УДК 621.313

В.И. Милых

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СТАТОРЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ АВТОНОМНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

На основі чисельних розрахунків обертового магнітного поля виконана оцінка роботи турбогенератора при несиметричному навантаженні. Аналізуються часові функції магнітної індукції в нерухомих точках магнітної системи статора, форма і гармонійний склад ЕРС його обмоток, їхні потужності. Результати розрахунків при несиметричному навантаженні порівнюються з аналогічними результатами при симетричному навантаженні. Бібл. 14, рис. 9.
Ключові слова: **турбогенератор, несиметричне навантаження, магнітні поля, чисельні розрахунки, електромагнітні процеси, часові функції.**

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проведена оценка работы турбогенератора при несимметричной нагрузке. Анализируются временные функции магнитной индукции в неподвижных точках магнитной системы статора, форма и гармонический состав ЭДС его обмоток, их мощности. Результаты расчетов при несимметричной нагрузке сопоставляются с аналогичными результатами при симметричной нагрузке. Библ. 14, рис. 9.
Ключевые слова: **турбогенератор, несимметричная нагрузка, магнитные поля, численные расчеты, электромагнитные процессы, временные функции.**

Введение. Наряду с основным режимом работы турбогенераторов (ТГ) на симметричную нагрузку, на который они обычно и проектируются [1], Межгосударственным стандартом ДСУ 533-2000 регламентируется и длительная работа при несимметричной нагрузке. И это относится как к автономную работе ТГ, так и работе на электроэнергетическую систему [2].

Работа на несимметричную нагрузку приводит к целому ряду дополнительных проблем в эксплуатации ТГ, которые имеют электромагнитную природу и выливаются в повышенную термическую и силовую напряженность, в проблемы вибрации и некачественной трехфазной системы электроснабжения.

Так, например, для ТГ мощностью до 100 МВ·А, согласно стандарту и нормали VDE 0530, допускается длительная несимметричная нагрузка с током обратной последовательности, составляющим до 8% от номинального тока. При больших мощностях, ввиду повышенного использования, допустимая несимметричная нагрузка должна быть уменьшена.

Эти ограничения является результатом многочисленных исследований несимметричных режимов турбогенераторов [3], которыми выявлено, что необходимо усиление конструкции для достаточной термической стойкости ротора.

Расчетные исследования работы при несимметричной нагрузке, проводимые ранее аналитическими методами, не могли охватить всей полноты электромагнитных процессов в ТГ. С развитием численных методов расчета электромагнитных полей, возможности математического моделирования существенно возросли. Однако предпринимаемые попытки исследования в основном касаются расчета вихревых токов (ВТ) в локальных электропроводящих элементах на поверхности ротора от магнитного поля токов обратной последовательности при весьма серьезных упрощениях области расчета.

Так, например, в [4] и [5] выполнено компьютерное моделирование электромагнитных процессов ТГ 300 МВт в двухмерной постановке при продолжительной несимметричной нагрузке. Основное внимание уделено исследованию ВТ и добавочных потерь мощности в пазовых клиньях ротора. Однако в этих двух работах приводятся настолько противоречивые результаты, что приходится сомневаться в их достоверности: плотности тока и тепловыделений различаются на несколько порядков.

Выявить проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке с разных сторон, а не только с точки зрения ВТ в клиньях ротора, с достаточной степенью адекватности можно, только рассматривая ТГ в целом, не ограничиваясь его локальными упрощенными частями. В полной постановке это задача чрезвычайной сложности. Поэтому здесь, сохраняя полную структуру электромагнитной системы ТГ, рассматриваем иной крайний вариант допущений – отсутствие реакции ВТ в элементах ротора.

Это позволяет выявить «верхний» уровень проблем электромагнитного характера, которые в реальности будут сглажены демпфирующей реакцией токов, возникающих в электропроводящем массиве бочки ротора и в отдельных его элементах.

Новые возможности для исследования проблем электромагнитного характера при эксплуатации ТГ с несимметричной нагрузкой предоставляют численные методы расчета магнитных полей [6, 7] в сочетании с быстродействующими компьютерами и эффективным программным обеспечением. Это и способствовало новизне предоставляемых результатов, так как рассматривается электромагнитная система ТГ в целом.

Цель работы. Данная работа посвящена оценке влияния несимметрии нагрузки ТГ на распределение магнитного поля, электрические и энергетические процессы в них на основе числено-полевого анализа в рамках указанных ограничений стандартов. Это проводится посредством выявления и анализа временных функций магнитной индукции (МИ) в различных точках статора ТГ, а также аналогичных функций магнитного потокосцепления (МПС) и ЭДС фазных обмоток статора.

Численные методы расчета магнитных полей снимают ограничения на учет реальных конструктивных форм электрических машин в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода. При этом мощные современные компьютеры позволяют это сделать и в статике, и в динамике. Примеры таких исследований приведены в работах автора [7, 8] и других исследователей, например, в [9].

