

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ В ПОЛНОСТЬЮ СВЕРХПРОВОДНИКОВОМ КРИОТУРБОГЕНЕРАТОРЕ (И ОБЪЕКТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА РЕАКЦИЮ ЯКОРЯ)

В.И.Милых, д.т.н., проф., 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

Проведено аналіз магнітного поля і електрорушійних сил (ЕРС) в обмотці якоря турбогенератора з надпровідниковими обмотками і зовнішнім екраном. Методика аналізу ЕРС основана на часових функціях магнітних потокозчеплень фазних обмоток статора. Миттєві значення потокозчеплень визначаються у процесі обертання ротора і зміни струмів статора за допомогою чисельних розрахунків магнітного поля в різних режимах збудження генератора. Аналіз ЕДС подано на прикладі надпровідникового генератора потужністю 500 МВт.

Проведен анализ магнитного поля и электродвижущих сил (ЭДС) в обмотке якоря турбогенератора со сверхпроводниковыми обмотками и внешним экраном. Методика анализа ЭДС основана на временных функциях магнитных потокозцеплений фазных обмоток статора. Мгновенные значения потокозцеплений определяются в процессе вращения ротора и изменения токов статора посредством численных расчетов магнитного поля в различных режимах возбуждения генератора. Анализ ЭДС дан на примере сверхпроводникового генератора мощностью 500 МВт.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, создание сверхпроводникового синхронного турбогенератора (СПСТГ) обещает определенные выгоды, достичь которых стремятся ведущие электромашиностроительные фирмы ряда стран [1-3].

Исходным решением этой задачи являлась замена медных проводников на сверхпроводники только в обмотке возбуждения. Как более радикальное решение представляется создание СПСТГ, в котором наряду со сверхпроводящей обмоткой возбуждения (СПОВ), располагаемой традиционно на роторе, предполагается сверхпроводящей и обмотка статора [4,5]. А развитием этой концепции можно считать вариант полностью сверхпроводящего генератора (ПСПГ), когда наряду со сверхпроводящими обмотками предлагается использование внешнего сверхпроводящего экрана (СПЭ) [6].

Конкретная компоновка электромагнитной системы ПСПГ по концепции [6] была рассмотрена в [7] и здесь представлена на рис.1 поперечным сечением. Особенностью этой системы является трехфазная сверхпроводниковая обмотка якоря (СПОЯ), фазы которой состоят из двух укороченных седлообразных модульных катушек ($k1$ и $k2$), причем стороны последних располагаются в различных по радиусу слоях.

В представленной конструкции, в отличие от традиционной [8], структура магнитного поля не очевидна ввиду отсутствия стального магнитопровода. Соответственно, для ПСПГ оказываются неприемлемыми традиционные методы электромагнитного расчета турбогенераторов. Поэтому в [7] представлена методология такого расчета и показано определение основных электромагнитных параметров ПСПГ на основе решения полевых задач.

Целью данной работы является дальнейшее развитие расчетно-теоретических исследований ПСПГ представленной конструкции. И на данном этапе рас-

сматривается принцип определения величины, характера и гармонического состава электродвижущих сил (ЭДС) в обмотке статора. Причем основой решения этой задачи вновь является полевой подход, а именно, численный расчет магнитных полей ПСПГ в различных режимах его возбуждения. Этой конкретной цели сопутствует и **общенаучная задача**: показать объективный подход к учету реакции якоря в машинах переменного тока вообще.

Для конкретных иллюстративных расчетов будем использовать модель электромагнитной системы ПСПГ, представленную на рис.1, и набор его параметров, известных из [7], как исходные и рассчитан-

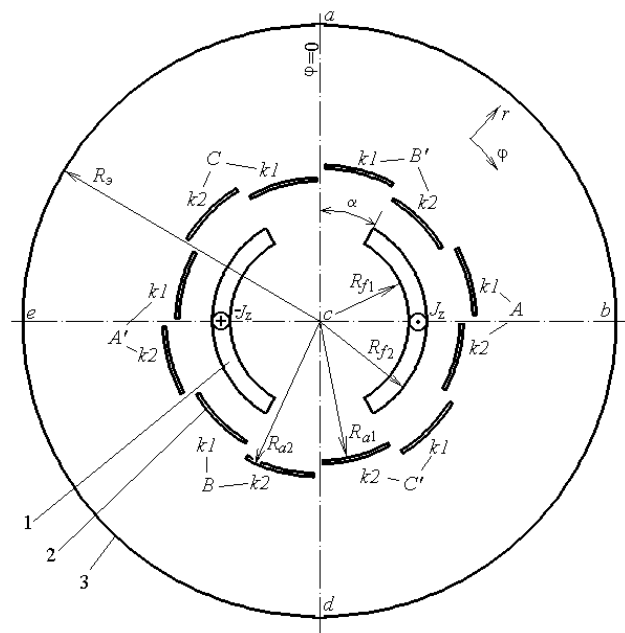


Рис.1. Расчетная модель ПСПГ: 1 - СПОВ; 2 - СПОЯ; 3 - СПЭ; A-A', B-B', C-C' - фазы обмотки статора; $k1, k2$ - модульные катушки фаз; показаны принятые направления плотности тока J_z и координат r, φ .

