



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проводится оценка работы турбогенератора при несимметричной нагрузке в рамках ее стандартных ограничений. Анализируются временные функции магнитных потокоцеплений и ЭДС в обмотках статора и ротора и в пазовых клиньях ротора, оцениваются переменные токи в обмотке ротора и клиньях, рассматриваются силовые действия на части ферромагнитного сердечника статора, электромагнитный момент и его пульсации, переменная составляющая магнитной индукции у поверхности сердечника ротора. Выявляется распределение мощности по фазным обмоткам статора и их коэффициенты мощности. Расчеты проводятся на примере турбогенератора мощностью 200 МВт. Сопоставляются результаты при несимметричной и симметричной нагрузках.

**Ключевые слова:** турбогенератор, несимметричная нагрузка, магнитное поле, численные расчеты, электромагнитные, силовые и энергетические параметры и процессы, временные функции.

**В**ведение. В условиях эксплуатации возможна работа турбогенераторов (ТГ) на несимметричную нагрузку [1]. При этом возникают проблемы электромагнитного, силового и теплового проявлений, создающие угрозы надежности и долговечности ТГ.

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

Выявить разносторонние проблемы эксплуатации ТГ с несимметричной нагрузкой можно, рассматривая ТГ в целом, не ограничиваясь его локальными упрощенными частями, как это обычно делалось. Однако в полной постановке — это задача чрезвычайной сложности. Именно поэтому в серии работ [2–5], посвященных исследованию несимметричной нагрузки ТГ, сохраняется полная структура электромагнитной системы ТГ в его активной части, но принимается иной вариант допущений — отсутствие реакции ВТ в элементах конструкции ротора.

Такой подход позволяет 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. Новизна представленных в [2–5] результатов достигнута благодаря сочетанию численных методов расчета магнитных полей (МП) в динамике, высокопроизводительных компьютеров и собственного эффективного программного обеспечения.

В упомянутых работах рассмотрены разные стороны электромагнитных, энергетических и силовых параметров и процессов при несимметричной нагрузке в ТГ мощностью 35 МВт.

Целью данной статьи является представление результатов численно-полевого анализа работы ТГ мощностью 200 МВт при несимметрии нагрузки в рамках указанных ограничений стандарта ГОСТ 533-2000. При этом, в отличие от [2–5], анализ электромагнитных и силовых параметров и процессов, сопутствующих этому режиму работы, здесь проводится в комплексе, но ограничивается той их частью, в которой отличие несимметричной нагрузки от симметричной проявляется в наибольшей степени. Для сравнения параллельно проводились аналогичные исследования и для симметричной нагрузки того же ТГ.

**Объект и исходные положения исследования.** Модель электромагнитной системы рассматриваемого ТГ представлена на Рис. 1 его поперечным сечением. ТГ имеет номинальные: мощность  $P_N = 200$  МВт; фазное напряжение  $U_{sN} = 9093$  В и ток  $I_{sN} = 8625$  А, коэффициент мощности  $\cos \varphi_{sN} = 0,85$ ;

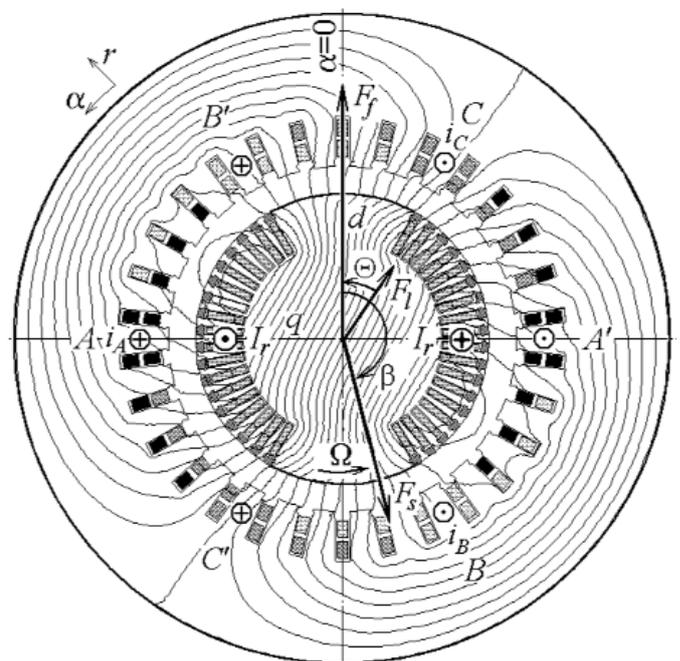


Рис. 1. Электромагнитная система ТГ

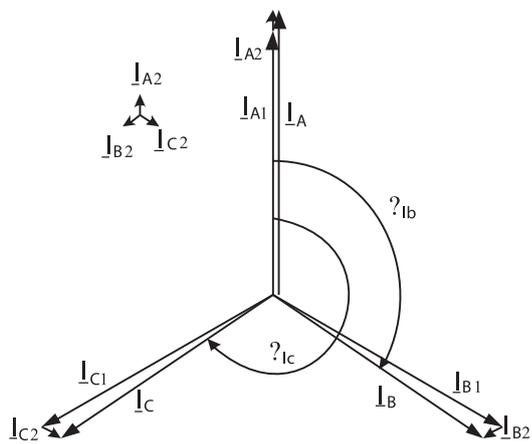


Рис. 2. Векторная диаграмма фазных токов ТГ

частоту  $f_s = 50$  Гц. Его числа фаз  $m_s = 3$  и пар полюсов  $p = 1$ ; активная длина  $l_a = 5$  м; немагнитный зазор  $\delta = 0,1$  м; диаметр ротора  $d_r = 1,075$  м; относительное укорочение обмотки статора – 0,8; числа последовательных витков фазной обмотки статора  $N_s = 10$ , обмотки ротора  $N_f = 180$ . На Рис. 1 выделены фазные зоны двухслойной укороченной трехфазной обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$ . Показана используемая полярная  $(r, \alpha)$  система координат, продольная  $d$  и поперечная  $q$  оси ротора.