Объект исследования. Демонстрационные расчеты проводятся на двухполюсном трехфазном ТГ, поперечное сечение электромагнитной системы которого дано на рис. 1. Он имеет номинальные: мощность P_N=35 МВт, фазные напряжение U_{sN}=6,3 кВ и ток I_{sN}=2315 А при схеме обмотки статора – «треугольник»; коэффициент мощности cos φ_{sN}=0,8; частоту f_s=50 Гц. Активная длина статора l_a=2,7 м; немагнитный зазор – 27 мм; радиус ротора – 0,408 м; на фазную обмотку статора приходится N_s=18 последовательных витков, ее относительное укорочение β_s=22/27; сопротивления фазной обмотки: активное R_s = 0,00537 Ом; реактивное от лобового рассеяния X_v = 0,134 Ом; в обмотке ротора число витков N_r=224.

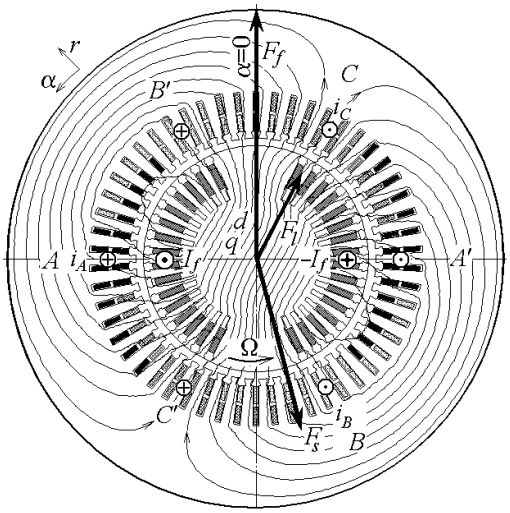


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора с картиной магнитного поля при несимметричной нагрузке

Теоретические основы анализа несимметричного режима работы ТГ. Несимметричные режимы в трехфазных ТГ обуславливаются различием фазных токов ввиду разных нагрузок фазных обмоток статора. Эти режимы исследуются с помощью метода симметричных составляющих [2, 3]. Конкретно рассматриваются фазные токи прямой $\underline{I}_{A1}$, $\underline{I}_{B1}$, $\underline{I}_{C1}$ и обратной $\underline{I}_{A2}$, $\underline{I}_{B2}$, $\underline{I}_{C2}$ последовательностей и результирующие токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$. Принятая исходная их система представлена на рис. 2 посредством векторной диаграммы.

Согласно ДСУ 533–2000, действующие значения токов обратной последовательности приняты равными $0{,}08 \cdot I_{sN}$. Кроме того, наибольшее действующее значение из всех результирующих фазных токов ограничено номинальным значением I_{sN}.

На этой основе расчетным путем определено, что действующие значения фазных токов составляют I_A=2170,2 А; I_B=2314,7 А; I_C=2015,3 А, а подробнее методика их расчета представлена в [10].

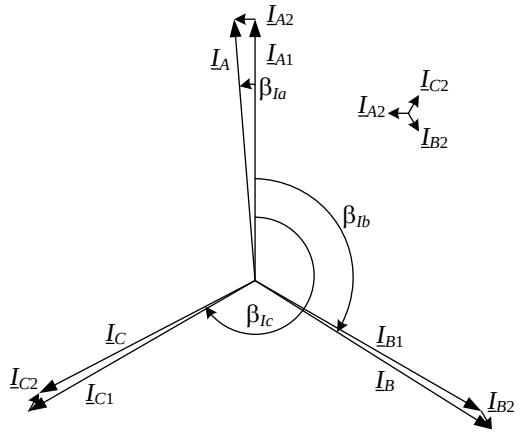


Рис. 2 – Фазные токи прямой и обратной последовательностей и результирующие токи ТГ

В расчетах вращающихся магнитных полей используются мгновенные значения фазных токов [7, 8]. В данной работе при несимметричной нагрузке фазные токи определяются их временными функциями:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{ma} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ia} + \beta)\,; \\ i_B &= I_{mb} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ib} + \beta)\,; \\ i_C &= I_{mc} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ic} + \beta)\,, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\omega = 2\pi f_s$ – угловая частота;

I_{ma}, I_{mb}, I_{mc} – амплитуды токов, определяемые через уже упомянутые их действующие значения.

Начальные фазы токов β_{Ia}, β_{Ib}, β_{Ic} определились изначально суммированием векторов на рис. 2 и поэтому жестко связаны друг с другом. Затем они были повернуты все на подобранный численными экспериментами некоторый угол таким образом, чтобы при β=0 результирующая МДС обмотки статора F_s была направлена по продольной оси ротора *d*, которая показана на рис. 1. Так получены необходимые начальные фазы β_{Ia} = 9,15°; β_{Ib} = -117,56°; β_{Ic} = -237,88°.

В (1) дополнительный угол поворота β для всех токов, соответственно, поворачивает вектор МДС F_s на тот же угол с таким условием, чтобы при заданных токах статора и токе возбуждения обеспечить необходимую выходную электрическую мощность ТГ, как это представлено в [11]. Поставленный в такую позицию вектор F_s показан на рис. 1. Вместе с вектором МДС обмотки возбуждения F_f они образуют условную результирующую МДС в режиме нагрузки F_l.

