

УДК 621.313

В. И. МИЛЫХ

ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ ПРИ ЕГО НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Подано принципи підготовки розрахункової моделі турбогенератора (ТГ) для чисельно-польового аналізу електромагнітних процесів у ньому при несимметричному навантаженні. За стандартними обмеженнями такої експлуатації ТГ, з використанням методу симетричних складових, знаходяться струми його обмоток разом з їхніми фазовими співвідношеннями. Аналізуються часові дискретні функції електромагнітних величин ТГ, які знаходять багатопозиційними розрахунками обертових магнітних полів. Як приклад, виконана оцінка фазних ЕРС, напруг, потужностей та інших величин при несимметричному навантаженні ТГ потужністю 35 МВт.

Ключові слова: турбогенератор, несимметричне навантаження, електромагнітні процеси, магнітні поля, чисельні розрахунки, часові функції.

Представлены принципы подготовки расчетной модели турбогенератора (ТГ) для численно-полевого анализа электромагнитных процессов в нем при несимметричной нагрузке. Исходя из стандартных ограничений такой эксплуатации ТГ, с использованием метода симметричных составляющих, получаются токи его обмоток вместе с их фазовыми соотношениями. Анализируются временные дискретные функции электромагнитных величин ТГ, которые получаются многопозиционными расчетами вращающихся магнитных полей. В качестве примера проведена оценка фазных ЭДС, напряжений, мощностей и других величин при несимметричной нагрузке ТГ мощностью 35 МВт.

Ключевые слова: турбогенератор, несимметричная нагрузка, электромагнитные процессы, магнитные поля, численные расчеты, временные функции.

Purpose. Design and presentation of the method of organization of the numerical-field calculations of the electromagnetic processes at asymmetry of turbo-generators load. **Methodology.** Preparation of the calculation model of turbo-generator is based on the method of symmetric constituents. Values and the phase relationship of the currents of their windings are obtained within the limits of the existing standard constraints. The temporal functions of the electromagnetic quantities are derived in a discrete form by the multi-position calculations of the rotating magnetic fields. A harmonic analysis is applied to these functions. **Results.** The calculations for testing of the presented method are performed on a three-phase 35 MW turbo-generator by during its work under autonomous unbalanced loading. The example of analysis of phase EMFs, tensions, powers and other quantities are presented in that load. The basis of this are the temporal functions of the magnetic flux linkage of phase windings which are expanded to the harmonic series. **Originality.** The novelty of the results is achieved by a combination of the new features of the numerical methods for the calculation of magnetic fields, high-performance computers and effective software. Problems of exploitation of turbo-generators under unbalanced loading are detected by the consideration of their electromagnetic system as a whole, and not their simplified local parts as usual. It is shown that the temporal functions of the magnetic flux linkage and EMF of 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. **Practical value.** Analysis of the turbo-generator work under unbalanced loading showed the "top" level of problems of electromagnetic character although excluding reaction of eddy and contour currents of the rotor core. Adequate such reaction which effectively transports these problems on the above currents occurs to their "smoothing" to an acceptable level. They are also a serious problem of turbo-generator exploitation under unbalanced loading and require a depth study. All this allows us to provide for measures to ensure a durable and reliable operation of turbo-generators.

Keywords: turbogenerator, unbalanced loading, magnetic fields, electromagnetic processes, numerical calculations, temporal functions.

Введение. При работе в энергосистемах и, особенно, на автономную нагрузку, возможна работа турбогенераторов (ТГ) на несимметричную нагрузку [1]. При этом возникают проблемы эксплуатации электромагнитного, силового и теплового проявлений, создающие угрозы надежности и долговечности ТГ.

Длительная работа ТГ с несимметричной нагрузкой регламентирована Межгосударственным стандартом ДСУ 533-2000. Установлено, что это возможно, если фазные токи обмотки статора не превышают номинального значения и в них токи обратной последовательности ограничены 8 %.

Достаточно адекватный расчет процессов в ТГ при несимметричной нагрузке с одновременным учетом указанных проявлений является чрезвычайно сложной задачей. Обычно из этого комплекса решаются лишь отдельные задачи в локальных зонах ротора при весьма серьезном их упрощении.

Например, в [2] внимание уделено исследованию добавочных потерь мощности в пазовых клиньях от вихревых токов (ВТ) в ТГ мощностью 300 МВт. Однако полученные результаты вызывают сомнение, так как на наружной поверхности ротора в дюралюминиевых клиньях получена плотность тока $(2-4) \cdot 10^{-3}$ А/мм², а плотность тепловыделений

находится в пределах $(3-5)$ Вт/м³. При таких значениях вряд ли вообще возникла бы проблема эксплуатации ТГ при несимметрии нагрузки.

Правдоподобнее результаты анализа несимметричного режима работы в [3] для ТГ мощностью 200 и 300 МВт. В центральной части клина получена плотность ВТ $3-4$ А/мм², удельные тепловыделения – $4-6$ Вт/см². В локальных точках области расчета плотность ВТ достигает даже $11-12$ А/мм². Однако и в этом случае рассматривается очень упрощенная ограниченная зона дюралюминиевого клина ротора с прилегающими частями зубцов и при других серьезных расчетных допущениях.