Чтобы избежать излишних усложнений, исследования проводятся в предположении автономной работы ТГ и на его активной части в пределах аксиальной длины сердечников. Это позволило в достаточной мере проявить проблемы электромагнитного и силового характера при несимметричной нагрузке 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, которую представим в символической форме:

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

Действующее значение большего из этих токов задавалось равным  $I_{sN}$ , а в его составе принят ток обратной последовательности  $I_{s2} = 0,08 I_{sN}$ . Для конкретики начальные фазы токов фазы А приняты одинаковыми и равными нулю. Тогда становятся определенными значения токов обратной последовательности, начальные фазы симметричных составляющих токов и результирующие фазные токи. Их значения являются предметом решения алгебраической задачи, результаты которого проиллюстрированы на Рис. 2 векторной диаграммой.

Соответственно представляются в комплексной форме результирующие фазные токи:

$$\underline{I}_A = I_A e^{j\beta_{Ia}}, \underline{I}_B = I_B e^{j\beta_{Ib}}, \underline{I}_C = I_C e^{j\beta_{Ic}}. \quad (2)$$

где их действующие значения составили

$$I_A = 8625 \text{ А}; I_B = 7613,5 \text{ А}; I_C = 7613,5 \text{ А},$$

начальные фазы –

$$\beta_{Ia} = 0; \beta_{Ib} = -124,50^\circ; \beta_{Ic} = -235,50^\circ.$$

При симметричной нагрузке аналогичные величины составляли  $I_A = I_B = I_C = 8625 \text{ А}$ ,  $\beta_{Ia} = 0$ ;  $\beta_{Ib} = -120^\circ$ ;  $\beta_{Ic} = -240^\circ$ .

В итоге, при расчете МП при нагрузке ТГ используется трехфазная система мгновенных значений фазных токов:

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

где  $\omega = 2\pi f_s$  – угловая частота;  $I_{ma}, I_{mb}, I_{mc}$  – амплитуды токов.

В (3) входит обобщенный фазовый сдвиг трехфазной системы токов  $\beta$ , который определяется вместе с током возбуждения  $I_f$  численно-полевыми расчетами из условия обеспечения заданных выходных параметров ТГ. Для симметричной нагрузки посредством метода, представленного в [6], определены  $I_f = 1812 \text{ А}$ ,  $\beta = -157,29^\circ$  (точность для "чистоты" дальнейших числовых экспериментов).

Для несимметричной нагрузки сохранили тот же ток возбуждения и для обеспечения той же номинальной мощности  $P_N = 200 \text{ МВт}$  итерационным путем нашли угол  $\beta = -153,75^\circ$ . Фазовые соотношения при несимметричной нагрузке ТГ, выявленные численно-полевыми расчетами методом из [7], показаны на Рис. 1, где представлены векторы МДС:  $\underline{E}_f$  – обмотки возбуждения,  $\underline{F}^s$  – трехфазной обмотки статора,  $\underline{E}_l$  – условная результирующая в режиме нагрузки. Здесь же представлен и угол нагрузки ТГ  $\Theta$ .

**Анализ электромагнитных и силовых процессов в ТГ.** Исследование процессов при симметричной и несимметричной нагрузках проводится путем выявления временных функций электромагнитных и силовых величин. Это делается посредством многопозиционных расчетов вращающегося магнитного поля ТГ, принципы которого представлены в [2–5].

Магнитное поле ТГ рассчитывается в двумерной постановке в его поперечном сечении (Рис. 1) на длине активной части методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопро-

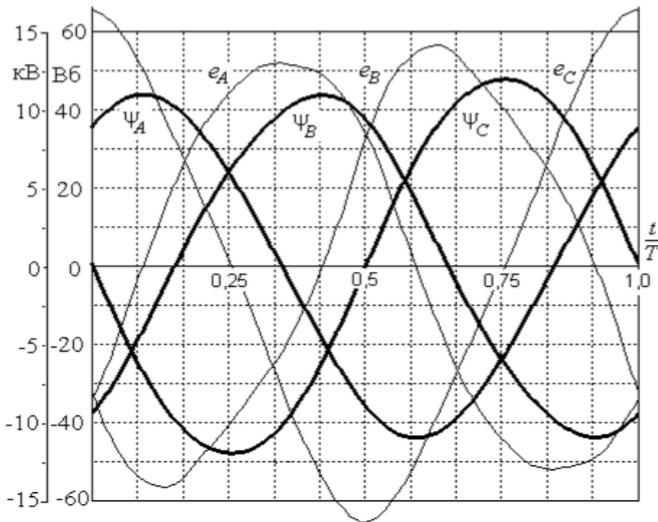


Рис. 3. Временные функции фазных МПС  $\psi_s$  и ЭДС  $e_s$  при несимметричной нагрузке ТГ

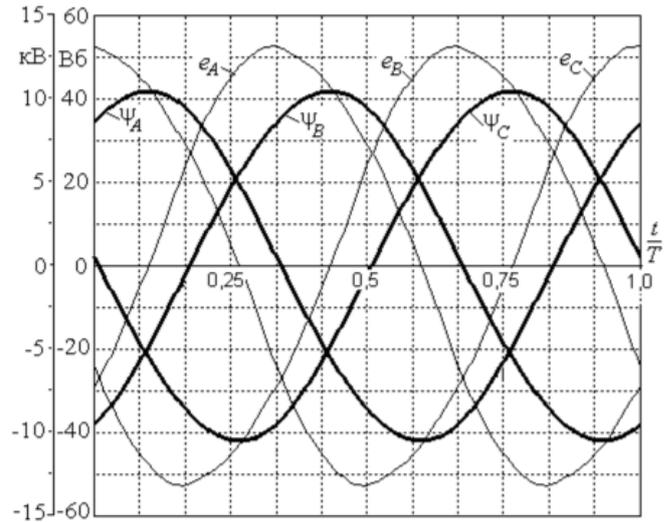


Рис. 4. Временные функции фазных МПС  $\psi_s$  и ЭДС  $e_s$  при симметричной нагрузке ТГ

вода по общедоступной программе FEMM [8].

А именно, задается с шагом  $\Delta t$  временной ряд

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

с обеспечением вращения ротора посредством его установки в угловые позиции

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

и синхронного вращения МП статора системой фазных токов в стержнях его обмотки (3), где  $n_a$  — минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения;  $\Delta \alpha = \Omega \Delta t$ ,  $t$  — угловой шаг вращения ротора.

В итоге искомые временные функции разных величин представлялись дискретным числовым рядом

$$\Gamma(t_k); \quad k = 1, 2, \dots, na, \quad (6)$$

где  $\Gamma$  — некий обобщенный символ функций.

Временные функции  $\Gamma(t)$  разных величин в ТГ имеют разные периоды, что рассматривалось подробнее в [9]. При симметричной нагрузке для выявления функций с периодом  $T$  необходимо их сформировать на временном интервале в шестую часть периода, при несимметрии нагрузки — в полпериода. При этом угол поворота ротора  $\Delta \alpha$  составлял  $1^\circ$ .

Картины МП в исходный момент времени для несимметричной нагрузки представлена силовыми линиями на рис. 1, при симметричной нагрузке картина похожа с некоторым изменением его угла поворота.

**Магнитные потокосцепления и ЭДС фазных обмоток статора.** Основой анализа электромагнитных и энергетических величин ТГ является магнитное потокосцепление (МПС) фазных обмоток статора и его временные функции.

Искомые временные функции МПС на их пе-

риоде формировались в процессе вращения магнитного поля согласно (3)–(5), как это представлено в [9]. Все операции при работе программы FEMM выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [8], встроенном в программу FEMM.

Временные функции МПС  $\psi_s(t)$  определялись для всех фазных обмоток и при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными. Они представлены на полном периоде их изменения на Рис. 3, а на Рис. 4 аналогичные графики даны и для симметричной нагрузке. Здесь и далее индекс  $s$  заменяет совокупность фазных индексов  $A, B, C$ .

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.

Функция МПС  $\psi_s(t_k)$  любой фазной обмотки раскладывается аналогично [2, 3] по известным правилам в косинусный гармонический ряд типа:

$$\psi_s = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \gamma_v). \quad (6)$$

Ценность функции (6) в том, что на основании закона электромагнитной индукции от нее делается переход к ЭДС фазной обмотки, а именно:

$$e_s = -\frac{d\psi_s}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \gamma_v - \pi/2), \quad (7)$$

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

Временные функции ЭДС (7)  $e_s(t)$  определялись для каждой из фазных обмоток и при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными. Они представлены на полном периоде их изменения на Рис. 3. Для сравнения, расчеты бы-



Таблица 1. Гармонический состав ЭДС фазных обмоток статора при несимметрии нагрузке

Фаза	$E_{m,1}$ , В	$E_{s,1}$ , В	$E_{m,3,*}$	$E_{m,5,*}$
A	13617	9629	0,050	0,007
B	13723	9704	0,097	0,007
C	15356	10858	0,062	0,004
Фаза	$E_{m,7,*}$	$E_{m,9,*}$	$E_{m,11,*}$	$d_{dist}$
A	0,003	0,005	0,002	0,999
B	0,006	0,005	0,002	0,995
C	0,004	0,003	-	0,998

ли проведены по той же методике и при симметричной нагрузке ТГ. Соответствующие результаты представлены на Рис. 4.

Было выявлено, что уже при симметричной нагрузке в характере ЭДС проявляется заметное влияние высших гармоник, амплитуды которых, 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 уже представлявшимся в [3] коэффициентом искажения  $d_{dist}$  который для "чистой" синусоиды равен единице. Очевиден большой удельный вес третьей гармоники.

**Фазовые соотношения, напряжения и мощности фазных обмоток статора.** Основа фазовых соотношений электромагнитных величин ТГ заложена уже в формулах фазных токов (3). В дополнение к ним из (6) для каждой фазной обмотки по аргументу 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  $90^\circ$  в соответствии с (7). 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 ЭДС относительно токов своих фазных обмоток:

$$\varphi_{IEa} = \gamma_{Ea} - \beta_{Ia}; \varphi_{IEb} = \gamma_{Eb} - \beta_{Ib}; \varphi_{IEc} = \gamma_{Ec} - \beta_{Ic}. \quad (8)$$

Все эти фазовые соотношения и соотношения

Таблица 2. Расчетные данные ТГ пофазно при несимметричной нагрузке

Фаза	$I_s$ , А	$U_s$ , В	$\cos\varphi_s$	$\varphi_s$ , град	$P_{as}$ , МВт
A	8625,0	9442	0,890	27,10	72,493
B	7613,5	9478	0,761	40,48	54,887
C	7613,5	10695	0,892	26,84	72,658

величин фазных токов, МПС, ЭДС и падений напряжения  $\underline{U}_R = R_s \underline{I}_s$  на активном сопротивлении  $R_s$ , а также ЭДС  $\underline{E}_{fh} = -jX_{fh} \underline{I}_s$  от потока лобового рассеяния фазной обмотки (здесь  $X_{fh}$  — соответствующее индуктивное сопротивление) позволяют определить фазные напряжения  $U_s$ , а также их фазовые сдвиги  $\varphi_s$  относительно своих фазных токов. Например, в комплексной форме  $\underline{U}_s = \underline{E}_s + \underline{E}_{fh} - \underline{U}_R$

Тогда активная мощность на фазную обмотку:

$$P_{as} = U_s I_s \cos \varphi_s. \quad (9)$$

Результаты расчетов по приведенным формулам представлены в Табл. 2.

По данным Табл. 2 суммарная активная мощность ТГ составила 200 МВт, т. е. выработана 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 200 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.

В Табл. 2 видны различия коэффициентов мощности разных фаз. Это трактуется так, что заданные на Рис. 2 соотношения токов прямой и обратной последовательностей возможны, если несимметричная нагрузка фаз предполагает именно такой характер.

**Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке.** В этой части работы представляются принципы анализа и расчетный анализ электромагнитных процессов в роторе ТГ при несимметричной нагрузке в рамках указанных ограничений стандарта и при рассмотрении его электромагнитной системы на активной части в целом. Это проводится посредством выявления и анализа временных функций МПС и ЭДС обмотки ротора и клиньев его сердечника.

На основе многопозиционных расчетов вращающегося магнитного поля была сформирована дискретная временная функция МПС:



$$\Psi_f(t_k), k = 1, 2, \dots, na, \quad (10)$$

которая раскладывается аналогично (6) по известным правилам в гармонический ряд:

$$\Psi_f = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{K_g} \Psi_{m,v} \cos(2v\omega t + \gamma_v), \quad (11)$$

вплоть до номера  $K_g$ , который ограничен принятым в (4), (5), (10) значением  $na$ .

Период функции МПС  $T_f$  оказывается в два раза меньше периода  $T$  токов (3), т. е.  $T_f = 0,5T$ . Значит, несущая частота  $f_f = 2f_s$  оказывается двойной, что подтверждает известную теорию электрических машин.

Функции МПС  $\Psi(t)$  обмотки ротора для несимметричной – 1 и симметричной – 2 нагрузок даны на Рис. 5, причем график 2 почти "слился" с осью абсцисс. А вот значения МПС для несимметричной нагрузки весьма существенны, что, естественно, отразилось и на ЭДС в обмотке возбуждения.

Эта ЭДС определяется через (11) на основании закона электромагнитной индукции:

$$e_f = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{N_g} v\omega_f \Psi_{m,v} \cos(v\omega_f t + \gamma_v - \pi/2), \quad (12)$$

где амплитуды гармоник  $E_{m,v} = v\omega_f \Psi_{m,v}$ ; угловая частота несущей гармоники  $\omega_f = 2\omega$ .

Графики функций ЭДС обмотки ротора  $e_f(t)$  представлены на том же Рис. 5 с сохранением смысла номеров 1 и 2. Поскольку амплитуды гармоник ЭДС пропорциональны их номерам, здесь уже проявились высшие гармоники и для симметричной нагрузки ТГ. Выявилось, что ЭДС в обмотке ротора при несимметричной нагрузке достигают чрезмерно больших значений. Так, например, максимум переменной ЭДС в обмотке ротора при несимметричной нагрузке составил около 31 кВ.

Графики функций ЭДС представлены при учете 30 гармоник. При увеличении числа учитываемых гармоник в кривых ЭДС появляются еще более выраженные пульсации – зубцовые и другие.

Значения ЭДС обмотки ротора и их гармонический состав для несимметричной нагрузки представлены в Табл. 3. Здесь амплитуда первой гармоники ЭДС  $E_{m,1}$  и ее действующее значение  $E_{f,1}$  даны в абсолютном измерении, а амплитуды высших гармоник – в относительных единицах:  $E_{m,v,*} = E_{m,v}/E_{m,1}$ . А в целом, гармонический состав

Таблица 3. Амплитуда и действующее значение первой гармоники и гармонический состав ЭДС обмотки ротора

$E_{m,1}$ , кВ	$E_{f,1}$ , кВ	$E_{m,2*}$	$E_{m,3*}$	$E_{m,4*}$	$E_{m,5*}$
30,7	21,7	0,054	0,030	0,010	0,008
$E_{m,6*}$	$E_{m,7*}$	$E_{m,8*}$	$E_{m,9*}$	$E_{m,10*}$	$d_{dist}$
0,010	0,005	0,005	0,003	0,001	0,997

оценивается известным коэффициентом искажения  $d_{dist}$  [4].

Для симметричной нагрузки было получено  $E_{m,1} = 6,7$  В, наибольшие гармоники составляли, например,  $E_{m,6*} = 200$ ;  $E_{m,6*} = 72$ ;  $E_{m,16*} = 29$ ;  $E_{m,24*} = 34$ ;  $E_{m,27*} = 43$ ;  $E_{m,31*} = 39$ ;  $E_{m,32*} = 56$ ;  $E_{m,53*} = 121$ ;  $E_{m,58*} = 65$  и т. д. Т. е. основная гармоника практически не проявляется, а наиболее заметные гармоники оказываются проявлением взаимодействия зубчатых структур статора и ротора, а также дискретной фазной структуры статора. Локальный максимум переменной ЭДС в обмотке ротора при такой нагрузке – 3,8 кВ, или 21 В на один виток, что намного меньше, чем при несимметричной нагрузке.

Заметим, что в Табл. 3 номер каждой гармоники надо умножить на 2, если их сопоставлять с номерами гармоник, например, ЭДС в обмотке статора.

Не следует воспринимать выявленные значения ЭДС в обмотке ротора как чрезмерную угрозу электробезопасности. То же касается переменной составляющей тока  $i_{fa}$ , возникающего под действием этой ЭДС. Оценка этого тока выполнена с использованием сопротивлений контура обмотки возбуждения.

Для определения реактивного сопротивления  $X_f$  были проведены расчеты магнитного поля ТГ в

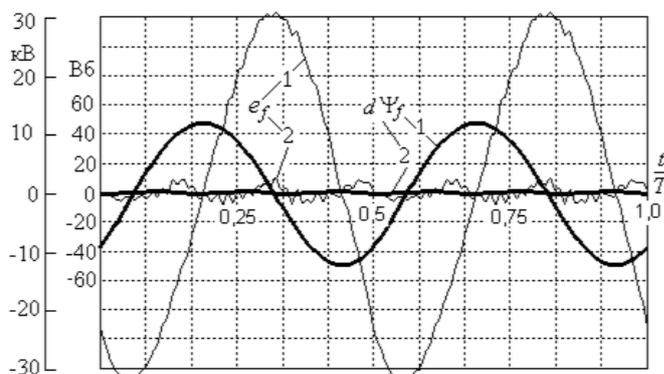


Рис. 5. Временные функции МПС и ЭДС обмотки ротора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

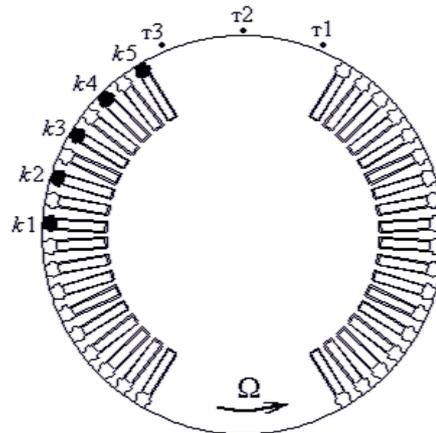


Рис. 6. Ротор с номерными клиньями и точками у поверхности большого зуба



Таблиця 4. ЭДС и токи клиньев ротора

Параметр	Номера клиньев				
	1	2	3	4	5
$E_{m,1}$ , В	115,5	99,6	85,4	81,8	89,5
$E_{k,1}$ , В	81,6	70,4	60,4	57,8	63,3
$I_{kl}$ , А	5197	4484	3847	3681	4032
$d_{dist}$	0,993	0,995	0,994	0,992	0,992
$E_{m,3^*}$	0,088	0,074	0,062	0,061	0,094
$E_{m,6^*}$	0,041	0,049	0,069	0,091	0,058
$E_{m,49^*}$	0,022	0,019	0,050	0,028	0,033
$E_{m,53^*}$	0,022	0,014	0,020	0,025	0,019
$E_{max}$ , В	135	121	103	102	101

режиме холостого хода при номинальном возбуждении. Затем определено МПС обмотки возбуждения  $\Psi_f$  и далее – статическое значение индуктивности  $L_f = \Psi_f / I_f = 0,98$  Гн и реактивное  $X_f = \omega_f L_f = 650$  Ом при двойной частоте  $f_f = 2 f_s$ .

Активное сопротивление  $R_p$ , которое при рабочей температуре составило 0,24 Ом, а также сопротивление источника постоянного тока и подводящих проводников по сравнению с  $X_f$  оказываются пренебрежимо малыми.

Действующее значение первой гармоники переменной составляющей тока  $i_{fa}$  в контуре обмотки возбуждения по закону Ома:

$$I_{fa} = E_{f,1} / \sqrt{R_f^2 + X_f^2}. \quad (13)$$

По этой формуле оценочное значение тока  $I_{fa}$  составило 33,4 А, которое, по сравнению с номи-

нальным током возбуждения, выглядит не столь уж и угрожающим. Так же, как и ЭДС  $e_p$ , которая по контуру обмотки будет скомпенсирована распределенным падением напряжения от тока  $i_{fa}$ .

Несомненный интерес представляют также МПС, ЭДС и токи пазовых клиньев ротора.

Принцип определения этих величин в целом соответствует тому, что было сделано для обмотки возбуждения. Для конкретного анализа были взяты пять клиньев  $k1 - k5$ , которые пронумерованы на Рис. 6.

Многопозиционными расчетами магнитного поля были сформированы дискретные временные функции МПС  $\Psi_k$  клиньев, аналогичные (10). Эти функции имеют период  $T_p$ , равный  $T/2$ , т.е. это функции двойной частоты  $f_f = 2 f_s$ , как и ЭДС в обмотке ротора.

На основе гармонического разложения типа (12) и формулы типа (13) получены временные функции ЭДС клиньев  $e_k$ , которые изображены на Рис. 7. Здесь использованы ряды с числом гармоник  $K_g = 30$ , дающим возможность проявиться зубцовым гармоникам от сердечника статора.

В числовой форме ЭДС клиньев представлены в Табл. 4, где смысл обозначения величин такой же, как и в Табл. 3. Даны также значения амплитуд наиболее заметных гармоник в относительной форме.

Оценка тока клина выполнена следующим образом. В диаметрально расположенной паре клиньев был задан такой ток  $I_{kl}$ , который обеспечил насыщение магнитопровода, примерно соответствующее режиму номинальной нагрузки ТГ. Численным расчетом магнитного поля во всем ТГ программой FEMM определены на один клин МПС  $\Psi_{kl}$  и далее индуктивность  $L_{kl} = k_l / I_{kl}$ . Эта индуктивность для разных клиньев несколько различна, а в среднем составила  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Гн. При этом реактивное сопротивление клина при двойной частоте  $X_{kl} = \omega_{kl} L_{kl} = 1,57 \cdot 10^{-2}$  Ом.

Активное сопротивление совокупности дюралюминиевых клиньев на длине сердечника ротора без учета переходных контактных сопротивлений в местах замыкания токов через зубцы сердечника ротора составило  $R_{kl} = 5,2 \cdot 10^{-4}$  Ом. Оно оказалось намного меньше, чем  $X_{kl}$ , поэтому сделанное допущение не столь влиятельно.

Действующее значение тока клина  $I_{kl}$  для первой гармоники определялось по формуле, аналогичной (13), а результаты расчета даны в Табл. 4. В ней еще представлены максимальные значения рассматриваемых ЭДС  $E_{max}$ .

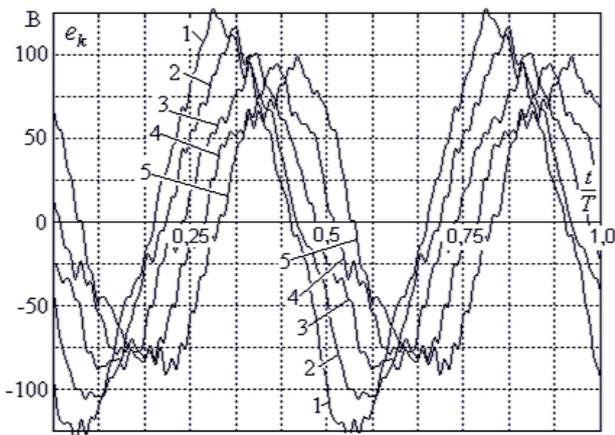


Рис. 7. Временные функции ЭДС клиньев ротора

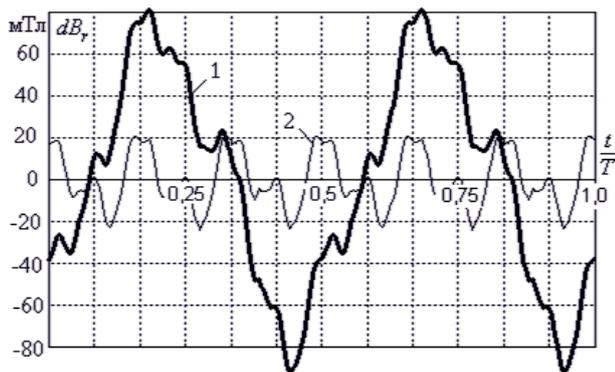


Рис. 8. Временные функции ПСМИ на поверхности вращающегося ротора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия



Равномерно распределенная плотность тока  $J_c$  в клине с наибольшим током составила  $4,8 \text{ А/мм}^2$ , что соизмеримо с плотностью рабочего тока в проводниках обмотки возбуждения, равной  $8,1 \text{ А/мм}^2$ . Но вот плотность тепловыделений  $q_w = (J_c)^2 \rho_c$  в клине оказалась больше, так как удельное сопротивление дюралюминия  $\rho_c$  больше, чем у меди, а именно,  $q_w$  в обмотке составило  $1,1 \text{ Вт/см}^3$ , в клине —  $1,3 \text{ Вт/см}^3$ .

Более реалистичные значения токов клиньев мог бы выявить расчет электромагнитного процесса с учетом вращения магнитного поля и полной реакции этих токов, да еще и вихревых токов в бочке ротора. Однако, как уже отмечалось, такая задача имеет чрезмерную сложность и ее решение в полной мере пока представляется недоступным. Тем не менее, проведенные здесь расчеты выявили уровень термической проблемы в клиньях ротора, которая сопутствует несимметричному режиму работы ТГ на допустимом по стандарту уровне.

**Переменная составляющая магнитной индукции (ПСМИ) на поверхности вращающегося ротора.** Для ТГ эта величина интересует проектировщиков ТГ в связи с тем, что она приводит к вихревым токам, дополнительным потерям мощности и нагреву поверхностного слоя ротора [1]. И этот процесс связывается с радиальной составляющей магнитной индукции. Конкретно, для точек на вращающемся роторе в процессе расчетов вращающегося магнитного поля, была сформирована дискретная временная функция радиальной составляющей магнитной индукции. Из полных значений функции  $B_r(t_k)$  выделяется постоянная составляющая  $B_{rav}$  и получается в виде числового массива дискретная временная функция ПСМИ:

$$B_{rt}(t_k) = B_r(t_k) - B_{rav}; \quad k = 1, 2, \dots, na. \quad (14)$$

Графики функции ПСМИ для точки  $t_2$  по середине большого зуба ротора (Рис. 5) на расстоянии 4 мм от его поверхности даны для двух вариантов нагрузки ТГ на Рис. 10, где: 1, 2 — при несимметрии и симметрии нагрузки при числе учетных гармоник  $K_g = 90$ .

