

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛ ФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ «УРАГАН-2М»

МАРТЫНОВ С.А., ХАЖМУРАДОВ М.А.

Рассматриваются модели и методы определения усилий, возникающих в элементах конструкции физической установки «Ураган-2М». Модели представлены в виде математических соотношений теории электромагнитных взаимодействий. Они позволяют в приемлемые сроки и с высокой точностью рассчитать напряженно-деформированное состояние магнитной системы, предназначенной для решения задач управляемого термоядерного синтеза с учетом изменения токов в проводниках винтовой обмотки.

### 1. Введение

Установка «Ураган-2М» является сложным техническим объектом, предназначенным для решения задач управляемого термоядерного синтеза. Конструкционная сложность системы обусловлена наличием крупногабаритных узлов, обладающих сложной пространственной формой. К таким узлам относятся, в первую очередь, полюсы магнитных обмоток.

По проводникам, сформированным в полюсы, протекают огромные токи в десятки и сотни килоампер. Наличие столь внушительных токов приводит к возникновению пондеромоторных сил, под воздействием которых полюсы обмоток деформируются, что в конечном итоге влияет на свойства магнитного поля, удерживающего высокотемпературную плазму.

При решении задачи определения напряженно-деформированного состояния (НДС) торсатрона «Ураган-2М» возникает необходимость обработки больших массивов управляемых параметров, зависящих от требования к точности проводимых расчетов.

Без использования современных вычислительных комплексов и программного обеспечения решить поставленные задачи не представляется возможным.

*Цель исследования* – разработка математических моделей расчета НДС конкретной тороидальной магнитной системы «Ураган-2М» с учетом электромагнитных взаимодействий, в основу которых положены законы Ампера и Био-Савара.

*Актуальность работы* обусловлена возможностью моделировать НДС реальной физической установки, что позволяет на этапе проектирования и эксплуатации определить наиболее нагруженные элементы данной установки.

### 2. Особенности конструкции торсатрона «Ураган-2М»

Физическая установка «Ураган-2М» представляет собой тороидальную 2-заходную магнитную систему, состоящую из ряда магнитных обмоток.

РИ, 2009, № 3

Наиболее сложной и трудоемкой в изготовлении подсистемой является винтовая обмотка (ВО), которая состоит из двух полюсов. В состав каждого полюса входит двадцать проводников, изготовленных из меди и имеющих трапецеидальную форму с размерами  $24 \times 20 \times 100$  мм. Проводники навиты на тороидальную поверхность: с большим радиусом  $R = 1700$  мм и малым –  $r = 395$  мм.

ВО имеет четыре периода при обходе вокруг главной оси тора. Между меридиональными сечениями в  $90^\circ$  геометрические характеристики ВО повторяются. Трехмерная геометрическая модель ВО (рис. 1) получена с использованием метода кинематического моделирования [3,4].

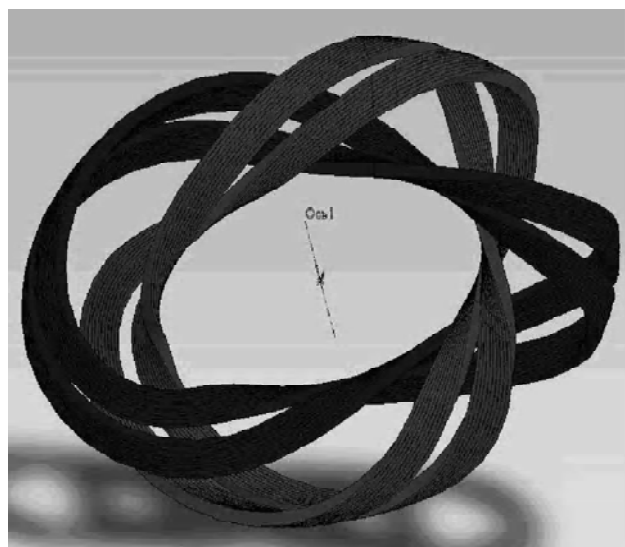


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель ВО торсатрона Урагана-2М

Формообразование сложной поверхности ВО осуществляется по набору меридиональных сечений (рис. 2).

### 3. Математические модели расчета пондеромоторных сил физической установки «Ураган-2М»

Данная работа является продолжением работ по расчету НДС тороидальных магнитных систем стеллараторного типа. В работах [1,2] рассмотрены методы и

алгоритмы трехмерного геометрического моделирования магнитных обмоток торсатрона «Ураган-2М», сформулирована функция цели и система ограничений для решения задачи оптимизации характеристик напряженно-деформированного состояния установки.

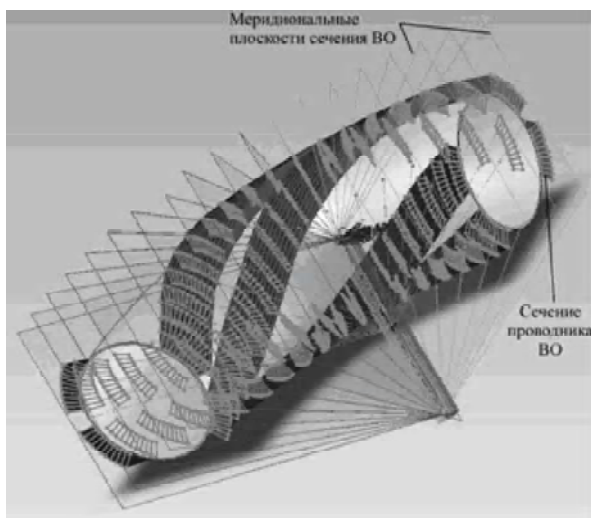


Рис. 2. Формообразование поверхности ВО по набору меридиональных сечений

В представленной работе изложен математический аппарат, позволяющий рассчитать возникающие в элементах конструкции магнитной системы пондеромоторные силы, зная геометрию полюсов магнитных обмоток, площадь поперечного сечения проводников полюса и токи в проводниках, что дает возможность определить прочность элементов конструкции установки.

Разработанные математические модели и методы отвечают требованиям адекватности, точности и экономичности. Установка «Ураган-2М», по сути, является механической системой. Физические процессы, происходящие в ней, рассматриваются в трехмерном пространстве, в котором фазовые переменные представлены в векторном виде.

Определение сил, действующих в магнитном поле на движущиеся заряды и токи в проводниках магнитных обмоток, является важнейшей составляющей расчета НДС торсатрона. Рассчитав силы, порождаемые токами в полюсах обмоток, можно решить целый ряд актуальных задач, связанных с конструированием, технологическим оснащением и эксплуатацией данной физической установки [5]. В частности, ответить на вопрос, при каких токах усилия достигают экстремальных значений, при которых деформации полюсов приводят к искажениям геометрии полюсов обмоток и как эти возмущения в геометрии отразятся на удерживающих плазму свойствах магнитного поля.

Природа происхождения пондеромоторных сил основана на двух экспериментально установленных фактах – магнитное поле действует на движущиеся заряды и движущиеся заряды создают магнитное поле. Эти два факта лежат в основе закона Ампера и Био-Савара, которые используются при получении мате-

матических моделей расчета усилий в элементах конструкции магнитной системы «Ураган-2М».

Сила  $F_m$ , действующая на движущийся заряд  $q$  в магнитном поле установки, выражается формулой

$$F_m = \frac{q}{c} [\mathbf{vB}],$$

где  $\mathbf{B}$  – вектор напряженности магнитного поля, в котором движется заряд  $q$ . Сила  $F_m$  перпендикулярна как к скорости электронов  $\mathbf{v}$ , так и к вектору  $\mathbf{B}$ , а величина силы  $F_m$  пропорциональна синусу угла между векторами  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{v}$ . Величина постоянной  $c$  определяет систему единиц измерений.

Для практических оценок, возникающих в элементах конструкции торсатрона усилий, важно учитывать электрические токи в полюсах обмоток. В этом случае ток, создаваемый движущимися электронами с зарядом  $e$  и концентрацией  $n$ , описывается соотношением  $\mathbf{j} = nev$ .

Число частиц в объеме  $dV$  будет  $dN = ndV$ , а сила  $dF$ , действующая в магнитном поле на элемент объема  $dV$ ,

$$dF = \frac{e}{c} [\mathbf{vB}]dN = \frac{ne}{c} [\mathbf{vB}]dV.$$

После преобразований

$$dF = \frac{1}{c} [\mathbf{jB}]dV.$$

Для расчетов НДС установки важны количественные оценки сил как для объемного (вектор  $\mathbf{j}dV$ ), так и для линейного ( $\mathbf{j}dl$ ) элементов тока. Если  $\mathbf{j}dV = Idl$ , тогда

$$dF = \frac{1}{c} [dlB]. \quad (1)$$

Здесь направление вектора  $dl$  совпадает с направлением тока  $I$  (рис. 3).

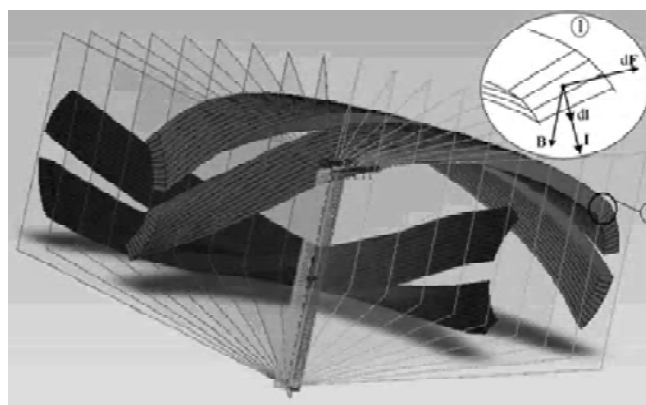


Рис. 3. Векторное представление расчета усилий, действующих на элемент тока

Сила, действующая в магнитном поле торсатрона на линейный элемент проводника, определяется интегрированием по всей длине проводника:

$$F = \int \frac{1}{c} [dlB]. \quad (2)$$

Величину вектора  $\mathbf{B}$  в соотношении (2) определяем как

$$d\mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{[\mathbf{j}\mathbf{r}]}{r^3} dV. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива для объемного элемента тока.

Для линейного элемента

$$d\mathbf{B} = \frac{I}{c} \frac{[d\mathbf{l}\mathbf{r}]}{r^3}. \quad (4)$$

Полное поле определяется интегрированием выражений (3) и (4) по всем значениям токов

$$\mathbf{B} = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j}\mathbf{r}]}{r^3} dV \quad (5)$$

или

$$\mathbf{B} = \oint \frac{I [d\mathbf{l}\mathbf{r}]}{c r^3}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) справедливы для случая, когда в проводниках протекают постоянные токи, что реализовано в конструкции тороидального «Ураган-2М».

#### 4. Выводы

Представлены математические модели и методы расчета пондеромоторных сил, возникающих в элементах конструкции тороидальной магнитной системы стеллараторного типа «Ураган-2М». Расчет сил осуществляется на основе теории электромагнитных взаимодействий и позволяет решить ряд конструкторско-технологических и эксплуатационных задач физической установки «Ураган-2М».

**Литература:** 1. Мартынов С.А., Воробьева В.П., Круголь М.С., Юркин А.Ю., Хажмурадов М.А. Модели и методы оптимизации напряженно-деформированного состояния тороидального «Ураган-2М» // АСУ и приборы автоматики. 2009. С. 32-37. 2. Мартынов С.А., Воробьева В.П., Круголь М.С., Слабоспицкая Е.А. Юркин А.Ю. Модели и методы оптимизации напряженно-деформированного состояния тороидальных магнитных систем // АСУ и приборы автоматики. 2008. Вып. 144. С. 168-175. 3. Шубин М.Б. Комплекс программ формирования поверхностей. М.: ВЦ АН СССР, 1979. 102 с. 4. Проблемы обработки графической информации в машиностроительных САПР. Вопросы кибернетики / Под ред. Вишнякова Ю.С. М., 1987. 167 с. 5. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высш. шк., 1991.

Поступила в редколлегию 16.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Левыкин В.М.

**Мартынов Сергей Алексеевич**, канд. техн. наук, младший научный сотрудник Национального Научного Центра, Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: автоматизированное проектирование сложных систем. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94, e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Хажмурадов Манап Ахмадович**, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра, Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Научные интересы: математическое моделирование физических процессов и систем, автоматизация проектирования, программирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua