

УДК 621.313

**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»****В.И. Милых, д-р техн. наук, Н.В. Полякова****ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
И РАЗНЫХ ВИДОВ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ  
В МОЩНОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ**

*Представлены принцип и результаты численно-полевого анализа разных режимов возбуждения и видов реакции якоря турбогенератора. Показаны выбор факторов возбуждения магнитного поля и метод определения на его основе магнитного потокосцепления, ЭДС и фазовых соотношений между ними и токами. Представлены картины магнитных полей во всех режимах, а также дан принцип построения соответствующих векторных диаграмм. Проведенные исследования могут быть основой совершенствования проектирования турбогенераторов и других электрических машин.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, численно-полевого анализ, магнитные поля, режимы возбуждения, виды реакции якоря, векторные диаграммы

**В.І. Мілих, Н.В. Полякова****Чисельно-польовий аналіз режимів збудження і різних видів реакції якоря в потужному турбогенераторі**

*Подані принцип і результати чисельно-польового аналізу різних режимів збудження і видів реакції якоря турбогенератора. Показані вибір чинників збудження магнітного поля і метод визначення на його основі магнітного потокосцеплення, ЕРС і фазових співвідношень між ними і струмами. Представлені картини магнітних полів у всіх режимах, а також поданий принцип побудови відповідних векторних діаграм. Виконані дослідження можуть бути основою вдосконалення проектування турбогенераторів і інших електричних машин.*

**Ключові слова:** турбогенератор, чисельно-польовий аналіз, магнітні поля, режими збудження, види реакції якоря, векторні діаграми

**V.I. Milykh, N.V. Polyakova****The numerical field analysis of excitation modes and of the different types of the armature reaction in a powerful turbogenerator**

*Principle and the results numerical field analysis of the different excitation modes and of the different types of the armature reaction of powerful turbogenerator are presented. A selection of the factors of the magnetic field excitation in the idle mode, the rated load and short-circuit, as well as those specific modes that are characterized by longitudinal demagnetizing and magnetizing and more cross-reaction of the armature excitation of the magnetic field only the stator winding along the longitudinal and transverse axes of the rotor is shown. The principle, which allows by the results of the calculation of the magnetic field in each mode to determine the key electromagnetic values (magnetic flux and EMF) and the phase relationship between them and the currents is considered. The pictures of the magnetic fields are graphically presented in all modes, and also principle of construction of the corresponding vector diagrams is presented on the basis of calculation of these fields. In the original received vector diagrams it is possible to qualitatively and quantitatively identify the share and role of the magnetic field of the rotor and the stator magnetic field. The conducted research can be the basis for improving the system of study, analysis and design of turbogenerators and other electric machines because the considered method of analysis of magnetic fields is quite universal*

**Key words:** turbogenerator, numerical-field analysis, magnetic fields, modes of excitation, types of the armature reaction, vector diagrams

**Введение.** Принцип действия электрических машин (ЭМ) построен на существовании и взаимодействии магнитных полей (МП) [1, 2]. Поэтому дальнейшее развитие системы изучения, расчета и проектирования ЭМ возможно, прежде всего, на основе совершенствования расчетов именно МП.

В синхронных электрических машинах (СЭМ) и, особенно, в мощных турбогенераторах (ТГ) принято рассматривать ряд режимов возбуждения МП и для них важную роль играет реакция якоря. Соответственно, в теории и проектировании этих машин значительное место отводят анализу и учету этого явления [1, 2]. При этом используются классические подходы, основанные на теории магнитной цепи. Такие подходы связаны с целым рядом допущений и условностей и потому сопряжены не с реалистичными, а с воображаемыми картинками МП. Это не позволяет адекватно учесть взаимодействие МП статора и ротора, насыщение магнитопровода при нагрузке СЭМ и в других сложных для анализа режимах.

С развитием численных методов расчета МП [3, 4], которые применительно к ЭМ практически не имеют серьезных допущений, появилась возможность более детального и всестороннего анализа любых режимов возбуждения и видов реакции якоря СЭМ. В данной работе приводится принцип такого анализа на примере крупного ТГ.

**Целью этой работы** является численно-полевой анализ разных режимов возбуждения и видов реакции якоря мощного ТГ. При

этом внимание сосредотачивается на выборе факторов возбуждения МП, обеспечивающих заданный режим и необходимый вид реакции якоря, на выявлении естественных ограничения при их выборе. Важным является также то, как по рассчитываемым численно МП определить электромагнитные величины (магнитные потокосцепления и ЭДС) и фазовые соотношения между ними и токами. Под факторами возбуждения понимаются токи обмоток ротора и статора и фазовые соотношения между ними, под видом реакции якоря подразумеваем продольную размагничивающую и подмагничивающую, поперечную и смешанную.

К результатам работы относятся еще полученные реалистичные картины силовых линий МП при разных видах возбуждения и реакции якоря ТГ, а также принцип построения соответствующих векторных диаграмм.

**Объект исследования.** Демонстрация расчетов проводится на трехфазном ТГ, имеющем числа пар полюсов  $p=1$  и параллельных ветвей обмотки статора  $a_s = 2$ , зазор 0,1 м; активную длину  $l_a = 4,55$  м; диаметр ротора 1,075 м; относительное укорочение обмотки статора  $4/5$ , числа последовательных витков фазной обмотки статора  $N_s = 10$ , обмотки ротора  $N_f = 180$ . Номинальные параметры ТГ: активная мощность  $P_N = 235$  МВт; фазные напряжения и ток  $U_{sN} = 9093$  В;  $I_{sN} = 10135$  А; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN} = 0,85$ ; частота  $f=50$  Гц.

