

И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, М.А. ОСИПОВ, С.А. КРАТ, И.А. РУДНЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА

Разработана численная модель для расчета магнитных и механических характеристик сверхпроводящей системы тороидального магнитного поля сферического токамака. Проведена оптимизация геометрической формы катушек двенадцать-секционного токамака для достижения требуемых рабочих значений магнитного поля при различных температурах охлаждения сверхпроводящих элементов.

I.V. MARTIROSYAN, D.A. ALEXANDROV, M.A. OSIPOV, S.A. KRAT, I.A. RUDNEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

SIMULATION OF MAGNETIC AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SUPERCONDUCTING SYSTEM OF A TOROIDAL MAGNETIC FIELD OF A SPHERICAL TOKAMAK

A numerical model has been developed to calculate the magnetic and mechanical characteristics of the superconducting system of the toroidal magnetic field of a spherical tokamak. The geometric shape of the coils of a twelve-section tokamak was optimized to achieve the required operating values of the magnetic field at different cooling temperatures of superconducting elements.

Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в области управляемого термоядерного синтеза представляет собой эффективный метод для значительного увеличения тороидального магнитного поля в установках. Этот подход практически не имеет альтернативы в достижении сверхсильных и стабильных магнитных полей при сниженном энергопотреблении по сравнению с аналогичной системой на основе медных проводников [1]. Одной из перспектив развития конструкции действующей установки малого сферического токамака НИЯУ МИФИ является создание магнитной системы, обеспечивающей получение постоянного тороидального магнитного поля величины ~ 2 Тл с использованием обмоток на основе высокотемпературных сверхпроводящих ленточных композитов. В настоящей работе представлена численная модель для расчета магнитных и механических характеристик системы тороидального магнитного поля токамака со сверхпроводящими соленоидами. Рассмотрены конфигурации с независимыми секциями D-образной формы, а также с 12-секционной конфигурацией неразрывного соленоида. Проведена оптимизация геометрической формы D-образных катушек токамака для достижения требуемых рабочих значений магнитного поля, транспортного тока при различных температурах охлаждения сверхпроводящих элементов. Моделирование выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Анализ механических характеристик магнитной системы выполнен для импульсного и стационарного режимов работы сверхпроводящих соленоидов. Большое внимание уделяется выбору оптимальных типов токнесущих элементов для обеспечения эффективной и устойчивой работы токамака. Проведено сравнение магнитных и механических свойств галетных ВТСП кабелей, твистированных стопок ВТСП лент и CORC (Conductor on Round Core) кабелей. Установлено, что наиболее перспективной из рассмотренных является конфигурация, состоящая из непрерывной двенадцати-секционной катушки на основе сверхпроводящего CORC-кабеля.

Для оптимальной конфигурации сверхпроводящего соленоида проведен расчет распределений магнитного поля и механических напряжений в системе тороидального магнитного поля сферического токамака, установлена величина транспортного тока, необходимого для достижения требуемого магнитного поля в импульсном режиме работы. Установлено, что магнитное поле на краях обмотки превышает магнитное поле на оси тора в несколько раз, что означает подавление критического тока сверхпроводника при работе. На основе А-Тформализма в термодинамической связке проведен расчет потерь сверхпроводящего CORC-кабеля, функционирующего в соответствующем магнитном поле. Проведена оптимизация как самой магнитной системы (увеличение количества витков в одной секции, изменение числа слоёв и рядов CORC-кабеля, угла намотки ВТСП лент и др.), так и оптимизация режимов охлаждения и нагрузки. Показаны характерные времена работоспособности системы для достижения требуемых параметров тороидального магнитного поля в различных режимах охлаждения при импульсной и стационарной токовой нагрузке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00749.

Список литературы

1. T.S. Lee et al. Optimal design of a toroidal field magnet system and cost of electricity implications for a tokamak using high temperature superconductors, *Fusion Engineering and Design*, Vol 88-89, October 2015, Pages 1072-1075.