

В. І. МІЛИХ, С. А. РЕВУЖЕНКО

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В КРУПНОМУ ТУРБОГЕНЕРАТОРІ В РЕЖИМІ НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

На основі багатопозиційних чисельних розрахунків обертового магнітного поля в програмі FEMM виконано дослідження електромагнітних параметрів та силових процесів в турбогенераторі потужністю 325 МВт при несиметричному навантаженні в рамках його стандартних обмежень. Проводиться аналіз часових функцій магнітного потокозчеплення та відповідних ЕРС обмотки ротора та фазних обмоток статора, розглядаються силові процеси в феромагнітному осерді статора турбогенератора, а саме силові дії на зубці та на осердя в цілому, досліджуються пульсації електромагнітного моменту та часові функції його змінної складової. Для більш детальної ілюстрації результатів, аналогічні розрахунки проводяться і для симетричного навантаження турбогенератора.

Ключові слова: турбогенератор, несиметричне навантаження, магнітне поле, чисельні розрахунки, часові функції, силові процеси.

На основе многопозиционных численных расчетов вращающегося магнитного поля в программе FEMM выполнено исследование электромагнитных параметров и силовых процессов в турбогенераторе мощностью 325 МВт при несимметричной нагрузке в рамках его стандартных ограничений. Проводится анализ временных функций магнитного потокозчепления и соответствующих ЭДС обмотки ротора и фазных обмоток статора, рассматриваются силовые процессы в ферромагнитном сердечнике статора турбогенератора, а именно силовые действия на зубцы и на сердечник в целом, исследуются пульсации электромагнитного момента и временные функции его переменной составляющей. Для более подробной иллюстрации результатов, аналогичные расчеты проводятся и для симметричной нагрузки турбогенератора.

Ключевые слова: турбогенератор, несимметричная нагрузка, магнитное поле, численные расчеты, временные функции, силовые процессы.

Purpose. Presentation of the results of a rotating magnetic field numerical calculation of a turbogenerator in an asymmetric load mode within its standard limitations. **Methodology.** The calculation of the rotating magnetic field at full rotation of the rotor is carried out by the finite element method according to the FEMM program. Calculations are automated by controlling the program using Lua script. **Results.** Calculations are carried out for a 325 MW turbogenerator. The temporal functions of magnetic flux linkage and the corresponding EMF of the rotor winding and phase stator windings were obtained, the power processes in the ferromagnetic core of the stator of the turbogenerator were analyzed, namely the force actions on the teeth and on the core as a whole, the pulsations of the electromagnetic moment and the time functions of its variable component. For a more detailed illustration of the results, similar calculations are performed for the symmetric load of the turbogenerator. **Practical value.** Analysis of the operation of the TG with an unbalanced load showed problems of power and electromagnetic nature. It is shown that the time functions of the forces acting on the teeth of the stator core are almost the same as those with a symmetrical load, but the compressive forces acting on the core have increased. It is determined that the pulsations of the electromagnetic moment reach 17% of its average value.

Keywords: turbogenerator, asymmetric load, magnetic field, numerical calculations, time functions, power processes.

Вступ. Під час роботи турбогенераторів (ТГ) на несиметричне навантаження, виникають явища, які становлять загрозу надійності та довговічності електричної машини в цілому.

Міждержавним стандартом ГОСТ 533-2000 встановлено, що довготривала робота ТГ на несиметричне навантаження можлива, якщо фазні струми обмотки статора не перевищують номінального значення та в них струми зворотної послідовності обмежені 8%. Але навіть при такому навантаженні електромагнітні та механічні процеси стають критичними, що вже показано в [1,2].

Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення, виникає можливість оцінити проблеми експлуатації ТГ при несиметричному навантаженні, не обмежуючись його локальними частинами. Але оскільки в повній постановці ця задача є надзвичайно складною, в дослідженнях несиметричного навантаження ТГ [1-4] зберігається повна структура електромагнітної системи ТГ в його активній частині, але приймається допущення відсутності реакції вихрових струмів в бочці ротора та в інших елементах ТГ.

Постановка задачі. Метою даної статті було надання результатів чисельних розрахунків динаміки магнітного поля ТГ потужністю 325 МВт при його роботі на несиметричне навантаження в рамках обмежень стандарту ГОСТ 533-2000 при різних значеннях початкових фаз струмів зворотної послідовності фази

A. Для детального аналізу паралельно проводилось аналогічне дослідження для симетричного навантаження ТГ.

Розрахунки магнітного поля (МП) ТГ проводяться в двохмірній постановці в його поперечному перерізі на довжині активної частини за методом скінченних елементів з урахуванням насичення магнітної системи по програмі FEMM з використанням скрипту Lua [5].

Об'єкт та основні положення дослідження. В процесі дослідження розглядається ТГ номінальною потужністю $P_N = 325$ МВт, електромагнітна система якого детально описана в [6]. Її поперечний переріз разом із картиною МП в режимі навантаження ТГ наведено на рис. 1. Тут виділено фазні зони двохслойної вкороченої трьохфазної обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ і $C-C'$. Показано полярну (r, α) систему координат, продольну d і поперечну q осі ротора. Показані вектори МРС обмотки збудження \underline{F}_f , трьохфазної обмотки статора \underline{F}_s , умовної результуючої в режимі навантаження \underline{F}_l та кут навантаження ТГ Θ .

Досліджуваний ТГ має номінальні фазні напругу $U_{SN} = 11547$ В і струм статора $I_{SN} = 11040$ А, коефіцієнт потужності $\cos\phi_{SN} = 0,85$, частоту $f_s = 50$ Гц, струм збудження $I_{fN} = 3127$ А. Також відомі кількості фаз $m_s = 3$ і пар полюсів $p = 1$, величина немагнітного проміжку $\delta = 0,09$ м, активна довжина статора $l_{as} = 5,715$ м, діаметр його розточки $d_s = 1,3$ м, відносне

вкорочення обмотки статора – 0,85, кількість її паралельних віток $a_s = 2$ при кількості послідовних витків на фазу $N_s = 10$, кількість витків обмотки ротора $N_f = 126$.

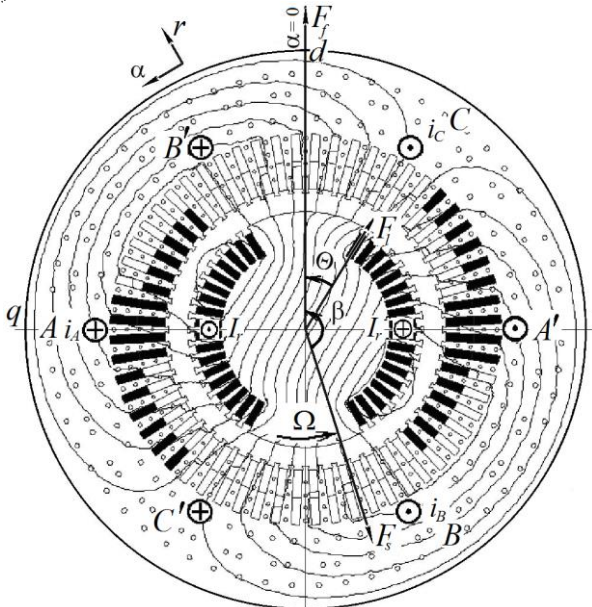


Рис. 1 – Електромагнітна система ТГ

Виникнення несиметричних режимів ТГ провокує різне навантаження фазних обмоток статора. Це викликає відмінність фазних струмів його обмоток. Основи чисельних розрахунків несиметричних режимів роботи ТГ вже детально розглянуто в [1, 2].

Несиметрична система фазних струмів формується за допомогою класичного методу симетричних складових з оперуванням прямою та зворотною симетричними послідовностями (індекси 1 та 2 відповідно):

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

Розрахунки несиметричного режиму роботи ТГ проводяться в двох варіантах – V_1 та V_2 . Значення струмів зворотної послідовності в кожному із цих варіантів відповідно до ГОСТ 533-2000 не перевищують $0,08I_{SN}$, а найбільший із фазних струмів обмежується значенням I_{SN} . Однак, для варіанту V_1 прийнято значення початкової фази струму зворотної послідовності фази А рівним $\beta_{Ia2} = 0$, а для варіанту V_2 $\beta_{Ia2} = 60^\circ$.

В ході вирішення поставленої задачі, було отримано наступні значення для варіанту V_1 : діючі значення і початкові фази струмів склали $I_A = 11040$ А; $I_B = I_C = 9745$ А; $\beta_{Ia} = 0$; $\beta_{Ib} = -124,5^\circ$; $\beta_{Ic} = -235,5^\circ$. Теж саме для варіанту V_2 : $I_A = I_B = 11040$ А; $I_C = 9635$ А; $\beta_{Ia} = 4,13^\circ$; $\beta_{Ib} = -124,13^\circ$; $\beta_{Ic} = -240^\circ$. На рис. 2 та рис. 3 наведено векторні діаграми, які ілюструють співвідношення даних величин, для варіантів V_1 та V_2 відповідно.