При симметричной нагрузке период изменения временных функций ПСМИ, как показано в [10], составляет  $T_t = 0,5 \cdot T/m_s$ , где  $m_s$  — число фаз обмотки статора. Это поясняется дискретной структурой фазных зон обмотки статора. И, кроме этого, явно выражены зубцовые пульсации с частотой  $f_{Q_s} = Q_s f_s$ , где  $Q_s$  — число пазов статора. При несимметрии все практически сохраняется, но появляются "глобальные" пульсации с частотой  $f_f = 2f_s$ , как в ЭДС обмотки возбуждения и в клиньях. То есть ситуации с вихревыми токами и поверхностными по-

Таблица 5. Сравнение ПСМИ в указанных точках поверхности большого зуба ротора

Магнитная индукция	$B_{rav}$ , Тл			$B_{rtmax}$ , мТл		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
Симметрия	0,90	0,80	0,73	24	24	22
Несимметрия	0,99	0,88	0,80	90	93	94

терями в "бочке" ротора существенно усложняется.

Сравнение значений постоянных составляющих  $B_{rav}$  и максимумов ПСМИ  $B_{rtmax}$  дано в Табл. 5 для трех точек у поверхности ротора (Рис. 6). Ясно, что  $B_{rtmax}$  в ТГ при несимметричной нагрузке в 3,7 — 4,3 раза больше, чем при симметричной нагрузке. С учетом того, что поверхностные потери мощности пропорциональны квадрату ПСМИ, термическая проблема ротора усугубляется.

**Силовые процессы в турбогенераторе при несимметричной нагрузке.** Анализ силовых процессов в ТГ при несимметрии нагрузки в рамках ограниченный стандартов проводится с рассмотрением его электромагнитной системы в целом на активной длине посредством выявления и анализа временных функций силовых действий на половинки его ферромагнитного сердечника и электромагнитного момента.

Отметим, что силовые процессы исследуются теми же методами и формулами, которые уже были представлены в [5, 11]. Поэтому сразу перейдем к представлению результатов расчетов этих процессов.

Силовые действия на части ферромагнитного сердечника статора после расчета магнитного поля определяются через тензор магнитного натяжения (ТМН) Максвелла, который описывает давление на единицу поверхности в немагнитной части области расчета, как это было представлено в [5].

Силы, действующие на сердечник статора в целом в поперечном сечении ТГ, определялись на основе составляющих ТМН [11]. Конкретно рассматривалась радиальная сила  $F_{Tr}$ , действующая на половину сечения сердечника. Она определялась на дуге окружности в пределах полюсного деления ТГ, проведенной вблизи расточки сердечника статора. Эта сила приведена к горизонтальной оси ТГ.

Временные функции силы  $F_{Tr}(t_k)$  представлены на Рис. 9, где показаны направления сил, действующих на половинки сердечника статора (значения сил даны на единицу аксиальной длины ТГ). Эти силы являются пульсирующими со значительной долей постоянной составляющей. Они приложены к аксиальному сечению сердечника по линии  $ab$ .

Фактически, при работе ТГ линия  $ab$  вращается вместе с магнитным полем, и по расточке сердечника "бегут" волны силы  $F_{Tr}$ . Ее постоян-



Таблица 6. Значения ЭММ и электромагнитной мощности ТГ

Тип нагрузки	Параметры		
	$M_{emav}$ , кН·м	$P_{emav}$ , МВт	$M_{em,2}$ , кН·м
симметрия	637	200	–
несимметрия	637	200	112

ная составляющая создает напряженное "стянутое" состояние сердечника статора, а переменная – дополнительно деформирует сердечник до "бегающего" эллипса.

В целом на Рис. 9 видно, что при несимметричной нагрузке силы  $F_{Tr}$  заметно увеличились. При длительной эксплуатации это может ускорить повреждения стяжных призм сердечника, а также ослабить монолитность его шихтованных пакетов, что и наблюдается в действительности.

**Электромагнитный момент**, действующий на ротор, определяется в программе FEMM [8] по известной формуле [11] и предусмотренной процедуре на скрипте Lua через угловую составляющую ТМН.

Расчеты в моменты времени (4) дали дискретную временную функцию ЭММ

$$M_{em}(t_k), k = 1, 2, \dots, na, \quad (15)$$

которая представлена на Рис. 10.

Эта функция, прежде всего, характеризуется средней величиной ЭММ

$$M_{emav} = \frac{1}{na} \sum_{k=1}^{na} M_{em,k}, \quad (16)$$

значения которой для двух видов нагрузки пред-

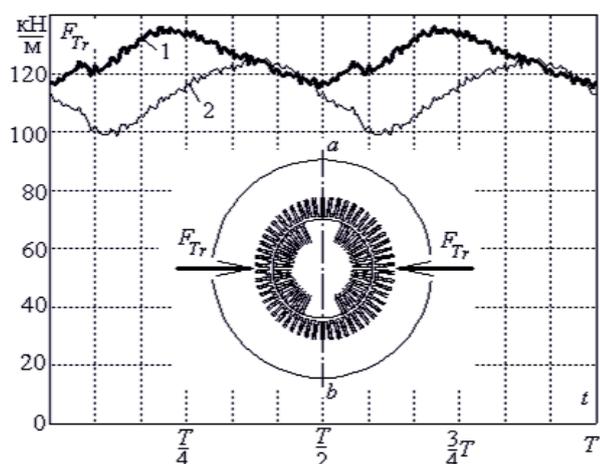


Рис. 9. Временные функции сил, приложенных к половинкам сердечника статора: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