Система фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ подробно представлена в [11] для режима его симметричной нагрузки. Этот угол β и ток возбуждения I_f определяются по специальной методике из условия, что они должны обеспечить номинальные выходные данные ТГ: напряжение U_{sN} и коэффициент мощности cosφ_{sN}, что дает при номинальном токе статора I_{sN} номинальную активную мощность P_N. Конкретно, для рассматриваемого ТГ при симметричной нагрузке выявлено β=-165,12° и I_f=632 А. Действующие значения фазных токов составляли I_A=I_B=I_C=2315 А, а в системе (1) было принято β_{Ia} =0;; β_{Ib} =-120°; β_{Ic} =-240°.

Для адекватного отображения изменений, которые происходят в ТГ при переходе от симметричной нагрузки к несимметричной, установлено, что при этом управляющие воздействия на ТГ отсутствуют. То есть от турбины на вал ТГ поступает та же механическая мощность и сохраняется ток возбуждения, что и при симметричной нагрузке. На этой основе численными экспериментами, используя уже названное значение β как первое приближение, было выявлено, что номинальная мощность при несимметричной нагрузке получается при β=-167,2° и уже представленном токе возбуждения I_f=632 А. Векторная диаграмма сформированной несимметричной системы токов и полученных в результате расчета других электромагнитных величин будет представлена далее.

Для анализа электромагнитных процессов в активной части ТГ магнитное поле при заданных токах его обмоток рассчитывалось в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1). Это поле описывается известным дифференциальным уравнением

$$\mathrm{rot}\left[\frac{1}{\mu}\mathrm{rot}\left(\vec{k}\,A_z\right)\right]=\vec{k}\,J_z\,, \qquad (2)$$

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

Организация расчета временных функций электромагнитных величин. Значения заявленных вместе с целью работы величин МИ, МПС и ЭДС определяются на основе расчета магнитного поля ТГ, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами [7, 8,] для временного ряда с шагом Δ*t*:

$$t_k=\Delta t\cdot(k\text{-}1);\quad k=1,\,2,\,...,\,K, \qquad (3)$$

при соответствующих угловых позициях ротора

$$\alpha_k=\Delta\alpha\,(k\text{-}1);\quad k=1,\,2,\,...,\,K, \qquad (4)$$

и с синхронным вращением магнитного поля статора изменениями фазных токов (1) в его обмотке в соответствии с рядом t_k (3).

В (3) и (4) $\Delta\alpha=\Omega\cdot\Delta t$, $\Omega=\omega/p$ – угловые шаг и скорость вращения ротора; *p* – число пар полюсов.

Символ *K* в (3), (4) обозначает число позиций, позволяющее в достаточной мере сформировать временные функции на их периоде изменения *T*.

Рассматриваемые в данной работе функции имеют полупериодичную асимметрию с условием типа

$$\Gamma(t_k + T/2) = -\Gamma(t_k),\ k=1,2,...,K, \qquad (5)$$

где Γ – пока некоторое обобщенное обозначение.

Поэтому реально функции конкретных величин с учетом периодичности магнитного поля ТГ сформированы при повороте ротора от 0 до 180° с угловым шагом в 1°, то есть *K* равняется 180.

Магнитное поле на основе (2) рассчитывается методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по программе FEMM [12]. Операции при ее работе по расчету поля, определению электромагнитных параметров и формированию временных функций выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [13].

Картина магнитного поля в режиме несимметричной нагрузки в исходный момент времени представлена на рис. 1 силовыми линиями. Отметим, что структура магнитного поля примерно соответствует тому, что было и в случае симметричной нагрузки.

Временные функции магнитной индукции.

Базовой величиной магнитного поля, используемой при электромагнитных расчетах, является МИ в форме радиальной и угловой составляющих и модуля:

$$B_r=\frac{1}{r}\frac{\partial A_z}{\partial\alpha};\ B_\alpha=-\frac{\partial A_z}{\partial r};\ B=\sqrt{B_r^2+B_\alpha^2}\,. \qquad (6)$$

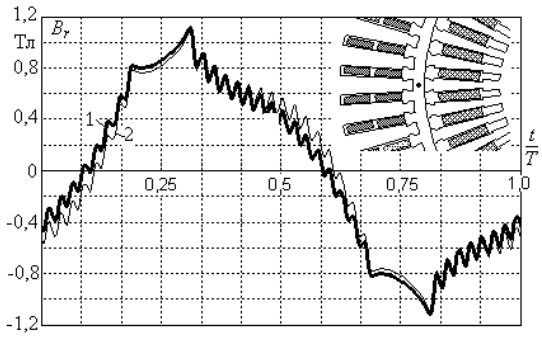
Заметим, что в зонах шихтованных сердечников программа FEMM «выдает» значения МИ, «размазанные» на всю их аксиальную длину. Поэтому надо делить эти значения на k_{Fe} – коэффициент заполнения сердечника сталью. Тогда получатся значения МИ непосредственно для стальных листов. Для данного ТГ, с учетом шихтовки и пакетирования сердечника статора, этот коэффициент составил 0,78.

В неподвижных точках электромагнитной системы ТГ получены по уже представленному принципу временные функции МИ в дискретной форме:

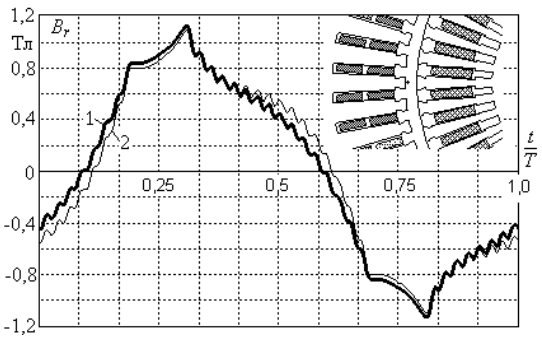
$$B_r(t_k),\ \ B_\alpha(t_k),\ \ B(t_k),\ \ k=1,2,...,K. \qquad (7)$$

Отметим, что при распространении полученных значений на второй полупериод по условию (5) для модуля *B* знак менять не надо.

Графики временных функций (7) для двух зафиксированных в зазоре точек представлены на рис. 3, где время дано в относительных единицах. Вариант *а* соответствует точке в середине зазора, *б* – на расточке сердечника статора.



а



б

Рис. 3. Временные функции радиальной составляющей МИ в обозначенных точках в зазоре на оси зубца сердечника статора: 1 – несимметрия; 2 –симметрия

Представленные функции далеки от синусоидальных. В их графиках очевидны зоны влияния больших зубов ротора и зубцовые пульсации от остальных его зубцов. Пульсации усиливаются по мере

приближения к поверхности ротора (от рис. 3 *б* до рис. 3 *а*). Во временных функциях в неподвижных точках зубцовые пульсации от сердечника статора не проявляются, как это подробнее представлено в [8].

На рис. 4 изображены временные функции радиальной составляющей магнитной индукции в зубце сердечника статора в обозначенных на фрагменте рисунка точках $z1$ и $z2$ – в его коронке и основании. Функции $B_r(t)$ опять далеки от синусоидальных, и в значительной мере формируются зубчатой структурой ротора, хотя с некоторым затуханием зубцовых пульсаций по сравнению с тем, что было в зазоре (рис. 3). Полученные графики свидетельствуют о том, что принятый при проектировании ТГ синусоидальный характер магнитной индукции в зубцах является весьма грубым приближением.

На рис. 5 показаны временные функции угловой составляющей B_α и модуля МИ B в обозначенной точке в спинке сердечника статора. Функции $B_\alpha(t)$ близки к синусоидальным, хотя и испытывают некоторые искажения, доходящие от уже представленных функций в зазоре и зубцах.

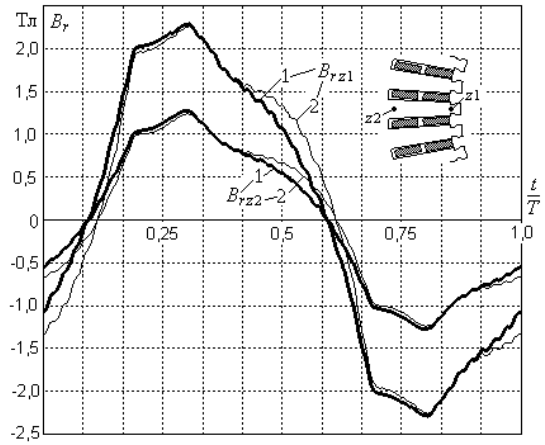


Рис. 4. Временные функции радиальной составляющей B_r магнитной индукции в зубце сердечника статора: 1 – несимметрия; 2 –симметрия

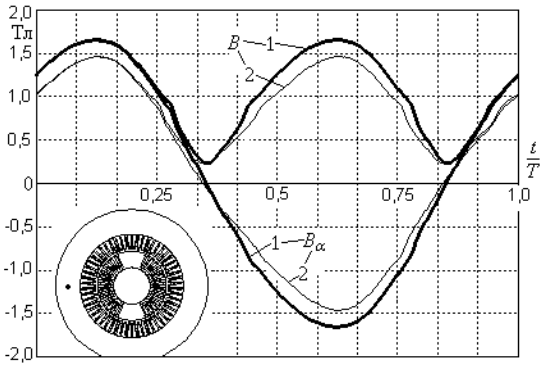


Рис. 5. Временные функции угловой составляющей B_α и модуля B магнитной индукции в сердечнике статора: 1 – несимметрия; 2 –симметрия

В целом на рис. 3 – рис. 5 отличия для разных типов нагрузки ТГ хотя и заметны, но не принципиальны. А интерес в целом представляет характер этих функций, получение которых, в принципе, оказалось возможным именно на основе многопозиционных расчетов магнитных полей. Это является нетривиальным подходом для электрических машин вообще.

Магнитное потокосцепление и ЭДС фазных обмоток статора. Как уже представлялось в [7], основой для ЭДС является временная функция МПС фазной обмотки статора.

МПС находится по распределению ВМП. Так, например, для любой из шести фазных зон (рис. 1) МПС определяется на основании формулы

$$\Psi = \frac{N_s l_a}{S_\varphi} \int_{S_\varphi} A_z \, dS \,, \qquad (8)$$

где S_φ – площадь сечения по токопроводящим элементам фазной зоны.