Выявить разносторонние проблемы эксплуатации ТГ с несимметричной нагрузкой, не сводя все к ВТ в клиньях ротора, можно, рассматривая ТГ в целом, не ограничиваясь его локальными упрощенными частями. Однако, как уже отмечалось, в полной постановке это задача чрезвычайной сложности.

Именно поэтому в данной работе сохраняется полная структура электромагнитной системы ТГ, но ввиду отмеченных причин, принимается другой крайний вариант допущений – отсутствие реакции ВТ в элементах конструкции ротора.

Это позволяет выявить «верхний» уровень про-

© В. И. Милых, 2016

блем електромагнитного и силового характера, которые в реальности, конечно же, будут сглажены демпфирующей реакцией токов, возникающих в электропроводящем массиве бочки ротора и в отдельных его элементах. И смысл этого еще в том, чтобы понимать, что такой «верхний» уровень потребует адекватной реакции ВТ и контурных токов. Эта реакция фактически перенесет указанные проблемы на себя, доводя их до приемлемого уровня.

Новизна предоставляемых далее результатов достигается благодаря новым возможностям симбиоза численных методов расчета магнитных полей [4, 5] и высокопроизводительных компьютеров в сочетании с эффективным программным обеспечением.

Цель работы. В данной работе представляется метод организации численно-полевых расчетов электромагнитных процессов при несимметрии нагрузки ТГ в рамках указанных ограничений стандарта ДСУ 533-2000.

Благодаря указанным новым возможностям, проблема достаточно точного определения электромагнитных и соответствующих силовых величин становится в значительной мере решенной, т.к. для численных методов уже нет ограничений на учет реальных конструктивных форм ТГ в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода. А достаточно мощные современные компьютеры позволяют это сделать не только в статике, но и в динамике. Примеры таких исследований, хотя и при симметричной нагрузке ТГ, приведены в работах автора [5, 6] и других исследователей, например, в [7, 8]. Конкретно в данной работе, как и в предшествующих работах автора, для расчетов магнитных полей использовалась общедоступная программа FEMM [9], основанная на методе конечных элементов.

Объект исследования. Демонстрационные расчеты проводятся на трехфазном ТГ, поперечное сечение электромагнитной системы которого дано на рис. 1. Он имеет номинальные: мощность $P_N=35$ МВт, напряжение $U_N=6,3$ кВ и ток $I_N=4009$ А; коэффициент мощности $\cos \varphi_{sN}=0,8$; частоту $f_s=50$ Гц. Его число пар полюсов $p=1$; активная длина $l_a=2,7$ м; немагнитный зазор – 27 мм; радиус ротора – 0,408 м; числа последовательных витков фазной обмотки статора $N_s=18$, обмотки ротора $N_r=224$; относительное укорочение $\beta_s=0,8148$; схема соединения обмотки статора – «треугольник», в соответствии с которой получают номинальные фазные напряжение $U_{sN}=6,3$ кВ и ток $I_{sN}=2315$ А.

Уровень мощности ТГ позволяет использовать полное воздушное охлаждение при радиальной системе вентиляции статора и применении подпазовых вентиляционных каналов в роторе. ТГ такого типа предназначены для металлургических комбинатов и других предприятий, заботящихся о собственной энергонезависимости.

Теоретические основы анализа несимметричного режима работы ТГ. Несимметричные режимы в ТГ обуславливаются различием фазных токов из-за разных нагрузок фазных обмоток статора.

Эти режимы исследуются с помощью классического метода симметричных составляющих с оперированием для ТГ прямой и обратной симметричными последовательностями (индексы 1 и 2), образующими несимметричную систему фазных токов (в символической форме):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}; \underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}; \underline{I}_C = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}. \quad (1)$$

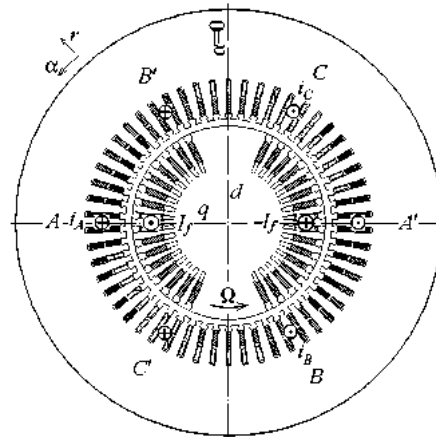


Рис. 1 – Расчетная модель турбогенератора

Если фазные токи прямой последовательности имеют действующее значение I_{s1} , то аналогичное значение токов обратной последовательности составит $I_{s2} = 0,08 \cdot I_{s1}$ в соответствии со стандартом. Для базовых векторов прямой и обратной последовательностей (фаза А) примем произвольно начальные фазы, равные нулю и 90° , соответственно.