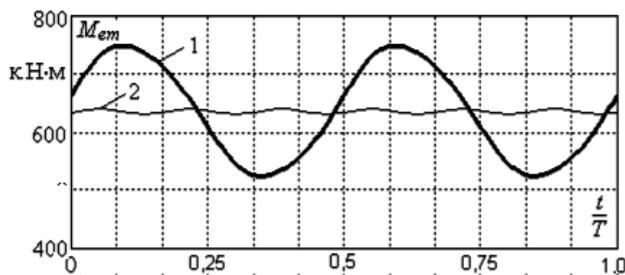


Рис. 10. Временные функции ЭММ в ТГ: 1 – несимметрия; 2 – симметрия

ставлены в табл. 6. Здесь же даны значения соответствующей электромагнитной мощности ТГ:

$$P_{em} = M_{emav} \Omega. \quad (17)$$

В функциях  $M_{em}(t_k)$  можно выделить визуально или гармоническим разложением пульсации с "зубцовой" частотой статора, а также с частотой  $f_{s6} = 6f_s$ , вызванной дискретной фазной структурой обмотки статора, что ранее рассматривалось в [11]. В случае симметричной нагрузки указанные пульсации на фоне  $M_{emav}$  выражены слабо, в то время как пульсации из-за несимметрии, которые, как видно, имеют двойную частоту  $f_{s2} = 2f_s$  в пределах глобального периода T, очень значительны.

Функция  $M_{em}(t)$  была разложена в гармонический ряд с несущей частотой  $f_{s2}$  по аналогии с формулой (11). Амплитуда основной – второй гармоники ЭММ  $M_{em,2}$  дана в Табл. 6, и при несимметрии составила около 18% от постоянной составляющей  $M_{emav}$ , что, безусловно, вызовет очень серьезные проблемы эксплуатации и долговечности ТГ ввиду вибраций.

Электромагнитная мощность в Табл. 6 совпадает с суммарной активной мощностью в Табл. 2, но при более точном представлении они различаются на значение, составляющее электрические потери мощности в обмотке статора, так же, как это показано в [5].

**Выводы.**

1. Выявить проблемы эксплуатации ТГ при несимметричной нагрузке с разных сторон можно, рассматривая активную часть 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 функций 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



заклучить, 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. Предполагаемый при несимметрии нагрузки синусоидальный характер фазных токов ТГ не может иметь места, так как временные функции ЭДС и напряжений явно несинусоидальны и имеют широкий и значительный спектр гармонических составляющих.

5. Наблюдается значительный дисбаланс активных мощностей, вырабатываемых отдельными фазными обмотками статора. В энергетическом отношении активная мощность ТГ по фазным обмоткам распределена весьма неравномерно с расхождением на 25% от среднего значения фазных мощностей. Напряжения и коэффициенты мощности этих обмоток также заметно отличаются, как и фазные токи, несимметрия которых и является причиной усложнений эксплуатации ТГ.

6. Временные функции ЭДС обмотки ротора имеют двойную несущую частоту и по величине значительно превышают даже напряжение в обмотке статора, однако вызванная ими переменная составляющая тока этой обмотки достигает лишь 1,8% от номинального тока возбуждения;

7. В клиньях сердечника ротора на его длине ЭДС оказываются заметно разными, имеют широкий гармонический состав и достигают 135 В по максимальному и 82 В — по действующему значению; токи в клиньях также разные и достигают значений 3,7 — 5,2 кА, соответствующая плотность тока составляет до 4,8 А/мм<sup>2</sup>, плотность тепловыделений — до 1,3 Вт/см<sup>3</sup>, что находится на уровне таких величин обмотки ротора.

8. Переменная составляющей магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора при возникновении несимметрии нагрузки ТГ значительно усилилась — примерно в 4 раза, и это, в основном, из-за дискретной фазной структуры статора.

9. Пульсации ЭММ при несимметричной нагрузке явно выражены и достигают 18% от его среднего значения; силовые воздействия на половинки сердечника статора имеют сложный характер и из-за несимметрии нагрузки увеличились на 14%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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 / Х. : ПФ "Колегіум", 2011. — 228 с.

2. Мильх 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.

3. Мильх В. И. Численно-полевой анализ магнитного поля и электрических величин в статоре турбогенератора при автономной несимметричной нагрузке // Електротехніка і електромеханіка. — 2016. — № 5. — С. 16—22.

4. Мильх В. И. Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке // Технічна електродинаміка. — 2017. — № 3. — С. 49—57.

5. Мильх В. И., Потоцкий Д. В. Численно-полевой анализ силовых и энергетических процессов в турбогенераторе при несимметрии нагрузки // Технічна електродинаміка. — 2017. — № 4. — С. 29—35.

6. Мильх 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. doi: 10.20998/2074-272X.2012.1.08.

7. Мильх 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.

8. Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.

9. Мильх В. И., Полякова Н. В. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов // Електротехніка і електромеханіка. — 2015. — № 6. — С. 24—30. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.04.

10. Мильх В. И., Полякова Н. В. Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 2. — С. 29—36.

11. Мильх В. И., Полякова Н. В. Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 3. — С. 56—63.