Определение МПС по формуле (8) не составляет труда, так как для определения S_φ и интеграла в интегрированном в программу FEMM скрипте Lua есть соответствующие процедуры [14].

Для всей фазной обмотки, например для фазы A, МПС находится по формуле

$$\Psi_A = \Psi_{sA} - \Psi_{sA'} \,, \qquad (9)$$

где Ψ_{sA} и $\Psi_{sA'}$ – МПС в фазных зонах A и A' (рис. 1), определенные по формуле (8).

На этой основе, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося магнитного поля, была сформирована дискретная временная функция МПС

$$\Psi_s(t_k),\ k=1,2,...,K, \qquad (10)$$

где индекс s является обобщенным обозначением любой из фазных обмоток: A, B, C.

Функция $\Psi_s(t_k)$ раскладывается аналогично [7, 8] по известным правилам в косинусный гармонический ряд из нечетных гармоник с учетом условия (5)

$$\Psi_s = \sum_{\nu=1,3,5...}^{N_g} \Psi_{m,\nu} \cos(\nu \omega t + \gamma_\nu) \,, \qquad (11)$$

где суммирование по номерам гармоник ν возможно вплоть до номера N_g, который, в принципе, ограничен принятым в (5, 10) значением K.

На основании закона электромагнитной индукции от (11) делается переход к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{\nu=1,3,5...}^{N_g} \nu \omega \Psi_{m,\nu} \cos(\nu \omega t + \gamma_\nu - \pi/2) \,, \qquad (12)$$

откуда получаются амплитуды гармоник $E_{m,\nu}=\nu\omega\Psi_{m,\nu}$.

Временные функции МПС (11) и ЭДС (12) определялись для каждой из фазных обмоток и при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными. Они представлены на полном периоде их изменения на рис. 6.

Для сравнения, расчеты были проведены по той же методике и при симметричной нагрузке ТГ. Соответствующие результаты представлены на рис. 7.

Очевидно, что при симметричной нагрузке временные функции МПС близки к синусоидальным, а вот в характере ЭДС уже проявляется заметное влияние высших гармоник, которые, в отличие от аналогичных гармоник МПС, умножаются на их номера.

При несимметричной нагрузке различие функций ЭДС разных фаз и их отличия от правильных синусо-

ид проявились в значительно большей мере, причем искажения и отличия заметны уже и для исходных для ЭДС функций МПС.

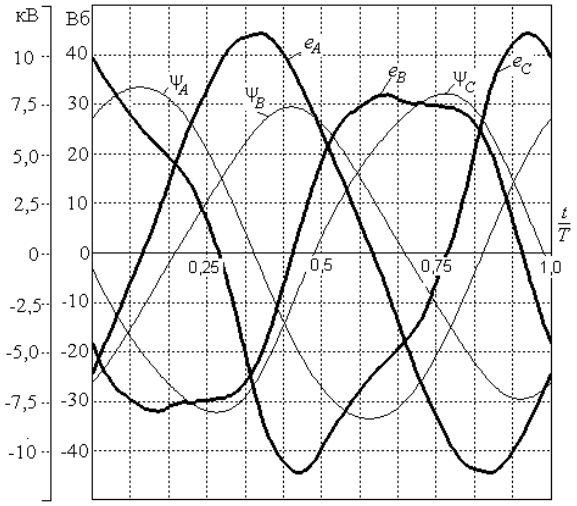


Рис. 6. Временные функции фазных МПС и ЭДС при несимметричной нагрузке ТГ

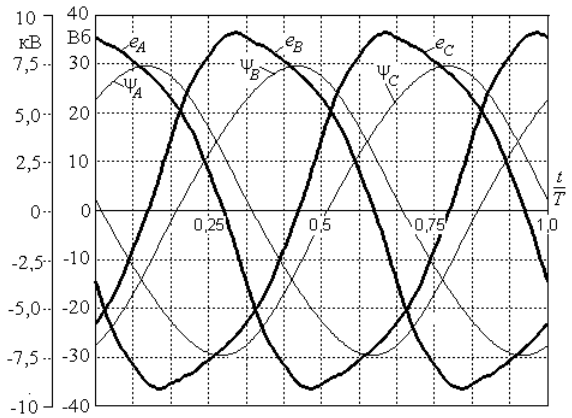


Рис. 7. Временные функции фазных МПС и ЭДС при симметричной нагрузке ТГ

В табл. 1 представлены числовые данные для фазных ЭДС при несимметричной нагрузке ТГ. Здесь амплитуда первой гармоники ЭДС $E_{m,1}$ и ее действующее значение $E_{s,1}$ даны в абсолютном измерении, а амплитуды высших гармоник – в относительной форме $E_{m,\nu,*} = E_{m,\nu} / E_{m,1}$. В целом, влияние высших гармоник оценивается коэффициентом искажения

$$d_{dist} = \frac{E_{m,1}}{\sqrt{\sum_{\nu=1}^{N_g} E_{m,\nu}^2}}. \qquad (13)$$

Таблица 1 – Гармонический состав ЭДС обмотки статора

Фаза	$E_{m,1}$, В	$E_{s,1}$, В	$E_{m,3,*}$	$E_{m,5,*}$
A	10702	7568	0,043	0,007
B	8865	6268	0,144	0,018
C	10071	7121	0,183	0,015
Фаза	$E_{m,7,*}$	$E_{m,9,*}$	$E_{m,11,*}$	d_{dist}
A	-	0,005	0,003	0,999
B	0,003	0,007	0,003	0,990
C	0,004	0,008	0,004	0,983

Очевиден большой удельный вес третьей гармоники, которая при схеме «треугольник» также создаст проблему значительных паразитных циркуляционных токов в трех фазных обмотках [5].

В дополнение к уже упоминавшимся величинам фазовых соотношений в (1), из разложения типа (11) для каждой фазной обмотки по аргументу γ_ν определяются начальные фазы МПС $\gamma_{\psi a}$, $\gamma_{\psi b}$ и $\gamma_{\psi c}$ для первых гармоник. Фазные ЭДС отстают от своих МПС на $\pi/2$ или 90° соответственно (12). Тогда начальные фазы ЭДС составляют $\gamma_{Ea}=\gamma_{\psi a}$-90°; $\gamma_{Eb}=\gamma_{\psi b}$-90°; $\gamma_{Ec}=\gamma_{\psi c}$-90°. Определенными становятся и фазовые сдвиги ЭДС относительно токов своих фазных обмоток:

$$\varphi_{IEa} = \gamma_{Ea} - \beta_{Ia}\,;\ \varphi_{IEb} = \gamma_{Eb} - \beta_{Ib}\,;\ \varphi_{IEc} = \gamma_{Ec} - \beta_{Ic}\,. \qquad (14)$$

Все эти фазовые соотношения и соотношения величин фазных токов, МПС, ЭДС и напряжений представлены в масштабе на рис. 8 посредством векторной диаграммы. Это соответствует первым гармоникам электромагнитных величин ТГ при несимметричной нагрузке для всех фазных обмоток.

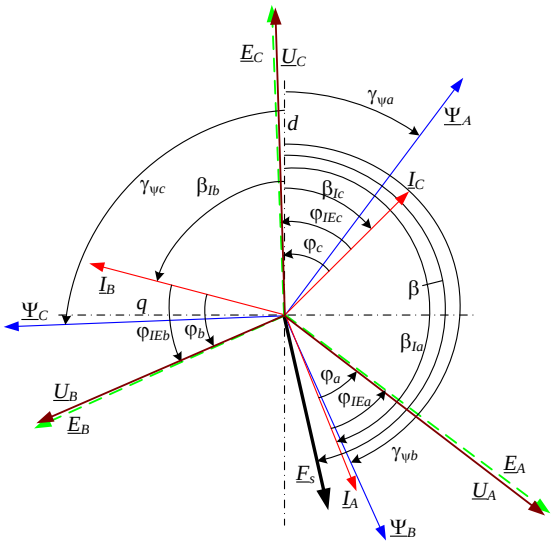


Рис. 8. Векторная диаграмма электромагнитных величин при несимметричной нагрузке ТГ

Определение фазного напряжения проведем на примере фазной обмотки *A*. Необходимый для этого фрагмент векторной диаграммы с рис. 8 дан на рис. 9, *а* в оригинале с увеличением масштаба, а в повернутом виде без соблюдения пропорций показан на рис. 9, *б*. Здесь дополнительно изображены падение напряжения на активном сопротивлении $\underline{U}_R=R_s\,\underline{I}_A$, а также ЭДС от потока лобового рассеяния $\underline{E}_\nu=-jX_\nu\,\underline{I}_A$.

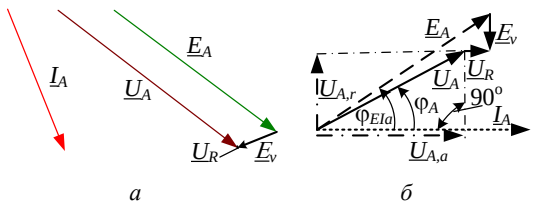


Рис. 9. Фрагменты векторной диаграммы

Из геометрических соотношений на рис. 9, *б* получаются активная и реактивная составляющие напряжения, его действующее значение и фазовый сдвиг от вектора тока, активная мощность:

$$U_{A,a} = E_A \cos\varphi_{IEa} - U_R;\ U_{A,r} = E_A \sin\varphi_{IEa} - E_v; \quad (15)$$

$$U_A = \sqrt{U_{A,a}^2 + U_{A,r}^2};\ \ \varphi_{sA} = \mathrm{arctg}(U_{A,r} / U_{A,a});\ (16)$$

$$P_{aA} = U_A I_A \cos\varphi_{sA}. \quad (17)$$

Аналогично все проделано для других фазных обмоток и результаты расчетов с обобщающим индексом *s* представлены в табл. 2. Очевидно, что суммарная активная мощность ТГ составила 34,90 МВт, т.е. выработана практически номинальная мощность. При уменьшенных токах статора, но при номинальном токе возбуждения, это произошло за счет увеличения ЭДС и напряжения ввиду увеличения МПС при уменьшенной реакции якоря.

