уменьшается (так как поверхности микровключений трансформируются в плоскости при очень малых l). В то же время напряженность ЭП экспоненциально увеличивается на всем диапазоне уменьшения величины l .

Полученные результаты показывают, что неоднородность распределения микродефектов в изоляции может быть одним из основных механизмов увеличения напряженности ЭП в ее локальных объемах и развития пороговых электрофизических процессов старения изоляции в электрических полях. Такой механизм может вызывать снижение энергетических барьеров для свободных электронов, возмущение молекулярных связей полимера, его химическую деструкцию с увеличением количества и размеров нано- и микродефектов, инжекцию объемных зарядов, возникновение электродендритов и частичных разрядов.

Расчет электромагнитных процессов в сегментированной жиле кабелей СВН. Полевая задача анализа электротепловых процессов индукционного нагрева сегментирован-

ных жил кабелей СВН при их изготовлении решалась для комплексного вектора напряженности магнитного поля, имеющего единственную Z -составляющую – $\dot{\mathbf{H}} = (0, 0, \dot{H}_z)$ [25].

В качестве источника питания использовалась трехфазная сеть (при нагреве на частоте 50 Гц) или тиристорный преобразователь частоты (при нагреве на частотах до 2400 Гц). Использование в жиле сегментов с изоляционными промежутками создает ряд особенностей, не позволяющих использовать известные методики расчета электромагнитных и тепловых процессов в жилах кабелей [27, 28]. Поэтому были созданы математическая модель и методики численного расчета указанных процессов в сегментированной токопроводящей жиле большого сечения ($1000 \dots 3000 \text{ мм}^2$) при ее непрерывном движении в переменном магнитном поле цилиндрических индукторов. При этом исследовались основные закономерности распределения джоулевых потерь и температуры в объеме жилы для выбора оптимальных параметров индукционной установки и источника электропитания.

Рассматривалось использование длинного индуктора, что позволило анализировать ЭМП в поперечном сечении, рассматривая поле в плоскости xOy (рис. 4). При расчете магнитного поля движение

жилы не учитывалось, что справедливо в приближении малых значений магнитного числа Рейнольдса – $Re_m = \mu_0 \sigma L v_z \ll 1$, где σ – электропроводность материала жилы. Материал жилы (например, алюминий) принимался токопроводящим и немагнитным. Контактное со-

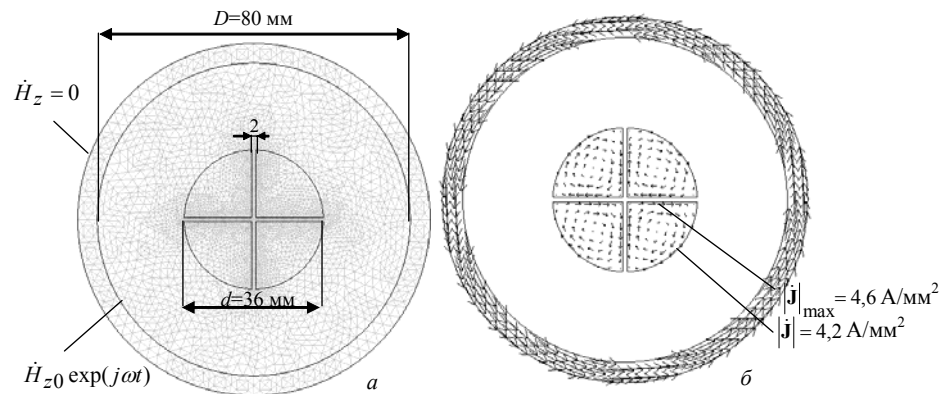


Рис. 2.

противление между проволоками каждого сегмента предполагалось равным нулю (учет значения этого сопротивления можно выполнить, если величину электропроводности в уравнении для электромагнитной задачи заменить предварительно вычисленным значением).

Расчетная область электромагнитной задачи показана на рис. 4 а на примере четырехсегментной жилы.

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

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

получим следующее основное дифференциальное уравнение:

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

В качестве источника поля задавалась напряженность на внутренней поверхности индуктора $\dot{H}_{z0} \exp(j\omega t)$, что эквивалентно заданию поверхностной плотности тока в индукторе. На внешней поверхности индуктора поле полагалось равным нулю (см. рис. 4 а). Решение дифференциального уравнения (1) с указанными граничными условиями выполнялось численно методом конечных элементов с помощью программного пакета Comsol 3.3 [26].

