

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВІБРОЗБУДЖУЮЧІ СИЛИ У ПОТУЖНИХ
ДВО- ТА ЧОТИРИПОЛЮСНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ АЕС УКРАЇНИЮ.М. Васьковський^{1*}, докт.техн.наук, А.М. Мельник^{2**}, канд.техн.наук¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: vun157@gmail.com²Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,e-mail: ied10@ukr.net

На основі представленої математичної моделі електромагнітного поля турбогенератора досліджено та проведено порівняльний аналіз електромагнітних віброзбуджуючих сил, що виникають у статорі дво- та чотириполюсних потужних турбогенераторів, які експлуатуються на АЕС України. Проведено спектральний аналіз віброзбуджуючих сил та показано, що в їхньому спектрі існують значні гармоніки частот 200, 300, 400 Гц, які кратні частоті 100 Гц основної віброзбуджуючої сили. Експериментально виміряно частоти власних коливань лобових частин обмотки статора та показано, що існує небезпека їх резонансних коливань на зазначених кратних частотах. Причому внаслідок особливостей конструкції більш небезпечними є двополюсні ТГ.

Бібл. 5, рис. 8, табл. 2.

Ключові слова: турбогенератор, електромагнітні віброзбуджуючі сили, неявнополюсний ротор, власна частота, спектральний аналіз, резонанс.

Вступ. Основним генеруючим обладнанням енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) є потужні синхронні турбогенератори (ТГ), які є найбільш складною ланкою в електричній частині електростанцій. Передовими компаніями Європи, що випускають ТГ номінальною потужністю 1000 МВт і більше для експлуатації на АЕС, є *GE Power* (раніше *Alstom*) та *Siemens*. ТГ компанії *GE* постійно удосконалюються для забезпечення їх відповідності сучасним вимогам енергетичного ринку та високому рівню надійності експлуатації. Компанія *GE* має досвід розробки ТГ типу *GIGATOP* з водневим охолодженням у діапазоні потужностей від 900 МВт до 2000 МВт [7]. Варто зазначити, що на сьогодні ТГ такого типу вже встановлені майже на третині енергоблоків АЕС світу, а саме: *Flamanville* – у Франції, *Hong Yan He* – в Китаї, *Unistar* – у США та ін.

На АЕС України наразі в експлуатації знаходяться 13 ТГ потужністю 1000 МВт з безпосереднім водяним охолодженням обмотки статора та водневим охолодженням осердя статора і обмотки ротора. Зазначені ТГ належать до двох різних типів – мають дво- або чотириполюсне виконання, що обумовлює різну частоту обертання їхнього ротора. Так, тихохідні ТГ типу ТВВ-1000-4УЗ мають чотири полюси та частоту обертання 1500 об/хв, а швидкохідні ТГ типу ТВВ-1000-2МУЗ мають відповідно два полюси та частоту обертання 3000 об/хв. Чотириполюсні ТГ, що експлуатуються в Україні, виконані на основі конструкцій двополюсних ТГ відповідних серій [1]. На енергоблоках № 1,2 ВП «Южно-Українська АЕС» та № 1-6 ВП «Запорізька АЕС» встановлено чотириполюсні ТГ типу ТВВ-1000-4УЗ. На енергоблоках № 1,2 ВП «Хмельницька АЕС», на енергоблоці № 3 ВП «Южно-Українська АЕС» та енергоблоках № 3,4 ВП «Рівненська АЕС» експлуатуються двополюсні ТГ типу ТВВ-1000-2МУЗ. Кожен із цих типів ТГ має свої переваги і недоліки. Так, двополюсні ТГ мають кращі питомі енергетичні та масогабаритні показники. Але крім цих важливих показників значна увага приділяється аналізу надійності роботи цих ТГ, особливо останнім часом у зв'язку з відпрацюванням гарантійних термінів їхньої експлуатації. Наприклад, відзначаються менші механічні напруження від дії відцентрових сил у масиві ротора тихохідного ТГ внаслідок меншої частоти його обертання. Надійність потужних ТГ також суттєво залежить від наявного рівня їхніх вібрацій. Порівняльний аналіз величин і спектрального складу вібрацій двох зазначених типів ТГ, зокрема найбільш суттєвих вібрацій електромагнітного походження, докладно не досліджувався.