Таблица 2 – Данные расчета при несимметричной нагрузке

Фаза	I_s	U_s	$\cos\varphi_s$	φ_s, град	P_a, МВт
A	2170	7489	0,861	30,55	14,00
B	2315	6174	0,785	38,28	11,22
C	2015	7029	0,684	46,86	9,69

В табл. 2 следует обратить внимание на различие нагрузок фазных обмоток – по активным мощностям и по характеру, заданному коэффициентами мощности. Это значит, что одна из причин конкретно рассмотренной несимметрии – разный характер и величина фазных сопротивлений трехфазной нагрузки.

Значение фазных напряжений в табл. 2 не очень сильно отличаются от фазных ЭДС в табл. 1. Следовательно, напряжения имеют примерно такой же гармонический состав, как и ЭДС. Поэтому и фазные токи будут иметь аналогичный состав. Значит, несимметричная нагрузка сопровождается всегда не синусоидальными, а более сложными функциями токов в виде гармонических рядов примерно такого же состава, как и в табл. 1.

Из всего этого вытекает, что принятый синусоидальный характер токов здесь (1) и в стандарте является еще одним серьезным допущением принятой расчетной методики как в данной работе, так и при расчетах несимметричной нагрузки в упомянутых [4, 5] и других аналогичных работах.

Видимо, более точная постановка задачи расчета несимметричных режимов работы заключается в том, чтобы согласовать временные функции фазных токов и ЭДС – возможно, итерационным путем или другим каким-либо эффективным методом.

Поставленная в [10] и продолженная здесь тема исследования не исчерпывает возможностей разработанного метода анализа несимметричного режима работы ТГ. Этот метод позволяет продолжить начатые исследования, и, прежде всего, рассмотрением электромагнитных процессов в роторе и силовых действий во всей электромагнитной системе ТГ.

Выводы.

1. Проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке в достаточно полной мере выявить можно, рассматривая ТГ в целом, а не его локальные упрощенные части. При этом для анализа широкого спектра проблем электромагнитного характера эффективной основой являются многопозиционные численные расчеты вращающихся магнитных полей, позволяющие сформировать временные функций рассматриваемых величин.

2. Чрезвычайно сложная задача анализа электромагнитных явлений в полной структуре электромагнитной системы ТГ пока решается при допущении отсутствия реакции ВТ в элементах конструкции ротора, а также, как выявилось, синусоидального характера фазных токов ТГ. Это позволило выявить предельный уровень проблем электромагнитного характера, которые в реальности будут сглажены демпфирующей реакцией указанных токов.

3. По рассмотренному комплексу электромагнитных явлений в рамках стандартных ограничений несимметричного режима работы ТГ установлено, что:

- функции магнитной индукции в неподвижных точках магнитной системы в целом претерпели изменения, но не принципиальные, в зазоре и зубцах сердечника статора они далеки от синусоидальных да еще имеют проявление зубцовых пульсаций из-за сердечника ротора, в спинке статора она приближены к синусоидам;

- временные функции ЭДС, а, значит, и напряжений фазных обмоток статора по форме значительно отличаются от синусоид и друг от друга, очевидны также отличия этих ЭДС и по значениям;

- наблюдается значительный небаланс активных мощностей, вырабатываемых отдельными фазными обмотками статора.

4. Смысл показанного «верхнего» уровня проблем электромагнитного характера в том, что понимать: для их «сглаживания» до приемлемого уровня требуется адекватная реакция названных токов, которая фактически перенесет проблемы с них на эти токи, что также является серьезной проблемой эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Извеков В. И., Серихин Н. А., Абрамов А. И. Проектирование турбогенераторов // 2-е издание. М.: МЭИ, 2005. – 440 с.

2. Коган Ф. Л. Анормальные режимы мощных турбогенераторов М.: Энергоатомиздат, 1988. – 188 с.

3. Тер-Газарян Г. Н. Несимметричные режимы синхронных машин // М.: Энергия, 1969. – 214 с.

4. Шульженко Н. Г., Пантелят М. Г., Руденко Е. К., Зозулин Ю. В. Добавочные потери в роторе турбогенератора при продолжительной несимметричной нагрузке // Електротехніка і електромеханіка. – 2006, №1. – С.54-57.

5. Зозулін Ю. В., Антонов О. Є., Бичік В. М., Боричевський А. М., Кобзар К. О., Лівшиць О. Л., Ракогон В. Г., Роговий І. Х., Хаймович Л. Л., Чередник В. І.. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Харків: ПФ «Колегіум», 2011.– С.68-76.

6. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.

