

УДК 621.3 : 004.94

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

В работе представлен обзор литературных источников, посвященных вопросам компьютерного моделирования в области электротехники с использованием многомасштабного метода. Дано описание метода многомасштабного моделирования и способов его реализации. Представлен ряд наиболее характерных классов задач, где целесообразно использовать метод, а именно, при численном исследовании электрического поля и расчете эффективных характеристик сложных диэлектрических материалов, при исследовании электромагнитных процессов и определении параметров силовых трансформаторов на высокой частоте, при изучении электротепловых процессов в установках индукционного нагрева, для биологических и наноразмерных систем при воздействии на них внешнего электромагнитного поля. Показаны преимущества и некоторые трудности в реализации метода многомасштабного моделирования. Библ. 35, рис. 6.

Ключевые слова: многомасштабное моделирование, представительный элемент, элементарная ячейка, мультифизическое моделирование, электротехнические устройства, биологические и наноразмерные системы, воздействие электромагнитного поля.

Развитие современных компьютерных технологий, направленных на увеличение мощности компьютерной техники, в сочетании с новыми методами и подходами к численному моделированию обуславливают новый уровень проведения научных исследований сложных физических объектов и, в частности, электротехнических устройств и технологических систем с учетом их структуры, свойств, функциональности. В современных условиях проблемы компьютерного моделирования актуальны в связи с необходимостью детального и точного изучения физических объектов, проектирования новых конструкций и материалов, прогнозирования их характеристик, разработки новых технологических подходов, что не всегда реализуемо только путем экспериментальных исследований.

Важными критериями эффективности компьютерного моделирования являются экономичность и точность численных расчетов, а также глубина изучения объекта при высокой степени его детализации, при наиболее полном отражении его строения и функциональности. Учитывая, что всем физическим объектам свойственна иерархическая организация структуры (иерархия, начинающаяся от всего объекта в целом, до его элементов, подэлементов, вплоть до атомного уровня), в зависимости от целей исследования могут быть выделены определенная шкала пространственных масштабов объекта и ряд временных диапазонов протекания соответствующих процессов. При этом каждый уровень пространственных/временных масштабов будет отличаться своими особенностями, различными электрическими, магнитными, механическими и другими физическими свойствами и параметрами.

Многоуровневый (или многомасштабный) подход применим, например, к реальным объектам материаловедения, физической химии, механики жидкостей и газов, электротехническим устройствам и системам, био- и нанотехнологиям.

На рис. 1 показана последовательность трех уровней рассмотрения трансформатора [29]. Первый уровень, считающийся макроуровнем, включает все устройство с многовитковой обмоткой, второй уровень – промежуточный – представляет периодическое расположение изолированных проводников обмотки, и, наконец, микроуровень включает единичный проводник обмотки. Таким образом, трансформатор представляется на трех различных своих масштабах. Такая система детализации не-

обходима при решении электромагнитных задач и анализе процессов на высокой частоте в электротехнических устройствах с многovitковой обмоткой. В этом случае эффективные параметры обмотки определяются на основании предварительного решения электромагнитной задачи в области отдельного проводника (на микроуровне, рис. 1).

Степень детализации рассматриваемого объекта определяет глубину его изучения. Так в [24] последовательно исследовались несколько уровней многovitковой катушки для определения ее электромагнитных параметров. Принятая схема рассмотрения ряда подобластей все меньших размеров по

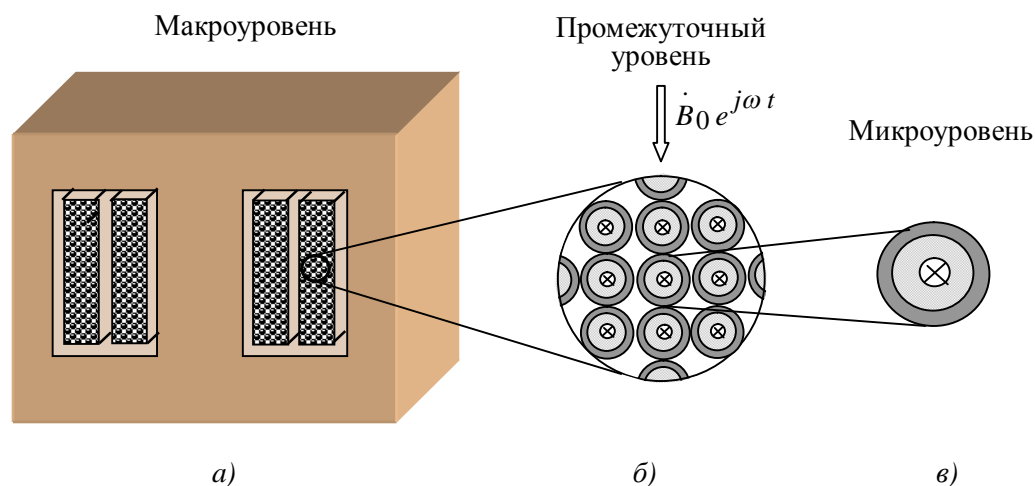


Рис. 1

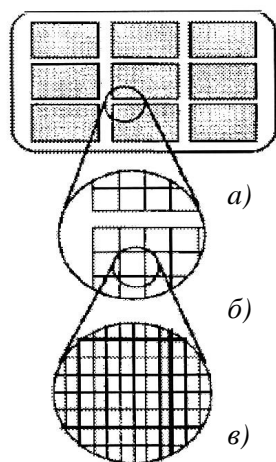


Рис. 2

сравнению с размерами всей исследуемой системы показана на рис. 2. Вначале рассматривалось сечение катушки (рис. 2, а), далее более детализированный вид проводника разбивался на элементы (рис. 2, б), затем отдельный взятый элемент представлялся в виде группы подэлементов (рис. 2, в). При таком подходе к расчету электромагнитных параметров катушки в [24] сложные части системы моделировались упрощенно и все более детально изучались процессы в каждой следующей подобласти.

Аналогичный подход к определению электрического поля в системе переноса зарядов использован в [12], где введено в рассмотрение четыре последовательных уровня, включающие представление все более "крупным планом" отдельных элементов всей системы. Расчеты электрического поля выполнены методом конечных элементов.

В [12,24] использован подход, близкий по сути к методу многомасштабного моделирования. Следует отметить, что многомасштабное моделирование предполагает не только моделирование объекта на различных уровнях его детализации, но и возможность применения результатов моделирования, полученных на одном уровне в качестве исходных данных для исследования объекта на следующем уровне масштабирования. Такая возможность не была реализована авторами работ [12,24].

В последнее десятилетие метод многомасштабного моделирования активно развивается. Многие публикации (например, [16,19,23,26–28,34]), а также статьи, представленные в специализированных изданиях [20,22], свидетельствуют о широком применении этого метода в самых различных областях научных знаний. Особенную востребованность метод многомасштабного моделирования получил в нанонауке и нанотехнологии [1,2,34]. Благодаря развитому математическому аппарату молекулярной динамики этот метод позволяет исследовать характеристики веществ и материалов на атомарном и молекулярном масштабах, выявлять практически значимые свойства объектов на макроуровне. С помощью многомасштабного метода выполняется компьютерное моделирование наноструктурных материалов и композитов, физико-химических процессов в нанотехнологиях. Строение нанообъектов исследуется по схеме: атомная структура, молекулы, супрамолекулярные системы и нанокластеры. Уникальность компьютерного многомасштабного моделирования в приложении к нано-

науке и наноиндустрии обусловлена тем, что экспериментальные исследования для нанообъектов сложны, трудоемки и требуют дорогостоящей высокоточной аппаратуры.

Метод многомасштабного моделирования может служить инструментом для прогнозирования новых свойств и функциональных возможностей объектов, а также являться средством виртуального проектирования новых структурных систем, например, создания новых композиционных материалов с требуемыми характеристиками. Не в последнюю очередь благодаря этому возникло новое направление в исследовании материалов – компьютерное материаловедение.

Успешной реализации метода многомасштабного моделирования способствуют достаточно полно разработанные математические основы объединения различных вычислительных моделей, относящихся к различным научным дисциплинам, например, молекулярной динамики на микроуровне и квантовой механики на макроуровне [19,25,27,35]. Математический аппарат связи между моделями разных масштабных уровней, включая обмен данными между масштабами, в зарубежной литературе называется *bridging scales* [25,33,35]. Эффективность связи различных масштабных уровней и правильности "сшивания" решений соседних уровней зависит от надлежащего выбора масштабов, их границ

разделов и условий согласования в виде граничных условий задач на разных уровнях [16,25,33].

На первом этапе своей реализации многомасштабный метод предполагает выделение ряда пространственных/временных уровней, характерных для конкретной задачи. На каждом из таких уровней выбирается система координат и *представительный элемент* объема. Для случая периодической структуры представительный элемент называется элементарной ячейкой и представляет собой такой минимальный элемент объема, с помощью параллельного переноса которого по координатным осям может быть реконструирована вся исследуемая структура. Например, на рис. 3, *а* показана регулярная структура композиционного материала, находящегося во внешнем электрическом поле E , а на рис. 3, *б* представлена элементарная ячейка этого композита.

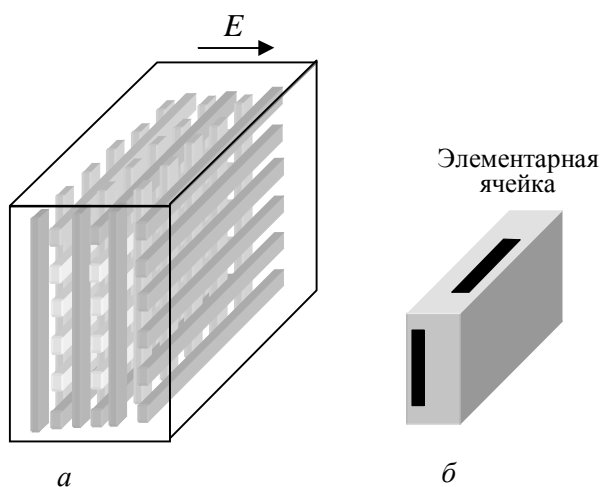


Рис. 3

В случае, когда структура изучаемого объекта не является периодической, для каждого рассматриваемого масштабного уровня выбирается представительный элемент объема. На рис. 4, *а* показана поверхность материала со стохастической структурой, для которого вид представительного элемента дан на рис. 4, *б*.

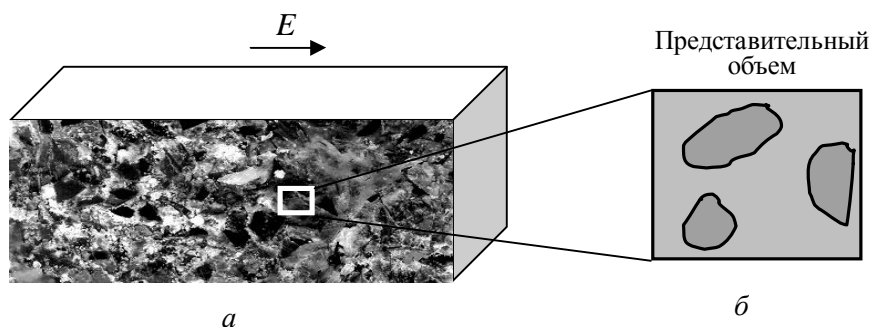


Рис. 4

Еще один пример выбора представительного элемента объема. Отдельный виток может рассматриваться в качестве представительного элемента всего многослойного индуктора или же быть элементарной ячейкой в случае, когда витки в структуре индуктора расположены регулярно. При этом элек-

тромагнитные параметры отдельного витка дают достаточно точное (без учета краевых эффектов) приближение значений эквивалентных параметров индуктора в целом.

После выбора представительного элемента выполняется решение задач на каждом иерархическом уровне. Как отмечено выше, в общем случае задачи математически могут выражаться различными моделями, основанными на положениях разных научных дисциплин. В ходе решения задач организуется обмен данными между масштабами путем либо последовательного решения задач от одного иерархического уровня к другому, либо одновременного решения задач на всех выбранных уровнях.

Отдельный пример схемы реализации трехуровневой модели методом многомасштабного моделирования при переходе от более низкого к более высокому уровню физического объекта (решение задач снизу вверх) показан на рис. 5.

Наиболее общей методологией многомасштабного моделирования является так называемый *гетерогенный* многомасштабный метод [17,18], который предусматривает решение связанных задач с различной физикой процессов на различных масштабах. Другими словами, в рамках многомасштабного метода реализуется *мультифизическое* моделирование. В таком случае на одном или нескольких иерархических уровнях совместно решаются, например, электромагнитная и тепловая задачи или исследуются электромеханические и гидродинамические процессы и т.п. Такие задачи взаимосвязаны. Связь между ними осуществляется путем учета зависимости характеристик одного процесса от характеристик и свойств другого физического процесса. Мультифизическое моделирование может быть проведено с помощью ряда программных пакетов, среди которых Comsol Multiphysics, Ansys Multiphysics [10,15] и др., где для вычислений используется метод конечных элементов.

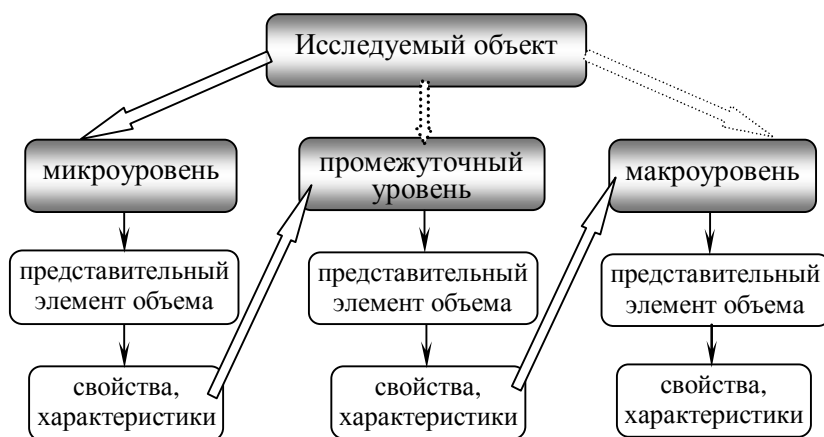


Рис. 5

В [6,7] с использованием метода многомасштабного моделирования при исследовании процессов в установке индукционного нагрева решены связанные электромагнитная и тепловая задачи, что является примером гетерогенного многомасштабного моделирования.

Метод многомасштабного моделирования показывает свою эффективность при исследовании электромагнитных процессов в композиционных материалах. Теоретические основы численного расчета таких процессов в материалах с микронеоднородной структурой разработаны в [9].

Анализ электромагнитных процессов проводится на двух масштабных уровнях – макроуровне с масштабом 0,1–1 м и микроуровне с микрометровым масштабом, который позволяет учитывать микронеоднородности в материале. При этом на макроуровне рассчитываются эффективные электромагнитные характеристики и электромагнитное поле в объеме всего материала, а на уровне отдельных неоднородностей находится микроскопическая картина поля.

В [9] с помощью многомасштабного моделирования проанализированы электромагнитные процессы в магнитопроводящем композиционном материале с регулярной структурой, а также электротепловые процессы при протекании электрического тока в пористом проводнике.

Разработанные в [9] теоретические основы расчета применимы к задачам исследования композиционных материалов при протекании электрического тока или воздействия электрического/электромагнитного поля, а также к задачам изучения электротепловых процессов в пористых материалах и проводниках с дефектами (например, с трещинами) при протекании электрического тока. Общим подходом в решении таких задач является определение эффективных электромагнитных характеристик сложных материалов, для чего необходимо применять многомасштабный подход и проводить анализ процессов на уровне микроструктуры рассматриваемого материала.

В [31,32] проведено многомасштабное моделирование диэлектрических свойств композиционных материалов соответственно с периодической и стохастической структурой, рассчитана эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость композитов, а также пространственные распределения трехмерного электрического поля и удельных потерь энергии в зависимости от частоты приложенного напряжения. Выявлено отличительное свойство композиционных диэлектрических материалов, заключающееся в зависимости от частоты распределения электрического поля и потерь энергии, что не характерно для однородных диэлектриков.

К примеру, в [31] детальный анализ электрического поля в композиционном диэлектрике со стохастической структурой выполнялся на двух пространственных уровнях:

- на микроуровне в представительном элементе объема, где определялось распределение электрического поля с учетом микроструктуры композита, затем на основании решения полевой задачи рассчитывалась эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость материалов;
- на макроуровне в объеме всего образца; при этом электрическое поле усреднялось по представительному элементарному объему и использовалось значение эффективной комплексной диэлектрической проницаемости.

Аналогичные исследования проведены в [32] для композиционного материала с периодической структурой.

Метод многомасштабного моделирования находит применение при решении задач магнетизма и микромагнетизма [11,21]. Так, в [11] анализируются гистерезисные явления в магнитах с учетом магнитной анизотропии, сдвоенных границ и микроструктурных изменений в материале. В [21] используется атомистический и микромагнитный подход к расчету энергии и локального поля магнита. Для расчета магнитных систем предлагается применять адаптивную конечно-разностную сетку.

В [13,14] обсуждается ряд вычислительных проблем, возникающих при решении разномасштабных электромагнитных задач. Предложены способы построения структурированных и неструктурированных сеточных элементов для различных сложных конфигураций исследуемых систем. Структурированным сеточным разбиением вычислительной области называют сетку, каждый узел которой имеет одинаковое количество соседних узлов, а неструктурированные сетки состоят из треугольных или тетраэдных элементов в зависимости от размерности задачи.

В [4,8] в качестве модели многовитковой катушки рассмотрена система круглых массивных проводников. Для определения распределения вихревых токов и потерь в такой системе на первом этапе проведен анализ электромагнитных процессов в элементарной ячейке системы проводников – единичном проводнике при воздействии на него внешнего магнитного поля. На микроуровне при решении задачи для отдельного проводника с помощью соответствующих граничных условий учтено влияние эффекта близости на характер распределения плотности тока в сечении проводников и величину полных потерь.

В [29] путем разномасштабного рассмотрения многовитковых обмоток электромагнитных устройств (рис. 1) проведен расчет зависящего от частоты эффективного сопротивления проводников и потерь в них. В частности, рассчитаны и проанализированы потери на вихревые токи многовитковой обмотки высокочастотного трансформатора для двух случаев: обмотка выполнена из массивного проводника и из литцендрата. Достоверность результатов расчета подтверждена данными экспериментальных исследований. Разработанная в [29] вычислительная методика, основанная на методе многомасштабного моделирования, может быть использована для расчета потерь в силовых трансформаторах, индуктивных накопителях, импульсных магнитных системах, содержащих многовитковые индукторы, при протекании в них токов высокой частоты.

В [30] методом многомасштабного моделирования исследованы высокочастотные явления в силовом трансформаторе. При этом обмотка трансформатора рассмотрена как составная среда с периодической структурой. Благодаря многомасштабному иерархическому подходу к моделированию, определены эффективные параметры (индуктивность, сопротивление и магнитная проницаемость) витков обмотки в широком диапазоне частоты – до 10 МГц. Учтены скин-эффект, эффект близости, геометрические особенности элементов трансформатора.

На микроуровне решена задача для элементарной ячейки, которая содержит единичный проводник обмотки. Моделирование процессов в трансформаторе проведено в три этапа: 1) определено локальное поле и рассчитаны потери на микроуровне; 2) найдено усредненное поле на макроуровне; 3) вычислены эффективные параметры обмотки и полные потери. Задачи низкого уровня решены в двумерной постановке, а на уровне всего электромагнитного устройства реализована трехмерная модель расчета магнитного поля трансформатора, по результатам которого и определены эффективные параметры обмотки с учетом потерь в шихтованном сердечнике.

Как показано в [29,30], использование метода многомасштабного моделирования позволяет выполнять расчет электромагнитного поля и эквивалентных параметров силовых трансформаторов на высокой частоте.

В рамках последовательного рассмотрения моделей разных масштабов известен подход непрерывного моделирования соседних уровней, а именно, итеративного решения взаимосвязанных задач на нескольких уровнях. Примером тому может служить подход, примененный в [6,7] для расчета электротепловых процессов в установках индукционного нагрева. Рассмотрены два пространст-

венных уровня: на микроуровне – отдельный виток индуктора, на макроуровне – вся установка. Электромагнитные задачи на двух уровнях решаются методом последовательных приближений. Путем итераций решение задачи на микроуровне уточняет решение задачи на макроуровне. Основным параметром системы при этом является эквивалентное сопротивление индуктора.

В [6] показана эффективность применения многомасштабного моделирования при исследовании электромагнитных процессов в установке индукционного нагрева при резком скин-эффекте в проводниках индуктора. Многомасштабный метод позволил определить зависящую от частоты и изменяющуюся во времени величину эквивалентного сопротивления многовиткового индуктора с учетом геометрического эффекта, скин-эффекта и эффекта близости в массивных витках, а также значение тока в индукторе при заданном напряжении.

Таким образом, для электротехнических устройств, содержащих многовитковую обмотку и требующих исследования электромагнитных процессов на высокой частоте целесообразно применение метода многомасштабного моделирования. В таком случае многовитковая обмотка характеризуется эффективными параметрами, для определения которых решается вспомогательная задача в окрестности единичного витка.

Еще один широкий класс задач, для решения которых необходимо рассмотрение процессов на ряде различных масштабных уровней, – это биологические системы, находящиеся под воздействием внешнего электромагнитного поля, и задачи нанотехнологических и биомедицинских приложений, основанных также на электромагнитном воздействии. В таких задачах поле на уровне биологической клетки определяется электромагнитными процессами на более высоких масштабных уровнях – уровне

