

СОВРЕМЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЭДУ В ПРОЕКТНЫХ РАБОТАХ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ КЯЭУ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Полоус М. А., Алексеев П. А., Ехлаков И. А.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского,
г. Обнинск, Калужская область, Россия

Задачу обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах по созданию термоэмиссионных космических ЯЭУ (КЯЭУ) нового поколения можно разделить на несколько достаточно независимых частей, каждая из которых впоследствии решается в отдельности. Наиболее важными среди них являются три: расчет выходных характеристик электрогенерирующих каналов (ЭГК), расчет нейтронно-физических характеристик термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП) и оптимизация массогабаритных характеристик радиационной защиты. Ниже последовательно рассматриваются актуальные методы решения этих задач с применением современных расчетных технологий.

На первом этапе работы был проведен численный расчет выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК с помощью модифицированного программного комплекса конечно-элементного анализа Comsol для обоснования проектных решений термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения. Использование модифицированного программного комплекса Comsol с созданным авторами численным решателем, позволяющим моделировать термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных вольтамперных характеристик термоэмиссионных преобразователей, показало достаточную гибкость и эффективность данного подхода для выполнения массовых вариантных расчетов ЭГК и термоэмиссионных электрогенерирующих систем со сложной геометрической структурой. Результаты расчетов подтвердили существенное влияние на выходные характеристики ЭГК пространственных эффектов, которые не могли быть учтены в полной мере в рамках одномерных моделей. Следует также отметить, в ходе работы были впервые получены расчетные данные об электростатике и сопряженном теплообмене в трехмерной геометрии внутри коммутационного пространства ЭГК.

Следующий этап работы состоял в решении задачи нейтронно-физического расчета реактора с целью обеспечения условий нормального протекания цепной ядерной реакции деления. Была проведена оптимизация на основе имитационного моделирования, заключающаяся в совместном использовании имитационной модели (ИМ) сложной системы и алгоритма оптимизации. С помощью метамоделей были рассчитаны значения отклика системы для различных комбинаций значений ее параметров, которые предлагает алгоритм оптимизации. В качестве алгоритма оптимизации используется генетический алгоритм, который устойчив к попаданию в локальные оптимумы и имеет ряд других преимуществ перед классическими численными методами.

Применение данной методики позволяет получить оптимальные нейтронно-физические характеристики реактора. Простая и с то же время эффективная методика обоснования нейтронно-физических характеристик ТРП позволяет интегрировать ее в код «сквозного» расчета КЯЭУ.

На заключительном этапе работы рассматривалась задача оптимизации радиационной защиты КЯЭУ, которая заключается в минимизации ее массогабаритных характеристик при обеспечении допустимых радиационных нагрузок на всех защищаемых объектах. Из трех основных подзадач, на которые разбивается эта задача, для подробного рассмотрения была выбрана одна – профилирование защитных слоев блока радиационной защиты. Ее специфика состоит в необходимости решения сложной интерполяционной задачи на одном из этапов оптимизации. Эта проблема решалась применением высокоскоростного и высоконадежного алгоритма Флоатера и Хорманна построения

рациональной интерполирующей функции, а также с помощью искусственной нейронной сети. Непосредственно поиск глобальных оптимумов проводился с помощью новейшего алгоритма из класса интеллектуальных мультиагентных методов (методов роевого интеллекта) – алгоритма искусственной пчелиной колонии. Этот алгоритм отличается замечательной устойчивостью, высокой скоростью работы и точностью конечного результата. Другое его достоинство состоит в том, что он требует лишь возможности вычислить значение исследуемого функционала в любой точке из области, в которой ищется глобальный экстремум, что существенно расширяет возможности его применения.

Использование рассмотренных алгоритмов обработки данных позволило унифицировать процесс оптимизации, повысить скорость и эффективность расчетов, что в свою очередь привело к дополнительному снижению массы радиационной защиты при соблюдении. Надежность их работы позволила автоматизировать отдельные этапы процесса оптимизации радиационной защиты и поставить задачу о его полной программной автоматизации.