

ческим контролем герметичности, проведенные в течение 28 часов (более  $10^6$  циклов), подтвердили достаточно высокую надежность РДС с фторопластовым сильфоном. Целесообразно применение таких разделителей в системах измерения давления энергетических и химико-технологических установок, работающих на агрессивных и загрязненных рабочих средах.

#### Библиографический список

1. Монтаж средств измерений и автоматизации: Справочник /К.А.Алексеев, В.С.Антипин, А.Л.Ганамек и др.; Под ред. А.С.Клюева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 498 с.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. М.: Машиностроение; 1989. 701 с.

УДК 681.3.:629.7.052

В.М.Анисимов, А.И.Данилин, А.Е.Платонов

#### ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СОВОКУПНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ САПР ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Для систем автоматизации проектирования электротехнических изделий предложена иерархическая совокупность моделей, позволяющая решать электромагнитные, термодинамические и механические задачи на единой методологической базе и с единых позиций.

Вне зависимости от методологии поиска и принятия проектных решений проблемы моделирования рабочих процессов в технических изделиях устойчиво сохраняют остроту и актуальность. Дело в том, что задачи синтеза технических объектов, а именно они ставятся при проектировании, могут быть решены только теоретически с использованием адекватных и высокоточных моделей, позволяющих получить числовые характеристики будущих изделий с высокой степенью достоверности.

С научной точки зрения спектр рассматриваемых задач в САПР электротехнических изделий крайне широк и простирается от анализа работы высоковольтных преобразователей постоянного тока (умформеров) до изучения гидродинамических явлений при пробое изоляторов, не говоря уже о проблемах прочностной и тепловой оптимизации электротехнического оборудования транспортных средств. Кроме того, требования эффектив-  
Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

ности определяют необходимость работы изделий на предельных режимах, или близких к ним, что в сочетании с заданной надежностью и ресурсом диктует потребность в моделях, рассчитанные характеристики по которым реально достижимы на практике. Речь идет не только о высокой точности моделирования, но и о том, что полученные результаты не должны нарушать законов природы и быть достижимы на данном уровне развития технологии.

Комплексный подход к моделированию электротехнических изделий диктуется происходящими сейчас фундаментальными изменениями в структуре и функционировании электротехнических систем (материалы с нелинейными свойствами, новые типы электрических машин, повышенные требования к качеству и долговечности и т.п.), а также принципиально новым подходом к построению систем автоматизированного проектирования (см. статью Анисимова В.М. и Коптева А.Н. в настоящем сборнике).

Исходя из изложенного, к математическим моделям в САПР электротехнических изделий могут быть предъявлены следующие основные требования.

1. Универсальность – возможность расчета характеристик процессов, происходящих в электротехнических изделиях, с единых методологических позиций и, по возможности, на единой геометрической модели изделия.

2. Адекватность – возможность получения имеющих физический смысл результатов.

3. Точность – возможность получения результатов, согласующихся с экспериментальными данными. Если модель точна, то она и адекватна. Однако обратное умозаключение в общем случае может быть неверным.

4. Быстродействие – возможность получения результатов в течение заданного интервала календарного времени.

5. Возможность развития – легкость модификации моделей для решения задач, которые могут выявиться в будущем. Это требование является ключевым при использовании в САПР методологии экспертных систем и концепций искусственного интеллекта. Должна быть предусмотрена возможность модификации моделей для новых задач не только при участии человека – разработчика САПР, но и в автоматическом режиме самой экспертной системы.

Указанные требования носят общий характер и должны учитываться как при создании глобальной САПР, так и при разработке специализированных систем проектирования электротехнического оборудования.

При моделировании работы электротехнических устройств основное внимание уделяется задачам электромагнетизма, которые тесно связаны с тепловыми явлениями – нагревом, потерями и т.д. В свою очередь, ме-

ханика объекта определяет его габариты и массу. Таким образом, электромагнетизм, термодинамика и механика – три дисциплины, на базе которых моделируются процессы в электротехнических системах.

Все электромагнитные явления, которые имеют место при работе электротехнических устройств, описываются уравнениями Максвелла в частных производных при учете токов смещения:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} E &= -\frac{dB}{dt}; \\ \operatorname{rot} H &= J; \end{aligned} \right\} \text{уравнения электромагнитных связей;}$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div} B &= 0; \\ \operatorname{div} D &= \rho; \end{aligned} \right\} \text{уравнения неразрывности поля;}$$

$$\left. \begin{aligned} B &= \mu H + B_r; \\ D &= \epsilon E; \end{aligned} \right\} \text{электромагнитные свойства материалов;}$$

$$J = \sigma E. \quad \text{закон Ома.}$$

Здесь  $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $D$  – вектор электрической индукции;  $H$  – вектор напряженности магнитного поля;  $B$  – вектор магнитной индукции;  $J$  – плотность тока;  $\rho$  – объемная плотность заряда;  $B_r$  – вектор индукции остаточной намагниченности;  $\mu, \epsilon$  – магнитная и диэлектрическая проницаемость;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость.

Эти уравнения полностью описывают все электромагнитные явления, однако их решение в аналитическом виде невозможно. Возможность решения уравнений Максвелла численными методами определяется возможностями задания граничных и начальных условий. Кроме того, при анализе работы конкретных устройств возможно принятие упрощающих допущений и тогда система принимает более простой вид.

Тепловые потери в электрических машинах неизбежны, но по своему эффекту они могут быть как желательными, например, в индукционных нагревательных элементах, так и нежелательными, например, в генераторах и электродвигателях. Тепловая мощность описывается законом Джоуля

$$q = \frac{1}{\sigma} I^2.$$

Поле температур  $T$ , образующееся под воздействием выделенного тепла  $q$ , подчиняется уравнению теплопроводности

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \text{div}(-\kappa \text{grad } T) - q = 0$$

с классическими граничными условиями в виде заданной температуры на внешней границе и заданного теплового потока на стенке. В последнем случае возможны варианты адиабатной стенки, заданного градиента температур, конвективного и лучистого теплообмена. Здесь  $\rho$  — плотность материала;  $C_p$  — теплоемкость;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности.

В среде, по которой протекают токи, развиваются силы, величины которых определяются векторным произведением  $J \times B$ . После их вычисления можно найти механические упругие перемещения точек конструкции, которые подчиняются уравнению

$$F = (2G + \lambda) \text{grad}(\text{div } V) - G \text{rot}(\text{rot } V),$$

где  $G$  и  $\lambda$  — упругие постоянные Ляме, характеризующие свойства материала;  $V$  — неизвестный вектор упругих перемещений;  $F$  — вектор действующих сил.

Для решения всех приведенных уравнений можно указать численный метод, на базе которого можно построить единую методологию моделирования процессов в электротехнических устройствах произвольной геометрии и с нелинейными характеристиками материалов. Таким методом является метод конечных элементов (МКЭ). Теория МКЭ к настоящему времени разработана достаточно подробно, сам метод применяется в необозримом количестве приложений, однако пакеты программ, объединяющие на базе МКЭ модели различных физических процессов, известны только в аэрокосмической промышленности, см. к примеру [1, 2]. Для электротехнических изделий не существует отечественной системы комплексного моделирования, а судя по доступным литературным источникам, за рубежом методом конечных элементов рассчитываются электромагнитные, тепловые и механические процессы, но по различным программам, не объединенным в рамках единой САПР.

Предложенная совокупность моделей позволяет покрыть потребности САПР электротехнических изделий в средствах расчета характеристик проектируемых устройств, а использование метода конечных элементов для их построения — полностью удовлетворить предъявляемым к моделям требованиям.

## Библиографический список

1. Комаров В.А., Пересылкин В.П., Иванова Е.А. и др. Автоматизация проектирования авиационных конструкций на базе МКЭ. САПР РИПАК / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев. 1984. 174 с. Деп. в ВИНИТИ 6.07.84г. № 3709-84 Деп. (Библ. указ. ВИНИТИ "Депонированные рукописи" № 10, 1984. 6/0 470).

2. Машинные методы проектирования летательных аппаратов. Библиографический список. М.: ОНТИ ЦАГИ, 1977. 57 с.

УДК 681.3:629.7.052

В.М.Анисимов, А.Н.Коптев

### ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРЕДПРИЯТИЯМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На основе анализа эволюции систем автоматизации проектирования (САПР) вскрыт ряд проблем, препятствующих их высокоэффективному применению. Для нового поколения САПР изделий электротехнической промышленности предложена концептуальная модель предметной области, которая обладает широкими возможностями и представляется весьма перспективной.

Опыт создания технического, программного и информационного обеспечения САПР в мировой практике, проблемы взаимосвязи САПР с текущим функционированием и перспективами развития предприятия, анализ экономических и финансовых вопросов, человеческого фактора (психологические и физиологические барьеры) позволяют говорить о необходимости нового подхода, связанного с концепцией искусственного интеллекта.

Классические методы, используемые в САПР, уже практически достигли предельных возможностей ЭВМ. В этой области можно ожидать некоторого прогресса, но его границы уже определены и нельзя рассчитывать на технологический взлет для дальнейшего развития САПР. Все это требует создания нового поколения подходов. Это новое поколение начинается с создания экспертных систем, которые являются альтернативой систематическим алгоритмам, активно развиваемым в САПР.

---

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

---