Электромагнитная система ТГ представ-

лена на рис.1. Показаны места расположения фазных зон обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$ , а явно структура стержней в пазах дана их затемнением для первой из этих фазных обмоток. Ориентация полярных координат  $(r, \alpha)$  и положительных направлений токов в обмотках введена в [5], а здесь показаны направления мгновенных токов в режиме номинальной нагрузки (НН).

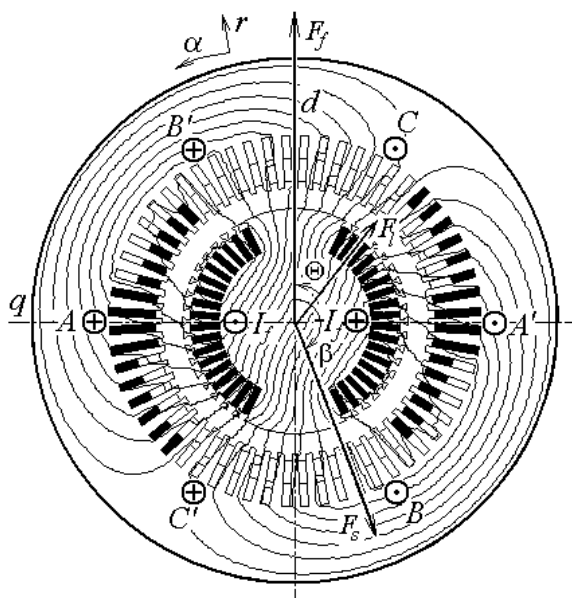


Рис.1. Электромагнитная система ТГ и магнитное поле в режиме НН ( $A_{max}=0,6352$  Вб/м)

**Теоретические основы расчета магнитного поля и фазовых соотношений в ТГ.** Магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается известным дифференциальным уравнением

$$\text{rot} \left[ \frac{1}{\mu} \text{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где  $A_z$ ,  $J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\vec{k}$  – орт по аксиальной оси  $z$ . На гра-

нице области расчета – внешней поверхности сердечника статора принималось граничное условие Дирихле  $A_z = 0$ .

Численные расчеты магнитных полей проводились методом конечных элементов по программе FEMM [3]. Главным результатом расчета магнитного поля являлось распределение ВМП  $A_z(r, \alpha)$ . Наглядно структуры магнитных полей представлялись картинками силовых линий – по сути это линии равного ВМП  $A_{z,*} = \text{const}$ . Здесь  $A_{z,*}$  – относительные значения ВМП, нормированного максимальным во всей области расчета абсолютным значением  $A_{max}$ , по которому можно не только качественно, но и количественно сравнивать общий уровень магнитного поля в разных расчетных режимах.

В симметричной трехфазной обмотке статора оперировали с фазной обмоткой  $A-A'$  (рис.1). Ключевой величиной для нее является магнитное потокоцепление (МПС) [4-7], определяемое по найденному распределению ВМП:

$$\Psi_A = N_s I_a \left( \frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (2)$$

где  $S_A$ ,  $S_{A'}$  – площади сечения по всем токонесущим элементам фазных зон  $A$  и  $A'$ ;  $K_A$ ,  $K_{A'}$  – числа конечных элементов их дискретизации;  $A_{z,av,j}$  – среднее значение ВМП в  $j$ -том элементе площадью  $\Delta S_j$ .

Структура магнитного поля конкретного расчетного режима предопределяется соотношением тока обмотки ротора  $I_f$  и симметричной системы фазных токов обмотки статора, приходящихся на параллельные ветви и соответствующие стержни в пазах:

$$\begin{aligned} i_{A,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t + \beta); \\ i_{B,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \beta); \\ i_{C,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $I_m = \sqrt{2} I_s$  – амплитуда,  $I_s$  – действующее значения фазного тока;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $t$  – время;  $\beta$  – начальная фаза, предопределяющая направление действия МДС обмотки статора  $F_s$  по отношению к продольной оси ротора  $d$ , по которой действует МДС обмотки возбуждения  $F_f$ , что показано на рис.1 (при расчетах задавались мгновенные значения фазных токов при  $t = 0$ ).

Основой выявления фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ является разложение угловой функции МПС фазной обмотки статора  $\Psi(\alpha)$  в ряд Фурье [5, 8]. С этой целью после расчета магнитного поля его структура (рис.1) фиксируется, а, значит, является фиксированным распределение ВМП. Тогда остается «собрать» МПС фазной обмотки  $A-A'$  по формуле (2), задавая ее условные позиции со сдвигом на зубцовое деление  $\Delta\alpha$ , как это было представлено в [5, 7]. С учетом периодичной струк-

туры магнитного поля ТГ число таких позиций  $K$  должно быть таким, чтобы пройти полюсное деление, т.е. в условиях рассматриваемого ТГ  $K=30$ .