Мета роботи. Метою роботи є математичне моделювання та порівняльний аналіз величин та спектрального складу електромагнітних віброзбуджуючих сил у статорі дво- та чотириполюсних ТГ

потужністю 1000 МВт. Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю розробки рекомендацій щодо подальшої їхньої експлуатації на АЕС України.

Математична модель. Польова математична дає змогу визначити електромагнітне поле в активній зоні ТГ та електромагнітні вібробуджуючі сили (ЕВС) на поверхні розточки статора. Основне рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу в статорній системі координат має наступний вигляд:

$$\dot{A}_z - j\omega\mu\gamma \dot{A}_z + \mu\gamma\omega_R \left(R \times \text{rot} \dot{A}_z \right) = -\mu \dot{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

де \dot{A}_z – векторний магнітний потенціал; $\dot{J}_{z_{\text{стор}}}$ – густина сторонніх струмів (у даному випадку – це щільність струмів у пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора); ω – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу; ω_R – кутова швидкість обертання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; R – радіус-вектор довільної точки розрахункової області.

Для аналізу електромагнітного поля в синхронному режимі ТГ, коли ротор і магнітне поле статора рухаються з однаковою швидкістю, рівняння (1) записується як

$$\Delta \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{\text{стор}}. \quad (2)$$

Джерелами поля є:

- *густини сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора.* Для кожного поточного моменту часу $t_k = 0 \dots T$ у межах сформованої геометрії розрахункової області диференціальне рівняння (2) розв'язується за відповідних цьому моменту часу величин густини струмів фаз статора, які визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A_{\text{ф0}}} &= J_m \cos \alpha_k, \\ \dot{J}_{B_{\text{ф0}}} &= J_m \left[\cos(\alpha_k + 2\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 2\pi/3) \right], \\ \dot{J}_{C_{\text{ф0}}} &= J_m \left[\cos(\alpha_k + 4\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 4\pi/3) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

де $J_m = I_{m1} u_{\Pi1} / S_{\Pi1}$ – густина струму у фазах обмотки статора, $u_{\Pi1}$ – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; $S_{\Pi1}$ – площа перерізу паза статора; $\alpha_k = \omega_R t_k$, $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 1, \dots, N$; N – кількість кроків за часом, Δt – крок за часом;

- *густини сторонніх струмів обмотки збудження:*

$$J_{f_{\text{стор}}} = I_{m2} u_{\Pi2} / S_{\Pi2}, \quad (4)$$

де I_{m2} – амплітуда струму в фазі обмотки збудження; $u_{\Pi2}$ – число послідовно з'єднаних провідників у пазу ротора; $S_{\Pi2}$ – площа перерізу паза ротора.

Рівняння (2) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду на лінії G зовнішньої поверхні ярма статора, що обмежує розрахункову область

$$\dot{A}_z \Big|_G = 0. \quad (5)$$

Величина μ у кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається за відповідними їм кривими намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються через векторний магнітний потенціал за співвідношеннями

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (6)$$

Нормальна (має напрям уздовж вектора нормалі до поверхні) та тангенціальна (має напрям уздовж дотичної до поверхні) складові магнітної індукції визначаються як

$$B_n = B_x \cos \alpha + B_y \sin \alpha = (y B_y + x B_x) / R_\delta, \quad (7)$$

$$B_\tau = B_x \sin \alpha - B_y \cos \alpha = (y B_x - x B_y) / R_\delta, \quad (8)$$

де x, y – координати точки, R_δ – радіус-вектор точки.

Щільність електромагнітних вібробуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу (ТМН), який має фізичну розмірність тиску (Н/м^2). Модулі нормальної та тангенціальної складових

$$T_n \text{ дорівнюють } T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \left(\dot{B}_n - \dot{B}_\tau \right) \right|, \quad T_\tau = \left| \frac{1}{\mu} \left(\dot{B}_n^2 \cdot \dot{B}_\tau^2 \right) \right|, \quad (9)$$

У декартових координатах тангенціальна і нормальна складові ТМН у довільній точці на розрахунковій лінії визначаються так:

$$T_\tau = T_x \cos \alpha - T_y \sin \alpha = T_x \frac{y}{R_\delta} - T_y \frac{x}{R_\delta}, \quad T_n = T_y \cos \alpha + T_x \sin \alpha = T_y \frac{y}{R_\delta} + T_x \frac{x}{R_\delta}, \quad (10)$$

де T_x, T_y – проекції ТМН на осі декартової системи координат.

Найбільший інтерес для дослідження має нормальна складова ТМН, яка направлена уздовж вектора нормалі до поверхні розточки статора. Саме ця складова зумовлює небезпечні вібрації статора ТГ. Її називають також радіальною складовою ТМН, оскільки її дія направлена уздовж радіуса кола розточки статора в поперечному перерізі активної зони ТГ. Аналіз закономірностей розподілу радіальної складової ТМН T_n фактично еквівалентний аналізу закономірностей розподілу ЕВС у ТГ.

Для реалізації польової математичної моделі у даній роботі використовується *метод багатопозиційних розрахунків* з урахуванням обертання ротора [2, 4]. Інтервал часу T , на якому здійснюється розрахунок, відповідає одному повному оберту ротора. Для двополюсного ТГ час одного оберту ротора дорівнює $T = (0 \dots 0,02)$ с, а для чотириполюсного ТГ – $T = (0 \dots 0,04)$ с. Ідея методу полягає в тому, що для заданого інтервалу часу T з обраним кроком за часом Δt виконується серія розв'язків рівнянь електромагнітного поля для гармонійних процесів (2) з урахуванням змін куткового положення ротора і величин струмів фаз статора згідно з виразами (3) та розрахунком ЕВС на поверхні розточки статора в обраній точці М, де розташований умовний давач вібрації (зазвичай це точка на поверхні коронки зубця статора). Тобто для кожного з положень ротора розглядається сталий електромагнітний процес. У результаті використання такого методу після розрахунків достатньої кількості окремих задач за різних положень ротора і різних значень струму статора та їхнього об'єднання отримують шукані залежності ЕВС як функції часу. Чисельні експерименти показали, що, наприклад, для двополюсного ТГ достатня кількість розрахункових кроків за часом становить 200. За один крок, який дорівнює $\Delta t = 10^{-4}$ с, ротор повертається відносно статора на третину зубцевої поділки статора, що задовольняє умовам точності.

Результати моделювання. Дослідження та порівняльний аналіз електромагнітних вібробуджуючих сил проведено на основі вихідних даних дво- та чотириполюсного турбогенераторів типу ТВВ-1000-2МУ3 і ТВВ-1000-4У3. Турбогенератори мають майже однакову повну потужність 1111 і 1112 МВА та номінальний фазний струм статора 26,73 і 26,76 кА, однакову номінальну лінійну напругу 24 кВ та номінальний коефіцієнт потужності 0,9. Але їхні геометричні дані суттєво різняться: діаметри розточки статорів ТГ дорівнюють відповідно 1400 і 1970 мм, діаметри роторів 1200 і 1800 мм, повітряні проміжки між статором і ротором 100 і 85 мм, довжини осердя статора 7200 і 7300 мм, кількість пазів статора 42 і 60, кількість пазів ротора 32 і 48.

На основі математичної моделі (1) – (10) виконано чисельний розрахунок електромагнітного поля і вібробуджуючих сил та отримано миттєвий розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу в активній зоні ТГ у *номінальному режимі роботи*. На рис. 1 для моменту часу $t = 0,02$ с і на рис. 2 для $t = 0,04$ с показані картини поля відповідно для двополюсного та чотириполюсного ТГ. З рисунків видно характерний розподіл електромагнітного поля в активній зоні залежно від полюсності ТГ. Літерою М позначено точку на поверхні коронки зубця статора, де розташовано умовний давач вібрації і розраховуються ТМН (або, що еквівалентно, ЕВС).

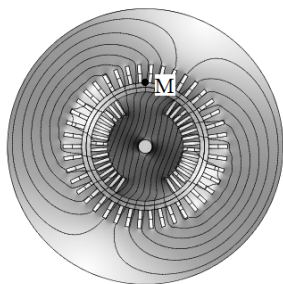


Рис. 1

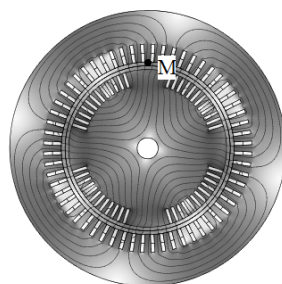
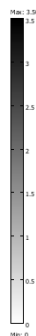


Рис. 2



люсного ТГ. З рисунків видно характерний розподіл електромагнітного поля в активній зоні залежно від полюсності ТГ. Літерою М позначено точку на поверхні коронки зубця статора, де розташовано умовний давач вібрації і розраховуються ТМН (або, що еквівалентно, ЕВС).

Як зазначалося, основною відмінністю конструкції чотириполюсних ТГ є те, що діаметр роторів таких генераторів приблизно в $\sqrt{2}$ є

більшим, ніж діаметр роторів двополюсних ТГ [1]. Проте це не призводить до суттєвого збільшення зовнішнього діаметра та маси осердя статора (рис. 2), оскільки за рахунок чотириполюсної конструкції ротора зменшення магнітного потоку на полюс дає змогу знизити висоту ярма осердя і відповідно масу та діаметр статора генератора. В результаті цього зовнішній діаметр чотириполюсного ТГ є набагато більшим, ніж для двополюсних, що дає змогу застосувати жорстке кріплення осердя до корпусу статора. Крім того, при обертанні ротора на осердя статора чотириполюсного ТГ діють зусилля від магнітного тяжіння у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

На рис. 3 та рис. 4 показано розрахункові часові залежності радіальної складової ТМН у точці М відповідно для двополюсного та чотириполюсного ТГ.

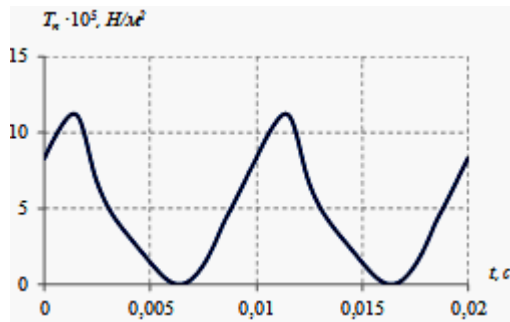


Рис. 3

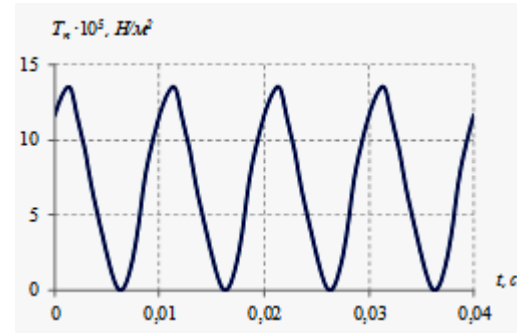


Рис. 4

Аналіз цих залежностей дає можливість зробити наступні висновки. З рис. 3 видно, що в часовій функції ЕВС на розрахунковому інтервалі є два явно виражені піки електромагнітної сили, пов'язані з наявною кількістю полюсів ротора. Зрозуміло, що за час повного оберту двополюсного ротора через умовний давач вібрації, що розташований на розточці статора у точці М, проходять відповідно два полюси ротора, а у часовій функції сигналу з'являються два характерні піки. Аналогічна картина спостерігається і для чотириполюсного ТГ, але за один повний оберт ротора виникають чотири піки ЕВС (рис. 4), хоча період одного коливання в обох випадках є однаковим і складає 0,01 с.

Важливу роль при дослідженні вібрацій відіграє аналіз спектрального складу отриманих часових функцій ТМН та дослідження співвідношення окремих складових спектрів для різних типів турбогенератора. У табл. 1 наведено числові значення складових амплітуд гармонік ТМН у межах від 50 до 400 Гц включно для двох типів ТГ.

Таблиця 1

Частота f , Гц		50	100	150	200	250	300	350	400
T_n , Н/м ²	$2p = 2$	5740	527000	4090	84600	4260	54600	3040	24000
	$2p = 4$	3460	647000	3250	30900	1610	32700	630	12200

Постійно діюче радіально направлене електромагнітне зусилля між статором та ротором для двополюсного ТГ складає $0,98 \cdot 10^6$ Н/м², а для чотириполюсного ТГ – $1,35 \cdot 10^6$ Н/м². Аналіз співвідношень основної гармоніки ТМН частоти 100 Гц показує, що для чотириполюсного ТГ амплітуда гармоніки дорівнює $6,47 \cdot 10^5$ Н/м², а для двополюсного – $5,27 \cdot 10^5$ Н/м². Тобто ЕВС у статорі тихохідного турбогенератора на частоті 100 Гц більші на 22,7%, ніж у швидкохідному ТГ. Цей результат можна пояснити меншою величиною повітряного проміжку в чотириполюсному ТГ, і, як наслідок, більшою величиною радіальної складової магнітної індукції основної гармоніки поля, яка згідно з виразом (9) визначає величину нормальної складової ТМН на частоті 100 Гц.

Аналіз амплітуд вищих гармонік ТМН, зокрема гармонік, частоти яких кратні частоті 100 Гц основної гармоніки електромагнітної сили, а також визначення сумарного значення ТМН від дії всіх складових гармонік спектра, яке характеризує загальний рівень ЕВС тихохідного та швидкохідного ТГ, дає наступні результати. З табл. 1 видно, що в спектрі вібрацій двополюсного ТГ спостерігаються гармоніки ТМН з частотами 200, 300 та 400 Гц, амплітуди яких є суттєво більшими, ніж амплітуди аналогічних гармонік ТМН у тихохідному ТГ. Отримані результати показують, що усі гармонічні складові віброзбуджуючих сил чотириполюсного ТГ (окрім 100 Гц) є суттєво меншими у порівнянні з двополюсним ТГ. Цей результат має важливе значення для загальної порівняльної оцінки вібраційної стійкості конструкцій двох зазначених типів ТГ. З урахуванням усіх наявних гармонік сумарне значення ТМН, яке визначається як квадратний корінь з суми квадратів амплітуд усіх гармонік, є більшою на 20% у чотириполюсного ТГ. Але такою оцінкою порівняльний аналіз ЕВС ТГ не вичерпується.

Відомо, що однією з основних причин ушкодження конструкції ТГ у разі його тривалої експлуатації є “втома” конструктивних матеріалів при багатоцикловій дії значних вібробуджуючих сил [3]. Але прискорене ушкодження конструкції відбувається також у випадках, коли частоти гармонік ЕВС наближені до власних частот коливань конструктивних вузлів і елементів статора ТГ, що викликає їхні резонансні коливання. Такими вразливими елементами є з’єднувальні та вивідні шини лобових частин обмотки статора. Діючі інструкції щодо налаштування та ремонту ТГ передбачають виконання технічних заходів для недопущення співпадіння власних частот коливань конструктивних елементів статора з частотою 100 Гц першої (основної) гармоніки ЕВС. При цьому вплив можливих резонансних коливань на інших (кратних) частотах не враховується. Але наведені результати моделювання спектрального складу ЕВС підтверджують наявність значних величин кратних гармонік ЕВС. Так, для двополюсного ТГ гармоніки 200 і 300 Гц складають відповідно 16 і 10,4% від гармоніки 100 Гц. Як видно з табл. 1, амплітуди вищих гармонік ЕВС чотириполюсних ТГ є значно меншими, що потрібно прийняти до уваги у разі порівняльного аналізу вібростійкості цих двох ТГ. Результати такого аналізу також залежать від особливостей конструкцій ТГ. Так, довжина і виліт лобових частин обмоток статора чотириполюсних ТГ є суттєво меншою, ніж у двополюсних, що пов’язано із меншою полюсною поділкою. Це призводить до зниження ЕВС у лобових частинах обмотки статора, зменшення вібрації, що сприяє більшій вібраційній надійності чотириполюсних ТГ.

У табл. 2 наведено результати експериментальних досліджень власних частот f , Гц осьових коливань з’єднувальних шин лобових частин обмотки статора ТГ типів ТВВ-1000-4У3 та ТВВ-1000-2МУ3, що встановлені відповідно на енергоблоках № 2 та № 3 ВП ЮУАЕС. Жирним шрифтом виділено власні частоти шин обмотки статора турбогенератора **К3А, К1, Н3А, К2, Н1А, К3, Н1**, значення яких близькі до критичних частот 200, 300 та 400 Гц. У табл. 2 для кожної шини наведено два стовпчики значень, в яких дано дві виявлені резонансні частоти, що відповідають зафіксованим пікам на експериментальних спектрограмах.

Таблиця 2

Шина	Частоти f , Гц ТВВ-1000-2У3		Шина	Частоти f , Гц ТВВ-1000-4У3	
К3А	203,1	259,4	1Н1	83,7	228,8
К1	176,2	205,6	1К3А	86,2	253,8
Н2	276,2	350,6	1Н2	66,3	170,6
Н3А	294,4	-	2К3А	202,5	296,9
К1А	180,6	346,2	1К2А	185,6	-
К2	200,6	447,5	2К2А	71,9	137,5
Н3	169,7	-	1К1А	87,5	-
Н1А	395,0	-	2Н3	88,7	235,0
К2А	178,1	-	2К1А	77,5	153,1
К3	410,6	-	2Н2	81,9	127,5
Н1	390,6	-	2Н1	67,5	155,6
Н2А	267,5	424,4	1Н3	87,5	277,5

Із наведених експериментальних даних видно, що в двополюсному ТГ із 12-ти з’єднувальних шин тільки п’ять не мають власних частот, близьких до кратних частот електромагнітних вібробуджуючих сил. Варто зазначити, що для чотириполюсного ТГ проблемною є тільки з’єднувальна шина **2К3А**, власні частоти якої є близькими до кратних частот ЕВС 200 та 300 Гц. Власні частоти інших шин лежать у безпечних діапазонах згідно з рекомендаціями нормативних документів, що регламентують порядок вимірювання динамічних характеристик лобових частин обмотки статора турбогенератора, наприклад, ОБС 477.876.

Зазначимо, що експериментально визначені сумарні вібрації корзини лобових частин обмотки статора у номінальних режимах роботи ТГ, виміряні вібродавачами, встановленими на корзині у чотирьох зсунутих на кут 90 град. точках, не перевищують допустимих норм. Це створює уявлення щодо можливості подальшої безпечної експлуатації ТГ. Проте такі вимірювання вібрацій з огляду на те, що вони є сумарними, тобто виникають внаслідок спільної вібрації усіх елементів конструкції лобових частин (стержнів, виводів, з’єднувальних шин), не гарантують відсутність резонансних коливань окремих елементів конструкції, наприклад, окремих виводів або з’єднувальних шин. Проведені дослідження засвідчують, що існує небезпека резонансних коливань зазначених з’єднувальних шин, що, з огляду на вичерпаність більшості потужних ТГ гарантійних строків їхньої експлуатації, може призвести до прискореної втоми матеріалів шин та їхньої подальшої руйнації. При цьому, проведений аналіз підтверджує більшу вразливість до руйнівної дії електромагнітних вібрацій двополюсного ТГ. Доцільно уточнити діючі інструкції щодо налагодження ТГ з метою відлаштування власних частот коливань з’єднувальних шин не тільки від частоти 100 Гц, але й від частот 200 і 300 Гц.

Важливе значення має також і просторовий розподіл ЕВС уздовж довжини розточки статора. На рис. 5 та рис. 6 показано миттєвий розподіл радіальної (нормальної) складової ТМН уздовж розточки статора для дво- та чотириполюсного ТГ. Ці хвилі рухаються уздовж розточки статора відповідно зі швидкістю 3000 і 1500 об/хв. Розподіл ЕВС вздовж розточки статора ТГ має характерний вигляд, який свідчить про наявність у спектрі ЕВС зубцевих гармонік. Гармонійний аналіз розподілу ЕВС з застосуванням швидкого перетворення Фур'є дає змогу визначити внесок окремих просторових складових спектра ЕВС. Так, на основі спектрального аналізу видно, що у спектрі отриманих розподілів ЕВС присутні гармоніки, які кратні числу зубців осердя статора: для двопольного – це 42-га та кратна їй 84-та гармоніки (рис. 7), для чотириполюсного ТГ – відповідно 60-та та 120-та (рис. 8).

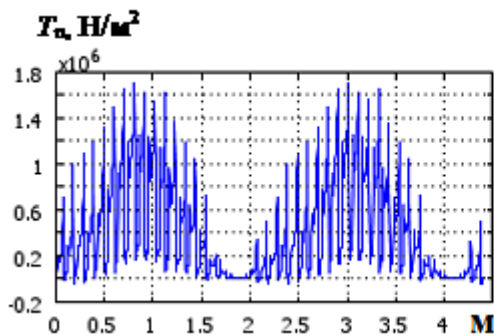


Рис. 5

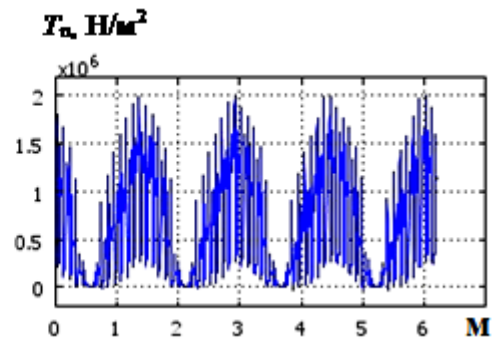


Рис. 6

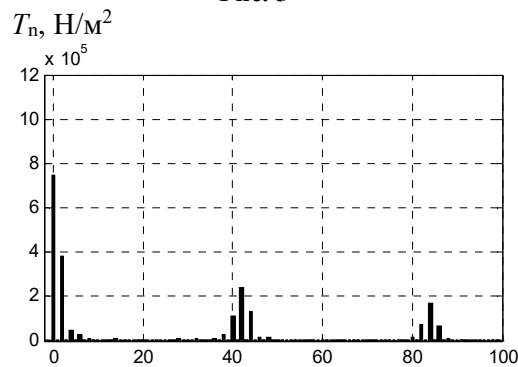


Рис. 7

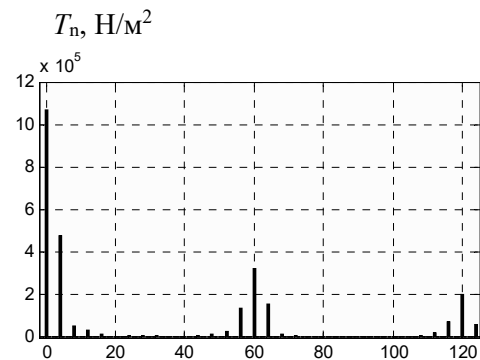


Рис. 8

При цьому амплітуда першої зубцевої гармоніки ЕВС двопольного ТГ більша на 32% ніж чотириполюсного ТГ, а друга відповідно на 20%. Окрім того, у спектрі спостерігаються також бічні зубцеві гармоніки, які складають приблизно половину основної амплітуди 1-ї та 2-ї зубцевих гармонік ЕВС, які є однією з причин появи шумів ТГ.

Висновки. На основі польової математичної моделі електромагнітного поля турбогенератора з використанням методу багатопозиційних розрахунків проведено дослідження та порівняльний аналіз ЕВС, що виникають у статорі дво- та чотириполюсних потужних ТГ, які експлуатуються на АЕС України.

Результати математичного моделювання та спектрального аналізу засвідчили, що сумарна амплітуда ЕВС від дії всіх гармонік є на 20% більшою у чотириполюсному ТГ, ніж у двопольному за рахунок більшого значення першої гармоніки ЕВС частоти 100 Гц. Це обумовлено меншою на 15% величиною повітряного проміжку чотириполюсного ТГ і відповідно більшим значенням у проміжку магнітної індукції.

З іншого боку, проведений спектральний аналіз ЕВС засвідчив, що амплітуди гармонік ЕВС на кратних частотах 200, 300 та 400 Гц у чотириполюсному ТГ є суттєво меншими, ніж у двопольному ТГ – відповідно в 2,73; 1,7 та 1,96 рази. При цьому експериментально встановлено, що власні частоти коливань більшості з'єднувальних шин (7 із 12-ти) лобових частин обмотки статора двопольного ТГ наближені до зазначених кратних частот ЕВС, що створює умови для виникнення резонансних коливань цих шин та їхньої подальшої руйнації. В чотириполюсному ТГ небезпечною є тільки одна шина. З урахуванням того факту, що лобові частини обмотки статора ТГ є найбільш вразливими до дії вібрацій, отриманий результат засвідчує перевагу чотириполюсних ТГ у порівнянні з двопольними ТГ з точки зору їхньої вібраційної надійності та повинен враховуватися при обґрунтуванні

доцільності та перспектив подальшої експлуатації зазначених типів потужних ТГ АЕС. Доцільно також уточнити діючі інструкції щодо налагодження ТГ з метою відлаштування власних частот коливань з'єднувальних шин обмотки статора не тільки від частоти 100 Гц, але й від кратних частот 200 і 300 Гц.

1. Абрамов А.И., Извеков В.И., Серихин Н.А. Проектирование турбогенераторов. М.: Высшая школа, 1990. 336 с.

2. Васьковський Ю.М., Мельник А.М. Електромагнітні вібробуджуючі сили в турбогенераторі з урахуванням несиметрії струмів в обмотці статора. *Техн. електродинаміка*. 2017. № 1. С. 52-57.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.01.052>

3. Васьковский Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора. *Электротехника и электромеханика*. 2009. № 2. С. 21-26.

4. Милых В.И., Пототский Д.В. Численно-полевой анализ силовых и энергетических факторов в турбогенераторе при несимметричной нагрузке. *Техн. електродинаміка*. 2017. № 4. С. 29-35.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.029>

5. URL: <http://atominfo.bg/wp-content/uploads/2012/01/GigaTop.pdf> (дата звернення 11.06.2018).

УДК 621.313

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВИБРОВОЗМУЩАЮЩИЕ СИЛЫ В МОЩНЫХ ДВУХ- И ЧЕТЫРЕХ-ПОЛЮСНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ АЭС УКРАИНЫ

Ю.Н. Васьковский¹, докт.техн.наук, А.М. Мельник², канд.техн.наук

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: yun157@gmail.com

² Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

e-mail: ied10@ukr.net

На основе представленной математической модели электромагнитного поля турбогенератора исследовано и проведено сравнительный анализ электромагнитных вибровозмущающих сил, возникающих в статоре двух- и четырёхполюсных мощных турбогенераторов, которые эксплуатируются на АЭС Украины. Проведен спектральный анализ вибровозмущающих сил и показано, что в их спектре существуют значительные гармоники частот 200, 300, 400 Гц, которые кратны частоте 100 Гц основной вибровозмущающей силы. Экспериментально измерены частоты собственных колебаний лобовых частей обмотки статора и показано, что существует опасность их резонансных колебаний на указанных кратных частотах. Причем в силу особенностей конструкции более опасными есть двухполюсные ТГ. Библи. 5, рис. 8, табл. 2.

Ключевые слова: турбогенератор, электромагнитные вибровозмущающие силы, неявнополюсный ротор, собственная частота, спектральный анализ, резонанс.

ELECTROMAGNETIC VIBRATION DISTURBING FORCES OF POWERFULL TWO- AND FOUR-POLE TURBOGENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANTS OF UKRAINE

Yu.M. Vaskovskyi,¹ A.M. Melnyk²

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», пр. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: yun157@gmail.com

² Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, пр. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ied10@ukr.net

A comparative analysis of the electromagnetic vibration disturbing forces occurring in the stator of two- and four-pole powerful turbogenerators operating on nuclear power plants of Ukraine on the basis mathematical model of the electromagnetic field was consider. The spectral analysis of of the electromagnetic vibrational forces was carry out. A spectrum of the electromagnetic vibrational forces has significant harmonics of frequencies 200, 300, 400 Hz, which are multiples of 100 Hz of the main vibrational force was show. Experimental investigation of the eigenfrequency modes of the end of stator winding was carry out. There is a danger of response eigenfrequency modes at the specified multiple frequencies. Moreover, due to the design structure of two-pole turbogenerators are more dangerous. References 5, figures 8, tables 2.

Keywords: turbogenerator, electromagnetic vibration disturbing forces, implicit-pole rotor, eigenfrequency, spectral analysis, response.

1. Abramov A.I., Izvekov V.I., Serihin N.A. Designing of turbogenerators. Moskva: Vysshiaia shkola, 1990. 336 p. (Rus)

2. Vaskovskyi Yu.M., Melnyk A.M. The electromagnetic vibration disturbing forces in turbogenerator with a glance of current asymmetry of stator winding. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 1. Pp. 52-57. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.01.052>

3. Vaskovskyi Yu.M., Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Analysis of vibration-exciting axial forces in a powerful turbogenerator stator core. *Elektrikal engineering & Electromechanics*. 2009. No 2. Pp. 21-26. (Rus)

4. Milykh V.I., Pototskyi D.V. The numerical-field analysis of power and energy processes in the turbo-generator at load unbalance. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 29-35. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.029>

5. URL: <http://atominfo.bg/wp-content/uploads/2012/01/GigaTop.pdf> (Accessed 11.06.2018).

Надійшла 30.10.2018
Остаточний варіант 07.12.2018