
УДК 621.315.2:004.94

И.Н. Кучерявая, д-р техн. наук
Ин-т электродинамики НАН Украины
(Украина, 03680, Киев, пр. Победы, 56,
тел. (044) 3662568, e-mail: rb.irinan@gmail.com)

Мультифизическое и многомасштабное моделирование электрофизических процессов в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей

Исследование электрофизических процессов проведено с помощью совместного многомасштабного и мультифизического моделирования посредством последовательного решения цепно-полевых задач для трех структурных уровней — всей кабельной линии, полиэтиленовой изоляции кабеля и элемента изоляции с характерными микронеоднородностями. Результаты решения связанных задач определения электрического поля и механических напряжений в изоляции на микроуровне позволяют сделать заключение о ее состоянии и сроке службы кабельной линии в конкретных условиях эксплуатации.

Дослідження електрофізичних процесів проведено за допомогою сумісного багатомасштабного та мультифізичного моделювання послідовним розв'язанням ланцюгово-польових задач для трьох структурних рівнів — всієї кабельної лінії, поліетиленової ізоляції кабеля та елементу ізоляції з характерними микронеоднородностями. Результати розв'язання зв'язаних задач визначення електричного поля і механічних напружень в ізоляції на мікрорівні дозволяють зробити висновок про її стан та термін служби кабельної лінії в конкретних умовах експлуатації.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многомасштабное и мультифизическое моделирование, цепно-полевые задачи, связанные полевые задачи, электромагнитные процессы, механические напряжения.

Разработка и внедрение современных электротехнических устройств и силового электрооборудования, в том числе силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжения, требуют детального изучения электромагнитного поля и электрофизических процессов с учетом сложной внутренней структуры и особенностей составляющих элементов на различных по размерному масштабу уровнях. Как правило, не удается построить и реализовать единую модель для всех уровней внутренней структуры устройства. Для всестороннего и детального исследования электротехнических устройств применяется метод многомасштабного моделирования [1—5].

© И.Н. Кучерявая, 2015

Достичь более полного понимания явлений и процессов, протекающих в различных физических объектах, позволяет исследование на основе совместного использования методов мультифизического и многомасштабного моделирования. В работах [6—8] приведены примеры таких исследований во многих областях науки и техники, в том числе в материаловедении, гидромеханике, структурной механике, химии, биомедицине, астрофизике. Подходы к моделированию на основе сочетания методов мультифизического и многомасштабного моделирования описаны в работе [6]. Изложению общих принципов организации связей в совместных многомасштабных и мультифизических моделях посвящена работа [8].

В работах [9, 10] рассмотрены теоретические основы построения комбинированных многомасштабных мультифизических моделей для мультиобластей. Такие многомасштабные мультифизические и мультигеометрические модели предназначены для исследования физических, химических и биологических систем, к которым отнесены топливные элементы, молекулярные двигатели, нано-жидкости, ионные каналы, вирусы, биологические и макромолекулярные системы.

Для исследования электротехнических устройств в работах [1, 11] предложен следующий подход к реализации многомасштабного моделирования. Компьютерное моделирование проводится с учетом таких уровней электротехнического устройства, которые представляют наибольший интерес для исследования. Каждый уровень имеет свой размерный масштаб и включает важнейшие элементы структуры, качество и работа которых наиболее влияют на функционирование всего устройства в целом. Такие элементы устройства названы ответственными элементами. Необходимость выделения структурных уровней при детальном исследовании электротехнических устройств связана с ограниченной разрешающей способностью численных методов решения физических задач и ограниченными ресурсами компьютеров.

Совместное использование методов многомасштабного и мультифизического моделирования для расчета процессов в электротехнических устройствах состоит в выполнении следующих этапов [1, 11].

1. Исследуемое устройство рассматривается как иерархическая структура, в которой выделяются характерные структурные уровни, отличающиеся по масштабу (размеру).

2. На каждом выбранном структурном уровне определяется ответственный элемент и строится своя математическая модель для расчета электромагнитного поля и связанных с ним мультифизических процессов. Заметим, что выбор ответственного элемента на каждом уровне требует в общем случае проведения дополнительных исследований.

3. Устанавливаются величины, характеризующие физические поля, а также параметры, связывающие процессы на структурных уровнях. Определяется характер связи между процессами разных уровней (слабосвязанные или сильносвязанные процессы согласно классификации, приведенной в работе [12]).

4. Численно решаются в общем случае мультифизические задачи на всех структурных уровнях. Связь полевых задач, решаемых на различных уровнях, реализуется посредством задания соответствующих граничных или начальных условий. Для цепных задач, решаемых на каких-либо уровнях, осуществляется обмен данными, в качестве которых выступают параметры и (или) характеристики цепей.

5. Выполняется анализ рассчитанных характеристик поля или цепей в наиболее важных областях исследуемого устройства — ответственных элементах на выбранных уровнях. С помощью конкретных данных об электромагнитных процессах на каждом структурном уровне формируется обобщенная информация о характере функционирования всего устройства в целом.

В данном исследовании электрофизических процессов в кабельной линии совместное использование методов многомасштабного и мультифизического моделирования проведено с помощью выбора ответственных элементов на трех структурных уровнях: всей кабельной линии (макроуровень), полиэтиленовой изоляции кабеля (средний уровень) и отдельного элемента объема изоляции с характерными микронеоднородностями (микроуровень) (рис. 1 на вклейке). Исследования выполнены на примере кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ, проложенной для электроснабжения металлургического завода «Днепро-сталь» (г. Днепрпетровск) [13].

Схема решения мультифизических задач с помощью многомасштабного моделирования. Для силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией, также как и для ряда электротехнических устройств, рассмотренных в [1], реализуется такая последовательность операций:

1) выделение трех взаимосвязанных структурных уровней кабельной линии со своими ответственными элементами: макроуровня со всей кабельной линией, среднего уровня — полиэтиленовой изоляции и микроуровня, включающего отдельный элемент объема изоляции с характерными микровключениями; такие уровни связаны между собой посредством основных характеристик, в общем случае — электрических, тепловых, механических;

2) выбор ответственных элементов на указанных структурных уровнях и расчет электрических характеристик, электромагнитного поля и

связанных с ним процессов (механических напряжений) при учете связи цепных и полевых задач на разных уровнях.

Согласно схеме, представленной на рис. 1 (см. вклейку), на макроуровне всей кабельной линии с учетом определенных условий ее работы в электроэнергетической системе моделируем переходные процессы с использованием программы расчета динамических систем Matlab/Simulink [14]. Рассчитываем зависимость от времени напряжения на входе в кабельную линию в различных эксплуатационных режимах — в режиме короткого замыкания (КЗ) в нагрузке на выходе линии $U_{кз}(t)$ и в режиме включения кабельной линии без нагрузки (на холостом ходу) $U_{хх}(t)$.

На среднем уровне выделяемый ответственный элемент — полиэтиленовая изоляция кабеля. По результатам решаемой на макроуровне цепной задачи последовательно решаем полевую задачу. Рассчитываем распределение электрического поля в объеме изоляции по зависимости $U_{кз}(t)$, которая формирует граничные условия электрической задачи. Так, на макро- и среднем уровнях решаются связанные цепная и полевая задачи — мультифизическая цепно-полевая задача (рис. 2).

На микроуровне выбираем ответственный элемент — объем полиэтиленовой изоляции с характерными микровключениями, так как на этом уровне определяющей является неоднородность микроструктуры полиэтиленового материала. В микрообъеме с включением решаем задачу определения электрического поля с граничными условиями, соответствующими максимальному перенапряжению в режиме включения кабельной линии на холостом ходу $U_{хх}$, которое находится на макроуровне. По результатам решения электрической задачи рассчитываем механические напряжения в материале изоляции с микровключениями. Таким образом, на макро- и микроуровнях решаются мультифизические задачи — связанные цепная и полевые задачи определения электрического поля и механических напряжений в изоляции кабеля в конкретном режиме работы.

На основании электрических характеристик по допустимому значению электромеханических напряжений может быть сделано заключение об интенсивности старения изоляции силового кабеля и надежности работы кабельной линии в целом, а также сформированы соответствующие рекомендации относительно необходимости изменения нагрузочной способности и условий эксплуатации исследуемой линии.

Важными факторами при решении задач согласно схеме, представленной на рис. 1, являются учет конкретных условий и режимов работы кабельной линии, выбор ответственных элементов на каждом структурном уровне, строгое определение граничных условий более низкого уровня в соответствии с данными, полученными при решении задач на более высоком уровне.

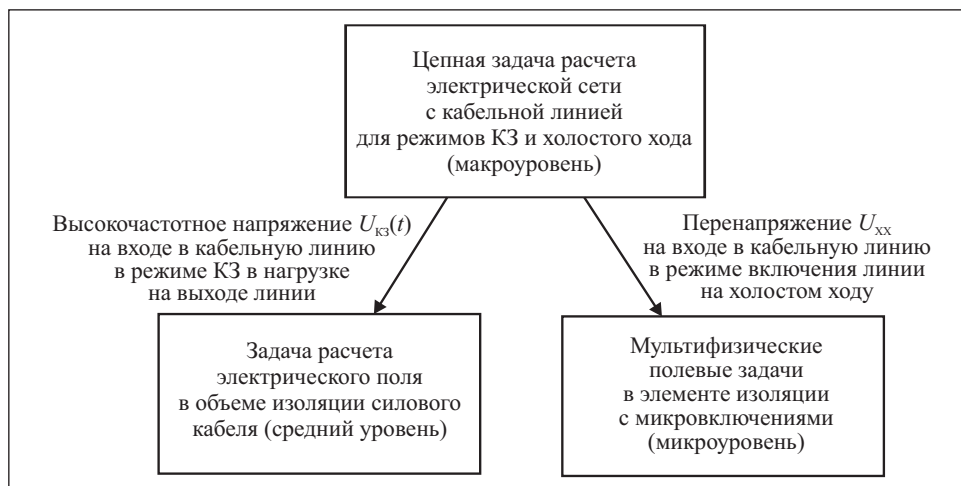


Рис. 2. Схема связи между задачами при реализации многомасштабного и мультифизического моделирования процессов в кабельной линии

Следует заметить, что связь процессов на различных структурных уровнях может быть слабой, тогда задачи на различных уровнях решаются последовательно. В общем случае процессы на низких уровнях могут существенно влиять на процессы, протекающие на более высоких уровнях. При этом связь задач разных уровней будет сильной, и такие задачи необходимо решать одновременно либо последовательно с применением итерационных процедур.