Для симетричного навантаження аналогічні величини склали: $I_A = I_B = I_C = 11040$ А; $\beta_{Ia} = 0$; $\beta_{Ib} = -120$; $\beta_{Ic} = -240^\circ$.

Для розрахунку МП режиму навантаження ТГ використовується трифазна система миттєвих значень фазних струмів обмотки статора:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{ma} \cos(\omega t + \beta_{Ia} + \beta); \\ i_B &= I_{mb} \cos(\omega t + \beta_{Ib} + \beta); \\ i_C &= I_{mc} \cos(\omega t + \beta_{Ic} + \beta), \end{aligned} \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f_s$ – кутова частота; I_{ma}, I_{mb}, I_{mc} – амплітуди струмів; β – узагальнений фазовий зсув трифазної системи струмів.

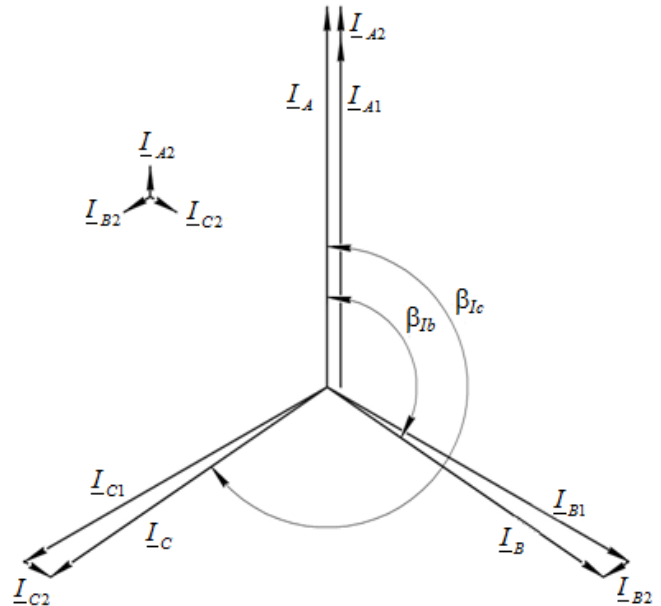


Рис. 2 – Векторна діаграма фазних струмів для варіанту V_1

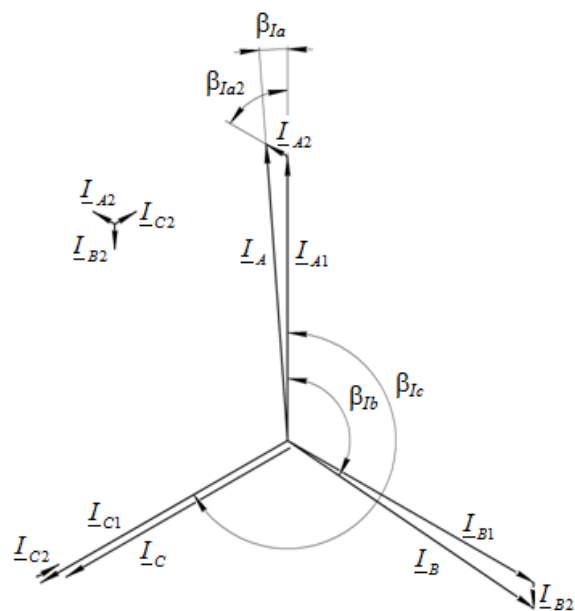


Рис. 3 – Векторна діаграма фазних струмів для варіанту V_2

Значення досліджуваних електромагнітних та силових величин визначаються на основі багатопозиційних розрахунків МП ТГ в програмі FEMM, як це викладено в [1-4]. Враховуючи періодичність, часові функції сформовано при кількості розрахункових позицій K , що склали 181, с кроком повороту $\Delta\alpha = 1^\circ$ при відповідному інтервалі Δt .

Магнітне потокозчеплення і ЕРС фазних обмоток статора. Процес визначення часових функцій магнітного потокозчеплення (МПЗ) фазних обмоток статора $\psi_s(t_k)$ на їх періоді детально описано в [7]. Отже, на основі багатопозиційних розрахунків обертового МП формуються дискретні часові функції МПЗ обмоток статора:

$$\psi_s(t_k), k=1,2,\dots,K. \quad (3)$$

Ці функції за загальновідомими правилами можна розкласти в косинусний гармонійний ряд аналогічно [1, 3]:

$$\psi_s = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \gamma_v), \quad (4)$$

аж до номера N_g , який обмежується прийнятою кількістю розрахункових позицій $K = 181$.