Так становятся заданными комплексы фазных токов симметричных составляющих $\underline{I}_{A1} = I_{s1}$, $\underline{I}_{B1} = I_{s1}e^{-j120^\circ}$, $\underline{I}_{C1} = I_{s1}e^{-j240^\circ}$, $\underline{I}_{A2} = I_{s2}e^{j90^\circ}$; $\underline{I}_{B2} = I_{s2} \cdot e^{-j150^\circ}$; $\underline{I}_{C2} = I_{s2} \cdot e^{-j30^\circ}$, которые отображены посредством векторной диаграммы в масштабе на рис. 2, а и б:

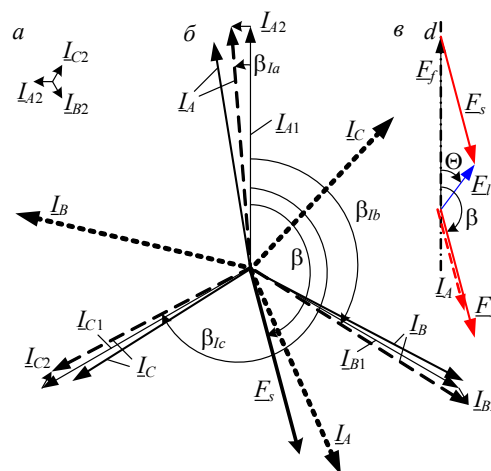


Рис. 2 – Векторные диаграммы фазных токов ТГ при различных фазовых соотношениях

По формулам (1) получены результирующие

фазные токи:

$$\underline{I}_A = k_{Ia} I_{s1} e^{j\beta_{Ia}}; \underline{I}_B = k_{Ib} I_{s1} e^{j\beta_{Ib}}; \underline{I}_C = k_{Ic} I_{s1} e^{j\beta_{Ic}}, \quad (2)$$

где коэффициенты несимметрии составили $k_{Ia} = 1,0032$; $k_{Ib} = 1,070$; $k_{Ic} = 0,9316$; начальные фазы $\beta_{Ia} = 4,57^\circ$; $\beta_{Ib} = -122,14^\circ$; $\beta_{Ic} = -242,46^\circ$ (точность для «чистоты» дальнейших числовых экспериментов). Векторы этих токов (2) также представлены на рис. 2, б пунктиром.

Так как фазные токи не должны превышать номинала I_{sN} , то по фазной обмотке с наибольшим током определяется $I_{s1} = I_{sN} / k_{Ib}$, и в итоге действующие значения фазных токов составили $I_A = 2170,2$ А; $I_B = 2314,7$ А; $I_C = 2015,3$ А.

Система фазных токов для расчета магнитного поля в режиме симметричной нагрузки ТГ сдвигается по фазе на определенный угол β [5, 6], задающий пространственный сдвиг МДС трехфазной обмотки статора относительно МДС обмотки возбуждения.

Фазовые соотношения при симметричной нагрузке ТГ показаны на рис. 2, в. Здесь представлены векторы МДС: \underline{F}_f – обмотки возбуждения, \underline{F}_s – трехфазной обмотки статора, \underline{F}_j – условная результирующая в режиме нагрузки. Установлено, что \underline{F}_f действует по продольной оси ротора d (рис. 1), \underline{F}_s – совпадает по фазе с фазным током \underline{I}_A .

Представленный угол β вместе с током возбуждения I_f определяются по специальной методике [10] с условием обеспечения номинальных данных ТГ, а именно: напряжения U_{sN} и коэффициента мощности $\cos\varphi_{sN}$, что при номинальном токе статора I_{sN} дает номинальную активную мощность P_N . Для рассматриваемого ТГ при симметричной нагрузке выявлено $\beta = -165,12^\circ$ и $I_f = 632$ А. Среди прочего определяется и угол нагрузки ТГ Θ , обозначенный на рис. 2, в.

Обусловленный поворот МДС обмотки статора проверяется расчетами ее индивидуального магнитного поля при $\beta = 0$ и при указанном значении β .

При заданной несимметричной системе токов (2), значения которых разделили на коэффициент k_{Ib} , провели расчет магнитного поля только обмотки статора. И по тому же принципу [10] определили, что МДС \underline{F}_s получила угловое смещение относительно оси d на угол $\Delta\beta = 4,58^\circ$. Поэтому заявленные ранее начальные фазы токов были изменены на этот угол и составили теперь $\beta_{Ia} = 9,15^\circ$; $\beta_{Ib} = -117,56^\circ$; $\beta_{Ic} = -237,88^\circ$. Контрольный расчет магнитного поля обмотки статора при фазных токах с этими начальными фазами «вернул» для МДС обмотки статора угол $\beta = 0$, т.е. эта МДС «стала» в правильную исходную позицию. Векторы обновленных фазных токов представлены на рис. 2, б пунктиром с прежними обозначениями \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C .

Для обеспечения при несимметричной нагрузке ТГ его мощности, приближенной к номинальному уровню, новые фазные токи по фазе сдвинули на тот же угол β , который был определен при симметричной нагрузке. Такая система фазных токов на рис. 2, б

представлена точечным пунктиром все с теми же обозначениями \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C .