7. Милых В. И., Полякова Н. В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе чис-

ленных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №2. – С.40-46.
8. Милых В. И., Полякова Н. В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Електротехніка і електромеханіка.– 2013.– №6.– С.40-45.
9. Титко О.І., Мельник А.М. Моделювання і розподіл електромагнітних сил, що діють на зубці та стержні обмотки статора турбогенератора // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 40 – 46.
10. Милых В. И. Организация численно-полевых расчетов электромагнитных процессов в турбогенераторе при его несимметричной нагрузке // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 3–10.
11. Милых В. И., Полякова Н. В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка. –2012. – №1. – С.36-41.
12. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (10 Oct 2010) [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/Download. – 2014.
13. Милых В. И., Полякова Н. В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 6. – С.14-20.
14. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений в турбогенераторах автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM // Електротехніка і електромеханіка.– 2016.– № 1.– С.20-26. **doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.**

REFERENCES

1. Izvekov V. I., Serihin N. A., Abramov A. I. Planning of turbogenerators. Moscow, MEI, 2005. 440 p.
2. Kogan F. L. Anormal modes of powerful turbogenerators. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 188 p.
3. Ter-Gazaryan G. N. Asymmetrical modes of synchronous machines. Moscow, Energiya Publ., 1969. 214 p.
4. Shulzhenko N. G., Pantelyat M. G., Rudenko E. K., Zozulin Yu. V. Additional losses in the rotor of turbogenerator at the long asymmetrical loading. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2006, no. 1, pp. 54–57.
5. Zozulin Yu. V., Antonov O. E., Bichik V. M., Borichevskiy A. M., Kobzar K. O., Livshits O. L., Rakogon V.G., Rogoviy I. H., Haymovich L. L., Cherednik V. I. Creation of new types and modernisation of operating turbogenerators are for the thermal electric stations. Harkiv, PF «Kolegium» Publ., 2011. 228 p.
6. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005, 276 p.
7. Milykh V. I., Polyakova N. V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2006, no. 2, pp. 40-46.
8. Milykh V. I., Polyakova N. V. Calculated and harmonic analysis of the magnetic fields in the active zone of the turbogenerator in the load mode. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2013, no. 6, pp. 40–45.
9. Titko O. I., Melnik A. M. Modelling and distribution of electromagnetic forces operated on the teeth and the cores of stator winding of the turbogenerator. *Tehnichna Elektrodinamika*. 2015, no. 3, pp. 40–46.
10. Milykh V. I. Organization of the numerical-field calculations of electromagnetic processes in a turbogenerator at its asymmetrical loadin // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion."* – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – pp. 3–10.
11. Milykh V. I., Polyakova N. V. Organization of numerical calculation of the magnetic field of turbogenerator in the mode of loading with providing of prescribed out parameters. *Electrotekhnika i Electromekhanika–Electrical engineering & electromehanics*. 2012,no. 1,pp. 36-41.
12. Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics: OldVersions." *Finite Element Method Magnetics: HomePage.* DavidMeeker, 11 October 2010. Web. 10 March 2014 <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>
13. Milykh V. I., Polyakova N. V. Automated calculations of the dynamics of a turbo-generator electromagnetic processes in the software environment FEMM. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2015, no. 6, pp. 16–20.
14. Milykh V. I., Polyakova N. V. Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromehanics*. 2016, no. 1, pp. 20–26. **doi: 10.20998/2074-272X.2016.1.05.**

Поступила (received) 26.07.2016

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone: +38 057 7076514; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

V. I. Milykh
National technical university «Kharkiv polytechnic institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The numerical-field analysis of the magnetic field and the electrical quantities in the turbogenerator stator under autonomous unbalanced loading.

Purpose. *Assessing the impact of load asymmetry of turbogenerator (TG) on the magnetic field distribution, on the electrical and energy processes in it based on the numerical-field analysis within the constraints regulated by the standards.* ***Methodology.*** *The calculation model of TG has been constructed on the method of symmetrical components of the three-phase current system. The formed asymmetric system of the currents is used for multi-position numerical calculations of rotating magnetic fields. The temporal functions of the electromagnetic quantities which are subjected to the harmonic analysis are obtained on this basis.* ***Results.*** *Test calculations are conducted on a three-phase 35 MW TG during his work under autonomous unbalanced loading. The analysis of the temporal functions of the magnetic induction at different points of the TG stator and also similar functions of the magnetic flux linkage, EMF phase stator windings and other variables have been executed.* ***Originality.*** *Problems of exploitation of turbogenerators under unbalanced loading are detected by the consideration of their electromagnetic system on the whole, but not their simplified local parts, as usual. It has been shown that the temporal functions of EMF of the phase stator windings under unbalanced loading significantly differ in shape from sine waves and from each other and contain a number of significant upper harmonics. It has been detected that the phase currents would contain not only the first but also significant upper harmonics under unbalanced loading.* ***Practical value.*** *Analysis of the work of TG under unbalanced loading showed the "top" level of problems of electromagnetic character. It has been established that the function of the magnetic induction at the fixed points of the magnetic system on the whole have been changed but not in principle. The temporal functions of EMF, and, hence, the voltage of the stator phase windings significantly differ in shape from sine waves and from each other, there is a considerable imbalance of active powers generated by the individual phase windings of the stator. The information provided will allow the measures to ensure a durable and reliable operation of turbogenerators*. References 14, tables 2, figures 9.

Key words: **turbo-generator, unbalanced loading, magnetic fields, numerical calculations, electromagnetic processes, temporal functions.**