На основі закону електромагнітної індукції із (4) отримуємо ЕРС фазної обмотки статора:

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

звідки амплітуда гармонік $E_{m,v} = v\omega \Psi_{m,v}$.

Часові функції МПЗ $\psi_s(t_k)$ (4) та ЕРС $e_s(t_k)$ (5) визначались для усіх фазних обмоток на повному періоді їх зміни. Вони представлені на рис. 4 для несиметричного навантаження V_1 , на рис. 5 для V_2 та на рис. 6 для симетричного навантаження ТГ.

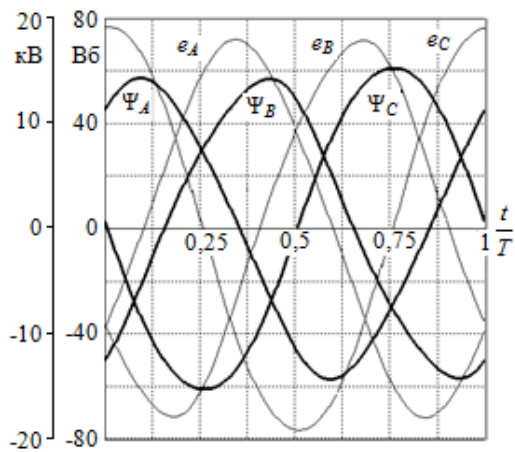


Рис. 4 – Часові функції фазних МПЗ $\psi_s(t_k)$ та ЕРС $e_s(t_k)$ при несиметричному навантаженні V_1 ТГ

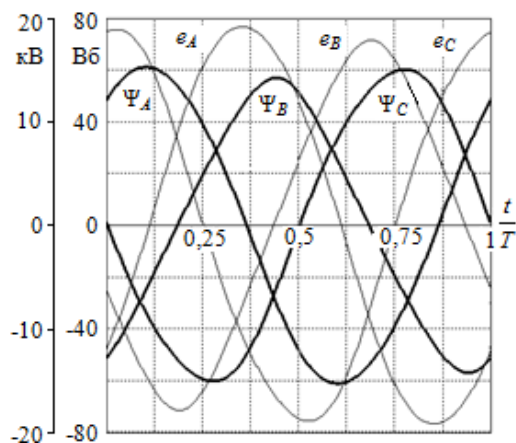


Рис. 5 – Часові функції фазних МПЗ $\psi_s(t_k)$ та ЕРС $e_s(t_k)$ при несиметричному навантаженні V_2 ТГ

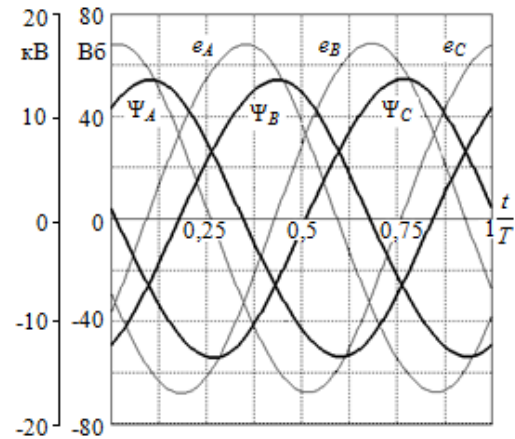


Рис. 6 – Часові функції фазних МПЗ $\psi_s(t_k)$ та ЕРС $e_s(t_k)$ при симетричному навантаженні ТГ

На відміну від симетричного режиму, в варіантах V_1 та V_2 спостерігається відмінність функцій різних фаз один від одної та загалом від правильних синусоїд, що видно вже по максимумах МПЗ.

Електромагнітні процеси в роторі турбогенератора при несиметричному навантаженні. Чисельно-польовий аналіз електромагнітних процесів в роторі ТГ відбувається на основі дослідження часових функцій МПЗ та ЕРС обмотки ротора та клинів його осердя. Це відбувається також для варіантів V_1 та V_2 несиметричного навантаження ТГ при розгляді його електромагнітної системи на активній частині в цілому.