В каждой позиции по формуле (2) производится определение МПС  $\Psi_A$  и таким способом для фазной обмотки статора получается в численной форме угловая функция МПС на половине ее периода

$$\Psi_k(\alpha_k); \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; k=1,2,3,\dots K. \quad (4)$$

Полученная дискретная численная угловая функция (4) раскладывается в гармонический ряд Фурье [5, 8]:

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^K \Psi_{m,v} \cos(v\alpha + \zeta_v). \quad (5)$$

При вращении магнитного поля угловая позиция фазной обмотки относительно магнитного поля изменяется и тогда с учетом

$$\alpha = \frac{\omega}{p} \cdot t \quad (6)$$

функция МПС (5) становится временной. Тогда на основе закона электромагнитной индукции имеем гармонический ряд временной функции фазной ЭДС

$$e_A = \omega \sum_{v=1,3,5,\dots}^K v \Psi_{m,v} \cos\left(v\omega t + \zeta_v - \frac{\pi}{2}\right). \quad (7)$$

Дальше оперируем, как принято и в [1], только с первыми гармониками МПС и ЭДС (действительно, более высокие гармоники, как показано в [6], весьма незначительны). Поэтому в (5) нас интересуют амплитуда  $\Psi_{m,1}$  и аргумент  $\zeta_1$  (начальная фаза) МПС при  $v=1$ . Для упрощения записей далее индекс 1 не пишем, а к  $\Psi$  и  $\zeta$  будем добавлять,

при необходимости, индекс соответствия конкретному режиму возбуждения ТГ.

Из (7) действующее значение фазной ЭДС первой гармоники

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Psi_m. \quad (8)$$

Систему фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ проиллюстрируем с использованием векторной диаграммы (ВД), представленной на рис.2, для режима НН, картина магнитного поля для которого дана на рис.1.

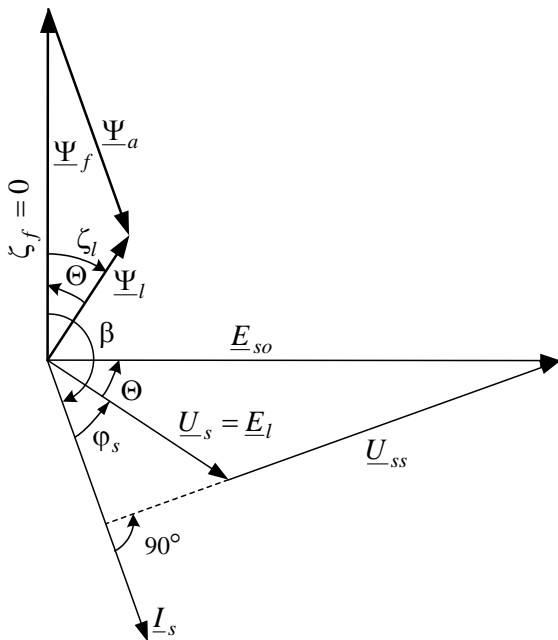


Рис. 2. Векторная диаграмма ТГ для режима номинальной нагрузки

Для упрощения, с целью большей наглядности, в данной работе пренебрегаем активным сопротивлением обмотки статора, что для мощного ТГ вполне естественно [1, 2], а также лобовым рассеянием магнитного поля. Фактически мы ограничиваемся процессами на активной длине ТГ. Именно на активной длине ТГ учитывается реакция якоря, а все остальные составляющие МПС

и соответствующие ЭДС в активной части будут автоматически учтены благодаря оперированию с единым магнитным полем ТГ и полным МПС фазной обмотки (2). При необходимости лобовое рассеяние и активное сопротивление обмотки статора могут быть учтены на основе полнофакторной расчетной модели ТГ, представленной в [7].

На ВД (рис.2) показаны векторы: МПС фазной обмотки:  $\underline{\Psi}_f$  – обусловлено полем обмотки ротора;  $\underline{\Psi}_a$  – обусловлено полем трехфазной обмотки статора (реакции якоря);  $\underline{\Psi}_l$  – результирующее МПС от единого поля ТГ;  $\underline{U}_s$ ,  $\underline{I}_s$  – фазные напряжение и ток;  $\underline{E}_{so}$  – фазная ЭДС, вызванная МПС  $\underline{\Psi}_f$ ;  $\underline{U}_{ss}$  – падение напряжения от действия реакции якоря (фактически  $\underline{U}_{ss} = -E_{ss}$ , где  $\underline{E}_{ss}$  – синхронная ЭДС, вызванная МПС  $\underline{\Psi}_a$ ). Из уравнений электромагнитных величин ТГ [1] в условиях принятых допущений следует, что  $\underline{\Psi}_l = \underline{\Psi}_f + \underline{\Psi}_a$ .

Представим взаимосвязь векторов на ВД, вытекающую из численного расчета магнитного поля. Исходя из соответствия ориентации пространственных векторов и условных вращающихся векторов, принятого в [5], вектор  $\underline{\Psi}_f$  ориентирован по продольной оси ротора  $d$ , как и МДС обмотки ротора  $\underline{F}_f$  на рис.1, а на рис.2 этот вектор становится базовым с нулевой начальной фазой  $\zeta_f = 0$ , следовательно, от него ведется отсчет прочих начальных фаз.

По методике из [7] для НН определено, что номинальное напряжение, коэффициент мощности и активная мощность достигаются при  $I_f = 2030,5$  А и  $\beta = -159,04^\circ$ . Именно под углом  $\beta$  проведен вектор  $\underline{I}_s$  на рис.2, а при  $I_s = I_{sN}$  мгновенные фазные токи по (3):  $i_{A,a} = -6692,3$  А;  $i_{B,a} = 1126,5$  А;  $i_{C,a} = 5565,5$  А. Это дало их конкретные направления на рис.1, а баланс токов задал направление МДС обмотки статора  $\underline{F}_s$ . После расчета магнитного поля (1) и разложения по (5) на основе числовых значений по (4), для  $\underline{\Psi}_l$  были найдены амплитуда этого МПС для НН  $\Psi_l = 40,93$  Вб и начальная фаза  $\zeta_l = -37,24^\circ$  – так проведен вектор  $\underline{\Psi}_l$ .

Между векторами МПС  $\underline{\Psi}_f$  и  $\underline{\Psi}_l$  получился фазовый сдвиг – это угол нагрузки [1]  $\Theta = \zeta_f - \zeta_l = 37,24^\circ$ . Вектор  $\underline{\Psi}_a$ , фактически символизирующий действие реакции якоря, совпадает по фазе с вектором  $\underline{I}_s$ . Пока  $\underline{\Psi}_f$  и  $\underline{\Psi}_a$  имели только направления, но их пересечение в построенном на основе  $\underline{\Psi}_l = \underline{\Psi}_f + \underline{\Psi}_a$  треугольнике предопределяет их длины, а значит и значения – в масштабе уже известного вектора  $\underline{\Psi}_l$ . Таким образом, в едином магнитном поле режима НН условно выделены составляющие  $\underline{\Psi}_f$  и  $\underline{\Psi}_a$  реально фигурирующего МПС  $\underline{\Psi}_l$ .

Результирующее МПС  $\underline{\Psi}_l$  порождает по (8) результирующую фазную ЭДС  $E_l$  (ин-

декс  $l$  соответствует режиму нагрузки), которая при принятых допущениях равна фазному напряжению:  $U_s = E_l$ , а для режима НН при работе на сеть бесконечной мощности они обязаны соответствовать  $U_{sN}$ .

Равенство действующих значений распространяется и на равенство векторов этих величин  $\underline{U}_s = \underline{E}_l$ . Все ЭДС, как и породившие их МПС, связаны соотношением  $\underline{E}_l = \underline{E}_{so} + \underline{E}_{ss}$  или  $\underline{U}_s = \underline{E}_{so} - \underline{U}_{ss}$  и образуют треугольник, подобный треугольнику векторов  $\underline{\Psi}_l$ ,  $\underline{\Psi}_f$  и  $\underline{\Psi}_a$ . Все ЭДС относительно своих МПС отстают по фазе на  $90^\circ$ , что отражено в (5), (7). Поэтому вектор фазного напряжения  $\underline{U}_s$  проводится с начальной фазой  $\zeta_U = \zeta_l - 90^\circ$  или, по-другому,  $\zeta_U = -\Theta - 90^\circ$ . Тогда выявляется фазовый сдвиг  $\varphi_s = -\beta - \Theta - 90^\circ$  между  $\underline{I}_s$  и  $\underline{U}_s$  и при НН получается  $\varphi_s = 31,79^\circ$ , что соответствует заданному значению  $\cos\varphi_{sN}$ .

Имея длину ( $U_s = 9093$  В) и направление вектора  $\underline{U}_s$ , стыкуем с ним вектор  $\underline{U}_{ss}$ , который должен быть перпендикулярным  $\underline{I}_s$  (это наследует перпендикулярность  $\underline{E}_{ss}$  и  $\underline{\Psi}_a$ ), до пресечения с вектором  $\underline{E}_{so}$ , который, в свою очередь, перпендикулярен  $\underline{\Psi}_f$ . В итоге отсечением векторов  $\underline{U}_{ss}$  и  $\underline{E}_{so}$  получаем их длины, и, тем самым, значения этих величин в масштабе вектора  $\underline{U}_s$ .

Определенные величины и фазовые соотношения ЭДС, тока, напряжений и МПС

дают основу для получения ряда других величин, например, активной мощности ТГ  $P_a = 3U_s I_s \cos \varphi_s$ , а также для анализа режимов возбуждения и видов реакции якоря в ТГ. При их анализе базовой величиной является номинальное фазное напряжение  $U_{sN}$ , которое при работе на сеть бесконечной мощности не зависит от режимов возбуждения (исключая режим короткого замыкания).

**Расчетные режимы возбуждения ТГ и разные виды реакции якоря.** Исходным является *режим холостого хода* (ХХ) при действии только МДС обмотки ротора  $F_f$ . Соответствующая ВД дана на рис.3, картина магнитного поля – на рис.4. Было определено, что ЭДС  $E_{so}$  по (8), равная номинальному напряжению  $U_{sN}$ , достигаются при токе возбуждения  $I_f = 822$  А.

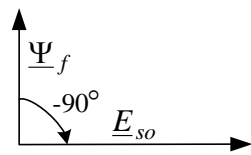


Рис.3. ВД в режиме ХХ

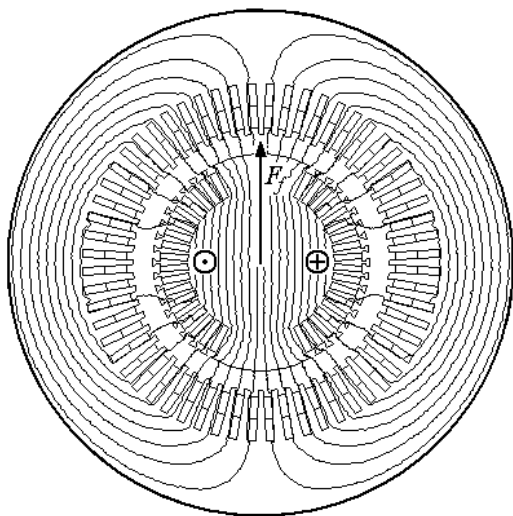


Рис.4. Поле обмотки ротора при  $I_f = 822$  А и  $U_s = 9093$  В ( $A_{max} = 0,5277$  Вб/м)

**Индивидуальное магнитное поле трехфазной обмотки статора**

рассчитано при продольном (рис.5) и поперечном (рис.6) действии ее МДС  $F_s$ , ВД даны на рис.7. В первом случае задано  $\beta = 0$  и напряжение  $U_{sN}$  обеспечивается при фазном токе  $I_s = 5671,9$  А, во втором –  $\beta = -90^\circ$  и для обеспечения  $U_{sN}$  понадобился несколько больший ток  $I_s = 5880,8$  А, что свидетельствует о различии магнитных свойств ТГ по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям.

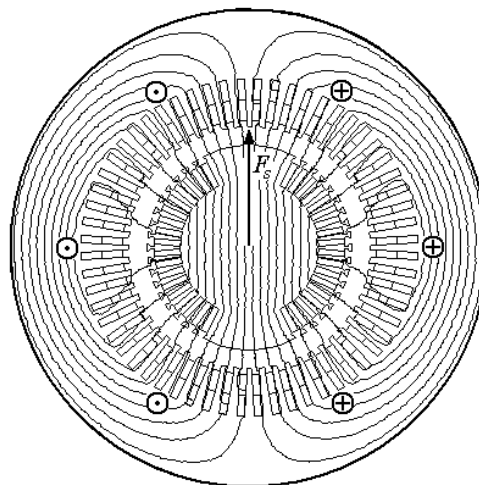


Рис. 5. Магнитное поле обмотки статора по продольной оси при  $I_s = 5671,9$  А ( $A_{max} = 0,5065$  Вб/м)

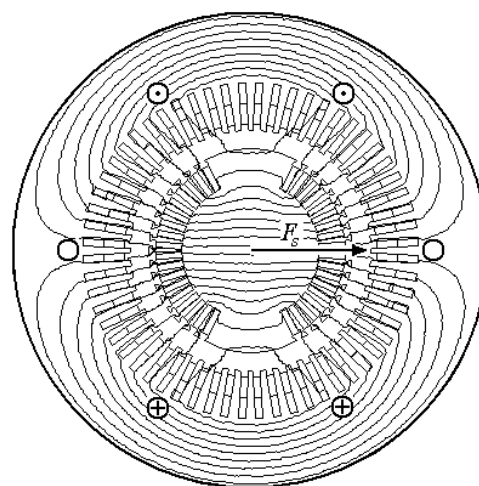


Рис. 6. Магнитное поле обмотки статора по поперечной оси при  $I_s = 5880,8$  А

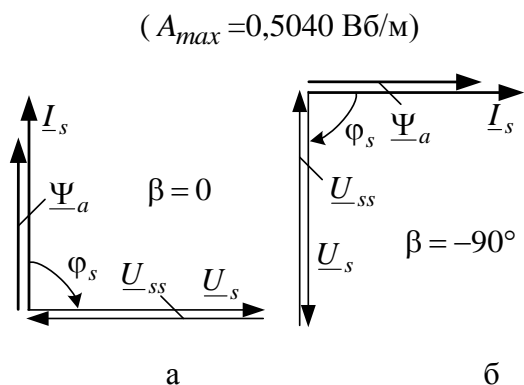


Рис. 7. ВД при продольном – а и поперечном – б поле обмотки статора

Варианты *совместного действия обмоток ротора и статора* при продольной реакции якоря представлены на рис.8 и на рис.9 – подмагничивающая и размагничивающая реакции якоря, которые обеспечиваются заданием в (3) соответствующих углов  $\beta$ : их значения очевидны на ВД (рис.10). При подмагничивании и размагничивании картины магнитных полей отличаются (рис.8 и рис.9), особенно в зазоре.

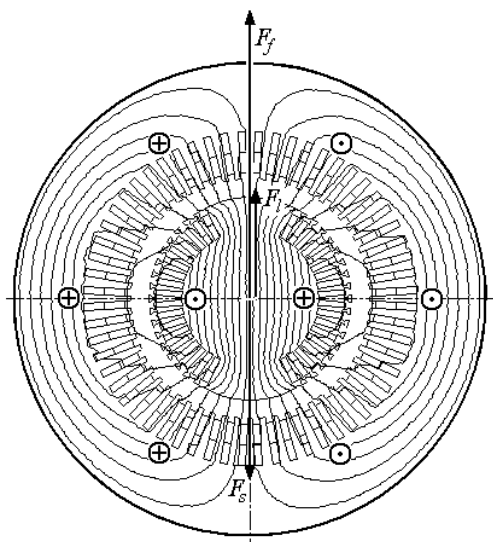


Рис. 8. Магнитное поле при продольной размагничивающей реакции якоря при  $I_s = 10135$  А и  $I_f = 2310,5$  А ( $A_{max}=0,6497$  Вб/м)

При *продольной размагничивающей реакции якоря* (рис.8 и рис.10, а) можно

было использовать номинальный фазный ток  $I_{sN} = 10135$  А. При этом для обеспечения  $U_{sN}$  понадобился ток возбуждения  $I_f = 2310,5$  А, который лишь немного превышает номинальный. На рис.8 МДС  $F_s$  и  $F_f$  действуют встречно и результирующая МДС  $F_l$  направлена в сторону  $F_f$ .

*При продольной подмагничивающей реакции якоря* (рис.9 и рис.10, б) токи обмоток не могут превышать значений, указанных в подписях к рис.4 и рис.5, а при совместном действии обмоток эти токи должны быть меньше указанных предельных значений, иначе нарушился баланс между ЭДС обмотки статора  $\underline{E}_l$  и напряжением сети  $\underline{U}_s$ , что физически невозможно.

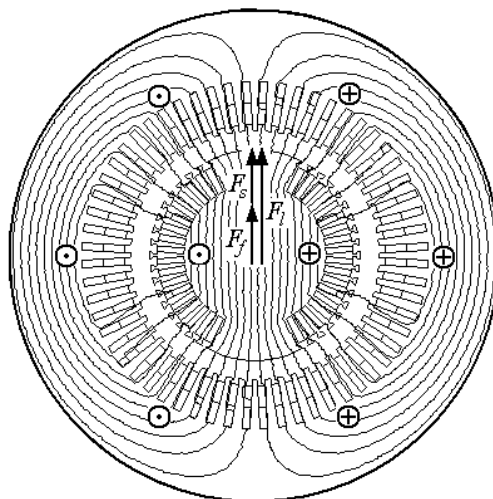


Рис. 9. Магнитное поле при продольной подмагничивающей реакции якоря при  $I_s = 5672$  А и  $I_f = 411$  А ( $A_{max}=0,4968$  Вб/м)

Для примера приняли половинное значение тока возбуждения из режима ХХ, т.е.  $I_f = 411$  А. Тогда фазный ток статора должен быть существенно меньше номинально-



го и для обеспечения  $U_{sN}$  понадобилось значение  $I_s = 5672$  А.

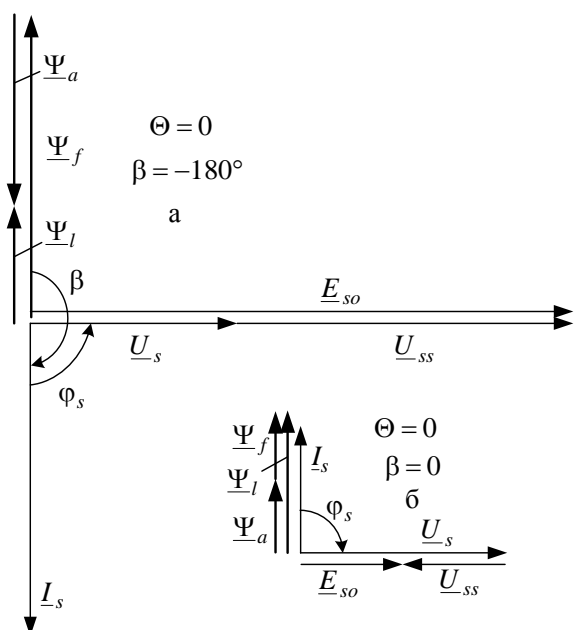


Рис. 10. ВД при продольной реакции якоря размагничивающей и подмагничивающей

В случаях продольной реакции якоря  $\Theta = 0$ , т.е. ТГ не несет активной нагрузки.

**Поперечная реакция якоря** возможна только при активно-емкостной нагрузке, задается посредством  $\beta = -90^\circ$  и зависит от конкретного фазового сдвига  $\phi_s$ . Магнитные поля и ВД для двух значений  $\phi_s$  представлены на рис.11-13.

Фазовый сдвиг  $\phi_s = -36,9^\circ$  (при  $\cos\phi_s = 0,8$ ) и поперечная реакция якоря (рис.11 и рис.13,а) обеспечивались при найденном конкретном соотношении токов  $I_s = 3530,8$  А и  $I_f = 655,3$  А. При этом ТГ способен нести активную мощность лишь  $P_a = 77,1$  МВт – существенно меньшую, чем номинальная.

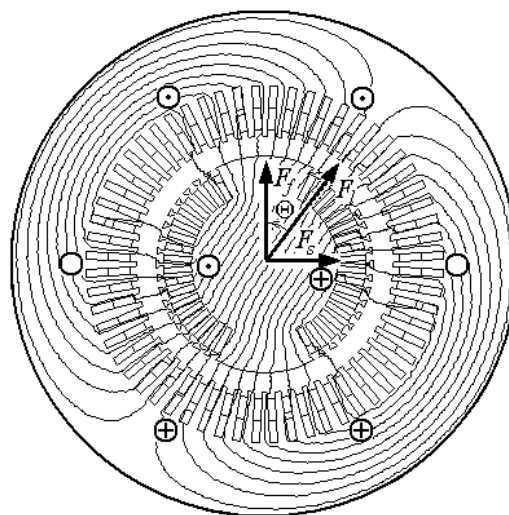


Рис. 11. Магнитное поле при поперечной реакции якоря для варианта  $\phi_s = -36,9^\circ$  при  $I_s = 3530,8$  А и  $I_f = 655,3$  А ( $A_{max} = 0,5183$  Вб/м)

Вариант поперечной реакции при вдвое увеличенном значении  $\phi_s$ , а именно при  $\phi_s = -73,8^\circ$ , был обеспечен при увеличении фазного тока статора до  $I_s = 5644,9$  А и соответствующем снижении тока возбуждения до  $I_f = 229,3$  А (рис.12 и рис.13,б). Активная мощность ТГ снизилась до 42,95 МВт.

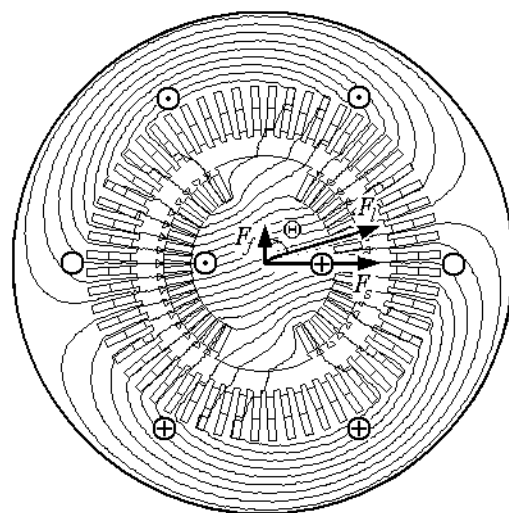


Рис.12. Магнитное поле при поперечной реакции якоря для варианта  $\phi_s = -73,8^\circ$  при  $I_s = 5644,9$  А и  $I_f = 229,3$  А ( $A_{max} = 0,5058$  Вб/м)

При рассмотренных вариантах поперечной реакции якоря угол нагрузки  $\Theta$  соответствует  $\varphi_s$  ( $\varphi_s = -\Theta$ ). Очевидно, что такая реакция якоря дает увеличение МПС обмотки статора от  $\underline{\Psi}_f$  до  $\underline{\Psi}_l$  (рис.13).

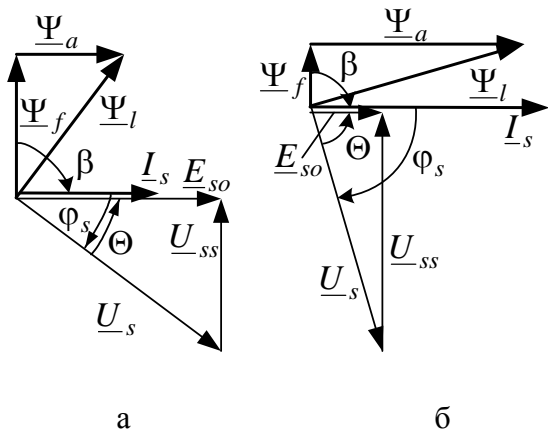


Рис. 13. ВД при поперечной реакции якоря при а)  $\varphi_s = -36,9^\circ$  и б)  $\varphi_s = -73,8^\circ$

Рассматриваемый ТГ рассчитан на работу с *продольно-поперечной реакцией якоря*, которая в целом является *размагничивающей*. Этот режим уже был продемонстрирован на рис.1 и рис.2 и он соответствует НН ТГ, обеспечивающей его заданные энергетические параметры.

Еще один интересный вариант МП и соответствующей ВД представлен на рис.14 и рис.15. Этот вариант соответствует *предельной нагрузке* при  $\Theta = 90^\circ$ . Такой режим обеспечивает конкретное соотношение: номинальный ток возбуждения  $I_f = 2030,5$  А; фазный ток статора  $I_s = 15380$  А, существенно превышающий номинальный, и  $\beta = -157,15^\circ$ . При этом достигается максимальная активная мощность  $P_{a\max} = 386,8$  МВт.

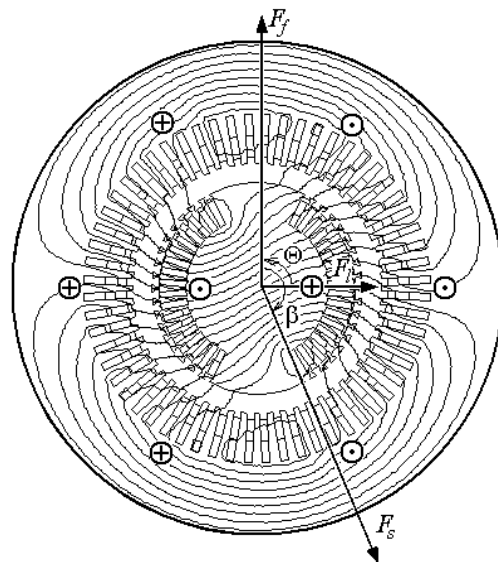


Рис.14. Режим нагрузки при  $\Theta = 90^\circ$ ;  
 $I_s = 15380$  А,  $I_f = 2030,5$  А  
 ( $A_{\max} = 0,5495$  Вб/м)

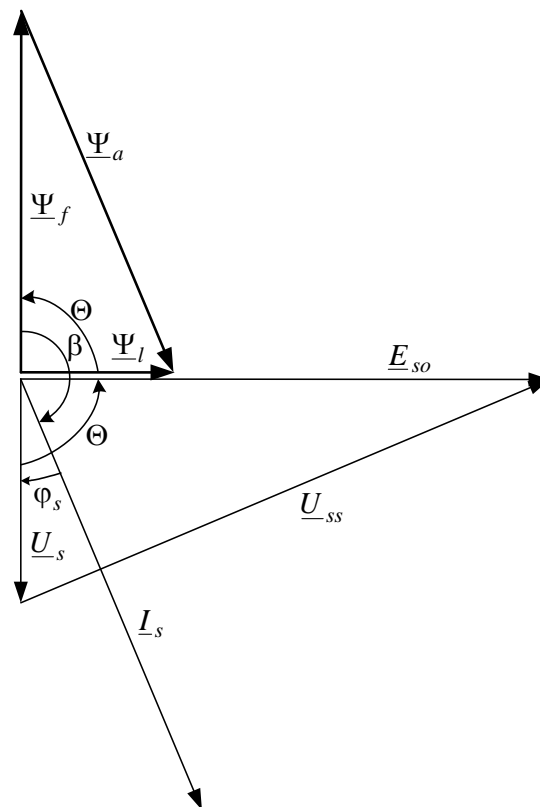


Рис. 15. ВД для предельного режима нагрузки при  $\Theta = 90^\circ$

Последним представим еще один режим возбуждения ТГ, соответствующий *установившемуся трехфазному короткому замыканию* (КЗ). В этом случае расчетным кри-

териум является условие  $U_s = 0$ , а реакция якоря является продольной ( $\beta = -180^\circ$ ) и полностью размагничивающей: результирующее МПС фазной обмотки статора  $\Psi_f$  также равно нулю.