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

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

Было подтверждено, что при частоте тока 50 Гц магнитное поле распределено практически равномерно по глубине сегментов жилы кабелей СВН, а с ростом частоты тока до

2400 Гц все более значительно проявляется скин-эффект. Анализ расчета распределения вектора плотности электрического тока при частотах от 50 до 2400 Гц в поперечном сечении жилы показал, что из-за наличия в ней изолированных сегментов плотность тока образует в них вихревые структуры, причем максимальная плотность локализуется не на наружной поверхности жилы (как при изготовлении ее без изолированных сегментов), а на внутренних поверхностях сегментов (из-за проявления между ними эффекта близости). Так, согласно рис. 4 б, значение плотности тока на наружной поверхности сегмента меньше его максимального значения на внутренней поверхности приблизительно на 10 %.

Расчет тепловых процессов в сегментированной жиле при ее движении в магнитном поле индукторов. Тепловая задача решена в трехмерной постановке в неподвижной системе координат, связанной с индукторами. В этом случае при постоянной скорости движения жилы температурное поле является трехмерным и стационарным (не зависящим от времени). Расчет поля температуры проводился 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:

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

где ρ, C, λ – соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность материала; $\mathbf{V} = (0, 0, v_z)$ – скорость движения жилы вдоль координаты z ; q – 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 равняется температуре окружающей среды $T_{окр} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; на боковых поверхностях сегмента выполняется условие теплоизоляции, а на наружной поверхности происходит теплоотдача в окружающую среду. На выходе из индуктора на торце сегмента задавался конвективный перенос тепла, то есть выполнялось 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 [26].

Расчитанные распределения температурного поля в различных сечениях по длине жилы представлены на рис. 5, на котором на вставке слева показано изменение температуры вдоль отмеченной линии AB .

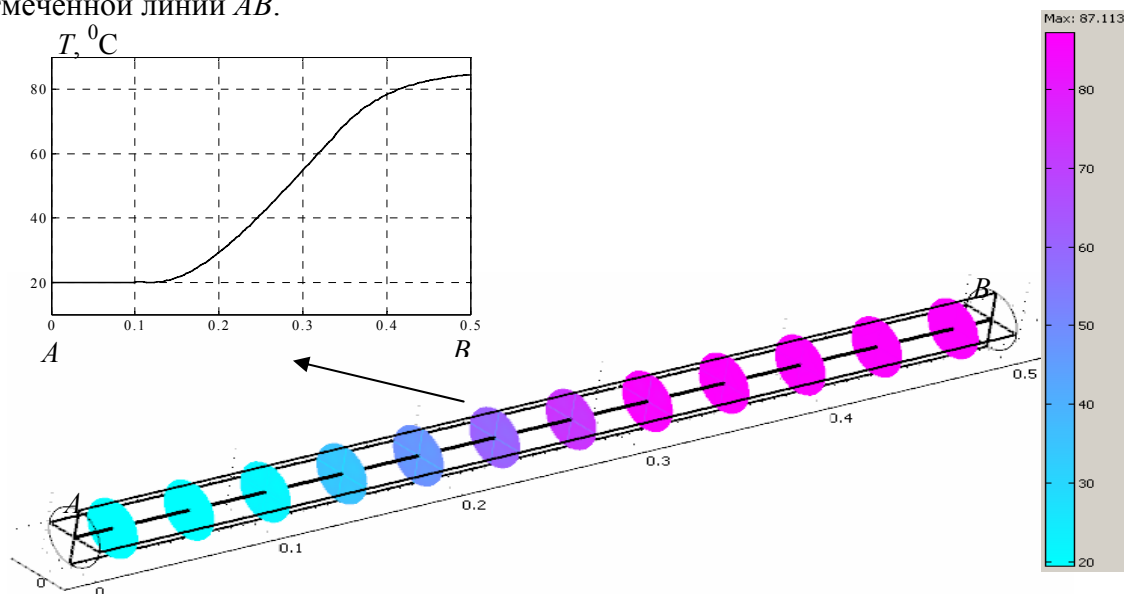


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что нагрев конечных участков жилы происходит до 87°C , а вдоль длины сегментов температура возрастает приблизительно по линейному закону. При выбранных значениях всех параметров только индуктор с частотой тока 2400 Гц обеспечивает нагрев до температуры в требуемом интервале $80\dots 120^{\circ}\text{C}$. При более низкой частоте и неизменном значении ампер-витков индуктора величина джоулевых потерь в сегментах и температура жилы на выходе из индуктора снижаются. Можно сделать вывод, что использование индукционного нагрева на частоте 50 Гц возможно только при значительном снижении скорости движения жилы, удлинении индукторов или увеличении сечения жилы, например, до 3000 мм^2 (а не 1000 мм^2 , как рассматривается в данной работе).

Выводы

1. Выявлено и обосновано новое электрофизическое явление дополнительного синергетического возмущения электрического поля в твердой полимерной изоляции с близко расположенными дефектами, размеры которых могут быть гораздо меньше общепринятых, что позволило разработать новые критерии качества СПЭ изоляции кабелей СВН.