В итоге, при расчете магнитного поля при несимметричной нагрузке надо вместе с представленным уже током возбуждения I_f задавать систему фазных токов

$$\begin{aligned} i_A &= I_{ma} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ia} + \beta); \\ i_B &= I_{mb} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ib} + \beta); \\ i_C &= I_{mc} \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta_{Ic} + \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

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

$I_{ma} = \sqrt{2} k_{Ia} I_{s1}$; $I_{mb} = \sqrt{2} k_{Ib} I_{s1}$; $I_{mc} = \sqrt{2} k_{Ic} I_{s1}$ – амплитуды токов.

В (3) должны задаваться уточненные значения β_{Ia} , β_{Ib} и β_{Ic} при $\beta = -165,12^\circ$. Такая система фазных токов обеспечила указанное на рис. 2, б направление МДС обмотки статора, вектор которой \underline{F}_s сдвинут от оси d на заданный угол β .

Использование в (3) косинусоид соответствует установленной в [5, 6] системе фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ.

Принципы расчета временных функций электромагнитных величин. Значения целого ряда электромагнитных и силовых величин, характеризующих состояние ТГ как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке, получают на основе расчета магнитного поля, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами магнитного поля [5, 11].

Позиции характеризуется моментами времени

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

и соответствующими угловыми положениями ротора

$$\alpha_k = \Delta\alpha \cdot (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K, \quad (5)$$

а также токами в фазных обмотках статора, вычисляемыми по (3) в эти моменты времени.

В (4) и (5) обозначение K – число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения с задаваемыми временным Δt и соответствующим угловым $\Delta\alpha = \Omega \cdot \Delta t$ шагами, где $\Omega = \omega/p$ – угловая скорость вращения ротора.

Магнитное поле ТГ рассчитывается в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1) на длине активной части. Здесь это поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (6)$$

где A_z , J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала и плотности тока;

μ – абсолютная магнитная проницаемость;

\vec{k} – орт по аксиальной оси z .

Магнитное поле в соответствии с уравнением (6) рассчитывается численным методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по упомянутой программе FEMM [9].

Картины магнитного поля в исходный момент

времени при симметричной и несимметричной нагрузках представлены силовыми линиями на рис. 3 и рис. 4, соответственно. Здесь же показаны масштабированные векторы упоминавшихся МДС, причем вектор F_f в двух вариантах одинаков. Отметим, что в целом структуры магнитного поля для двух вариантов подобны, только во втором варианте из-за уменьшенных токов обмотки статора вектор F_s уменьшился. Потому вектор F_r несколько увеличился и повернулся, так что угол нагрузки Θ между векторами F_f и F_r уменьшился от $36,14^\circ$ до $28,05^\circ$.

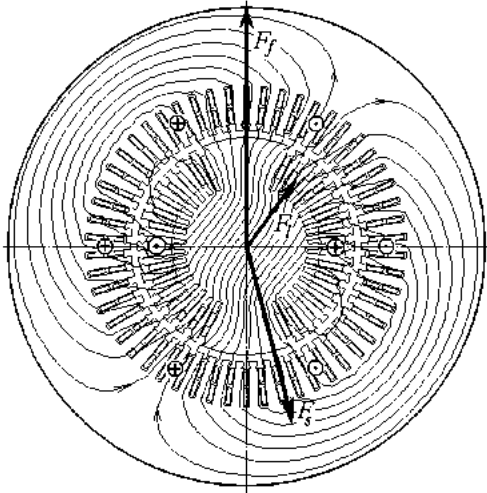


Рис. 3 – Картина магнитного поля ТГ при симметричной нагрузке

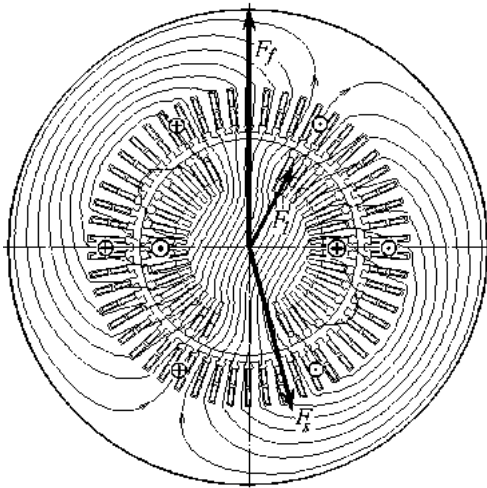


Рис. 4 – Картина магнитного поля ТГ при несимметричной нагрузке

Расчеты при симметричной нагрузке проводились для проявления особенностей электромагнитных и силовых величин при несимметричной нагрузке – посредством сопоставления аналогичных величин. Отличие расчетов при симметричной нагрузке заключалось в том, действующие значения фазных токов составляли $I_A=I_B=I_C=2315$ А, а в их системе (3) было принято $\beta_{Ia} = 0$; $\beta_{Ib} = -120^\circ$; $\beta_{Ic} = -240^\circ$. Ток возбуждения обмотки ротора I_f и общий фазовый сдвиг токов β обмотки статора в обоих вариантах расчетов были

идентичными и соответствовали уже упомянутым значениям: $I_f=632$ А; $\beta=-165,12^\circ$.

Однако на основании рассмотрения одного исходного момента времени судить об энергетических и силовых параметрах ТГ преждевременно. При вращении ротора и магнитного поля векторы МДС и их соотношение, а также картина поля примерно сохраняются только для симметричной нагрузки. При несимметричной нагрузке практически все изменяется, за исключением вектора F_f .

Поэтому для исследования несимметричного режиме необходима именно динамика электромагнитных и силовых процессов на основе многопозиционных расчетов вращающегося магнитного поля.

Расчеты проведенные по приведенным далее формулам, при симметричной нагрузке дали номинальную мощность, при несимметричной нагрузке – меньшую чем номинальная. Однако, с учетом того, что от турбины на вал ТГ поступает та же механическая мощность, что и при симметричной нагрузке, соответственно и активная электрическая мощность при несимметрии должна остаться той же.

Чтобы выйти на это расчетным путем, можно изменить угол β , что приведет к соответствующему увеличению угла нагрузки Θ и, следовательно – к увеличению активной мощности ТГ. В процессе работы ТГ это происходит автоматически его саморегулированием. В расчете заданные по условиям стандарта фазные токи обмотки статора изменять не следовало, так как и ток возбуждения, не зависящий от нагрузки ТГ.

Численными экспериментами было выявлено, что номинальная мощность при несимметричной нагрузке получается при $\beta=-167,2^\circ$. Именно при таком значении проводились далее расчеты процессов в ТГ при несимметричной нагрузке.

Магнитное потокоцепление и ЭДС фазных обмоток статора. Основой анализа электромагнитных и энергетических величин ТГ является магнитное потокоцепление (МПС) фазных обмоток статора и его временные функции.

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

$$\Psi = \frac{N_s I_a}{S_\phi} \int_{S_\phi} A_z dS \approx \frac{N_s I_a}{S_\phi} \sum_{j=1}^{K_\phi} A_{z,av,j} \Delta S_j, \quad (7)$$

где S_ϕ – площадь сечения по токопроводящим элементам фазной зоны; K_ϕ – число элементов ее дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение векторного магнитного потенциала в j -том элементе.

Определение МПС по формуле (7) не составляет труда. Для вычисления S_ϕ и интеграла во встроенном в программу FEMM скрипте Lua есть соответствующие процедуры [12].

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

$$\Psi_A = \Psi_{sA} - \Psi_{sA'} \quad (8)$$

где Ψ_{sA} и $\Psi_{sA'}$ – МПС в фазных зонах A и A' (рис. 1), определенные по формуле (7).

Искомые временные функции МПС на их периоде формировались в процессе вращения магнитного поля согласно (3)–(5), как это представлено в [5, 6]. Все операции при работе программы FEMM выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [11].

На отмеченной основе, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося магнитного поля, при угловом шаге поворота ротора $\Delta\alpha$ в 1° , была сформирована дискретная временная функция МПС

$$\Psi_s(t_k), k=1,2,\dots,K. k=1,2,\dots,K. \quad (9)$$

Она имеет тот же период T , что и токи (3), и сформирована по числу точек $K=180$ на полупериоде, а затем распространена на полный период с учетом условия полупериодической асимметрии:

$$\Psi_s(t_k + T/2) = -\Psi_s(t_k), k=1,2,\dots,K. \quad (10)$$

На границах полупериода значения функции первой и последней точек совпадали, но с обратным знаком.

Временные функции МПС (10) определялись для всех фазных обмоток и при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными. Они представлены на полном периоде их изменения на рис. 5 вместе с графиками для симметричной нагрузки.

Очевидно, что при симметричной нагрузке временные функции МПС близки к синусоидальным. При несимметричной нагрузке различие функций разных фаз и их отличия от правильных синусоид проявились в значительной мере. Причем искажения и отличия заметны уже и по максимумам МПС.

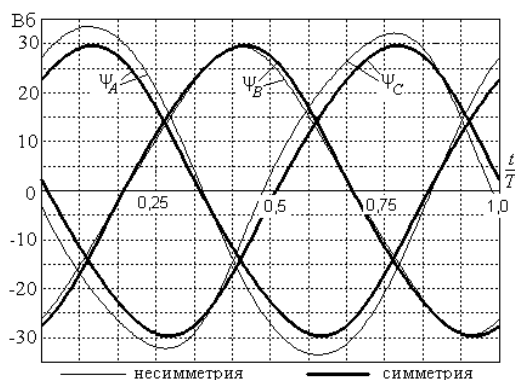


Рис. 5 – Временные функции фазных МПС при несимметричной и симметричной нагрузке ТГ

Функция МПС $\Psi_s(t_k)$ любой фазной обмотки раскладывается аналогично [5, 6] по известным правилам в косинусный гармонический ряд

$$\Psi_s = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \gamma_v). \quad (11)$$

Этот ряд состоит из нечетных гармоник с учетом упомянутого условия (10) и имеет предельный номер

N_g , который, в принципе, ограничен принятым в (9) значением K .

Ценность функции (11) в том, что на основании закона электромагнитной индукции от нее делается переход к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \gamma_v - \pi/2) \quad (12)$$

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

Было выявлено, что уже при симметричной нагрузке в характере ЭДС 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 синусоид проявились в значительно большей мере, так как искажения и отличия заметны уже и для исходных функций МПС.

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 $E_{m,v,*} = E_{m,v} / E_{m,1}$. В целом влияние высших гармоник оценивается коэффициентом искажения

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

который для «чистой» синусоиды равен единице.

Очевиден большой удельный вес третьей гармоники, которая при схеме «треугольник» также создаст проблему значительных паразитных циркуляционных токов в трех фазных обмотках [3].

Таблица 1 – Гармонический состав ЭДС фазных обмоток статора при несимметрии нагрузки

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

Основа фазовых соотношений электромагнитных величин ТГ заложена уже в формулах фазных токов (3). В дополнение к ним из (11) для каждой фазной обмотки по аргументу γ_v определяются начальные фазы МПС $\gamma_{\Psi a}$, $\gamma_{\Psi b}$ и $\gamma_{\Psi c}$ для первых гармоник.

Фазные ЭДС отстают от своих МПС на четверть периода или на 90° в соответствии с (12). Тогда начальные фазы этих ЭДС составляют $\gamma_{Ea} = \gamma_{\Psi a} - 90^\circ$;

$$\gamma_{Eb} = \gamma_{\psi b} - 90^\circ; \gamma_{Ec} = \gamma_{\psi c} - 90^\circ.$$

Определенными становятся фазовые сдвиги ЕРС относительно токов своих фазных обмоток:

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

Все эти фазовые соотношения и соотношения величин фазных токов, МПС, ЭДС и напряжений представлены в масштабе на рис. 6 посредством ВД. Это соответствует первым гармоникам электромагнитных величин ТГ при несимметричной нагрузке для всех фазных обмоток.

Для определения фазных напряжений – пока обозначим обобщенно U_s , необходимо учесть падение напряжения $\underline{U}_R = R_s I_s$ на активном сопротивлении R_s , а также ЭДС $\underline{E}_v = -jX_v I_s$ от потока лобового рассеяния фазной обмотки (здесь X_v – соответствующее индуктивное сопротивление). Значения сопротивлений определены при проектировании ТГ и составили: $R_s = 0,00537$ Ом и $X_v = 0,134$ Ом.

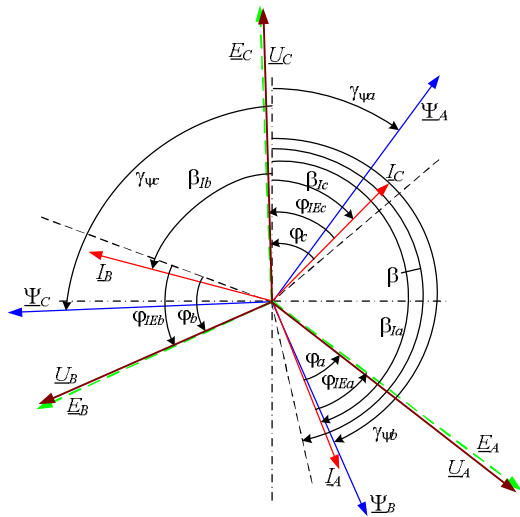


Рис. 6 – Векторная диаграмма электромагнитных величин при несимметричной нагрузке ТГ

Порядок определения U_s поясняется с помощью фрагмента ВД с рис. 6. Он взят для фазы А и показан на рис. 7, а в оригинале с увеличением масштаба, а в повернутом виде – на рис. 7, б (без соблюдения пропорций и с использованием обобщающего индекса s для фазных величин). Известно, что вектор \underline{U}_R параллелен вектору I_s , а вектор \underline{E}_v – перпендикулярен (в сторону отставания). Так они и пристроены к концу вектора фазной ЭДС \underline{E}_s и дают в итоге вектор фазного напряжения $\underline{U}_s = \underline{E}_s + \underline{E}_v - \underline{U}_R$.

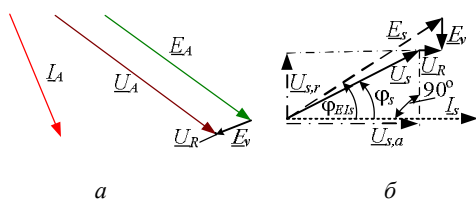


Рис. 7 – Фрагменты векторной диаграммы а – оригинал ВД с увеличенным масштабом; б – без масштаба, повернутый вид.

Из геометрических соотношений ВД на рис. 7, б

получаются активная и реактивная составляющие напряжения \underline{U}_s , его действующее значение и фазовый сдвиг от вектора фазного тока I_s :

$$U_{s,a} = E_s \cos \varphi_{EIs} - U_{sR}; U_{s,r} = E_s \sin \varphi_{EIs} - E_{sv}; \quad (15)$$

$$U_s = \sqrt{U_{s,a}^2 + U_{s,r}^2}; \varphi_s = \arctg(U_{s,r} / U_{s,a}). \quad (16)$$

Активная мощность на одну фазную обмотку

$$P_{as} = U_s I_s \cos \varphi_s. \quad (17)$$

Аналогичные действия производятся конкретно для фазных обмоток А, В и С, и в результате получены их фазные напряжения U_A, U_B, U_C , фазовые сдвиги относительно токов: $\varphi_{sA}, \varphi_{sB}$ и φ_{sC} , активные мощности P_{aA}, P_{aB} и P_{aC} .

Результаты расчетов по приведенным формулам представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные данные ТГ пофазно при несимметричной нагрузке

Фаза	I_s, A	U_s, B	$\cos \varphi_s$	$\varphi_s, \text{град}$	$P_{as}, \text{МВт}$
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

По данным табл. 2 суммарная активная мощность ТГ составила 34,9 МВт, т.е. выработана практически номинальная электрическая мощность, при той же мощности, получаемой ТГ от приводной турбины, как и при симметричной нагрузке. При ограниченных токах статора, но при номинальном токе возбуждения, это произошло за счет увеличения ЭДС и напряжения ввиду увеличения МПС при уменьшенной реакции якоря. Здесь подразумевается, что переход от симметричной к несимметричной нагрузке в системе ТГ произошел без управляющих воздействий.

Для симметричной нагрузки суммарная активная мощность трехфазной обмотки составила также 34,9 МВт, но при номинальных напряжениях, токах статора и коэффициенте мощности.

Рассмотрение данных табл. 2 показывает весьма неравномерную нагрузку фазных обмоток и явно выраженную несимметрию фазных напряжений, порожденную, в основном несимметрией ЭДС в табл. 1. Векторы напряжений также представлены на рис. 6 вместе с векторами ЭДС.

В табл. 2 видны также различия коэффициентов мощности разных фаз. Это надо трактовать так, что заданные на рис. 2 соотношения токов прямой и обратной последовательностей возможны, если несимметричная нагрузка фаз предполагает именно такой ее характер.

На данном этапе статьи можно считать, что цель, поставленная в ее начале, достигнута, а именно представлен метод организации численно-полевых расчетов электромагнитных процессов при несимметрии нагрузки ТГ. Работоспособность метода подтверждена расчетным анализом ряда

электромагнитных и энергетических величин.

Представленный метод открывает возможность исследования еще целого ряда временных функций электромагнитных и силовых величин ТГ, таких как ЭДС обмотки ротора, магнитная индукция в различных неподвижных точках ТГ, переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора, пульсации электромагнитного момента, силы, действующие на стержни обмотки статора, зубцы его сердечника и на сердечник в целом, и т.д. Однако это выходит за рамки данной статьи и будет представлено в ее продолжениях.

Выводы. 1. Выявить проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке с разных сторон можно, только рассматривая ТГ в целом, не ограничиваясь его локальными упрощенными частями. При этом для анализа широкого спектра проблем электромагнитного характера эффективной основой являются многопозиционные численные расчеты вращающихся магнитных полей, позволяющие сформировать временные функции рассматриваемых величин.

2. Задача анализа электромагнитных и силовых явлений в полной структуре электромагнитной системы ТГ чрезвычайно сложна. Поэтому здесь, сохраняя ее, рассмотрен крайний вариант допущений – отсутствие реакции ВТ в элементах конструкции ротора. Это позволило выявить «верхний» уровень проблем электромагнитного и силового характера, которые в реальности будут сглажены демпфирующей реакцией токов, возникающих в электропроводящем массиве бочки ротора и в отдельных его элементах.

3. По рассмотренному комплексу электромагнитных явлений в рамках стандартных ограничений несимметричного режима работы ТГ можно заключить, что временные функции МПС, а следовательно и ЭДС фазных обмоток статора при несимметричной нагрузке по форме значительно отличаются от синусоид и друг от друга и содержат ряд весомых высших гармоник, и в первую очередь – третью.

4. Активная мощность ТГ весьма неравномерно распределена по фазным обмоткам с различием порядка 37 %.

5. Смысл проведенного анализа режима работы ТГ при несимметричной нагрузке с допущением о неучете реакции вихревых и контурных токов в бочке и элементах конструкции ротора заключается в том, что показан «верхний» уровень проблем электромагнитного характера. И при этом подразумевается, что для их «сглаживания» до приемлемого уровня требуется адекватная такая реакция, которая фактически перенесет проблемы с них на указанные токи, что также является серьезной проблемой эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке и требует углубленного изучения.

Список литературы

1. Коган Ф. Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов / Ф. Л. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 188 с.
2. Шульженко Н. Г. Добавочные потери в роторе турбогенератора при продолжительной несимметричной нагрузке /

Н. Г. Шульженко, Пантелеят М. Г., Е. К. Руденко, Ю. В. Зозулин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №1. – С.54–57.