Аналогічно (3) формується дискретна часова функція МПЗ обмотки ротора $\psi_f(t_k)$, яка по (4) розкладається в гармонійний ряд:

$$\psi_f = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{K_g} \Psi_{m,v} \cos(2v\omega t + \gamma_v). \quad (6)$$

Функції МПЗ $\psi_f(t_k)$ обмотки ротора представлено на рис. 7 для варіантів несиметричного навантаження $V_1 - 1$, та $V_2 - 2$, а також для порівняння в режимі симетричного навантаження ТГ – 3. Графік 3 практично «зливається» з віссю абсцис на відміну від функцій МПЗ при несиметричному навантаженні 1 та 2. Амплітуда МПЗ 2 досягає найбільшого значення, що, звичайно, вплинуло і на ЕРС обмотки збудження.

За законом електромагнітної індукції через (6) визначається ЕРС обмотки збудження ТГ:

$$e_f = -\frac{d\psi_f}{dt} = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{K_g} v\omega_f \Psi_{m,v} \cos(v\omega_f t + \gamma_v - \pi/2), \quad (7)$$

звідки амплітуда гармонік $E_{m,v} = v\omega_f \Psi_{m,v}$. Через те, що період функції МПЗ T_f вдвічі менше періоду T струмів (2), тобто $T_f = 0,5 T$, несуча частота $f_f = 2f_s$ є подвійною, а отже і кутова частота несучої гармоніки становить $\omega_f = 2\omega$.

На рис. 7 також наведено часові функції ЕРС обмотки ротора $e_f(t_k)$ зі збереженням змісту номерів 1, 2 і 3. Оскільки амплітуди гармонік ЕРС пропорційні їх номерам, і для симетричного режиму має місце вплив вищих гармонік. Виявилось, що ЕРС обмотки ротора при несиметричному навантаженні ТГ досягають занадто великих значень, а особливо в випадку V_2 , так максимум ЕРС для цього варіанту сягає майже 30 кВ.

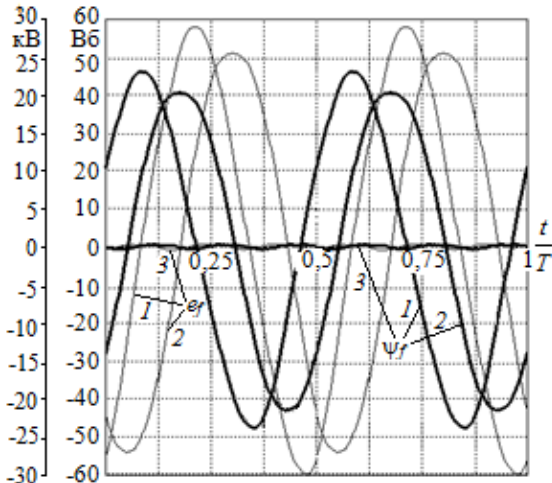


Рис. 7 – Часові функції МПЗ $\psi_f(t_k)$ та ЕРС $e_f(t_k)$ обмотки ротора:

- 1 – варіант V_1 несиметричного навантаження,
- 2 – варіант V_2 несиметричного навантаження,
- 3 – симетричне навантаження ТГ

Дослідження силових процесів в турбогенераторі при несиметричному навантаженні. На основі розрахунків обертового МП виникає можливість оцінити силові дії на частини феромагнітного осердя ТГ. Це відбувається через тензор магнітного натягу (ТМН) Максвелла, який описує тиск на одиницю поверхні в немагнітній області розрахунку [8]. На цій поверхні визначаються нормальна та дотична складові ТМН, Н/М^2

$$f_{Tr} = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_a^2); \quad f_{Ta} = \frac{1}{\mu_0}(B_r \cdot B_a), \quad (7)$$

де μ_0 – магнітна постійна.

Силові дії на зубці осердя статора характеризуються кутовою силою F_{Ta} . Оскільки саме ця сила при тривалій експлуатації ТГ викликає втомні пошкодження зубців осердя статора, її розрахунковий аналіз є особливо важливим.

Сила F_{Ta} визначалась поблизу розточки осердя статора в межах його зубцевого кроку τ_s на дузі радіусом r_δ поблизу розточки осердя статора. А саме, було розглянуто один зубець зліва на рис. 1 на осі q , для якого шукана сила має вигляд:

$$F_{Ta} = r_\delta l_a \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [f_{Ta} \cos(\alpha - \alpha_z) + f_{Tr} \sin(\alpha - \alpha_z)] \cdot d\alpha, \quad (8)$$

де α_1, α_2 – початкова та кінцеві кутові координати вказаної дуги;

α_z – кутова координата осі зубця, до якої приводиться сила.

Багатопозиційні розрахунки дають дискретні часові функції сили

$$F_{Ta}(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (9)$$

які разом із фрагментом досліджуваного зубця наведено на рис. 8 на одиницю аксіальної довжини ТГ.