По описанной схеме моделирования процессов в кабельной линии осуществляется решение цепно-полевых задач, а на микроуровне выполняется решение двух мультифизических полевых задач (см. рис. 2).

Макроуровень — расчет электромагнитных процессов в кабельной линии на основе теории цепей. Первая в Украине кабельная линия с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ, проложенная на металлургическом заводе «Днепросталь» для обеспечения внешнего электроснабжения электроплавильного комплекса, представляет собой сложное инженерное сооружение (рис. 1, а) [13]. В [15] вопросы надежности и безопасности функционирования такой кабельной линии предложено решать с помощью компьютерного моделирования переходных электромагнитных процессов для различных режимов работы. Средствами пакета программ Matlab/Simulink в [15] реализована Simulink-модель кабельной линии и получены результаты для случая, когда линия работает на номинальную активную нагрузку с линейным током 600 А и в момент времени $t = 0,5$ с все три фазы нагрузки замыкаются на землю,

каждая через сопротивление 10 Ом; в дальнейшем (при $t = 1$ с) эти цепи размыкаются.

На рис. 3, а (см. вклейку) представлены полученные в [15] посредством компьютерного моделирования осциллограммы изменения напряжения на входе в линию для случая трехфазного КЗ в нагрузке на выходе кабельной линии. Напряжение приведено в относительных единицах в долях от величины $U_{\phi \max}(t) = 330\sqrt{2}/\sqrt{3}$ кВ. Из рис. 3, а, видно, что в момент возникновения КЗ в линии появляется высокочастотное затухающее напряжение, которое может быть аппроксимировано функцией:

$$U_{\text{кз}}(t) = 1,15U_{\phi \max} \exp(-t/\tau) \sin 2\pi f t, \quad \tau = 0,01 \text{ с}, \quad f = 2,5 \text{ кГц}. \quad (1)$$

Далее выражение (1) используется на среднем уровне в схеме многомасштабного моделирования (см. рис. 1) для расчета электрического поля в изоляции кабеля в режиме трехфазного КЗ в нагрузке.

По результатам моделирования в вычислительной среде Matlab/Simulink в [15] найдено также изменение напряжения на входе в кабельную линию в режиме включения линии без нагрузки (см. рис. 3, б). Полученное при этом максимальное перенапряжение $U_{\text{хх}}(t) = 1,8U_{\phi \max}$ передается на микроуровень для проведения мультифизического моделирования в неоднородной полиэтиленовой изоляции.

Средний уровень — электрическое поле в изоляции. Надежность и срок службы кабельных линий зависят от технических характеристик кабелей, их качества, электрофизических свойств используемых материалов, условий и режимов эксплуатации [16]. В кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена используется трехслойная изоляционная структура, включающая полиэтиленовую изоляцию, полупроводящий слой по жиле и полупроводящий слой по основной изоляции. Полупроводящие слои предназначены для выравнивания скачка напряжения в электрическом поле у поверхности жилы и металлического экрана в различных режимах работы кабелей, в том числе в условиях КЗ в нагрузке, кратковременных бросков токов и перенапряжений на линии, что обеспечивает защиту изоляции от преждевременного старения.

В связи с изложенным представляет практический интерес исследование распределения электрического поля в изоляции силовых кабелей в аварийных режимах, например в случае возникновения высокочастотного напряжения на токопроводящей жиле кабеля в режиме КЗ, для гарантирования экранирующей функции полупроводящего слоя и надежности изоляции.

Задачу исследования электрического поля в объеме изоляции кабеля решаем с учетом условий его работы в режиме КЗ в нагрузке. Моделируем такой режим, задавая напряжение на жиле кабеля, найденное из решения

задачи на макроуровне (см. рис. 3, а). Полагаем, что кабель находится во внешнем переменном электрическом поле, изменяющемся во времени с частотой $f = 2,5$ кГц.

Применяем схему с элементами многомасштабного моделирования, представленную на рис. 4 (см. вклейку). Сечение кабеля разбиваем на ряд эквивалентных секторов с учетом неровности поверхности многопроводочной жилы. Один из таких секторов составляет элементарную ячейку структуры [1]. Учитывая периодичность структуры поперечного сечения кабеля, достаточно найти распределение электрического поля в одном секторе. Тогда картина поля во всем сечении кабеля определится путем периодического повторения по угловой координате распределения поля в элементарной ячейке. В качестве расчетной области выбрана элементарная ячейка, представленная на рис. 4, а.