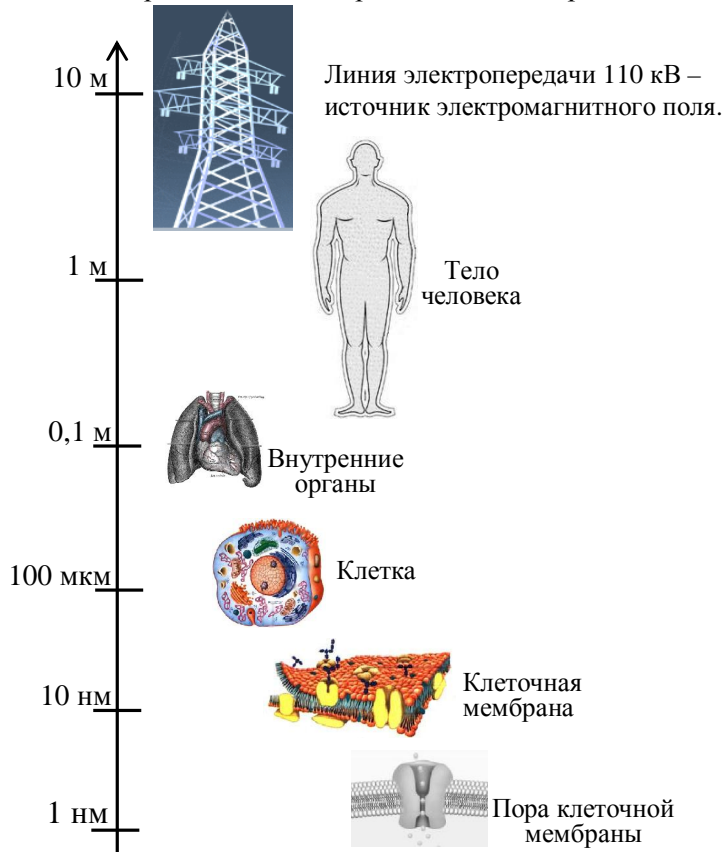


Рис. 6

установки, создающей электромагнитное воздействие, уровне всего организма человека и уровне его органов. Так, в [5] исследуются электромагнитные процессы в теле человека, находящегося под высоковольтной линией электропередачи. Анализ процессов проведен путем последовательного решения электромагнитных задач на пространственных уровнях всего человека, отдельного органа, на уровне выделенной клетки и затем на уровне отдельной поры клеточной мембраны. Иерархия физических моделей для исследования электромагнитных процессов в биологических системах на различных пространственных уровнях, использованная в [5], показана на рис. 6. Здесь же указаны характерные размеры пространственных уровней (от 1 нм до 10 м). Переход от уровня к уровню в исследовании проведен сверху вниз, т.е. от моделей высокого уровня к более низкому уровню.

В результате использования метода многомасштабного моделирования в [5] установлено, что при воздействии внешнего электрического поля на человека наблюдается усиление величины поля на уровне мембраны. Поры клеточной мембраны также реагируют на электро-

магнитное воздействие. Показано, что внешнее электрическое поле, в котором находится человек, способно оказывать влияние на обменные процессы, протекающие на клеточном уровне. В задачах, относящихся к области биомедицинских исследований, необходимо учитывать, по крайней мере, два пространственных уровня – наноуровень, где определяется характер движения молекул и наноразмерных частиц, и макроуровень, включающий все устройство, создающее электромагнитное воздействие на молекулы и наночастицы. К примеру, относительно проблемы движения

магнитных наночастиц в потоке крови под воздействием внешнего высокоградиентного магнитного поля в [3] проведены исследования на макроуровневом масштабе. Найдены распределения трехмерного магнитного поля и магнитной силы, создающихся системой на основе постоянных магнитов. Такая магнитная система предназначена для концентрирования и удержания наночастиц в целевой области биологической ткани, что необходимо для достижения терапевтического эффекта. На микроуровне предполагается провести изучение особенностей движения магнитных наночастиц в потоке биологической жидкости под силовым воздействием магнитной системы, которое определено в [3].

Анализ опубликованных научных исследований электрических и магнитных систем свидетельствует о широком применении и эффективности метода многомасштабного моделирования. Основным достоинством метода является возможность анализа процессов на разных масштабных уровнях с достижением глубокого понимания явлений при необходимой для каждой конкретной задачи степени детализации исследуемой системы.

Наряду с этими преимуществами имеются сложности в реализации метода многомасштабного моделирования, заключающиеся в том, что метод требует для каждой задачи выделения своих характерных масштабов, разработки для них достаточно сложных связанных между собой математических моделей и проведения многоэтапных расчетов при наличии мощных компьютерных средств. Несмотря на это, важными достоинствами использования метода являются детальное исследование сложных и взаимосвязанных процессов и явлений, получение точных результатов. Необходимо также отметить, что данный метод позволяет в ряде случаев заглянуть за пределы эксперимента и решать практически важные технические и технологические проблемы.

1. I Всероссийская конференция "Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях" / Сборник тезисов докладов ММПСН-2008. – М.: МИФИ, 2008. – 352 с.

The First All-Russian Conference "Multi-scale modeling of processes and structures in nanotechnology" / Sbornik tezisev dokladov MMPSN-2008. – Moskva: Moskovskii inzhenerno-fizicheskii institut, 2008. – 352 p. (Rus.)

2. II Всероссийская конференция "Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях" / Сборник тезисов докладов ММПСН-2009. – М.: МИФИ, 2009. – 492 с.

The Second All-Russian Conference "Multi-scale modeling of processes and structures in nanotechnology" / Sbornik tezisev dokladov MMPSN-2009. – Moskva: Moskovskii inzhenerno-fizicheskii institut, 2009. – 492 p. (Rus.)

3. Кириленко А.В., Чехун В.Ф., Подольцев А.Д., Кондратенко И.П., Кучерявая И.Н., Бондар В.В., Шпилева С.И., Тодор И.Н. Исследование силового воздействия высокоградиентного магнитного поля на магнитные наночастицы в потоке жидкости // Доповіди Національної академії наук України. – 2010. – № 9. – С. 162–172.