Расчет режима КЗ проведен при токе возбуждения, соответствующем режиму ХХ (рис.4), т.е.  $I_f = 822$  А. Для выполнения отмеченных условий был итерационно определен необходимый ток статора  $I_s = 5742,3$  А. Соответствующие картина МП и ВД представлены на рис.16 и рис.17.

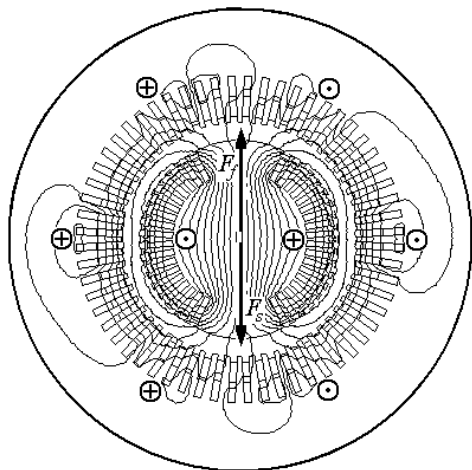


Рис.16. Магнитное поле в режиме КЗ при  $I_s = 5742,3$  А и  $I_f = 822$  А ( $A_{max} = 0,0718$  Вб/м)

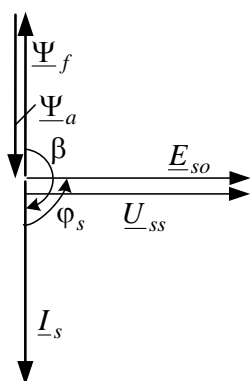


Рис.17. ВД для режима КЗ

По сравнению со всеми другими режимами, здесь совершенно иная структура магнитного поля: силовые линии проходят через сердечник ротора и замыкаются вдоль зазора и зубцовых структур

статора и ротора поперек пазов, хотя есть и другие локальные вихри МП.

В завершение отметим, что на рисунках с картинками магнитных полей векторы МДС для возможности наглядного сравнения выдержаны в едином масштабе.

### Выводы

1. Численные расчеты МП ТГ являются наиболее адекватным средством получения ключевых электромагнитных величин – МПС и ЭДС фазной обмотки статора, а также фазовых соотношений между ними и токами.

2. Векторные диаграммы, построенные на основе численно-полевых расчетов с учетом насыщения магнитопровода, получают новое наполнение и позволяют в явном виде выделить из единого МП части МПС и ЭДС, обеспечиваемые обмотками статора и ротора.

3. Проведенные расчеты позволили получить картины магнитных полей для практически всех режимов возбуждения турбогенератора и видов реакции якоря, не все из которых воспроизводились классическим подходом на основе теории магнитных цепей. Эти картины могут стать основой для уточнения системы проектирования турбогенераторов и, в принципе, других синхронных электрических машин.

### Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек.– Л.: Энергия, 1978.– 832 с.
2. Титов В.В. Турбогенераторы / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная, Г.П. Вартамян, Д.И. Заславский, И.А. Смотров. –Л.: Энергия,-1967.–895 с.

3. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.

4. *Милых В.И.* Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / В.И. Милых, Н.В. Полякова // *Электротехника і електромеханіка.*—2006.—№2.—С.40-46.

5. *Милых В.И.* Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе / В.И. Милых, Н.В. Полякова // *Электротехника і електромеханіка.*—2011.—№5.—С.33-38.

6. *Милых В.И.* Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов / В.И. Милых, Н.В. Полякова // *Технічна електродинаміка.*— 2013.—№3.—С.40-49.

7. *Милых В.И.* Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров / В.И. Милых, Н.В. Полякова // *Электротехника і електромеханіка.*— 2012.—№1.—С.36-41.

8. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн.—М.: Наука, 1973.— 832 с.

#### **Spisok literatury**

1. Voldek A.I. Elektricheskiye mashiny / A.I. Voldek.— L.: Energiya, 1978.— 832 s.

2. Titov V.V. Turbogeneratory / V.V. Titov, G.M. Hutoreckij, G.A. Zagorodnaja, G.P. Var-

tan'jan, D.I Zaslavskij, I.A. Smotrov. —L.: Energiya,-1967.—895 s.

3. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.

4. *Milykh V.I.* Opredeleniye elektromagnitnykh parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // *Elektrotehnika і elektromekhanika.*—2006.—№2.—S.40-46.

5. *Milykh V.I.* Sistema napravleny i fazovykh sootnosheny elektromagnitnykh velichin pri chislennykh raschetakh magnitnykh poley v turbogeneratore / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // *Elektrotehnika і elektromekhanika.*—2011.—№5.—S.33-38.

6. *Milykh V.I.* Garmonicheskyy analiz elektromagnitnykh velichin trekhfaznoy obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislenno-polevykh metodov / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // *Tekhnichna elektrodinamika.*— 2013.—№3.—S.40-49.

7. *Milykh V.I.* Organizatsiya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniyem zadannykh ego vykhodnykh parametrov / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // *Elektrotehnika і elektromekhanika.*— 2012.—№1.—S.36-41.

8. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn.—М.: Nauka, 1973.— 832 s.

Поступила 23.05.2013