Ці сили є знакозмінними зі значною часткою постійної складової та досягають вагомих значень для всіх досліджуваних варіантів. Вони прикладаються і до решти зубців осердя статора та повторюються з

деяким часовим зсувом, а їх сума утворює електромагнітний момент.

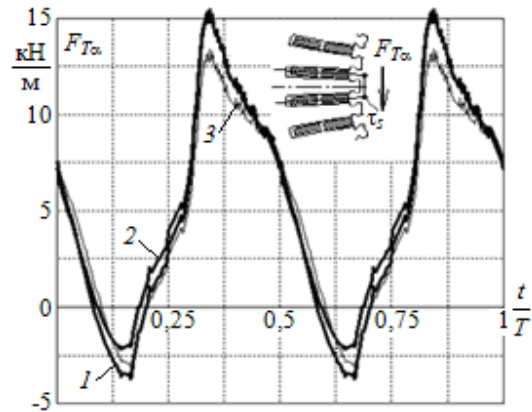


Рис. 8 – Сили, що діють на зубець осердя статора:

- 1 – варіант V_1 несиметричного навантаження,
- 2 – варіант V_2 несиметричного навантаження,
- 3 – симетричне навантаження ТГ

Сили, що діють вцілому на осердя статора ТГ описуються радіальною силою

$$F_{Tr} = r_\delta l_a \int_0^\pi [f_{Tr} \cos(\alpha - \alpha_q) + f_{Ta} \sin(\alpha - \alpha_q)] \cdot d\alpha, \quad (10)$$

яка припадає на половину осердя. Вона визначалась на дузі окружності в межах полюсного кроку ТГ, проведеної поблизу розточки осердя статора. Ця сила прикладена до горизонтальної осі, розташованої під кутом $\alpha_q = 90^\circ$.

Розрахунки в задані моменти часу дають дискретні часові функції сили

$$F_{Tr}(t_k), k=1,2,\dots,K. \quad (11)$$

Динаміка сил F_{Tr} для трьох розрахункових варіантів надано на рис. 9, де також показано осердя статора та напрямки сил, прикладених до його половинок.

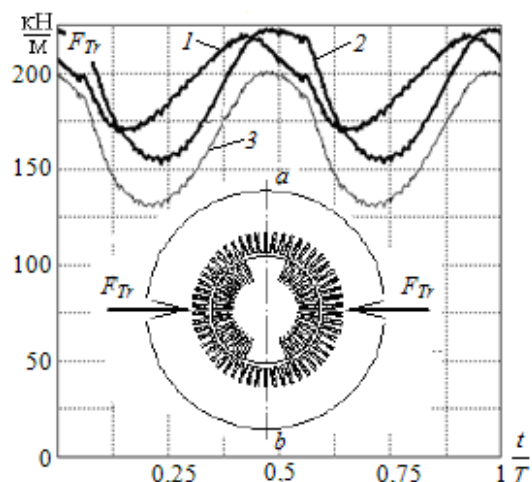


Рис. 9 – Сили, що діють вцілому на осердя статора ТГ:

- 1 – варіант V_1 несиметричного навантаження,
- 2 – варіант V_2 несиметричного навантаження,
- 3 – симетричне навантаження ТГ

Ці сили є пульсуючими зі значною часткою постійної складової. Вони прикладені до аксіального

перерізу осердя по лінії ab . Для будь-якого іншого аксіального перерізу часові функції сили повторюються з відповідним часовим зсувом. А отже, по розточці осердя «переміщуються» хвилі сили F_{Tr} , постійна складова якої утворює напружений «стягнутий» стан осердя, а змінна складова ще накладає на цю деформацію пульсації подвійної частоти f_f .

Із рис. 9 очевидно, що при несиметричному навантаженні, а особливо в варіанті V_2 , величина сил F_{Tr} значно зростає. Це викликає загрозу надійності електричної машини, адже при довготривалій експлуатації це може прискорити пошкодження стяжних призм осердя та послабити монолітність його шихтованих пакетів.

Для визначення електромагнітного моменту (ЕММ) взаємодії ротора і статора ТГ використовується спеціальна процедура в скрипті Lua. Розрахунок ЕММ полягає в розрахунку поверхневого інтегралу по площі S_δ поперечного перерізу немагнітного проміжку

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r B_r B_a dS, \quad (12)$$

де r_r і r_s – радіуси, які обмежують проміжок зі сторін ротора та статора.