Kirilenko A.V., Chekhun V.F., Podoltsev A.D., Kondratenko I.P., Kucheriavaia I.N., Bondar V.V., Shpilevaia S.I., Todor I.N. Investigation of force action of high-gradient magnetic field on magnetic nanoparticles in flowing liquid // Dopovidi Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – № 9. – P. 162–172. (Rus.)

4. Кучерявая И.Н. Вихревые токи и потери в круглых массивных проводниках с учетом их взаимного влияния и действия поперечного магнитного поля // Электротехника и электроэнергетика. – 2000. – № 2. – С. 68–72.

Kucheriavaia I.N. Eddy current and losses in round solid conductors taking into account their interaction and effect of transverse magnetic field // Elektrotehnika i elektroenergetika. – 2000. – № 2. – P. 68–72. (Rus.)

5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Компьютерное исследование распределения внешнего переменного электрического поля в теле человека // Электронное моделирование. – 2009. – Том 31. – № 3. – С. 91–109.

Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Computer investigation of external alternating electric field in human body // Elektronnoe modelirovanie. – 2009. – Vol. 31. – № 3. – P. 91–109. (Rus.)

6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование электротепловых процессов в установке индукционного нагрева на двух пространственных уровнях // Электронное моделирование. – 2007. – Том 29. – № 2. – С. 85–99

Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Computer modeling of electromagnetic and thermal processes in induction heating installation at two space levels // Elektronnoe modelirovanie. – 2007. – Vol. 29. – № 2. – P. 85–99. (Rus.)

7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Применение многоуровневого моделирования для исследования электротепловых процессов в установке индукционного нагрева // Техн. электродинамика. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки" – 2006. – Част. 3. – С. 17–20.

Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Application of multi-level modeling for investigation of electromagnetic and thermal processes in induction heating installation // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2006. – Part 3. – P. 17–20. (Rus.)

8. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Расчет вихревых токов и потерь в системе массивных проводников с учетом эффекта близости и воздействия внешнего магнитного поля // Техн. электродинамика. – 2001. – № 1. – С. 11–16.

Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Computation of eddy current and losses in the system of solid conductors with regards for proximity effect and external magnetic field // Tekhnichna elektrodynamika. – 2001. – № 1. – P. 11–16. (Rus.)

9. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах. – Киев: Изд-во Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. – 363 с.

Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. The elements of theory and numerical simulation of electromagnetic processes in conducting media. – Kyiv: Izdatelstvo Institutu elektrodinamiki NAN Ukrainy, 1999. – 363 p. (Rus.)

10. ANSYS Multiphysics Simulation – <http://www.ansys.com/>

11. Antropov V.P., Belashchenko K.D. Multiscale modeling of hysteretic phenomena in magnets (invited) // Journal of Applied Physics. – 2003. – №. 10. – Vol. 93. – P. 6438–6443.

12. Chitarin G., Guarnieri M., Stella A. Transient behavior of thick-walled axisymmetric windings: a lumped parameters approach. // IEEE Trans. on Magnetics. – 1988. – № 1. – Vol. 24. – P. 205–208.

13. Christopoulos C. Multi-Scale modelling in time-domain electromagnetics // International Journal of Electronics and Communications. – 2003. – №2. – Vol. 57. – P. 100–110.

14. Christopoulos C., Sewell P., Biwojno K., Wykes J., Paul J.D., Thomas D.W.P., Ajayi A., de Menezes L. Multi-scale problems and complexity in computational electromagnetics // Computational Electromagnetics Workshop. – 2007. – P. 44–48.

15. COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software – <http://www.comsol.com/>

16. E.W., Engquist B. Multiscale modeling and computations // Notices of the AMS. – Vol. 50. – № 9. – 2003. – P. 1062–1070.

17. E.W., Engquist B. The heterogeneous multiscale methods // Comp. Math. Sci. – Vol. 1. – №. 1. – 2002. – P. 87–132.

18. E.W., Engquist B., Li X., Ren W., Vanden-Eijnden. The heterogeneous multiscale method: a review. – 2005. – <http://www.math.princeton.edu/multiscale>.

19. Ghoniem N.M., Busso E.P., Kioussis N., Huang H. Multiscale modeling of nanomechanics and micromechanics: an overview // Philosophical Magazine. – Nov.–Dec. 2003. – Vol. 83. – №. 31–34. – P. 3475–3528.

20. International Journal for Multiscale Computational Engineering – <http://www.begellhouse.com/journals/61fd1b191cf7e96f,1b4adbb73e2792e0.html>

21. Jourdan T., Marty A., Lancon F. Multiscale method for Heisenberg spin simulations // Phys. Rev. B. – Vol. 77, 224428. – 2008. – P. 1–10.

22. Journal of Multiscale Modeling (JMM) – <http://www.worldscinet.com/jmm.html>

23. Kwon Y.W., Allen D.H., Talreja R.R. Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures. – Springer Publisher, 2008. – 630 p.

24. Lee J.H., Chung Y.K., Kwak H.R., Park I.H. Local electric field analysis for evaluation of charge transfer system using sequential subwindow technique // IEEE Trans. on Magnetics. – March 2004. – Vol. 40. – № 2. – P. 679–682.

25. Liu W.K., Karpov E.G., Park H.S. Nano mechanics and materials: theory, multiscale methods and applications. – John Wiley & Sons Publisher, 2006. – 320 p.

26. Lu G., Kaxiras E. Overview of multiscale simulations of materials // Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology. – Ed. by M. Rieth and W. Schommers. – Vol. X. – P. 1–33.

27. Multiscale modeling and simulation in science. (Series: Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Vol. 66) – Ed. by Engquist B.; Lötstedt P.; Runborg O. – Springer Publisher, 2009. – 320 p.

28. Multiscale modeling of polymer properties (Series: Computer-aided chemical engineering; 22) / Ed. by M. Laso and E.A. Perpete. – Amsterdam; Oxford : Elsevier, 2006. – 424 p.

29. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Lebedev B.B. Analysis of effective resistance and eddy-current losses in multi-turn winding of high-frequency magnetic components // IEEE Trans. on Magnetics. – 2003. – Vol. 39 – № 1. – P. 539–548.

30. Podoltsev A.D., Nilanga K.G., Serdyuk Yu.V., Gubanski S.M. Multiscale computations of parameters of power transformer windings at high frequencies. Part I: small-scale level // IEEE Trans. on Magnetics. – November,

2007. – № 11. – Vol. 43. – P. 3991–3998; Part II: large-scale level // IEEE Trans. on Magnetics. – December, 2007. – № 12. – Vol. 43. – P. 4076–4082.

31. Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski S.V. Numerical simulations and experimental study of frequency-dependent dielectric properties of composite material with stochastic structure // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – June, 2004. – № 3. – Vol. 11. – P. 379–392.

32. Serdyuk Yu.V., Podoltsev A.D., Gubanski S.V. Numerical simulations of dielectric properties of composite material with periodic structure // Journal of Electrostatics. – Vol. 6, № 11. – P. 1073–1091.

33. Tang S., Hou T.Y., Liu W.K. A mathematical framework of the bridging scale method // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 63. – P. 1688–1713.

34. Vvedensky D.D. Multiscale modeling of nanostructures. Topical review // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Vol. 16. – № 50. – P. R1537–R1576.

35. Wagner G.J., Liu W.K. Coupling of atomistic and continuum simulations using a bridging scale decomposition // Journal of Computational Physics. – 2003. – Vol. 190. – P. 249–274.

УДК 621.3 : 004.94

І.М.Кучерява, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

Застосування методу багатомасштабного моделювання в дослідженні електротехнічних систем

У роботі представлено огляд літературних джерел, присвячених питанням комп'ютерного моделювання в області електротехніки з використанням багатомасштабного методу. Дано описання методу багатомасштабного моделювання та способів його реалізації. Представлено ряд найбільш характерних класів задач, для яких доцільно використовувати метод, а саме, при чисельному дослідженні електричного поля та розрахунку ефективних характеристик складних діелектричних матеріалів, при дослідженні електромагнітних процесів і визначенні параметрів силових трансформаторів на високій частоті, при вивченні електротеплових процесів в установках індукційного нагріву, для біологічних і нанорозмірних систем при впливі на них зовнішнього електромагнітного поля. Показано переваги та деякі труднощі в реалізації методу багатомасштабного моделювання. Бібл. 35, рис. 6.

Ключові слова: багатомасштабне моделювання, представницький елемент, елементарний об'єм, мультифізичне моделювання, електротехнічні пристрої, біологічні та нанорозмірні системи, дія електромагнітного поля.

I.M.Kucheriava

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

Application of multi-scale modeling to study of electrical systems.

The article is a review of research works devoted to computer multi-scale modeling in the field of electrical engineering. The method of multi-scale modeling is described. The ways of its realization are explained. A number of the most typical classes of problems for using the method are presented. Among the problems are numerical investigation of electric field and computation of effective characteristics for composite dielectric materials; investigation of electromagnetic processes and determination of parameters for power transformers at high frequency; study of electromagnetic and thermal processes for induction heating installations; analysis of processes under the action of external electromagnetic field for biological and nano-sized systems. The advantages and some difficulties in the utilization of the method of multi-scale modeling are noted. References 35, figures 6.

Key words: multi-scale modeling, representative volume element, unit cell, multiphysics modeling, electrical devices, biological and nano-sized systems, action of electromagnetic field.

Надійшла 14.01.2011

Received 14.01.2011