Задачу будем рассматривать в двумерной постановке в декартовой системе координат. Основное уравнение, определяющее нестационарное электрическое поле в кабеле $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$, имеет вид

$$\nabla \left[-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \right] = 0, \quad (2)$$

где $\varphi(\mathbf{r}, t)$ — электрический потенциал, зависящий от пространственной координаты $\mathbf{r} = (x, y)$ и времени t ; σ и ε_r — электропроводность и диэлектрическая проницаемость соответствующего материала (относительное значение); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Задаем следующие граничные условия задачи (2) (см. рис. 4, б):

на поверхности медного экрана кабеля $\varphi = 0$;

на боковых границах $\partial\varphi/\partial n = 0$ (\mathbf{n} — единичный вектор внешней нормали);

на поверхности жилы согласно (1) зависимость от времени вида

$$\varphi = U_{\text{кз}}(t) = 1,15 U_{\text{ф max}} \exp(-t/\tau) \sin 2\pi f t, \quad (3)$$

где $U_{\text{ф max}}(t) = 330\sqrt{2}/\sqrt{3}$ кВ — максимальное фазное напряжение для кабеля 330 кВ в рассматриваемом аварийном режиме; $\tau = 0,01$ с; $f = 2,5$ кГц.

Численные расчеты выполнены для кабеля на напряжение 330 кВ, у которого в соответствии с [13] наружный диаметр составляет 105 мм, диаметр жилы — 34,8 мм, площадь сечения жилы — 800 мм², площадь сечения медного экрана — 150 мм², толщина изоляции — 23,5 мм, толщина наружной оболочки — 6 мм, внутренний радиус внешнего экрана — 42,8 мм, толщина полупроводящего слоя — 1,9 мм. Приняты следующие значения электрических параметров полиэтиленовой изоляции: электропроводность — $\sigma_1 = 10^{-14}$ (Ом·м)⁻¹, диэлектрическая проницаемость — $\varepsilon_1 = 2,3$; для полупроводящего слоя — $\sigma_2 = 10^{-6}$ (Ом·м)⁻¹, $\varepsilon_2 = 2,3$.

Процесс рассмотрен во времени, когда напряжение на жиле изменяется по закону (3) и максимальное значение поля достигается в момент времени $0,25T$, где T — период изменения напряжения. Показанное на рис. 5, а (см. вклейку) распределение электрического поля соответствует этому значению времени. На рис. 5, б, для сравнения приведено изменение напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$ вдоль границы полупроводящего слоя (линии AB) при частоте $f = 2,5$ кГц, соответствующей рассматриваемому аварийному режиму, и частоте номинального режима кабельной линии $f = 50$ Гц. При аварийном режиме ($f = 2,5$ кГц) происходит увеличение уровня поля в изоляции на границе перехода токопроводящая жила — полупроводящий слой по жиле и некоторое возрастание напряженности электрического поля в центральной части этой зоны. При этом наиболее вероятны процессы возникновения и развития триинговых структур и, как результат, ускоренное старение полиэтиленовой изоляции.

Микроуровень — мультифизические процессы в неоднородной изоляции. Одной из важных проблем, связанных с достижением высокой надежности электрических кабелей с полиэтиленовой изоляцией, является повышение устойчивости изоляционного материала к деградации. Поскольку наличие водных включений в изоляции приводит к ухудшению свойств и является причиной ее старения [17], значительное внимание исследователей уделяется изучению влияния микровключений на электрическую прочность и структурно-механическое состояние изоляции. В связи с этим на микроуровне по схеме многомасштабного моделирования (см. рис. 1) выполнено исследование электрического поля и связанных с ним механических напряжений в неоднородной изоляции силового кабеля.

Физической моделью для исследования выбран малый объем полиэтиленовой изоляции с водными микровключениями различной формы. Основным уравнением для расчета электрического поля в микрообъеме изоляции является уравнение для электрического потенциала ϕ :

$$\nabla(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r)\nabla\phi = 0, \quad (4)$$

где ω — угловая частота; j — мнимая единица; точкой обозначены комплексные величины.

Расчетная модель представлена в виде осесимметричной в цилиндрической системе координат (рис. 6 на вклейке). Перенапряжение $U_{xx} = 1,8U_{\phi \max}$ на входе в кабельную линию в режиме включения на холостом ходу, передаваемое с макроуровня (см. рис. 3, б), формирует граничные условия задачи (4). На верхней границе, ориентированной вдоль поля, определяется условие $\phi = U_{xx}l/h$, где h — толщина полиэтиленовой изо-

ляции кабеля; l — высота расчетной области вдоль поля; на нижней границе области с включением $\dot{\phi} = 0$.

Предполагая отсутствие объемных зарядов, по значению электрического поля $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\dot{\phi}$ определяем объемную электрическую силу (среднюю за период), действующую в диэлектрической среде [18]:

$$\mathbf{F}_e = \frac{\varepsilon_0}{2} \nabla(\varepsilon - 1) |\dot{\mathbf{E}}|^2.$$

Здесь $|\dot{\mathbf{E}}| = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{E}_r))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{E}_r))^2 + (\operatorname{Re}(\dot{E}_z))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{E}_z))^2}$, где \dot{E}_r , \dot{E}_z — составляющие вектора поля $\dot{\mathbf{E}}$; Re и Im — действительная и мнимая части комплексных величин.

Далее, для расчета механических напряжений в материале изоляции решаем дифференциальное уравнение механического равновесия, записанное для тензора механических напряжений σ_M в предположении, что действует только внутренняя объемная сила \mathbf{F}_e , а внешние силовые нагрузки и давление в материале отсутствуют [19]:

$$\nabla\sigma_M + \mathbf{F}_e = 0.$$

Полученные в результате расчета распределения эквивалентного механического напряжения σ_M и электрической силы $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e$ в окрестности включения различной формы показаны на рис. 6, а, из которого видно, что величина силы наибольшая на полюсах, ориентированных вдоль поля. Внутри водного включения электрическая сила незначительна в силу малого значения поля. Чем более вытянуто микровключение вдоль поля, тем большая сила действует на его полюсах и тем большее механическое напряжение наблюдается в этих зонах. Направленное сжимающее действие силы \mathbf{F}_e на включение в изоляции может способствовать растрескиванию его поверхности и дальнейшему увеличению в объеме.

На рис. 6, б, представлены распределения напряжения σ_M и силы \mathbf{F}_e вблизи вершины триингового канала для различных радиусов скругления вершины. Показано, что в зоне заостренной вершины триинга могут быть достигнуты значения механического напряжения (в данном случае 16 МПа), совпадающие по порядку величины с разрушающим напряжением полиэтилена (для базовых марок полиэтилена, например, низкого давления разрушающее напряжение составляет 20—30 МПа). При таком высоком значении локального механического напряжения и при условии циклических нагрузок в кабелях (растяжении и изгибах на трассе прокладки) суммарное механическое воздействие может приводить к локальной деградации полиэтиленовой изоляции на микроуровне.

Выводы

Применение предложенной схемы комбинированного многомасштабного и мультифизического моделирования силовых кабелей позволяет посредством исследования электрических и механических характеристик изоляции количественно оценить основные физические процессы, протекающие в изоляции кабеля в различных режимах работы кабельной линии, прогнозировать интенсивность старения изоляции и срок службы линии в конкретных условиях эксплуатации.

Совместное применение многомасштабного и мультифизического моделирования дает возможность проводить комплексные исследования сложных электротехнических устройств посредством решения цепно-полевых задач на различных структурных уровнях исследуемого устройства, осуществления связей между задачами на различных уровнях и применения мультифизического моделирования на отдельном структурном уровне устройства.

Аналогичные схемы совместного использования многомасштабного и мультифизического моделирования могут быть применены для исследования не только кабельных линий, но и других электротехнических устройств и систем, в числе которых трансформаторы, электрические машины, индукционные установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. — Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. — 255 с.
2. Asinari P., Chiavazzo E. An introduction to multiscale modeling with applications. — Bologna: Societa Editrice Esculapio, 2013. — 372 p.
3. Christopoulos C. Multi-scale modelling in time-domain electromagnetics // Intern. J. of Electronics and Communications. — 2003. — Vol. 57, Is. 2. — P. 100—110.
4. Multiscale modeling and simulation in science. (Series: Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol. 66). / Ed. by B. Engquist, P. Lötstedt, O. Runborg. — Springer Publisher, 2009. — 320 p.
5. Weinan E. Principles of multiscale modeling. — Cambridge University Press, 2011. — 496 p.
6. Cross M., Croft T.N., Slone A.K. et al. Computational modelling of multi-physics and multi-scale processes in parallel / Intern. J. for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. — 2007. — No. 8. — P. 1—12.
7. Groen D., Zasada S.J., Coveney P.V. Survey of multiscale and multiphysics applications and communities // Computing in Science and Engineering. — 2014. — Vol. 16, Is. 2. — P. 34—43.
8. Larson J.W. Some organising principles for coupling in multiphysics and multiscale models // ANZIAM Journal. — 2009. — Vol. 48. — P. C1090—C1111. — http://ftp.mcs.anl.gov/pub/tech_reports/reports/P1414.pdf.
9. Wie G.W. Multiscale multiphysics and multidomain models I: basic theory // Journal of Theoretical and Computational Chemistry. — 2013. — Vol. 12, No 8. — P. 1341006-1—1341006-34 (34 p.) — <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4220694/>.

10. Xia K., Opron K., Wie G.W. Multiscale multiphysics and multidomain models — flexibility and rigidity // The Journal of Chemical Physics. — 2013. — No. 139. — P. 194109-1 — 194109-10 (10 p.) — <http://math.msu.edu/~xiakelin/paper/p9.pdf>.
11. Кучерявая И.Н. Электромагнитные поля и процессы в неоднородных диэлектрических и проводящих средах (многомасштабное моделирование). Дис... докт. техн. наук. — Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014 — 390 с.
12. Hameyer K., Driesen J., De Gersen H., Belmans R. The classification of coupled field problems // IEEE Trans. on Magnetics. — 1999. — Vol. 35, No. 3. — P. 1618—1621.
13. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ — новый этап развития электрических сетей Украины // Электрические сети и системы. — 2009. — № 3. — С. 16—21.
14. Simulink. Simulation and model-based design — <http://www.mathworks.com/products/simulink-real-time/index.html> ; <http://matlab.ru/products/simulink>
15. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ // Технічна електродинаміка. — 2013. — № 1. — С. 9—15.
16. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М. и др. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. — Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. — 550 с.
17. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. — London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. — 601 p.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. — 621 с.
19. Гачкевич А.Р. Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазиустановившихся электромагнитных полей. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.

I.N. Kucheryavaya

MULTIPHYSICS AND MULTISCALE MODELING OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLES

The electrophysical processes have been studied by combined using the multiscale and multiphysics modeling and by sequential solving the field-circuit problems for three structural levels – all power cable line, cable polyethylene insulation and separate element of the insulation with micro-sized inclusions. The results of solving the coupled electric and mechanical problems in the insulation at the microlevel give a possibility to define the insulation quality and service life of cable line under specific operation conditions.

Keywords: multiscale and multiphysics modeling, field-circuit problems, coupled field problems, electromagnetic processes, stresses.

REFERENCES

1. Podoltsev, A.D. and Kucheryavaya, I.N. (2011), *Mnogomasshtabnoe modelirovanie v elektrotekhnike* [Multiscale modeling in electrical engineering], Kiev Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine.
2. Asinari, P. and Chiavazzo, E. (2013), An introduction to multiscale modeling with applications, Bologna: Societa Editrice Esculapio, Italy.
3. Christopoulos, C. (2003), “Multi-scale modelling in time-domain electromagnetics”, *Intern. J. of Electronics and Communications*, Vol. 57, Iss. 2, pp. 100-110.

4. Multiscale modeling and simulation in science. (Series: Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol. 66) (2009), Ed. by Engquist, B., Lötstedt, P. and Runborg, O., Springer Publisher, Germany.
5. Weinan, E. Principles of multiscale modeling (2011), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
6. Cross, M., Croft, T.N., Slone, A.K. and et al. (2007), “Computational modelling of multiphysics and multi-scale processes in parallel”, *Intern. J. for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, no. 8, pp. 1-12.
7. Groen, D., Zasada, S.J. and Coveney, P.V. (2014), “Survey of multiscale and multiphysics applications and communities”, *Computing in Science and Engineering*, Vol. 16, Iss. 2, pp. 34-43.
8. Larson, J.W. (2009), “Some organising principles for coupling in multiphysics and multiscale models”, *ANZIAM Journal*, Vol. 48, pp. C1090–C1111, available at: http://ftp.mcs.anl.gov/pub/tech_reports/reports/P1414.pdf.
9. Wie, G.W. (2013), “Multiscale multiphysics and multidomain models I: basic theory”, *Journal of Theoretical and Computational Chemistry*, Vol. 12, no. 8, pp. 1341006-1–1341006-34 (34 p.), available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4220694/>.
10. Xia, K., Opron, K. and Wie, G.W. (2013), “Multiscale multiphysics and multidomain models – flexibility and rigidity”, *The Journal of Chemical Physics*, no. 139, pp. 194109-1-194109-10 (10 p.), available at: <http://math.msu.edu/~xiakelin/paper/p9.pdf>.
11. Kucheryavaya, I.N. (2014), “Electromagnetic fields and processes in heterogeneous dielectric and conducting media (multiscale modeling)”, Dissertation of Dr. Sci. (Tech.), Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine.
12. Hameyer, K., Driesen, J., De Gerssem, H. and Belmans, R. (1999), “The classification of coupled field problems”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, no. 3, pp. 1618-1621.
13. Lyakh, V.V., Molchanov, V.M., Sudakova, I.V. and Pavlichenko, V.P. (2009), “330 kV cable line – new stage for development of electric lines in Ukraine”, *Elektricheskie seti i sistemy*, no. 3, pp. 16-21.
14. Simulink, “Simulation and model-based design”, available at: <http://www.mathworks.com/products/simulink-real-time/index.html>; <http://matlab.ru/products/simulink>.
15. Shcherba, A.A., Podoltsev, A.D. and Kucheryavaya, I.N. (2013), “Electromagnetic processes in 330 kV cable line with polyethylene insulation”, *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 9-15.
16. Shidlovsky, A.K., Shcherba, A.A., Zolotarev, V.M. and et al. (2013), *Kabeli s polimernoj izolyatsiej na svarkhvisokie napryazeniya* [Extra-high voltage cables with polymer insulation], Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
17. Dissado, L.A. and Fothergill, J.C. (1992), *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd. for IEE, London, UK.
18. Landau, L.D. and Lifshits, E.M. (1982), *Elektrodinamika sploshnokh sred* [Electrodynamics of continuous media], Nauka, Moscow, Russia.
19. Hachkevich, A.R. (1992), *Termomekhanika elektroprovodnikh tel pri vozdeystvii kvaziustanovivshikhsya elektromagnitnikh polej* [Thermomechanics of electroconducting bodies under the action of quasi-steady-state electromagnetic fields], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.

Поступила 24.06.15

КУЧЕРЯВАЯ Ирина Николаевна, д-р техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та электродинамики НАН Украины. В 1982 г. окончила Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко. Область научных исследований — применение математического моделирования и компьютерных средств для решения электромагнитных, тепловых, биофизических задач.

К статье И.Н. КУЧЕРЯВОЙ

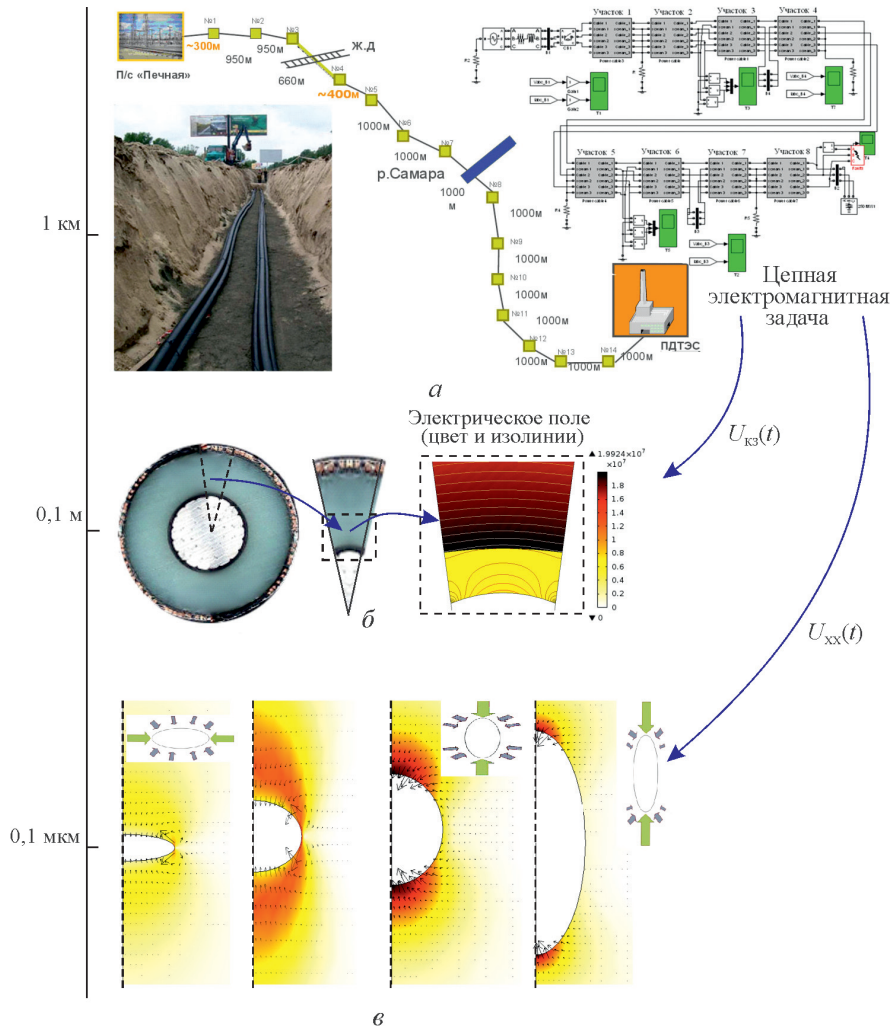


Рис. 1. Схема многомасштабного и мультифизического моделирования процессов в кабельных линиях с полиэтиленовой изоляцией: *а* — макроуровень — кабельная линия; *б* — средний уровень — сечение кабеля; *в* — микроуровень — область изоляции с микровключением; распределение электрической силы (стрелки) и механических напряжений (цвет) вблизи включений различной формы

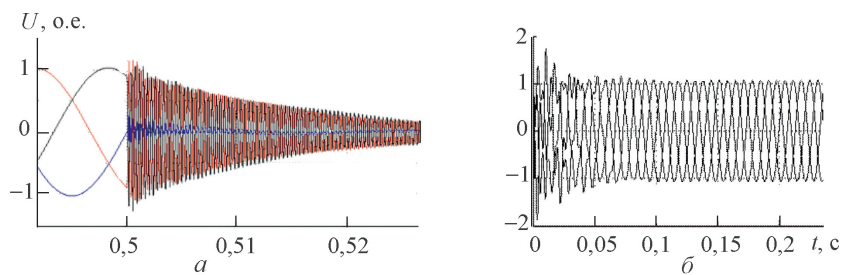


Рис. 3. Компьютерные осциллограммы напряжения на входе в кабельную линию: *а* — в режиме трехфазного КЗ в нагрузке; *б* — при включении на холостом ходу (макроуровень)

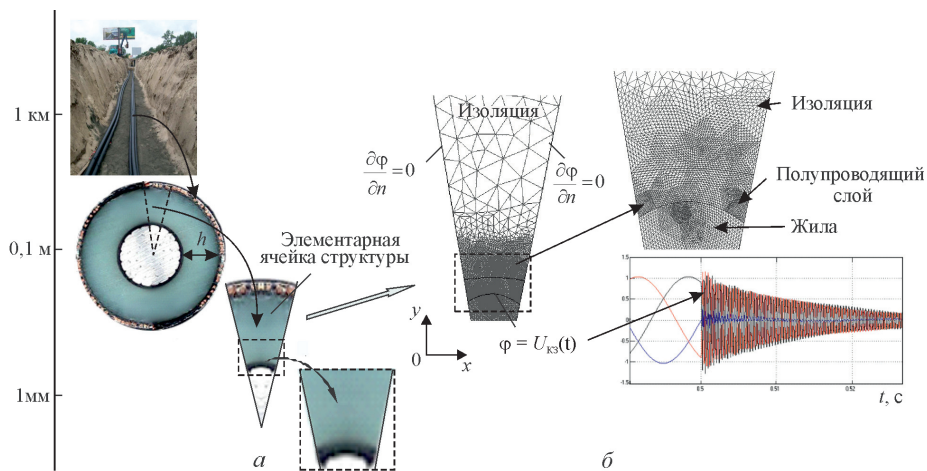


Рис. 4. Схема многомасштабного моделирования электрического поля в изоляции кабеля: *a* — макро- и средний масштабные уровни; *б* — конечно-элементное разбиение области вблизи полупроводящего слоя по жиле и граничные условия задачи на среднем масштабном уровне

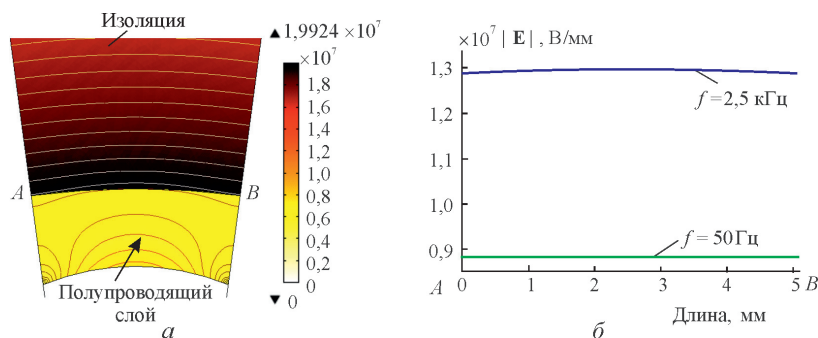


Рис. 5. Распределение поля $|E|$ в окрестности полупроводящего слоя по жиле при частоте $f = 2,5 \text{ Гц}$ (*a*) и графики напряженности электрического поля вдоль границы полупроводящего слоя (линии *AB*) при различных значениях частоты f (*б*) (средний масштабный уровень)

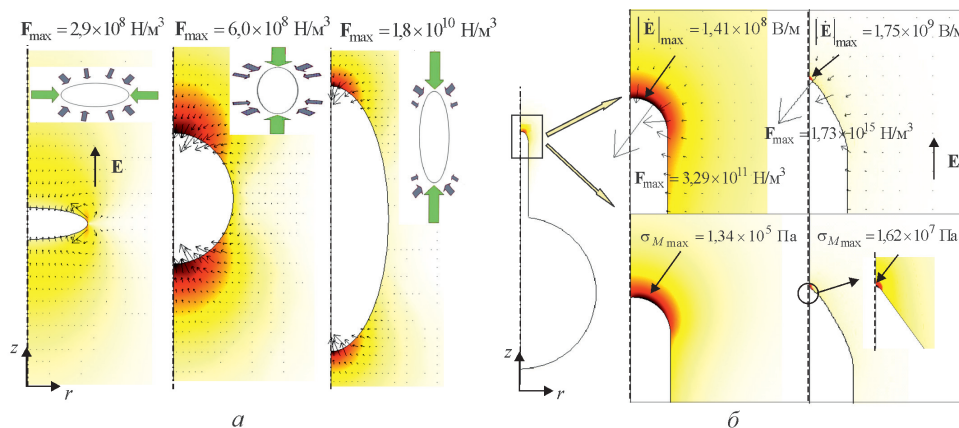


Рис. 6. Распределение эквивалентного механического напряжения σ_M (цвет) и электрической силы F (стрелки) вблизи включения: *a* — простой формы (на вставках схематически показан характер действия силы на включение); *б* — с фрагментом триинга и на вставке — в области вершины триинга с различными радиусами скругления (микроуровень)