

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЕРОЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ПОЛНОСТЬЮ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО КРИОТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ЗАДАЧ

В.И. Милых, д.т.н., В.Г.Данько, д.т.н., Н.В.Полякова

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра «Общей электротехники»

Тел. (0572) 40-04-27, факс (0572) 40-06-01, E-mail: mvikri@kpi.kharkov.ua

Викладено методику перевірного електромагнітного розрахунку турбогенератора з надпровідниковими обмотками ротора і статора, а також з зовнішнім надпровідним екраном. Методика основана на чисельних розрахунках магнітного поля обмотки збудження і фази обмотки статора. Принцип визначення низки електромагнітних параметрів подано на прикладі надпровідникового генератора потужністю 500 МВт.

Изложена методика поверочного электромагнитного расчета турбогенератора со сверхпроводниковыми обмотками ротора и статора, а также с внешним сверхпроводящим экраном. Методика основана на численных расчетах магнитного поля обмотки возбуждения и фазы обмотки статора. Принцип определения ряда электромагнитных параметров показан на примере сверхпроводникового генератора мощностью 500 МВт.

ВВЕДЕНИЕ

Среди актуальных научно-технических направлений электромашиностроения уже достаточно длительное время находятся разработки сверхпроводникового синхронного турбогенератора (СПСТГ) [1,2]. Оптимистичные прогнозы практического воплощения идеи такого генератора пока еще не сбылись. Дело в том, что, с одной стороны, еще не все физические предпосылки этой идеи реализованы на необходимом технологическом уровне, гарантирующем надежность работы всех систем СПСТГ. С другой стороны, турбогенераторы традиционной конструкции [3] обладают высокой конкурентоспособностью и, к тому же, очевидна тенденция максимального упрощения их конструкции и условий эксплуатации [4].

Однако интерес к СПСТГ в ряде стран сохраняется [5] и продолжается поиск пути наиболее эффективного решения проблемы его создания. К основным концептуальным вариантам длительное время относился СПСТГ, в котором сверхпроводниковой являлась только обмотка возбуждения. С появлением технических сверхпроводников, работающих в переменных магнитных полях, в круг исследований вошел вариант, в котором сверхпроводящей является и обмотка якоря [6,7]. Дальнейшим развитием этой концепции можно считать вариант полностью сверхпроводящего генератора (ПСПГ) [8,9], в котором наряду со сверхпроводящими обмотками ротора и статора предполагается использование сверхпроводящего экрана (СПЭ), ограничивающего зону распространения магнитного поля. Этот СПЭ является альтернативой шихтованному ферромагнитному экрану и, обладая определенными достоинствами, привносит в конструкцию свои проблемы.

ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитная система ПСПГ показана на рис.1 в его поперечном сечении и соответствует компоновке, уже представлявшей в [9]. Кроме СПЭ,

особенностью этой системы является сосредоточенная сверхпроводниковая обмотка якоря (СПОЯ): каждая ее фаза состоит из двух укороченных седлообразных модульных катушек ($k1$ и $k2$), стороны которых располагаются в различных по радиусу слоях. В целом, двенадцать модульных катушек образуют трехфазную обмотку спиральной формы, что позволяет выполнить компактную укладку ее лобовых частей.

Применение СПОЯ, подверженной воздействию переменных магнитных полей, сопряжено с появлением дополнительного ограничивающего фактора - критического значения магнитной индукции на сверхпроводниках этой обмотки, которое существенно ниже, чем для сверхпроводниковой обмотки возбуждения

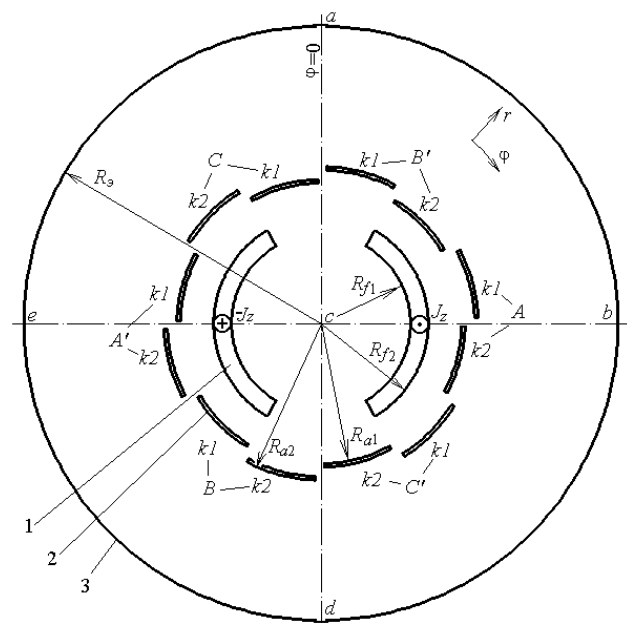


Рис.1. Область расчета магнитного поля в ПСПГ: 1 - СПСТГ; 2 - СПОЯ; 3 - СПЭ; $A-A'$, $B-B'$, $C-C'$ - фазы обмотки статора; $k1, k2$ - модульные катушки фаз; показаны принятые направления плотности тока J_z и координат r, ϕ .

(СПОВ), работающей преимущественно в постоянном магнитном поле. Возможный уровень магнитной индукции в зазоре ПСПГ в [8,9] оценивается в 0,35 Тл. Такое ее существенное снижение, по сравнению с другими вариантами СПСТГ, предполагается компенсировать соответствующим повышением линейной токовой нагрузки СПОЯ.

Описанная конструкция ПСПГ прошла первые этапы расчетных исследований, результаты которых представлены в [8,9]. В этих работах основой расчета является решение полевой задачи методом Фурье-Ламе. При этом СПОЯ представляется распределенным достаточно толстым токовым слоем, не отражающим реалий модульной структуры СПОЯ (рис.1). К тому же указанный метод характеризуется весьма плохой сходимостью именно в зонах расположения токонесящих элементов. В результате не сделана реальная оценка значений магнитной индукции в зонах расположения сверхпроводников. К тому же, не рассмотрен ряд других важных аспектов, сопутствующих проектированию ПСПГ, например, выбор числа витков СПОЯ, электродинамические усилия и другие.

Целью данной работы является дальнейшее развитие расчетно-теоретических исследований ПСПГ представленной конструкции. На данном этапе рассматривается принцип построения поверочного электромагнитного расчета ПСПГ, позволяющего преодолеть указанные пробелы расчетного анализа, дающего возможность определить основные электромагнитные параметры ПСПГ и вскрыть проблемы электромагнитного характера, которые еще предстоит решать на последующих этапах исследований.

Так как поверочный электромагнитный расчет должен строиться на определенном наборе исходных данных, то установим их перечень для рассматриваемого варианта такого расчета. А именно, будем считать, что структура поперечного сечения ПСПГ (рис.1) и его размеры определены. Задаются также номинальные данные генератора и стандартный набор сопутствующих параметров. Сводка исходных данных

Таблица 1. Технические данные ПСПГ

Параметр	Значение
Номинальная мощность, P	500 МВт
Номинальное фазное напряжение, U_{ϕ}	11,55 В
Частота, f	50 Гц
Число фаз, m	3
Схема соединения фаз обмотки статора	Y- звезда
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,9
Ток фазы обмотки статора, I_1	16 кА
Число пар полюсов, p	1
Активная длина обмотки статора, l_a	4,0 м
Размеры сечения стороны модульной катушки	15x300 мм ²
Угол раскрытия обмотки ротора, α	30°
Радиусы расположения обмотки возбуждения: R_{r1}/R_{r2}	0,375/0,45 м
Радиусы расположения обмотки статора: R_{a1}/R_{a2}	0,59/0,66 м
Радиус сверхпроводящего экрана, R_s	1,25 м

и их обозначений находится в табл.1, где также есть значения указанных параметров, которые использовались для числовых иллюстраций излагаемой методики.

РЕШЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ЗАДАЧИ

В исследуемом ПСПГ нет достаточно четкой организации структуры магнитных потоков ввиду отсутствия ферромагнитного магнитопровода. Следовательно, традиционные методы электромагнитного расчета, построенные на базе понятий магнитной цепи, становятся неприемлемы. Поэтому для расчета основных электромагнитных параметров ПСПГ естественным представляется использование математической модели, основанной непосредственно на решении полевых задач. Имеющийся опыт расчетов и исследования электрических машин специального исполнения, также требовавших нестандартного подхода [10], свидетельствует, что наилучших результатов можно добиться, решая задачу расчета магнитного поля одним из численных методов [11,12]. В данном случае последующая тактика расчетов магнитного поля делает наиболее предпочтительным метод конечных разностей (МКР), так как эта тактика будет построена на применении регулярной полярной сеточной модели с равномерным шагом по угловой координате φ .

Магнитное поле в поперечном сечении ПСПГ будем рассматривать как двумерное и использовать полярную систему координат (r, φ) . Учитывая, что в области расчета отсутствуют ферромагнетики, ее можно рассматривать как однородную с магнитной проницаемостью $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Гн/м. В таких условиях плоскопараллельное магнитное поле описывается известным уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \varphi^2} = -\mu_0 J_z, \quad (1)$$

где A_z, J_z - аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока.

Решая это уравнение посредством МКР [10-12], необходимо использовать соответствующую сеточную модель, то есть на поперечное сечение электромагнитной системы ПСПГ (рис.1) нанести полярную сетку. Так в области на рис.1 число линий окружности составляло $j_m=50$ и они проводились с неравномерным шагом. Радиальные линии проводились с равномерным шагом в один градус и на полюсное деление τ (половина сечения ПСПГ) приходилось $i_m=181$ радиальных линий сетки. Фрагмент сеточной модели дан на рис.2 в зоне расположения сечений модульных катушек фазы А СПОЯ.

Как известно, дифференциальное уравнение (1) заменяется системой конечно разностных алгебраических уравнений, решение которой дает распределение ВМП в узлах расчетной сетки [11,13]

$$A_{z,j,i}, \quad j = 1,2,\dots, j_m; \quad i = 1,2,\dots, i_m. \quad (2)$$

В основу поверочного электромагнитного расчета ПСПГ положены два полевых расчета:

1) магнитного поля СПОВ; 2) магнитного поля одной фазы СПОЯ. Определим условия таких расчетов.

СПЭ предполагается идеально диамагнитным и область расчета по рис.1 ограничивается его поверхностью abd , где устанавливается условие для ВМП

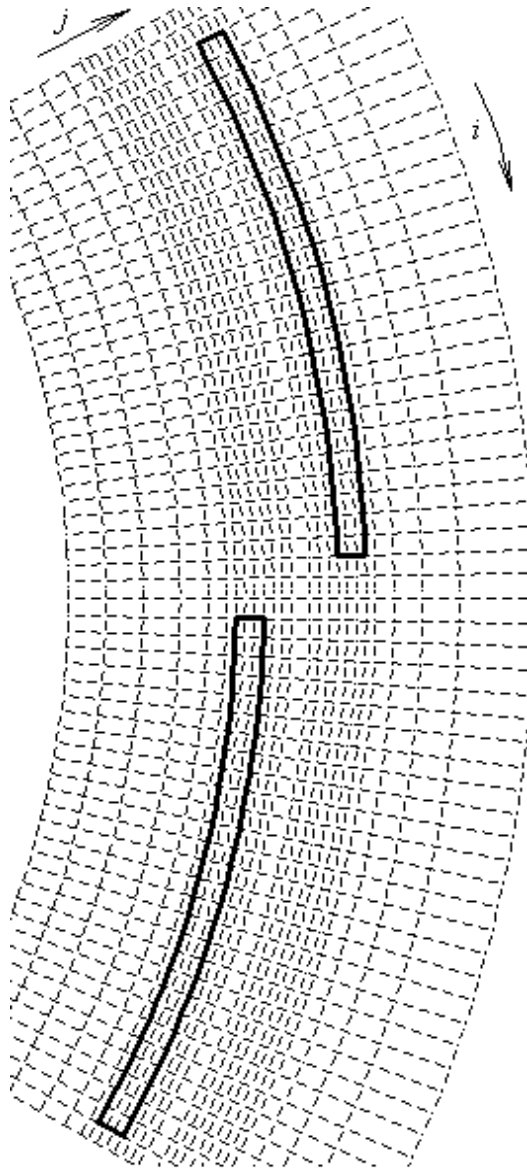


Рис.2. Фрагмент сеточной модели

$$A_z(R_3, \varphi) = 0. \quad (3)$$

При расчете магнитного поля СПОВ можно ограничиться четвертью сечения ПСПГ, представленного на рис.1, и на границах подобласти ac и bc , совпадающих с линиями симметрии, для ВМП имеют место условия

$$A_z(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \left(r, \frac{\pi}{2} \right) = 0. \quad (4)$$

У структуры модульных катушек фазы СПОЯ нет линий симметрии. Поэтому минимальной подобластью расчета является полюсное деление, на границах ac и dc которой учитывается условие периодичности

$$A_z(r, 0) = -A_z(r, \pi). \quad (5)$$

После расчета магнитного поля в заданных подобластях на остальные части области расчета (рис.1) распределение ВМП распространялось с учетом геометрической и электромагнитной симметрии (последняя учитывает направления токов), либо с учетом периодичности.

Так как магнитная среда в области расчета принята линейной, то изначальные расчеты магнитного поля, которые назовем *тестовыми*, можно провести

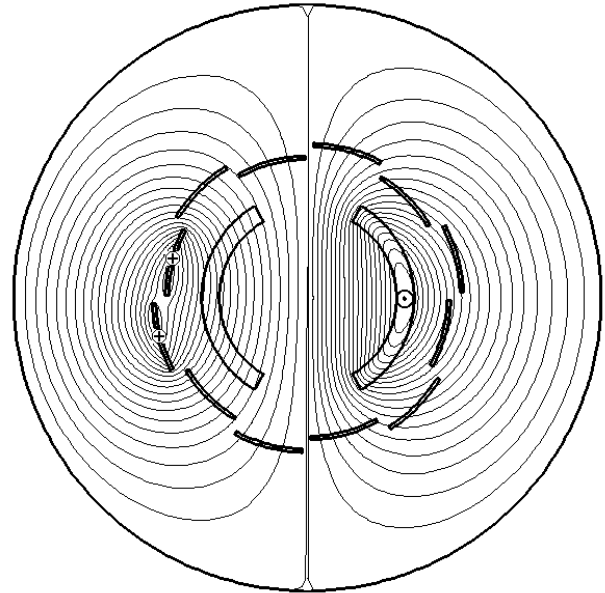


Рис.3. Магнитное поле обмотки возбуждения (справа) и магнитное поле одной фазы обмотки статора (слева)

при произвольно заданной магнитодвижущей силе (МДС). Конкретно, расчет полей СПОВ и фазы $A-A'$ СПОЯ был проведен при задании их МДС $F_{f0}=1000$ кА и $F_{A0}=1000$ кА соответственно. Полученные структуры магнитных полей представлены на рис.3, где силовые линии - это линии равного ВМП $A_z^* = const$, подвергнутого нормировке максимальным абсолютным значением A_{max} по формуле

$$A_z^*(r, \varphi) = \frac{A_z(r, \varphi)}{A_{max}}. \quad (6)$$

Так для магнитного поля СПОВ получено $A_{fmax} = 0,2735$ Вб/м, для магнитного поля фазы $A-A'$ - $A_{Amax} = 0,3614$ Вб/м, а на рисунках линии проведены через 0,05 о.е. (относительных единиц).

Важной величиной, которую необходимо определить на основе расчета магнитных полей СПОВ и фазы СПОЯ, является магнитное потокоцепление фазы A обмотки статора. Для этой величины исходным является выражение [14]

$$\Psi_A = \frac{2}{S_A} \int_{S_A} A_z dS, \quad (7)$$

где интегрирование проводится по общей площади поперечного сечения S_A сторон обеих модульных катушек фазы A , расположенных в секторе $acdba$ (рис.1). Значение (7) будет приходиться на единицу

аксиальной длины и один виток этой фазы, а удвоение учитывает наличие вторых сторон катушек в секторе *acdea*.

С учетом сеточной аппроксимации (рис.2) интегрирование в формуле (7) заменяется алгебраическим суммированием по ячейкам сетки в сечениях указанных сторон катушек

$$\Psi_A = \frac{2}{S_A} \left[\sum_j \sum_i^{n_1 m_1} A_{z,j,i,s} \Delta\varphi_i \Delta r_j (r_j + r_{j+1}) + \sum_j \sum_i^{n_2 m_2} A_{z,j,i,s} \Delta\varphi_i \Delta r_j (r_j + r_{j+1}) \right] \quad (8)$$

где *i, j* - нумераторы радиальных и дуговых линий сетки; $A_{z,j,i,s}$ - среднее значение ВМП в ячейке *i, j*, определяемое по его значениям в узлах сетки, обрамляющих ячейку; $\Delta\varphi_i, \Delta r_j, r_j, r_{j+1}$ - угловые и радиальные размеры ячеек, а также радиусы, ограничивающие ячейку; n_1, m_1, n_2, m_2 - числа рядов ячеек по направлениям *j* и *i* для катушек *k1* и *k2*, соответственно.

Если в формуле (8) используется распределение ВМП, созданного самой фазой *A-A'* СПОЯ, то получаем собственное магнитное потокоцепление этой фазы Ψ_A . Если это распределение ВМП, созданного СПОВ, то взаимное магнитное потокоцепление СПОВ и фазы *A-A'* СПОЯ Ψ_{fA} .

Величина Ψ_{fA} зависит от взаимного расположения СПОВ и фазы *A-A'* СПОЯ. Поэтому расчеты магнитного потокоцепления по формуле (8) были проведены в целом ряде фиксированных положений сечений катушек фазы А. Эти положения отличались смещением в угловом направлении с шагом в одну ячейку сетки. Таким образом было пройдено полюсное деление и зависимость $\Psi_{fA}(\varphi)$ была получена в форме числовых массивов

$$\Psi_{fA,i}; \varphi_i, i=1,2,\dots,i_m-1. \quad (9)$$

Эта зависимость была разложена в гармонический ряд Фурье [15] и выявлена амплитуда первой гармоники магнитного потокоцепления СПОВ и фазы СПОЯ Ψ_{mfA} .

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПСПГ

По магнитным потокоцеплениям определяются две ключевые величины:

1) амплитудное значение удельной взаимной магнитной проводимости СПОВ и фазы СПОЯ

$$\Lambda_{mfA} = \frac{\Psi_{mfA}}{F_{f0}}, \quad (10)$$

2) собственная удельная магнитная проводимость фазы обмотки статора

$$\Lambda_A = \frac{\Psi_A}{F_{A0}}, \quad (11)$$

Значения этих проводимостей составили $\Lambda_{mfA} = 0,313 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $\Lambda_A = 0,6635 \cdot 10^{-6}$ Гн/м и приходится на единицу аксиальной длины ПСПГ.

Полученные значения проводимостей используются для определения параметров ПСПГ по известным расчетным формулами [3].

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом ее активной длины l_a и числа витков каждой фазы w_a

$$X_c = \pi f m l_a \Lambda_A w_a^2, \quad (12)$$

где учитывается взаимоиндуктивность ее фаз.

МДС СПОВ F_f при любом режиме возбуждения ПСПГ, характеризующемся амплитудой магнитного потокоцепления фазы СПОЯ Ψ_m

$$F_f = \frac{\Psi_m}{\Lambda_{mfA}} \quad (13)$$

А с учетом выражения для действующего значения электродвижущей силы (ЭДС) в фазе обмотки статора $E_a = 4,44 f w_a l_a \Psi_m$, вместо (13) имеем

$$F_f = \frac{E_a}{4,44 f w_a l_a \Lambda_{mfA}}. \quad (14)$$

Тогда, на основе того, что ЭДС фазы обмотки якоря в режиме ХХ

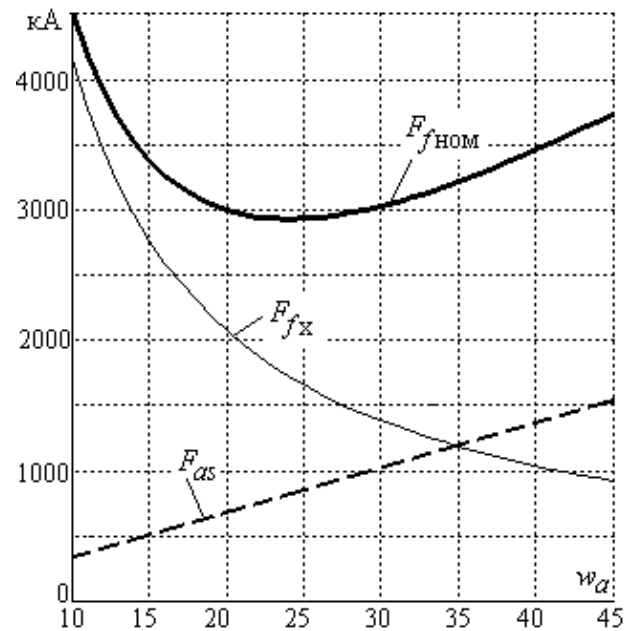


Рис.4. Зависимости МДС обмоток ПСПГ от числа витков фазы статора

$$E_{ax} = U_\phi, \quad (15)$$

по формуле (14) получим МДС СПОВ в этом режиме - F_{f_x} , а в режиме номинальной нагрузки такая ЭДС

$$E_{аном} = \sqrt{(U_\phi \cos\varphi)^2 + (X_c I_1 + U_\phi \sin\varphi)^2}, \quad (16)$$

и, соответственно, по формуле (14) получим номинальную МДС СПОВ - $F_{f_ном}$.

Для определения оптимального числа витков фазы обмотки статора w_a были проведены расчеты по представленным формулам (12, 15, 16, 14) при варьировании этого числа. Полученные зависимости $F_{f_x}(w_a)$ и $F_{f_ном}(w_a)$ представлены на рис.4. В этих

же осей показана линейная зависимость МДС обмотки якоря (с учетом всех трех ее фаз) $F_{ас} = 0,5 m \sqrt{2} w_a I_1$.

Очевидно, что оптимальное значение w_a надо определять по минимуму МДС обмоток в режиме номинальной нагрузки. В данном случае - это $w_a = 20$.

При этом значении w_a были проведены расчеты с использованием тех же формул, а также заданных и

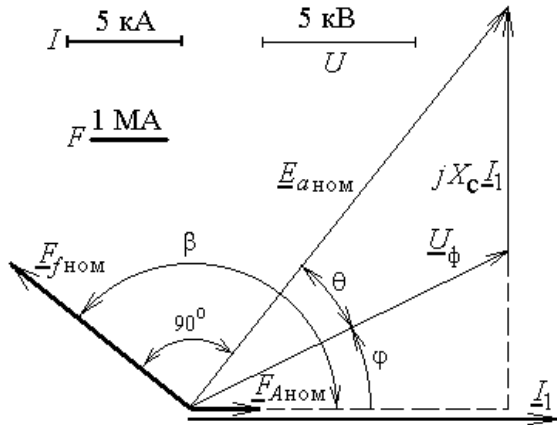


Рис.5. Векторная диаграмма для номинального режима нагрузки ПСПГ (даны масштабы тока - I , напряжений и ЭДС - U , МДС - F)

подготовленных параметров. Для основных величин получены такие значения: $X_c=0,5$ Ом; $E_{ак}=11550$ В; $F_{як}=2078$ кА; $E_{аном}=16680$ В; $F_{аном}=3000$ кА; МДС на фазу СПОЯ $F_{Аном} = \sqrt{2} w_a I_1 = 453$ кА.

Исходя из проведенных расчетов, на рис.5 представлена векторная диаграмма, иллюстрирующая соотношения напряжений, ЭДС и МДС, а также соответствующие фазовые сдвиги, которые имеют место в режиме номинальной нагрузки ПСПГ.

Представленные на рис.5 угловые смещения определены так:

$$\text{фазовый сдвиг } \varphi = \arccos(0,9) = 25,8^\circ;$$

$$\text{угол нагрузки } \theta = \arctg \frac{X_c I_1 + U_\phi \sin \varphi}{U_\phi \cos \varphi} - \varphi = 25,6^\circ;$$

угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора $\beta = \varphi + \theta + 90 = 141,4^\circ$.

На угол β , равный 142° (сеточная структура позволяла оперировать с целыми значениями, так как шаг сетки по углу составлял 1 градус) обмотка ротора была повернута относительно обмотки статора и вместе с ней повернута структура ВМП, полученная в режиме XX при $F_{яном}=3000$ кА.

Для фазы A обмотки статора поле было скорректировано на МДС $F_A = 453$ кА, а для других фаз B и C поля получены поворотом этого поля на углы 120° и -120° , а значения ВМП скорректированы на МДС $F_B=F_C=F_A/2=226,5$ кА. Результирующее магнитное поле в режиме номинальной нагрузки получено наложением всех полей и соответствующая картина представлена на рис.6, где линии $A_z^* = const$ проведены через 0,05 о.е. от $A_{max} = 0.7308$ Вб/м. Все эти повороты и наложение полей возможны, благодаря исполь-

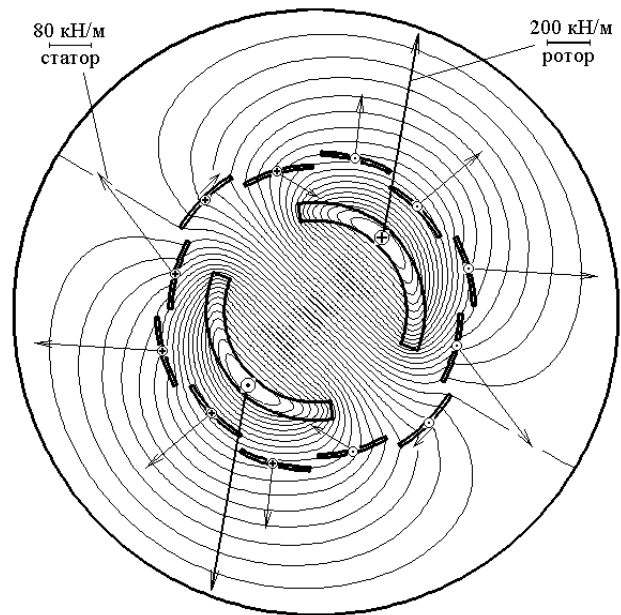


Рис.6. Магнитное поле в режиме номинальной нагрузки и электродинамические усилия, действующие на обмотки ПСПГ

зованию расчетной сетки с постоянным шагом по угловой координате (ее фрагмент представлялся на рис.2).

По распределению ВМП определяются составляющие и модуль магнитной индукции по формулам $B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial \varphi}$; $B_\varphi = -\frac{\partial A_z}{\partial r}$; $B = \sqrt{B_r^2 + B_\varphi^2}$, (17)

которые претерпевают соответствующую конечно-разностную аппроксимацию [10].

Это дает основу для вычисления составляющих электродинамических усилий (ЭДУ), действующих на

Таблица 2 - Электромагнитный момент вращения, действующий стороны обмоток в режиме номинальной нагрузки, (кН·м)/м (на единицу аксиальной длины)

Обмотка ротора	Фазная зона обмотки статора (рис.1)					
	B'		A		C'	
	Модульная катушка фазной обмотки					
	k1	k2	k1	k2	k1	k2
-210	-11	7	51	89	37	37

стороны катушек или обмоток по формулам из [16]

$$F_\varphi = l_a \int_S [B_\varphi \sin(\varphi - \varphi_c) - B_r \cos(\varphi - \varphi_c)] J_z r d\varphi dr; \quad (18)$$

$$F_r = l_a \int_S [B_\varphi \cos(\varphi - \varphi_c) + B_r \sin(\varphi - \varphi_c)] J_z r d\varphi dr. \quad (19)$$

где S - площадь сечения СПОВ или конкретной катушки СПОЯ; φ_c - угловая координата радиальной линии, к которой приводятся силы.

Распределение ЭДУ по сторонам сечений обмоток ротора и статора в режиме номинальной нагрузки представлено на рис.6 в векторной форме в указанных масштабах (значения сил даны в расчете на единицу аксиальной длины).

Электромагнитные моменты вращения

$$M_{ЭМ} = l_a \int_S B_r J_z r^2 d\varphi dr, \quad (20)$$

полученные на основе определенных электродинамических взаимодействий в ПСПГ и действующие на стороны его обмоток, представлены в табл.2.

Так, результирующий электромагнитный момент вращения, действующий на ротор с учетом всей активной длины l_a ,

$$M_{ЭМр} = 2 \cdot M_{ЭМр\tau} l_a = -2 \cdot 841 \cdot 4 = -1680 \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (21)$$

где $M_{ЭМр\tau}$ - электромагнитный момент, действующий на обмотку ротора в пределах полюсного деления.

Если сложить моменты вращения, действующие на стороны катушек СПОЯ, то получим ту же величину $M_{ЭМс}$, что и момент вращения, действующий на обмотку ротора, но с противоположным знаком.

Через электромагнитный момент вращения определяется электромагнитная мощность ПСПГ

$$P_{ЭМ} = \Omega M_{ЭМс} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{ЭМс} = 528 \text{ МВт}, \quad (22)$$

где Ω - угловая частота вращения ротора.

Это значение электромагнитной мощности соот-

Таблица 3. Максимальные значения магнитной индукции на сверхпроводящих элементах ПСПГ, Тл

Режим	СПОВ	СПОЯ	СПЭ
ХХ	2,04	0,97	0,37
НН	2,79	1,68	0,39

ветствует заданному в табл.1 значению номинальной мощности ПСПГ, что является подтверждением правильности проведенных расчетов. Некоторое отклонение возможно из-за неточного задания угла β , на который сдвигались оси МДС ротора и статора, а также из-за того, что в формуле (10) учтена только первая гармоника магнитного потокоцепления Ψ_{mfa} .

По результатам расчета магнитного поля установлены максимальные значения модуля магнитной индукции на сверхпроводниках обмоток ротора и статора, а также на поверхности СПЭ в режимах ХХ и номинальной нагрузки (НН). Эти значения приведены в табл.3 и не внушают оптимизма, так как на СПЭ они существенно превышают допустимые критические значения, а на СПОЯ таковы, что приведут к повышенным потерям мощности в ее сверхпроводниках. Это остается одной из основных проблем, которые должны быть решены при дальнейших исследованиях и разработках ПСПГ. Этим исследованиям в значительной степени может содействовать предложенная методика поверочного электромагнитного расчета ПСПГ.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель для поверочного электромагнитного расчета ПСПГ, построенная на численном расчете магнитного поля. Эффективность модели заключается в возможности достаточно полного учета практически любого расположе-

ния и формы обмоток ПСПГ и их отдельных элементов. Адекватность математической модели подтверждена совпадением значения мощности ПСПГ, определяемого по исходным электрическим величинам, и значения, полученного в результате расчета электромагнитного момента вращения.

Конкретный расчетный анализ, проведенный для заданного концептуального варианта конструкции ПСПГ, показал, что к основным проблемам относится наличие слишком высоких значений магнитной индукции переменного магнитного поля на элементах конструкции, выполняемых из сверхпроводников - СПОЯ и СПЭ.

Выявленная проблема позволяет установить ориентиры на совершенствование конструкции ПСПГ: Этому совершенствованию будет способствовать предложенная методика поверочного электромагнитного расчета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сверхпроводящие машины и устройства. Под редакцией С.Фонера и Б.Шварца. Пер. с англ.-М.: Мир.-1977.-763 с.
- [2] Чубраева Л.И. Генераторы нетрадиционного исполнения.-Л.:Наука,1991.-246 с.
- [3] Турбогенераторы. В.В.Титов, Г.М.Хуторецкий, Г.А.Загородная и др.- Л.: Энергия, 1967.-895 с.
- [4] Тимошенко В.Г., Кузьмин В.В., Зозулин Ю.В., Федоренко Г.М. Новая серия турбогенераторов мощностью 110-220 МВт с воздушным охлаждением повышенной надежности и маневренности // Новини енергетики.-2001.-№3.-С.87-89.
- [5] Болух В.Ф., Данько В.Г., Кожемякин С.М. Аналіз конструкцій та тенденції у розробці надпровідникових турбогенераторів // Вестник Харьк. госуд. политехн. ун-та. Вып. № 84. Тем. выпуск: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. - Харьков: ХГПУ, 2000. - С. 19-24.
- [6] Brunet Y., Tixador P., Nuhart H. Cryogenic conception for full superconducting generators: realization of superconducting armature cryostat // Cryogenics.-1988.-Vol.28.-'11.-p.751-755.
- [7] Singh S.K., Serbarth D.W., Ortolì E.S. et al. Conceptual design of a high temperature superconducting generator // IEEE Transactions on Applied Superconductivity.-1999.-vol.9.-'2.-P.1237.-1240.
- [8] Болух В.Ф., Данько В.Г., Кожемякин С.М., Станкевич А.И. К вопросу разработки криотурбогенератора со сверхпроводящим статором // Изв.РАН.Энергетика.-1993.-№2.-С.69-75.
- [9] Данько В.Г., Болух В.Ф. Концепция полностью сверхпроводящего криотурбогенератора без магнитопровода // Техн. електродинаміка,2000.-№3.-С.38-43.
- [10] Милых В.И. Численное моделирование электродинамических процессов в машинах постоянного тока с высокими удельными нагрузками. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук.- Харьков: ХГПУ.-1995.- 402 с.

- [11] Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Пер. с англ.- М.: Энергия, 1970.- 376 с.
- [12] Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей.- М.: Высш.школа, 1986.- 240 с.
- [13] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.-1982.-№12. -С.46-49.
- [14] Теоретические основы электротехники. Том III. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля. Под ред.П.А.Ионкина. М.: Высшая школа, 1976.-383 с.
- [15] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.- 832 с.
- [16] Данько В.Г., Милых В.И. Электродинамические усилия в обмотках электродвигателя с гладким якорем // Электротехника.- 1977.-№8.-С.24-28.

Milykh V.I., Danko V.G., Polyakova N.V.

Methodology of a check-up field-problem-based electromagnetic computation of a fully superconducting cryoturbogenerator

The paper presents a technique for check-up calculating electromagnetic characteristics of a turbogenerator with superconducting rotor and stator windings and an outer superconducting shield. The technique is based on numerical computations of magnetic field of the excitation winding and a phase of the stator winding. The mechanism of determining a number of electromagnetic parameters is illustrated with electromagnetic calculations of a 500 MW superconducting generator.

Key words - **superconducting turbogenerator, electromagnetic calculations, magnetic field.**