ные там же. Сводка этих параметров и их обозначений находится в табл.1 и соответствует трехфазному двух- полюсному ПСПГ мощностью 500 МВт.
Таблица 1. Исходные данные ПСПГ

Параметр и его обозначение	Значение
Номинальное фазное напряжение, U_{ϕ}	11,55 кВ
Частота, f	50 Гц
Схема соединения фаз обмотки статора	Y- звезда
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,9
Активная длина обмотки статора, l_a	4,0 м
Число последовательных витков в фаз- ной обмотке статора, w_a	20
Угол раскрытия обмотки ротора, α	30°
Радиусы расположения СПОВ, R_{r1}/ R_{r2}	0,375/0,45 м
Средние радиусы расположения сторон модульных катушек СПОЯ, R_{a1}/ R_{a2}	0,59/0,66 м
Радиус СПЭ, R_s	1,25 м
МДС СПОВ в режиме холостого хода, F_{fx}	2078 кА
МДС СПОВ в режиме номинальной нагрузки, $F_{fном}$	3000 кА
Амплитуда МДС на фазу СПОЯ в ре- жиме номинальной нагрузки, $F_{Аном}$	453 кА
Угол нагрузки, Θ	25,6°
Угол сдвига осей намагничивания обмо- ток ротора и статора, β	141°

РЕШЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ЗАДАЧИ

Как и в [7], магнитного поле предполагалось плоскопараллельным, расчеты проводились в поперечном сечении ПСПГ и это поле описывалось в полярной системе координат (r, φ) 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; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Это уравнение решалось методом конечных разностей [7,9] с использованием полярной сеточной модели. Она имела в радиальном направлении неравномерный шаг и число линий окружности $j_m = 50$, в угловом направлении на полюсное деление было нанесено $i_m = 181$ линий сетки с равномерным шагом, что было важно для последующего вращения полей.

Расчеты магнитного поля проводились для двух вариантов возбуждения ПСПГ: 1) в режиме холостого хода (ХХ) от СПОВ при ее магнитодвижущей силе (МДС) F_{fx} ; 2) от действия одной фазы $A-A'$ СПОЯ при ее МДС $F_{Аном}$. Ввиду отсутствия осей симметрии для СПОЯ, необходимо было оперировать с магнитными полями в пределах полюсного деления с заданием на ограничивающих радиальных линиях ca и cd (рис.1) условия периодичности для ВМП

$$A_z(r, 0) = -A_z(r, \pi). \quad (2)$$

На внешней границе abd области расчета СПЭ предполагается идеально диамагнитным и здесь для ВМП устанавливается условие

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

Как известно, дифференциальное уравнение (1) заменяется системой конечно разностных алгебраических уравнений, решение которой дает распределение ВМП в узлах расчетной сетки [7,9]

$$A_{z,j,i}, \quad j = 1, 2, \dots, j_m; \quad i = 1, 2, \dots, i_m, \quad (4)$$

где j, i - нумераторы круговых и радиальных ее линий.

Магнитные поля для указанных расчетных вариантов представлены на рис.2 структурами линий равного ВМП $A_z^* = const$ при его нормировке максимальным абсолютным значением A_{max} по формуле

$$A_{z,j,i}^* = \frac{A_{z,j,i}}{A_{max}}. \quad (5)$$

причем для магнитного поля СПОВ получено $A_{fmax} = 0,5683$ Вб/м, для магнитного поля фазы $A-A'$

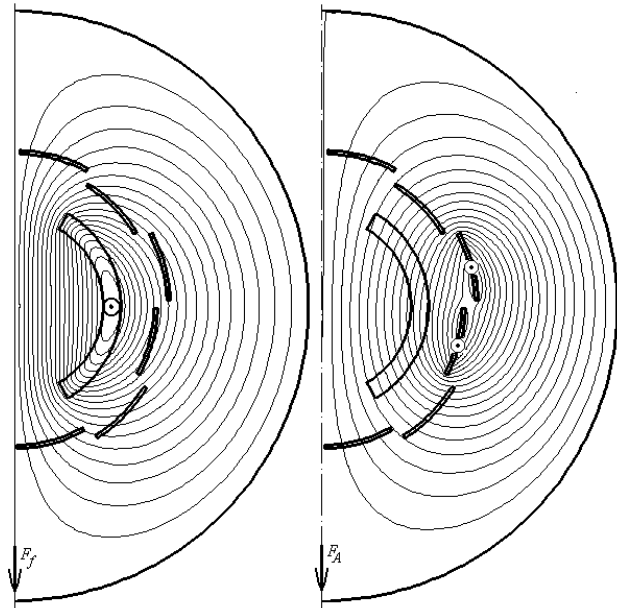


Рис.2. Магнитное поле обмотки возбуждения (слева) и магнитное поле одной фазы $A-A'$ обмотки статора (справа)

- $A_{Amax} = 0,1636$ Вб/м, а на рисунках линии проведены через 0,05 о.е. (относительных единиц).

На рис.2 указаны направления осей намагничивания для МДС F_f и F_A , соответствующие конкретному расположению обмоток и направлениям их токов.

После расчета магнитного поля в определенной подобласти, ВМП распространялся на второе полюсное деление области расчета (рис.1) с учетом той же периодичности (2) для конкретных узлов расчетной сетки

$$A_{z,j,i+im-1} = -A_{z,j,i}. \quad (6)$$

По распределению ВМП $A_{z,A,j,i}$ фазы $A-A'$ получались соответствующими поворотами распределения ВМП фаз $B-B'$ и $C-C'$

$$A_{z,B,j,i} = -A_{z,A,j,i+is-1}; \quad A_{z,C,j,i} = -A_{z,A,j,i-is+1}, \quad (7)$$

где фазный сеточный сдвиг $i_s = (i_m - 1) / 3 + 1$.

Повернутые так поля фаз $B-B'$ и $C-C'$ при соответствующих направлениях токов и осей намагничивания представлены для МДС F_B и F_C на рис.3.

Поле трехфазной обмотки статора, а также поле

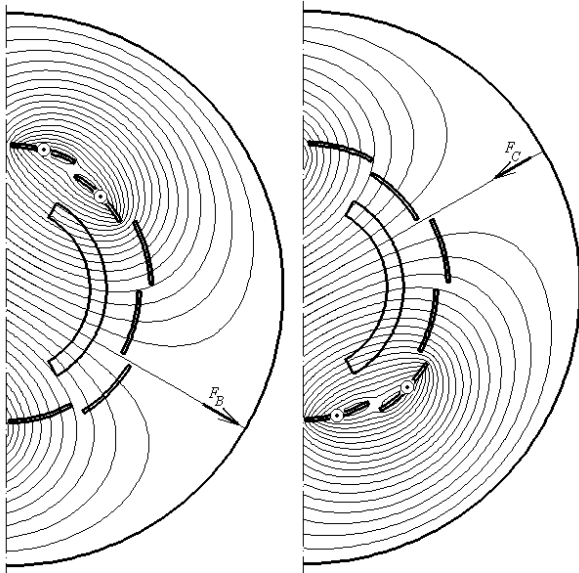


Рис.3. Магнитное поле фазы $B-B'$ (слева) и фазы $C-C'$ (справа) обмотки статора

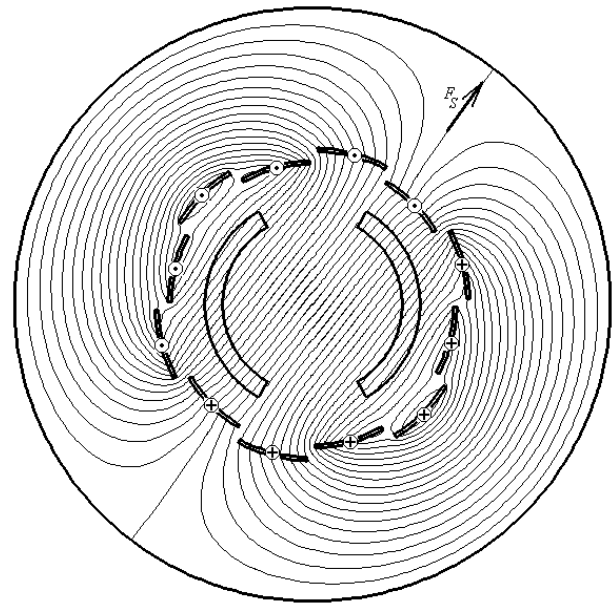


Рис.4. Магнитное поле трехфазной обмотки статора

при ее совместном действии с обмоткой ротора получались методом наложения с необходимыми поворотами составляющих полей и учетом мгновенные значений МДС. Отсчет времени принят от того момента, когда СПОВ и, значит, ротор занимают позицию, показанную на рис.1 и рис.2, с их дальнейшим вращением по движению стрелок часов. В момент времени $t=0$ верхняя полуось ротора совпадает с линией сетки $i=1$.

