

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ДВУХЗАХОДНОЙ ВИНТОВОЙ ОБМОТКИ ТОРСАТРОНА

ЛУЧАНИНОВ А.А., МАРТЫНОВ С.А.,
ХАЖМУРАДОВ М.А.

Рассматриваются модели и методы определения электродинамических усилий, действующих на элементы двухзаходной винтовой обмотки магнитной системы торсатронного типа. В качестве геометрической модели полюсов выбрана упрощенная модель бесконечно тонких проводников, расположенных в центрах полуполусов.

1. Введение

Среди множества задач, стоящих перед разработчиками и исследователями тороидальных магнитных систем термоядерных установок, можно выделить задачу расчета сил, возникающих в результате электромагнитных взаимодействий в элементах магнитной системы [1,2]. К таким элементам относят ряд обмоток, при пропускании тока через которые создается магнитное поле с заданными свойствами, обеспечивающее удержание плазмы. Среди них наиболее сложным объектом является винтовая обмотка (ВО).

С конструкционной точки зрения ВО характеризуется как объект сложной пространственной формы и больших габаритных размеров, величина тока в проводниках которого достигает десятков килоампер. Столь внушительные токи порождают значительные электродинамические усилия (ЭДУ), а следовательно, и напряжения в конструктивных элементах магнитной системы [3]. Под воздействием напряжений система деформируется, что в конечном итоге может привести к ухудшению характеристик удерживающего плазму магнитного поля.

Расчет усилий в ВО сложный, трудоемкий процесс, требующий обработки больших массивов данных. При этом повышенные требования предъявляются к точности проводимых расчетов.

Основной целью данной работы является определение ЭДУ в тороидальной двухзаходной ВО с геометрическими характеристиками, сходными с геометрией торсатрона «Ураган-2М» [4]. Расчеты проведены с использованием авторских компьютерных программ.

Полученная математическая модель может быть использована при оптимизации параметров конструкций термоядерных установок стеллараторного типа.

2. Постановка и особенности задачи

Объектом исследования выбрана двухзаходная ВО торсатронного типа (с однонаправленными токами в проводниках), выполненная в виде двух расщепленных полюсов. Количество полуполусов в полюсе –

два. Винтовая обмотка расположена на поверхности тора по закону цилиндрической спирали $\theta = m \cdot \varphi$, где m – целое, φ – угол меридионального сечения тора.

Для расчета ЭДУ, распределенных по длине винтовой обмотки при протекании в ней токов, выбрана упрощенная геометрическая модель. Каждый из четырех полуполусов ВО задавался в виде бесконечно тонкого замкнутого проводника. При этом координаты проводников задавались в тороидальной системе координат $\{\varphi, \theta, r\}$ (рис. 1).

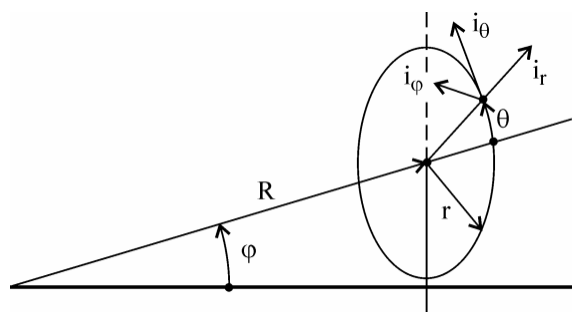


Рис. 1. Тороидальная система координат

В такой системе координат угол φ определяет азимутальное положение точек проводников ВО. Плоскость $\varphi = \text{const}$ задает меридиональное сечение тора. θ – полоидальный угол, характеризующий положение точки проводника ВО в плоскости меридионального сечения (на окружности $r = \text{const}$). Таким образом, заданием углов φ и θ однозначно определяется положение винтовых проводников на поверхности тора. i_φ, i_θ, i_r – орты тороидальной системы координат.

Проводники винтовой обмотки расположены на тороидальной поверхности с большим радиусом $R = 1700$ мм и малым радиусом $r = 450$ мм. При аналитическом задании навивки форма проводников ВО соответствует закону цилиндрической спирали $\theta = 2 \cdot \varphi$ (при обходе вокруг главной оси тора перемещению по φ между двумя соседними меридиональными сечениями в один градус соответствует перемещение по θ в два градуса в меридиональном сечении). Каждый проводник разбивался на 720 равных отрезков $dl_n^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3, 4$ – номер проводника) плоскостями $\varphi = \text{const}$ через 0,5 градуса при движении по φ вокруг главной оси тора. Азимутальная координата начальной точки n -го отрезка k -го проводника $dl_n^{(k)}$ равна $\varphi_n = 0,5 \cdot n$ градусов, полоидальная координата θ в сечении $\varphi = \varphi_n$ равна $\theta_n^{(k)} = 2 \cdot \varphi_n + \theta^{(k)}$, $\theta^{(1)} = -27^\circ$, $\theta^{(2)} = 27^\circ$, $\theta^{(3)} = 153^\circ$, $\theta^{(4)} = 207^\circ$ (рис. 2).

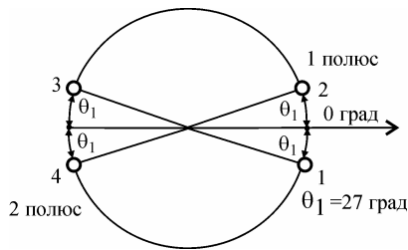


Рис. 2. Вид полюсов ВО в сечении тора плоскостью $\varphi = 0$ (1, 2, 3, 4 – номера винтовых проводников)

3. Математические модели расчета компонентов сил, действующих на полуполюсы ВО

Расчет сил, действующих на 4×720 отрезков (токовых элементов) всех четырех проводников, осуществлялся в несколько этапов.

На первом этапе в декартовой системе координат рассчитывалось распределение векторов магнитного поля по длине модельных проводников.

Декартовы координаты точек вычислялись по формулам:

$$x = (R + r \cdot \cos \theta) \cos \varphi,$$

$$y = (R + r \cdot \cos \theta) \sin \varphi,$$

$$z = r \cdot \sin \theta.$$

Координаты ортов используемой тороидальной системы координат равны:

$$i_\varphi(-\sin \varphi, \cos \varphi, 0),$$

$$i_\theta(-\sin \varphi \cdot \cos \varphi, -\sin \theta \cdot \sin \varphi, \cos \varphi),$$

$$i_r(\cos \theta \cdot \cos \varphi, \cos \theta \cdot \sin \varphi, \sin \theta).$$

Величина $B_n^{(k)}$ индукции магнитного поля в центре n -го отрезка k -го проводника ($k=1, 2, 3, 4$) рассчитывалась по формуле Био-Савара путем суммирования магнитных полей, создаваемых токами во всех элементарных отрезках всех четырех модельных проводников.

Силы $dF_n^{(k)}$, действующие на линейные элементы $dl_n^{(k)}$, вычислялись по формуле Ампера

$$dF_n^{(k)} = I^{(k)} \cdot [dl_n^{(k)} \times B_n^{(k)}].$$

Величина тока в каждом проводнике (полуполюсе) при расчете выбиралась равной 800 кА [2].

Результаты вычислений представлялись в виде матрицы 12×720 , содержащей компоненты сил F_x, F_y, F_z , действующих на 4×720 элементов всех винтовых проводников.

4. Результаты расчетов распределения магнитного поля и сил, действующих на элементы длины проводника

Распределение модуля вектора индукции магнитного поля B по длине 1-го полуполюса первой винтовой обмотки (см.рис. 1) представлено на рис. 3.

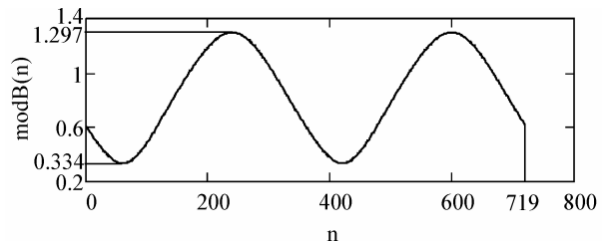


Рис. 3. Распределение модуля вектора индукции магнитного поля $B_n^{(1)}$ по длине 1-го полуполюса (n – номер токового элемента)

Распределение модуля сил, действующих на элементы длины 1-го полуполюса, представлено на рис. 4.

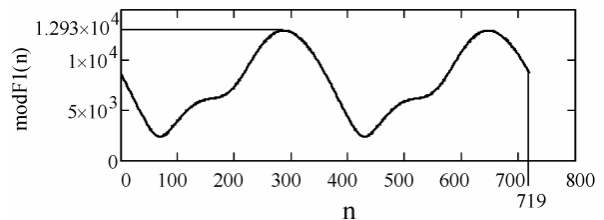


Рис. 4. Распределение модуля сил $dF_n^{(1)}$ по длине 1-го проводника 1-го полуполюса (n – номер токового элемента)

Величины усилий представлены в Ньютонах.

Для наглядного представления нормальных и касательных компонентов сил, приложенных к элементам проводников, были рассчитаны распределения по длине винтовой обмотки радиальной F_r , азимутальной F_φ и полоидальной F_θ компонентов сил в тороидальной системе координат (рис. 5-7). Компоненты сил вычислялись по формулам скалярного произведения векторов:

$$F_r = (\mathbf{F} \cdot \mathbf{i}_r), \quad F_\varphi = (\mathbf{F} \cdot \mathbf{i}_\varphi), \quad F_\theta = (\mathbf{F} \cdot \mathbf{i}_\theta).$$

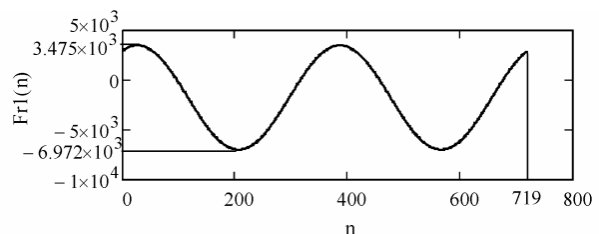


Рис. 5. Распределение радиальной компоненты силы $dF_n^{(1)}$ по длине 1-го проводника 1-го полуполюса

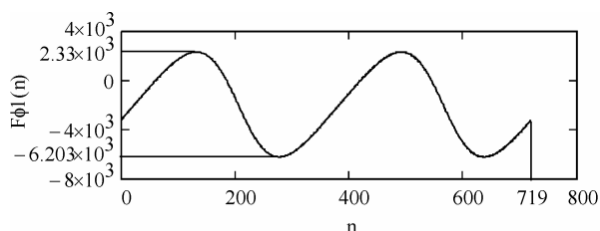


Рис. 6. Распределение азимутальной компоненты силы $dF_n^{(1)}$ по длине 1-го проводника 1-го полу полюса

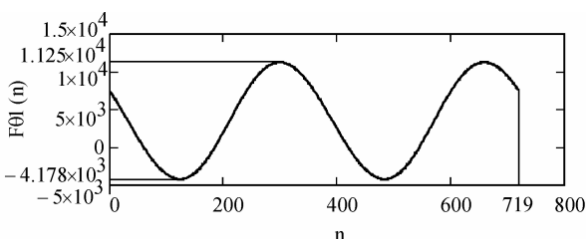


Рис. 7. Распределение полоидальной компоненты силы $dF_n^{(1)}$ по длине 1-го проводника 1-го полу полюса

Характерным для распределений модуля индукции магнитного поля, модуля и компонент сил по длине всех четырех проводников является наличие двух периодов изменения величин, что соответствует двухзаходному типу обмотки.

Величина модуля магнитного поля по длине проводника изменяется почти в 4 раза (с 0,33 до 1,3 Тл), соответственно величина модуля ЭДУ по длине проводника изменяется от 3 до 13 кН (см. рис. 3, 4).

Компоненты ЭДУ знакопеременны и несимметричны относительно нуля. Так, F_r изменяется от -7 до +3,5 кН, F_φ – от -6,2 до +2,3 кН, F_θ – от -4,2 до +2,1 кН. Наибольшим по величине является диапазон изменения радиальной и тороидальной компонент ЭДУ.

Результирующие силы, приложенные к каждому проводнику в отдельности и к винтовой обмотке в целом, вычислялись путем суммирования сил $dF_n^{(k)}$, действующих на элементарные отрезки модельных проводников.

Результирующая сил, действующих на все четыре проводника, оказалась равной нулю (в пределах машинной точности ПВМ), в соответствии с тем, что проводники составляют замкнутую систему:

$$\text{Res}F = \sum_n (dF_n^{(1)} + dF_n^{(2)} + dF_n^{(3)} + dF_n^{(4)}),$$

$$\text{Res}F = \begin{pmatrix} 1,47 \times 10^{-9} \\ 1,65 \times 10^{-9} \\ 2,706 \times 10^{-11} \end{pmatrix}.$$

Однако внутри этой системы между парами проводников 1-2 и 3-4 действуют равные и противоположно направленные силы, стремящиеся деформировать проводники таким образом, чтобы все проводники стали круговыми, расположенными в экваториальной плоскости тора.

5. Выводы

Представлены математические модели и алгоритмы расчета радиальной, азимутальной и полоидальной компонент ЭДУ, действующих на двухзаходную ВО торсастрона.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанные математические модели и компьютерные программы могут быть использованы для расчетов ЭДУ в проводниках ВО тороидальных магнитных систем, необходимых для оптимизации их напряженно-деформированного состояния.

Литература: 1. Быков В.Е., Георгиевский А.В., Корякко В.И., Литвиненко Ю.А. Бессилловые тороидальные магнитные системы. Препринт ХФТИ 76-39. Харьков, 1976. 2. Shishkin A.A. Torsatron type system with the small pitch angle of helical windings and additional toroidal field coils – URAGAN-2M (Principal physics issues). Preprint KhIPT 2005-2. Kharkov, 2005. 3. Быков В.Е., Георгиевский А.В., Друнов В.А. и др. Проект торсастрона с дополнительным продольным полем – установка «УРАГАН-2М». Доклады 3 Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. (Ленинград, 20-22 июня 1984 г.). М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. Том 1. С. 61-67. 4. Мартынов С.А., Воробьева В.П., Круголь М.С., Юркин А.Ю., Хажмурадов М.А. Модели и методы оптимизации напряженно-деформированного состояния торсастрона «Ураган-2М» // АСУ и приборы автоматики. 2009. №147. С. 32-38.

Поступила в редколлегию 23.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Хаханов В.И.

Лучанинов Александр Андреевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, (057)335-65-94. e-mail: luchaninov@kipt.kharkov.ua

Мартынов Сергей Алексеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). 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). Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua