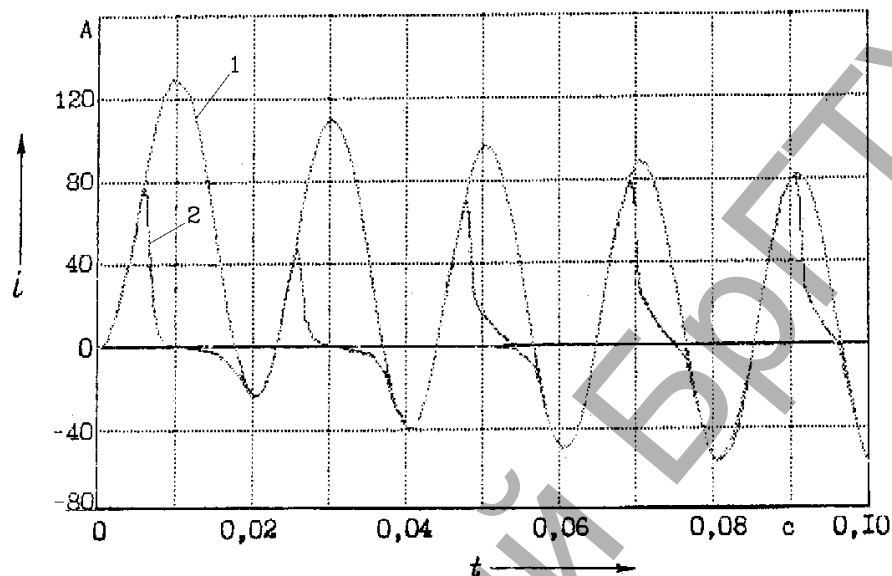


Одним из недостатков рассмотренной модели является наличие в ней индуктивности рассеяния (L_s), учитывающей неравномерность намотки обмотки на магнитопровод [3]. Лишь в случае тороидального сердечника эту величину можно считать близкой к нулю. В остальных случаях величину этого параметра определить достаточно трудоемко. Актуальным является вопрос построения математической модели ТТ без использования индуктивности рассеяния.



Результаты расчетов (1 – приведенный первичный ток; 2 – вычисленный вторичный ток: активная нагрузка, сталь Э-310, кусочно-параболическая аппроксимация) в значительной степени зависят от качества аппроксимации характеристики намагничивания стали магнитопровода [4]. Желательно применять приближение, учитывающее гистерезис характеристики намагничивания.

Литература

1. Сопьяник В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты. – Мн.: БГУ, 2000. – 143 с.: ил.
2. Власов А. И., Глушенок Е. А., Радюк В. Л., Сопьяник В. Х. Методика снятия и расчета вольт-амперных характеристик намагничивания трансформаторов тока на основе цифровых технологий // Энергетика... (Изв. ВУЗов). – 2003. – №5. – С. 5–10.
3. Зихерман М. Х. Об электромагнитном рассеянии обмоток трансформатора // Электричество. – 1983. – №9. – С. 60–63.
4. Жук Е. М., Сопьяник В. Х. Расчет и анализ на ПЭВМ процессов в трансформаторах тока с учетом их характеристик намагничивания и вторичных нагрузок // Энергетика... (Изв. ВУЗов). – 2001. – №5. – С. 23–29.

ПРОБЛЕМЫ РЕШЕТОЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВНЕРЕШЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ

Разумейчик В.С., Дереченник А.С., БГТУ, Брест

Одной из важных задач вычислительного материаловедения является адекватное модельное представление структуры многокомпонентных материалов (композитных, дисперсных, поликристаллических и т.п.). Так, например, исследование процессов гидратации цементной смеси (растворения дисперсных компонентов, диффузии вещества в

дисперсной среде, химических реакций с образованием новых веществ и пор) и эволюции ее микроструктуры, а также оценка разнообразных структурно-топологических характеристик такой полидисперсной системы требуют создания соответствующих программных средств генерации ее сложной трехмерной структуры. Для этой цели наиболее выгодным является применение внерешеточного метода моделирования, т.е. размещения составляющих систему элементов без использования какой-либо пространственной сетки. Такая модель оказалась вполне эффективной, с точки зрения достигаемой плотности упаковки и времени моделирования, для генерации размещения сферических частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде [1].

Для моделирования реальных физических и физико-химических процессов, происходящих в таких системах, представляется целесообразным использование метода конечных разностей. Метод конечных элементов в данном случае потребует для каждого из процессов независимого (самостоятельного) разбиения на ячейки, а большое количество расчетных параметров в ходе моделирования процессов в многофазной трехмерной системе приведет к резкому увеличению вычислительной сложности модели.

Таким образом, возникает задача перехода от внерешеточной модели полидисперсной системы к решеточному ее представлению. Так как полидисперсная система – это сложная гетерогенная система, состоящая из различных по химическому составу и размеру частиц, поставленная задача не является тривиальной. Немаловажным здесь является выбор расчетной сетки для представления трехмерной полидисперсной системы в процессе ее эволюции, а также метода преобразования из внерешеточной модели системы в решеточную.

Для простоты и удобства область моделирования была разбита на равные кубические ячейки (одинаковый шаг сетки по каждой из трех осей координат). Далее, необходимо определить объемы всех фаз, попавших в каждую ячейку. В частности, возникает задача определения объема части сферы, решение которой с применением интегрирования приводит к росту вычислительной сложности модели из-за появления нелинейных вычислительных операций. Тем не менее, к настоящему времени разработаны методы приближенного численного интегрирования (простейшими из них являются формулы трапеций и Симпсона). Но и они в случае достаточного (для обеспечения требуемой точности) количества узлов интегрирования и кратного интеграла весьма трудоемки даже для современных ЭВМ.

Для вычисления объема фигуры (части сферы), заключенной в куб, можно также использовать сеточное приближение, заключающееся в разбиении куба на ячейки меньшего размера и определении принадлежности сферы каждой из ячеек куба. Но и данный алгоритм либо является неточным (вследствие большого шага сетки), либо требует значительного процессорного времени (уменьшение шага сетки в n раз приводит к увеличению числа ячеек в n^3 раз).

Наиболее оптимальным оказалось применение приближенного вычисления объема фигуры методом Монте-Карло (метод статистических испытаний). С помощью генератора случайных чисел получали набор точек, равномерно распределенных внутри куба. Каждую точку проверяли на принадлежность какой-либо фазе. Если принять сферическое приближение зерен дисперсной фазы, то процедура такой проверки заключается лишь в нахождении расстояния от данной точки до центра зерна и сравнения его с радиусом зерна. Таким образом, легко определить концентрацию любой фазы в каждой

ячейке моделируемой системы - как отношение количества точек, принадлежащих дисперсной фазе, к общему количеству пробных точек, а, следовательно, и ее общий объем.

Для получения статистически значимых результатов выполнялись серии вычислительных экспериментов при различном количестве пробных точек, при этом задавались следующие параметры: шаг сетки – 1 мкм, область моделирования - $100 \times 100 \times 10$ мкм³. В каждом эксперименте вычислялся общий объем дисперсной фазы, сравнивался с действительным ее объемом, и определялась ошибка. Полученные ошибки усреднялись по всем экспериментам серии, вычислялся также размах ошибки как разница между наибольшим и наименьшим ее значением. Полученные результаты были сведены в таблицу.

Таблица. Зависимость ошибки определения общего объема по методу Монте-Карло от количества пробных точек

Количество пробных точек	Средняя ошибка	Наибольшая ошибка	Наименьшая ошибка	Размах ошибки
10	0,001547	0,00264	0,00009	0,00255
50	0,001508	0,00215	0,00116	0,00099
100	0,001474	0,00190	0,00129	0,00061
500	0,001497	0,00159	0,00141	0,00018
1000	0,001497	0,00159	0,00141	0,00018
2000	0,001497	0,00156	0,00144	0,00012
3000	0,001473	0,00153	0,00144	0,00009

Из таблицы видно, что средняя ошибка определения общего объема дисперсной фазы во всей системе при увеличении числа пробных точек в десятки раз меняется незначительно и всегда остается менее 0.2% даже в случае, когда количество пробных точек менее 10. Поэтому для выбора количества точек воспользовались другой характеристикой – размахом ошибки. Тестирование программного модуля решеточного представления, при числе пробных точек равном 2000, дало отличный результат в оценке не только общего объема, но и объема части зерна дисперсной фазы, попавшей в одну клетку объемом 1 мкм³.

Полученные оценки точности метода согласуются с теоретическими выкладками относительно достигаемой по методу Монте-Карло точности вычисления объема произвольной формы [2]. Это, в числе прочего, подтверждает корректность реализованных алгоритмов. Представляет интерес также и предполагаемая взаимосвязь ошибки модельного представления в отдельных ячейках с коэффициентом их заполнения.

Таким образом, успешно решена задача решеточного (сеточного) представления внерешеточных моделей полидисперсных систем, что позволяет применять для дальнейшего моделирования эволюции их структуры подходы, основанные на методе конечных разностей.

Литература

1. С. Дереченник, В. Разумейчик, В. Тур. Внерешеточные модели дисперсных фаз в исследованиях структуры цементных композитов / Материалы III Международной НТК "Строительство на основе оптимизированного энергетического потенциала" (20-21.10.2005, г. Ченстохова, Польша).
2. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория вероятностей. Математическая статистика. – М.: Гардарики, 1998.