Розрахунки в K моментів часу дають дискретну часову функції ЕММ

$$M_{em}(t_k), k=1,2,\dots,K. \quad (13)$$

Ця функція характеризується середньою величиною ЕММ

$$M_{em,av} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K M_{em,k}, \quad (14)$$

значення якої для трьох випадків навантаження ТГ надано в табл. 1. Ці значення перевірено через електромагнітну потужність

$$P_{em} = M_{em,av} \cdot \Omega, \quad (15)$$

де Ω – кутова швидкість ротора.

Функцію $M_{em}(t_k)$ було розкладено в гармонійний ряд з несучою частотою $f_{s2} = 2f_s$. Амплітуду основної – другої гармоніки ЕММ $M_{em,2}$ також представлено в табл. 1. В випадку несиметричного навантаження варіанту V_1 ця величина сягнула найбільшого значення і склала приблизно 17% від постійної складової $M_{em,av}$. Це в сукупності із розглянутими вище силовими діями на осердя статора ТГ, можуть призвести до проблем експлуатації та безпеки з боку довговічності з огляду на шум та вібрації.

Таблиця 1 – ЕММ та потужності в різних режимах навантаження ТГ

Тип навантаження	Параметри		
	$M_{em,av}$, кНм	P_{em} , МВт	$M_{em,2}$, кНм
V_1	1055,341	331,545	180,97
V_2	1198,078	376,387	173,36
симетрія	1033,899	324,809	–

Із функції ЕММ $M_{em}(t_k)$ виділили змінну складову

$$dM_{em}(t_k) = M_{em}(t_k) - M_{em,av}, k=1,2,\dots,K, \quad (16)$$

яку для всіх варіантів розрахунку наведено на рис. 10.

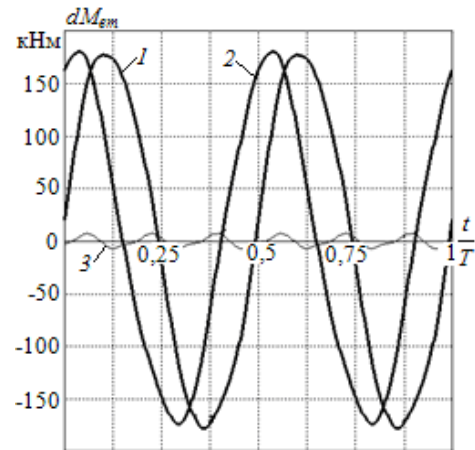


Рис. 10 – Дискретні часові функції ЕММ:
1 – варіант V_1 несиметричного навантаження,
2 – варіант V_2 несиметричного навантаження,
3 – симетричне навантаження ТГ

Пульсації в функціях $dM_{em}(t_k)$ викликаються зубцевою структурою статора, а також дискретною фазною структурою обмотки статора з частотою $f_{s6} = 6f_s$. Але для випадку симетричного навантаження значення змінної складової $dM_{em}(t_k)$ істотно менше його середнього значення $M_{em,av}$. В той час, як пульсації при несиметричному навантаженні, які мають частоту f_{s2} в межах глобального періоду T , досить значущі.

Висновки.

1. За розглянутим комплексом електромагнітних явищ в рамках стандартних обмежень несиметричного режиму роботи ТГ очевидно, що часові функції МПС, а отже і ЕРС фазних обмоток статора відрізняються від синусоїд і один від одної пофазно. Особливо це проявляється для несиметричного навантаження варіанту V_2 .

2. Оскільки характер часових функцій фазних ЕРС відрізняється від синусоїдального, можна припустити що і характер фазних струмів буде не синусоїдальним та із значним спектром гармонічних складових.

3. Часові функції ЕРС обмотки ротора мають подвійну несучу частоту та при несиметричному режимі V_2 перевищують по величині майже на десять порядків аналогічну ЕРС симетричного режиму та взагалі фазну напругу обмотки статора.

4. Пульсації ЕММ при несиметричному навантаженні досягають 17% від його середнього значення; силові дії на зубці осердя статора не надто відрізняються від симетричного навантаження; силові дії на половинки осердя статора через несиметрію навантаження збільшились на 20%.

Список літератури

1. Милых В. И. Численно-полевой анализ магнитного поля и электрических величин в статоре турбогенератора при автономной несимметричной нагрузке / В. И. Милых // Электротехника і електро механіка. – 2016. – № 5. – С. 16-22.
2. Милых В. И. Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке / В. И. Милых // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 3. – С. 49-57.

3. Милых В. И. 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". – 2016. – № 11 (1183). – С. 3-10.
4. Милых В. И. Исследование электромагнитных и силовых параметров и процессов в турбогенераторе при несимметричной нагрузке / В. И. Милых, С. А. Ревуженко // Гідроенергетика України. – 2017. – № 3-4. – С. 33-41.
5. Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>
6. Милых В. И. Методика определения характеристик турбогенератора с использованием автоматизированных численных расчетов магнитных полей / В. И. Милых, С. А. Ревуженко // Problemele energeticii regionale. – 2019. – № 1-3 (45). – С. 1-12. doi:10.5281/zenodo.3239170
7. Милых В. И. Автоматизированные расчеты в программной среде FEMM динамики электромагнитных процессов турбогенераторов / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 6. – С. 24-30. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.04
8. Милых В. И. Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных стационарных режимах работы / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 47-54.
3. Milykh V. I. Orhanyzatsiya chyslenno-polevykh raschetov elektromagnitnykh protsessov v turboheneratori pry eho nesymetrychnoi nahruzke [Organization of the numerical-field calculations of electromagnetic processes in a turbogenerator at its asymmetrical loading]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2016, no. 11 (1183), pp. 3–10. (Rus)
4. Milykh V. I., Revuzhenko S. A. Issledovanie elektromagnitnykh i silovykh parametrov i protsessov v turboheneratori pry nesymetrychnoi nahruzke. [Research of electromagnetic and power parameters and processes in a turbo generator under asymmetric load]. *Hydroenergetics of Ukraine*. 2017, no. 3-4, pp. 33-41. (Rus)
5. Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>
6. Milykh V. I., Revuzhenko S. A. Metodika opredeleniya harakteristik turboheneratora s ispolzovaniem avtomatizirovannykh chislennykh raschetov magnitnykh poley. [The method of determining the turbogenerator characteristics using automated numerical calculations of magnetic fields]. *Problemele energeticii regionale* [Problems of regional energy]. 2019, no. 1-3 (45), pp. 1-12. doi:10.5281/zenodo.3239170 (Rus)
7. Milykh V. I., Polyakova N. V. Avtomatizirovannyye raschety v programmnoy srede FEMM dinamiki elektromagnitnykh protsessov turboheneratorov. [Automated calculations in the FEMM software environment of the dynamics of electromagnetic processes of turbogenerators]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no. 6, pp. 24-30. doi:10.20998/2074-272X.2015.6.04 (Rus)
8. Milykh V. I., Polyakova N. V. Silovyye vzaimodeystviya v turboheneratori v razlichnykh statsionarnykh rezhimakh raboty [Power interactions in a turbogenerator in various stationary operating modes]. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013, no. 5, pp. 47–54. (Rus)

References (transliterated)

1. Milykh V. I. Chislenno-polevoy analiz magnitnogo polya i elektricheskikh velichin v statore turbogeneratora pri avtonomnoy nesymetrychnoy nahruzke [Numerical-field analysis of the magnetic field and electric quantities in the stator of a turbogenerator with autonomous asymmetric load]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2016, no. 5, pp. 16-22. (Rus)
2. Milykh V. I. Chyslenno-polevoi analiz elektromagnitnykh protsessov v rotore turboheneratora pry nesymetrychnoi nahruzke [The numerically-field analysis of electromagnetic processes in the

Надійшло (received) 12.02.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Міліх В. І. Порівняльний аналіз електромагнітних параметрів та силових взаємодій в крупному турбогенераторі в режимі несиметричного навантаження / В. І. Міліх, С. А. Ревуженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 91-96. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.15.

Милых В. И. Сравнительный анализ электромагнитных параметров и силовых взаимодействий в крупном турбогенераторе в режиме несимметричной нагрузке / В. И. Милых, С. А. Ревуженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 91-96. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.15.

Milykh V. I. Comparative analysis of electromagnetic parameters and power interactions in a large turbogenerator in asymmetric load mode / V. I. Milykh, S. A. Revuzhenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 91-96. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.15.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Міліх Володимир Іванович (Милых Владимир Иванович, Milykh Vladimir Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, м. Харків, Україна, тел. (057)707-65-14; ORCID: 0000-0002-6176-3103; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Ревуженко Світлана Афанасіївна (Ревуженко Светлана Афанасьевна, Revuzhenko Svitlana Afanasiiivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка кафедри електричних машин, м. Харків, Україна, тел. (057)707-68-44, ORCID: 0000-0002-4375-2806; e-mail: sveta.revuzhenko@gmail.com.