3. Зозулін Ю. В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю. В. Зозулін, О. С. Антонов, В. М. Бичік, А. М. Боричевський, К. О. Кобзар, О. Л. Лівшиць, В. Г. Ракогон, І. Х. Роговий, Л. Л. Хаймович, В. І. Чередник. – Харків: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
4. *Bianchi Nicola*. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)* / Nicola Bianchi. – CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.
5. Мильх В. И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №2. – С.40–46.
6. Мильх В. И. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №6. – С.40–45.
7. Васковський Ю. М. Діагностика ушкоджень обмотки збудження потужного турбогенератора на основі аналізу електромагнітних вібробуджуючих сил / Ю. М. Васковський, О. І. Тутко, А. М. Мельник // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – 2013. – №36. – С.40–46.
8. Тутко О. І. Моделювання і розподіл електромагнітних сил, що діють на зубці та стержні обмотки статора турбогенератора / О. І. Тутко, А. М. Мельник // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – №3. – С.40–46.
9. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (10 Oct 2010) [Електронний ресурс]: Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/Download>. – 2014.
10. Мильх В. И. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №1. – С.36–41.
11. Мильх В. И. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С.14–20.
12. Мильх В. И. Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений в турбогенераторах автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №1. – С.20–26.

References (transliterated)

1. Kogan F. L. *Anormalnyie rezhimy moschnyih turbogeneratorov* [Anormal modes of powerful turbogenerators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 188 p.
2. Shulzhenko N. G., Pantelyat M. G., Rudenko E. K., Zozulin Yu. V. *Dobavochnyie poteri v rotore turbogeneratora pri prodolzhitelnoy nesimmetrichnoy nagruzke* [Additional losses in the rotor of turbogenerator at the long asymmetrical loading]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2006, no. 1, pp. 54–57.
3. 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. *Stvorenniya novih tipiv ta modernizatsiya diyuchih turbogeneratoriv dlya teplovih elektrichnih stantsiy* [Creation of new types and modernisation of operating turbogenerators are for the thermal electric stations]. Harkiv, PF «Kolegium» Publ., 2011. 228 p.
4. Bianchi Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)* // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005, 276 p.
5. Milykh V. I., Polyakova N. V. *Opredelenie elektromagnitnyih parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennyih raschetov magnitnyih poley* [Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2006, no. 2, pp. 40–46.
6. Milykh V. I., Polyakova N. V. *Raschetnyiy i garmonicheskiy analiz magnitnyih poley v aktivnoy zone turbogeneratora v rezhime nagruzki* [Calculated and harmonic analysis of the magnetic fields in the active zone of the turbogenerator in the load mode].

- Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2013. no. 6, pp. 40–45.
7. Vaskovskiy Yu. M., Titko O. I., Melnik A. M. Diagnostika ushkodzen obmotki zbudzhennya potuzhnogo turbogeneratora na osnovi analizu elektromagnitnih vibrozbudzhuyuchih sil [Diagnosis of damage to the excitation winding powerful turbogenerator based on the analysis of electromagnetic forces]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki NAN Ukraini*. 2013, no. 36, p. 40–46.
8. Titko O. I., Melnik A. M. Modelyuvannya i rozpodil elektromagnitnih sil, scho diyut na zubtsi ta sterzhni obmotki statora turbogeneratora [Modelling and distribution of electromagnetic forces operated on the teeth and the cores of stator winding of the turbogenerator]. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2015, no. 3, pp. 40–46.
9. 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>>
10. Milykh V. I., Polyakova N. V. Organizatsiya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannyh ego vyihodnyh parametrov [Organization of numerical calculation of the magnetic field of turbogenerator in the mode of loading with providing of prescribed out parameters]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2012, no. 1, pp. 36–41.
11. Milykh V. I., Polyakova N. V. Avtomatizirovannyye raschety v programmnoy srede FEMM dinamiki elektromagnitnyh protsessov turbogeneratorov [Automated calculations of the dynamics of a turbo-generator electromagnetic processes in the software environment FEMM]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no. 6, pp. 16–20.
12. Milykh V. I., Polyakova N. V. Opredelenie elektromagnitnyh parametrov i fazovyih sootnosheniy v turbogeneratorah avtomatizirovannym raschetom magnitnogo polya v programmnoy srede FEMM [Determination of electromagnetic parameters and phase relations in turbo-generators by the automated calculation of the magnetic field in the software environment FEMM]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2016, no. 1, pp. 20–26.

Поступила (received) 22.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Организация численно-полевых расчетов электромагнитных процессов в турбогенераторе при его несимметричной нагрузке / В. И. Милых // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 3–10. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Организация численно-полевых расчетов электромагнитных процессов в турбогенераторе при его несимметричной нагрузке / В. И. Милых // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 3–10. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2409-9295.

Organization of the numerical-field calculations of electromagnetic processes in a turbogenerator at its asymmetrical loading / V. I. Milykh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 3–10. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Милых Владимир Иванович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Milykh Vladimir Ivanovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.