Суть новых критериев состоит в недопустимости появления в СПЭ изоляции кабелей СВН как критических размеров отдельных дефектов и микровыступов, так и критических размеров скоплений близко расположенных дефектов самых малых размеров. Близко расположенными названы дефекты, расстояния между которыми меньше их размеров.

2. Созданы новые многоуровневые математическая модель и методика численного расчета распределения трехмерного электрического поля в СПЭ изоляции кабелей СВН, позволяющие учитывать дополнительное возмущение поля совокупностью многофазных близко расположенных микровключений с различными размерами, конфигурациями, средами и взаимным расположением. Для уточненного анализа такого возмущения поля разработан новый критерий изменения шага расчетной сетки, учитывающий изменение градиента напряженности поля независимо от механизма дополнительного его возмущения.

3. Показано, что с уменьшением расстояния вдоль напряженности электрического поля между близко расположенными водными микровключениями, напряженность поля в изоляции между ними увеличивается по экспоненте (независимо от величины включений), а величина напряженных микрообъемов изоляции сначала увеличивается до максимальных значений, а затем уменьшается (что объясняется трансформацией поверхностей микровключений в плоскости при очень малых взаимных расстояниях).

4. Полученные результаты показывают, что неоднородность распределения микродефектов в изоляции может быть одним из основных механизмов увеличения напряженности ЭП в ее локальных объемах и развития пороговых электрофизических процессов старения изоляции в электрических полях. Такой механизм может вызывать снижение энергетических барьеров для свободных электронов, возмущение молекулярных связей полимера, его химическую деструкцию с увеличением количества и размеров нано- и микродефектов, инъекцию объемных зарядов, возникновение электродендритов и частичных разрядов.

5. Разработаны программные средства для расчета распределения вектора плотности электрического тока и температуры в сегментированных жилах кабелей СВН при частотах индуцированных токов от 50 до 2400 Гц.

Показано, что из-за наличия в жиле кабелей СВН изолированных сегментов плотность тока образует в них вихревые структуры, причем максимальные плотности токов локализуются не на наружной поверхности жилы (как при изготовлении ее без изолированных сегментов), а на внутренних поверхностях сегментов (из-за проявления между ними эффекта близости). Значение плотности тока на наружной поверхности сегментов меньше его значения на внутренней поверхности на $\approx 10\%$.

Исследованы и определены параметры индукторов и источника питания, при которых обеспечивается оптимальное распределение температуры (обычно от 80 до 120°C) вдоль и в сечении сегментированных жил кабеля СВН.

6. Обосновано, что при выбранных значениях всех параметров нагрев жил кабелей СВН до температуры в интервале $80...120^{\circ}\text{C}$ возможно только при использовании индуцированных токов частотой 2400 Гц. При более низкой частоте и неизменном значении ампервитков индуктора величина джоулевых потерь в сегментах и температура жилы на выходе из индуктора снижаются. Применение токов частотой 50 Гц возможно только при значительном снижении скорости движения жилы, удлинении индукторов или увеличении сечения жилы до 3000 мм^2 (вместо сечений 1000 мм^2 , которые анализировались в работе).

7. Новые фундаментальные и прикладные электрофизические результаты в виде научно-технических рекомендаций, моделей и методик использованы на ЗАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков) при создании технологической линии и оптимизации ее режимов промышленного изготовления энергетических кабелей высокого [7, 29] и сверхвысокого напряжений [30] с твердой пероксидно сшитой полиэтиленовой изоляцией.

1. Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А., Золотарев В.В. Отечественные разработки кабелей среднего, высокого и сверхвысокого напряжений // Вісн. НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 20. – С. 87–95.
2. Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. Кабели на напряжение 10-500 кВ: состояние и перспективы развития // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38.
3. Мещанов Г.И. Перспективы и направления развития производства кабелей и проводов энергетического назначения // Кабели и провода. – 2007. – № 3 (304). – С. 22–27.
4. Мендельсон А., Аартс М.У. Мировой опыт применения изоляции из триингостойкого сшитого полиэтилена // Кабели и провода. – 2005. – № 5 (294). – С. 23–29.
5. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Сливов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. – 2005. – № 1 (290). – С. 9–13.
6. Шидловский А.К., Шумилов Ю.Н., Щерба А.А., Золотарев В.М. Высоковольтные полимерные изоляторы. – К.: Сучасність, 2008. – 253 с.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненко Ю.А., Василец Л.Г., Гримуд Г.И. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 64/110 кВ // Науч.-метод. изд. РТМ К28–004:2006. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненко Ю.А., Василец Л.Г., Гримуд Г.И. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ // Науч.-метод. изд. РТМ К28–005: 2007. – Харьков: Майдан, 2007. – 65 с.
9. Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.В. Самонесущие изолированные и высоковольтные защищенные провода. – Киев: ИЭД НАНУ. – 2008. – 288 с.
10. Бустром Дж. О., Кампус А., Хэмpton Р.Н., Хейккала П., Ягер К.М., Смедберг А., Валд Д. Сополимерные композиции сшитого полиэтилена (Super Copo) // Кабели и провода. – 2005. – № 5 (294). – С. 7–22.
11. Satoru M., Tanaka T., Muto H. et al. Development of XLPE Cable under DC Voltage // 5th International Conference on Insulated Power Cables. – 20-24 June, 1999. – Versailles, France. Paper B 7.3. – P. 527–532.
12. Byggeth M., Johannesson K., Liljegren C., Paimqvist L. et al. The Development of an Extruded HVDC Cable System and its First Application // 5th International Conference on Insulated Power Cables. – 20-24 June, 1999. – Versailles, France. Paper B 7.5. – P. 538–542.
13. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 152 с.
14. Ушаков В.Я., Робежко А.Л., Важов В.Ф. и др. О роли неоднородности полимеров в развитии разрушения под действием электрического поля // Физика твердого тела. – 1985. – Т. 27. – Вып. 8. – С. 2361–2366.
15. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Моделирование и анализ неоднородных электрических полей в высоковольтных кабельных линиях с учетом поверхностных и объемных дефектов в их полиэтиленовой изоляции // Техн. электродинамика. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2006. – Ч.1. – С. 96–105.
16. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.В., Перетятко Ю.В. Анализ микрон неоднородности электрического поля как фактора повышения интенсивности электрофизических процессов в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и самонесущих изолированных проводов // Техн. электродинамика. – 2008. – № 4. – С. 3–12.
17. Шувалов М.Ю., Маврин Н.А. Теоретическое и экспериментальное исследование водных триингов типа «бант» // Кабели и провода. – 2002. – № 1 (272). – С. 42–44.
18. Щерба А.А., Резинкина М.М. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов. – К.: Наук. думка. – 248 с.

19. Щерба А.А., Золотарев В.М., Перетятко Ю.В., Еришов С.Е. Влияние длины и взаимного расположения водных микроканалов на неоднородность электрического поля в полимерной изоляции высоковольтной кабельно–проводниковой продукции // Техн. електродинаміка. Темат. вип. „Силова електроніка та енергоєфективність”. – 2008. – Ч. 1. – С. 83–88.
20. Леппанен Й., Чамов А.В. Производство сверхвысоковольтных кабелей на наклонных и вертикальных линиях вулканизации компании Майллефер // Кабели и провода. – 2009. – № 1 (314). – С. 16–18.
21. Стандарт МЭК. IEC 62067 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170 \text{ kV}$) up to 500 kV ($U_m = 550 \text{ kV}$). Test methods and requirements. First edition, 2001.
22. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.Л., Василец Л.Г. Математическая модель и методика численного расчета неоднородного электрического поля и нагрева полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей при возникновении дендритных микроканалов // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силова електроніка та енергоєфективність”. – 2006. – Ч. 4. – С. 116–120.
23. Щерба А.А., Кучерявая И.Н., Подольцев А.Д., Соболева К.Л., Шумилов Ю.Н. Моделирование и анализ электрических полей в диэлектрических средах, содержащих включения сложной формы // Техн. електродинаміка. – 1998. – № 1. – С. 3–6.
24. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненц Ю.Л., Василец Л.Г. Математическое моделирование и численный расчет неоднородных электрических полей, удельных потерь и плотности поверхностных зарядов в полиэтиленовой модифицированной изоляции высоковольтных силовых кабелей // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силова електроніка та енергоєфективність”. – 2006. – Ч. 4. – С. 116–120.
25. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Индукционный нагрев сегментированной токопроводящей жилы силового кабеля на этапе его изготовления // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 53–60.
26. www.comsol.com
27. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
28. Установки индукционного нагрева / Ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 326 с.
29. Пат. 21738 Україна. Силовий кабель / В.М. Золотарьов, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антоненц, Л.Г. Василец, А.К. Шидловський, А.А. Щерба, О.Д. Подольцев. – Опубл. 15.03.2007. Бюл. № 3.
30. Пат. 21739 Україна. Силовий кабель надвисокої напруги / В.М. Золотарьов, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антоненц, Л.Г. Василец, А.К. Шидловський, А.А. Щерба, О.Д. Подольцев. – Опубл. 15.03.2007. – Бюл. № 3.