Вращение ротора имитировалось поворотом его магнитного поля. Так, если верхнюю полуось ротора (противоположную направлению его МДС) надо поставить на линию сетки $i=n$, то следует провести следующее перераспределение ВМП

$$A_{z,j,i}^n = A_{z,j,i-n+1}, \quad (8)$$

что будет соответствовать повороту ротора на $n-1$ градус (угловой сеточный шаг составлял 1 градус).

Так как по направлению результирующая МДС трехфазной обмотки статора F_S должна отставать от МДС ротора на угол β (см.табл.1 и работу [7]), то ось, направленная противоположно F_S , должна быть ориентирована по радиальной линии сетки с номером $s=n-\beta$. Тогда, при заданном положении ротора ($i=n$), магнитное поле СПОЯ в любой момент времени получается суммированием масштабированных полей ее трех фаз

$$A_{z,S,j,i} = a_i A_{z,A,j,i} + b_i A_{z,B,j,i} + c_i A_{z,C,j,i}, \quad (9)$$

где масштабные множители определяются с учетом мгновенных значений токов фаз следующим образом

$$a_i = \cos \varphi_i; \quad b_i = -\cos(\varphi_i - \frac{2}{3} \pi); \quad c_i = -\cos(\varphi_i + \frac{2}{3} \pi),$$

где $\varphi_i = \frac{\pi(s-1)}{i_m-1}$ - угловое положение МДС F_S .

Полученная картина магнитного поля СПОЯ и мгновенные направления токов в ее катушках при $t=0$ представлены на рис.4, причем $A_{Smax}=0,1901$ Вб/м.

Для получения магнитного поля в режиме нагрузки в любой момент времени, надо установить

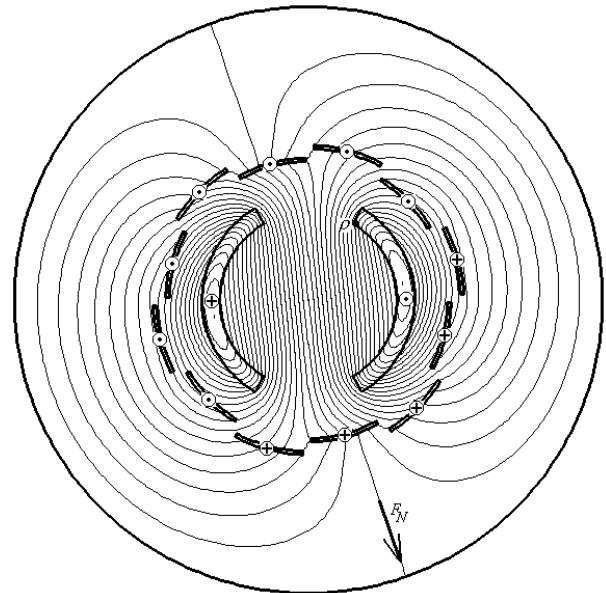


Рис.5. Магнитное поле в режиме номинальной нагрузки

ось СПОВ с ее полем на соответствующую линию сетки n , по формуле (9) пересчитать распределение поля СПОЯ, скорректировать распределение ВМП режима ХХ

$$A_{z,Xном,j,i} = A_{z,X,j,i} \frac{F_{fном}}{F_{fX}}. \quad (10)$$

с МДС F_{fX} на МДС $F_{fном}$ и наложить эти поля. Одна из картин поля в режиме номинальной нагрузки (НН) дана на рис.5 для момента времени $t=0$ (показано направление результирующей МДС F_N , и в данном случае величина $A_{Nmax}=0,7268$ Вб/м). Так изменением n от 1 до i_m-1 вращается результирующее поле на половину оборота с шагом в один градус. При этом проходит полпериода изменения всех величин (этого достаточно для распространения данных на вторую его половину).

РАСЧЕННЫЕ ДАННЫЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИХ АНАЛИЗ

По рассчитанным распределениям ВМП можно получить целый ряд электромагнитных величин, как, например, в [7,10]. В данной работе анализ начнем с магнитной индукции, составляющие и модуль которой определяются по следующим известным формулам

$$B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial \varphi}; \quad B_\varphi = -\frac{\partial A_z}{\partial r}; \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_\varphi^2}. \quad (11)$$

Так как индуцирует ЭДС в СПОЯ радиальная составляющая B_r , то будем оперировать именно с ней.

Сначала на рис.6 представлено мгновенное распределение $B_r(\varphi)$ при указанных в подписи условиях.

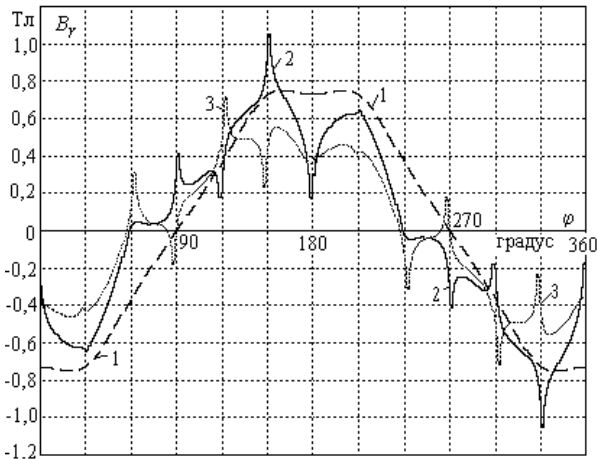


Рис.6. Распределение $B_r(\varphi)$: 1 - поле СПОВ при $F_{ном}$ на среднем радиусе СПОЯ; 2,3 - поле в режиме НН на радиусах R_{a1} и R_{a2} (все для $t=0$ или $n=1$)

Для анализа гармонического состава получаемых функций они раскладываются по координате φ в гармонический ряд Фурье по известным правилам [11]

$$B_r = \sum_{k=1,3,5...}^{\infty} B_{m,k} \sin(k\varphi + \zeta_k). \quad (12)$$

Так, в режиме ХХ при F_{fx} для функции $B_r(\varphi)$ на среднем радиусе СПОЯ (аналог кривой 1 на рис.6) получена амплитуда первой гармоники $B_{m,1}=0.5427$ Тл, а гармонический состав представлен в табл.2 амплитудами гармоник соответствующих номеров k в безразмерной форме (за базу принято значение $B_{m,1}$). Здесь и далее приводятся только те гармонические составляющие, которые имеют еще заметное значение.

Та же функция и в том же месте, но в режиме НН имеет $B_{m,1}=0.5865$ Тл, а гармонический состав представлен в табл.3 и соответствует кривой 2 на рис.7.

Таблица 2. Гармонический состав $B_r(\varphi)$ на среднем радиусе СПОЯ в режиме ХХ

$k=1$	$k=5$	$k=7$	$k=11$	$k=13$
1.000	0.051	0.017	0.002	0.001

Таблица 3. Гармонический состав $B_r(\varphi)$ на среднем радиусе СПОЯ в режиме НН при повороте ротора на линию $n=172^\circ$

$k=1$	$k=5$	$k=7$	$k=11$	$k=13$
1.000	0.053	0.092	0.088	0.011
0.018	0.018	0.037	0.016	0.017

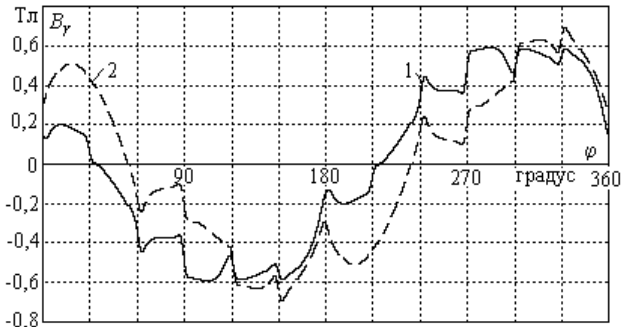


Рис.7. Распределение $B_r(\varphi)$ в режиме НН на среднем радиусе СПОЯ: 1 - при повороте оси ротора на 141° ; 2 - на 171° (то есть с временным интервалом в $1/12$ периода)

1.000	0.053	0.092	0.088	0.011
$k=17$	$k=19$	$k=23$	$k=25$	$k=35$
0.018	0.018	0.037	0.016	0.017

Как известно из общепринятой теории электрических машин переменного тока [12,13], для их якорных обмоток рассматривается координатное распределение МДС вдоль зазора, а по этому распределению получается распределение магнитной индукции. Эти распределения раскладываются в гармонические ряды Фурье с последующим получением временной функции ЭДС в обмотке якоря. Так вот, если следовать этой логике, то полученные на рис.6 и 7 кривые $B_r(\varphi)$ и их гармонический состав (табл.3) в режиме НН могут внушить пессимизм относительно возможности рассматриваемого ПСПГ создать в обмотке якоря ЭДС приемлемой, близкой к синусоиде, формы. К тому же, сравнение двух кривых на рис.7, зафиксированных в различные моменты времени, в данном случае не подтверждает общепринятого предположения о вращении некоторого стабильного распределения магнитного поля.

Однако дальнейший анализ позволяет преодолеть этот пессимизм, так как указанная классическая логика [12,13] представляется нам ошибочной, ибо коор-

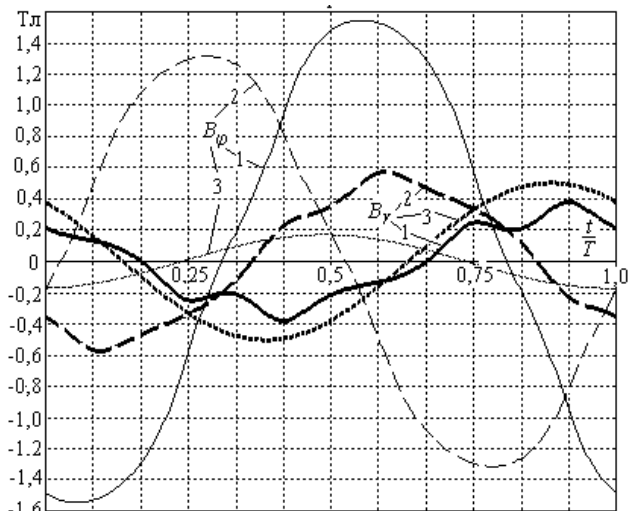


Рис.8. Функции $B_\varphi(t)$ и $B_r(t)$ в режиме НН за период T в двух фиксированных точках: 1 - на нижнем краю модульной катушки $k2$ фазы $A-A'$ СПОЯ (см.рис.1); 2 - на среднем радиусе СПОЯ на оси $\varphi=0$; 3 - там, где и 2, но только поле СПОЯ

динатное распределение $B_r(\varphi)$ не следует трансформировать во временные функции ЭДС обмотки якоря и, тем более, в их гармонический состав.

Как первый шаг к оптимизму, представим на рис.8 временные функции $B_\varphi(t)$ и $B_r(t)$, полученные в процессе вращения ротора и магнитного поля СПОЯ, для некоторых фиксированных точек в зоне расположения последней. В отличие от $B_r(\varphi)$ на рис.6 и 7, функции $B_r(t)$ на рис.8 в значительной мере более гладкие и приближаются по форме к синусоидам.

Так, разложение $B_r(t)$ в гармонический ряд по t

$$B_r = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} B_{m,k} \sin(k\omega t + \gamma_k) \quad (13)$$

для кривой 2 на рис.8 дало гармонический состав, представленный в табл.4, причем для первой гармоники амплитуда $B_{m,1}=0.5274$ Тл ($\omega=2\pi f$).

Таблица 4. Гармонический состав $B_r(t)$ в фиксированной точке на среднем радиусе СПОЯ в режиме НН

$k=1$	$k=5$	$k=7$	$k=11$	$k=13$
1.000	0.0764	0.0247	0.0033	0.0013

Этот гармонический состав отличается в лучшую сторону от представленного в табл.3, но не может считаться приемлемым для фазной ЭДС $e_A(t)$. Но между точечной функцией $B_r(t)$ и функцией $e_A(t)$ также нет прямой связи.

Для ПСПГ представляют интерес еще величины магнитной индукции B в сверхпроводящих элементах СПОВ, СПОЯ и СПЭ. Так, максимальные значения B_{max} , в таких элементах уже приведены в [7]. А временные функции магнитной индукции, подобные представленным на рис.8, нужны для вычисления потерь в сверхпроводниках и других элементах СПОЯ. Кроме того, проведенные здесь расчеты позволяют выявить пульсации магнитного поля в зоне расположения СПОВ, которые, как известно[1-3], для неё весьма неблагоприятны. Такие пульсации вызваны неидеальной структурой вращающегося магнитного поля обмотки статора (см.рис.7) и их можно выявить для любой точки в сечении СПОВ, а также для любого элемента конструкции вращающегося ротора. Для примера отметим, что в точке ρ на рис.5 в сечении СПОВ функция $\Delta B(t)$ имеет широкий спектр гармоник с размахом колебаний в 0,035 Тл при абсолютном максимуме индукции B_{max} , равном 2,67 Тл.

МАГНИТНЫЕ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В СПОЯ

Реальный анализ формы ЭДС в СПОЯ возможен только исходя из временных функций магнитных потоковосцеплений фазных обмоток статора. Поэтому именно эти функции необходимо определить на основе расчета магнитных полей, оставив упражнения с магнитной индукцией.

Для магнитного потоковосцепления, например, фазы $A-A'$ СПОЯ, исходным является выражение [7,14]

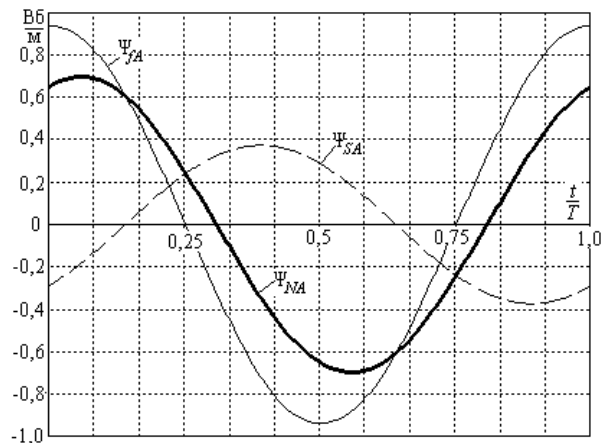


Рис.9. Функции магнитного потоковосцепления фазы $A-A'$ СПОЯ за период оборота ротора T : Ψ_{fA} - от поля СПОВ при $F_{\text{ном}}$; Ψ_{SA} - от СПОЯ; Ψ_{NA} - при НН

$$\Psi_A = \frac{2}{S_A} \int_{S_A} A_z dS, \quad (14)$$

где интегрирование проводится по общей площади поперечного сечения S_A сторон обеих модульных катушек этой фазы в секторе $acdba$ (рис.1). Значение Ψ_A по (14) будет приходиться на единицу аксиальной длины и один усредненный виток, а удвоение учитывает наличие вторых сторон катушек в секторе $acdea$.

Принцип вычислений Ψ_A с учетом сеточной аппроксимации по полученному распределению ВМП представлен в [7,10]. Если в формуле (14) используется распределение ВМП, созданного СПОЯ, то получаем магнитное потоковосцепление фазы $A-A'$ от реакции якоря Ψ_{SA} . Если это распределение ВМП, созданного СПОВ, то взаимное магнитное потоковосцепление СПОВ и фазы $A-A'$ СПОЯ Ψ_{fA} , если поле в режиме нагрузки, то результирующее магнитное потоковосцепление Ψ_{NA} . Рассчитанные временные функции этих величин представлены на рис.9, а гармонический состав ряда по формуле, аналогичной (13), - в табл.5.

Таблица 5. Гармонический состав $\Psi_{fA}(t)$ в режиме ХХ при $F_{\text{ном}}$ ($\Psi_{m,1}=0.9391$ Вб/м) и $\Psi_{NA}(t)$ для НН ($\Psi_{m,1}=0.6966$ Вб/м)

Режим	$k=1$	$k=5$	$k=7$
ХХ	1.000	0.0028	0.0006
НН	1.000	0.0037	0.0008

Еще отметим, что функция $\Psi_{fA}(t)$ - чистая синусоида с амплитудой $\Psi_{m,1}=0.3727$ Вб/м (гармоник кроме первой нет). То есть для характера $\Psi_{fA}(t)$ никакой роли не играет форма, шаг и расположение фазных обмоток статора: временная функция $\Psi_{fA}(t)$ полностью подобна временным функциям токов в фазах обмотки статора, а они в данной работе предполагаются синусоидальными, что отражено в расшифровке к формуле (9).

Подготовленные данные - временные функции магнитных потоковосцеплений фазы обмотки статора, позволяют перейти к основным величинам в данной

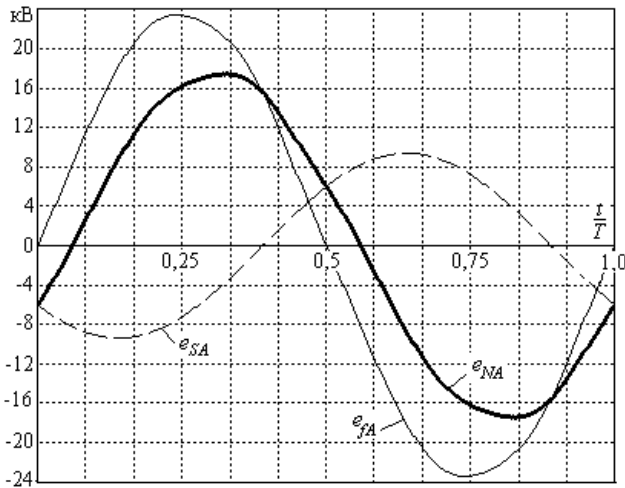


Рис.10. Временные функции ЭДС фазы А-А' СПОЯ за период T оборота ротора: e_{fA} - от поля СПОВ при $F_{\text{ном}}$; e_{SA} - от поля СПОЯ; e_{NA} - при НН

работе - ЭДС в этой обмотке. Такая ЭДС, например, для фазы А-А' определяется на основании закона электромагнитной индукции, и в данном случае

$$e_A = -w_a l_a \frac{d\Psi_A}{dt}. \quad (15)$$

Используя данные табл.1 и проведя численное дифференцирование функций магнитного потокосцепления (рис.9) фазной обмотки статора, получили ЭДС последней для соответствующих режимов. Графики этих ЭДС представлены на рис.10, а гармонический состав для ЭДС в режиме НН - в табл.6.

Из рис.10 и гармонического состава (табл.6) очевидно, что ЭДС по характеру весьма близка к чистой синусоиде, так как амплитудные значения имеющихся практически только пятой и седьмой гармоник относительно малы.

Таблица 6. Гармонический состав $e_{NA}(t)$ в режиме НН ($E_{m1}=17500$ В)

$k=1$	$k=5$	$k=7$
1.000	0.0186	0.0053

Наличие этих высших гармоник, как и гармоник в функции потокосцепления (табл.5) обусловлено некоторым отличием формы магнитного поля СПОВ от синусоидального характера. Именно усредненная форма функций $B_r(\varphi)$, созданной обмоткой вращающегося ротора, для совокупности точек в сечении катушек фазы СПОЯ непосредственно трансформируется во временную функцию ЭДС $e_{fA}(t)$. Сама же СПОЯ для своей ЭДС высших гармоник не создает, так как они отсутствуют во временной функции ее собственного магнитного потокосцепления. Если же идти от обычной теории обмоток машин переменного тока [12,13], что уже отмечено выше с пессимизмом, то можно было бы прийти к ложному выводу о весьма неблагоприятном гармоническом составе ЭДС обмотки статора ПСПГ.

ВЫВОДЫ

1. Представленная методика анализа ЭДС в обмотке статора ПСПГ, построенная на многопозиционных расчетах магнитного поля, позволяет выявить реальную форму этой ЭДС. При этом использование пространственных распределений магнитной индукции неприемлемо, а допустимо оперирование непосредственно с временными функциями магнитных потокосцеплений фазных обмоток статора.

2. Проведенный анализ позволил выявить, что временные функции ЭДС в СПОЯ рассмотренного ПСПГ достаточно близка к синусоидальной, хотя и имеются гармонические составляющие выше первой, но их амплитуды относительно малы. Отличие от чисто синусоидального характера вызвано несинусоидальным характером формы магнитного поля вращающейся СПОВ, сама же СПОЯ при синусоидальном характере ее токов не создает в себе высших гармоник.

3. Проведенный анализ гармонического состава пространственных и временных функций магнитной индукции, потокосцеплений и ЭДС позволяет заключить, что принятое в классической теории обмоток машин переменного тока разложение пространственного распределения МДС этих обмоток не может трансформироваться в форму и гармонический состав их же ЭДС. Временной характер ЭДС в обмотке статора, вызванной реакцией якоря, предопределяется только временными функциями токов этой обмотки. Этот вывод, полученный на примере ПСПГ, в равной мере может быть распространен и на электрические машины переменного тока обычной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сверхпроводящие машины и устройства. Под ред. 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] Болух В.Ф., Данько В.Г., Кожемякин С.М. Аналіз конструкцій та тенденцій 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.
- [4] Brunet Y., Tixador P., Nuhart H. Cryogenic conception for full superconducting generators: realization of superconducting armature cryostat // Cryogenics.-1988.-Vol.28.-111-p.751-755.
- [5] 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.-12.-P.1237.-1240.
- [6] Данько В.Г., Болух В.Ф. Концепция полностью сверхпроводникового криотурбогенератора без магнитопровода // Техн. електродинаміка,2000.-№3.-С.38-43.
- [7] Мильх В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета полностью сверхпроводникового криотурбогенератора на основе решения полевых задач // Електротехніка і електромеханіка.-2002.-№1.-С.43-48.
- [8] Турбогенераторы. В.В.Титов, Г.М.Хуторецкий, Г.А.Загородная и др.- Л.: Энергия, 1967.-895 с.

- [9] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.- 1982.-№12. -С.46-49.
- [10] Милых В.И. Электродинамические условия в пазах якоря машины постоянного тока // Электротехника.- 1992.-№10-11. -С.36-43.
- [11] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.- 832 с.
- [12] Êîíîðàéè Ì.Ì., Ìåìîðèàíååé Ë.Ì. Ýååòòðå+àíååà ìàèåíó. Ë.: Ýíàðäåý, 1972.- 544 ñ.
- [13] Âèóàâé Á.Ë. Ýååòòðå+àíååà ìàèåíó. Ë.: Ýíàðäåý, 1978.- 832 ñ.
- [14] Теоретические основы электротехники. Том III. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля. Под ред.П.А.Ионкина. М.: Высшая школа, 1976.-383 с.

АНОТАЦИЯ СТАТЬИ

Milykh V.I., Polyakova N.V.

Analysis of Magnetic Field and Electromotive Forces in a Fully Superconducting Cryoturbogenerator (with an Unbiased View on Armature Reaction)

The paper presents analysis of magnetic field and electromotive forces (EMF) in armature winding in a turbogenerator with superconducting windings and an outer shield. The EMF analysis technique is based on time functions of stator phase windings magnetic linkage. Transient values of the linkage are determined at the rotor rotation and at changes in the stator currents by means of numerical magnetic field calculations at various generator excitation modes. There is an example of EMF analysis for a 500 MW superconducting generator.

Key words - superconducting turbogenerator, magnetic field, electromotive forces

СПИСОК АВТОРОВ

Милых Владимир Иванович

Полякова Наталия Владимировна