

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ У СИНХРОННОМУ ТА АСИНХРОННОМУ РЕЖИМАХ

Ю.М. Васьковський¹, докт. техн. наук, **О.І. Турчин²**, магістр, **О.А. Гераскін³**, аспірант

1,2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна;

3 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Розроблено математичну модель для аналізу електромагнітних віброзбуджуючих сил потужних турбогенераторів у синхронному та асинхронному режимах. Проведено порівняльний аналіз спектрів цих сил у зазначених режимах та зроблено висновки щодо характеру вібрацій турбогенератора в асинхронному режимі. Бібл. 3, рис. 6.

Ключові слова: турбогенератор, віброзбуджуючі сили, електромагнітне поле, ротор, статор, синхронний та асинхронний режими.

Вступ. Експлуатація потужних турбогенераторів (ТГ) на енергоблоках електростанцій супроводжується значною вібрацією статора ТГ. Віброзбуджуючі сили мають різну фізичну природу, причому значний вклад у сумарні вібрації вносять віброзбуджуючі сили електромагнітного походження. При цьому їх характер істотно залежить від розподілу струмів у роторі ТГ, який визначається режимом його роботи. В синхронному режимі роботи струми ротора зосереджені у витках обмотки збудження, які розміщуються в пазах ротора. При переході ТГ в асинхронний режим у масивних зубцях і ярмі ротора виникають вихрові струми частоти ковзання, які суттєво змінюють розподіл магнітного поля у повітряному проміжку і характер віброзбуджуючих сил. Дослідження змін вібрацій ТГ при переході з синхронного в асинхронний режим роботи є особливо актуальним у зв'язку з розробкою турбогенераторів нового типу – синхронно-асинхронних турбогенераторів (САТ) [3]. Якщо для традиційного синхронного ТГ асинхронний режим роботи є небажаним і короткочасним, то САТ здатні працювати в асинхронному режимі тривалий час. Як відомо, впровадження САТ має сприяти підвищенню управління балансом реактивної потужності, нормалізації рівнів напруги, стабільності режимів енергосистеми і в цілому підвищенню надійності енергопостачання країни [3]. Але деякі питання, зокрема вібрації САТ у різних режимах роботи, залишаються малодослідженими. У статті методами математичного моделювання досліджуються віброзбуджуючі електромагнітні сили ТГ у синхронних і асинхронних режимах роботи.

Математична модель. Передбачає розв'язання рівняння електромагнітного поля в активній зоні ТГ і визначення віброзбуджуючих сил у виділених точках статора, де розміщуються датчики вібрації. З огляду на значно більшу осьову довжину активної зони ТГ у порівнянні з довжиною полюсної поділки достатньо розглянути поле у двовимірному наближенні в поперечному перетині. Розглядатимемо сталі процеси, припускаючи, що всі польові функції змінюються у часі за гармонійним законом. У загальному випадку основне рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осьової складової векторного магнітного потенціалу \dot{A}_z в довільній системі координат має такий вигляд [1]:

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

де ω – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу; ω_R – кутова швидкість обертання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; $\dot{J}_{z\text{стоп}}$ – густина статорних струмів (у даному випадку це щільність струмів у пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора); R – радіус-вектор довільної точки ротора. Для даної задачі

доцільно використовувати роторну систему координат, у якій рівняння (1) набуває більш простого вигляду [2]:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1 s \mu \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{стоп}}, \quad (2)$$

де s – ковзання ротора. Рівняння (2) використовується для аналізу поля в асинхронному режимі ТГ. Доцільність використання роторної системи координат обумовлена тим, що вихрові струми виникають тільки в елементах масивного ротора, а всі елементи конструкції статора ТГ можна вважати неелектропровідними (магнітопровід статора – шихтований, у пазах статора задаються сторонні струми). При аналізі поля в синхронному режимі, коли ротор і магнітне поле статора рухаються з однаковою швидкістю, необхідно прийняти $s = 0$, і рівняння (2) перетвориться в звичайне рівняння Пуассона:

$$\Delta \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{стоп}}. \quad (3)$$

Джерелами поля є густина сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора:

$$\dot{J}_{A\text{стоп}} = I_m u_{II} / S_{II}; \quad \dot{J}_{B\text{стоп}} = I_m u_{II} [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] / S_{II}; \quad (4)$$

$$\dot{J}_{C\text{стоп}} = I_m u_{II} [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] / S_{II},$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_{II} – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора; S_{II} – площа перетину паза статора. Рівняння (2) і (3) доповнюються однорідними граничними умовами першого роду $A_z|_G = 0$ на лінії G зовнішньої поверхні яра статора, що обмежує розрахункову область. Величина μ у кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається по відповідних їх кривих намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (5)$$

Щільність віброзбуджуючих сил *пропорційна тензору магнітного натягу*, який має фізичну розмірність тиску (Н/м²). Модулі нормальної та тангенціальної складових тензора магнітного натягу виражаються як [1]

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \cdot \left(\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2 \right) \right|, \quad T_\tau = \left| \frac{\dot{B}_n^2 \cdot \dot{B}_\tau^2}{\mu} \right|, \quad (6)$$

де \dot{B}_n , \dot{B}_τ – нормальна (направлена уздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці) і тангенціальна (направлена уздовж дотичної до поверхні в заданій точці) проекції вектора магнітної індукції, які знаходяться за відомими проекціями вектора магнітної індукції \dot{B}_x , \dot{B}_y у декартовій системі координат. Наприклад, нормальна складова магнітної індукції визначається як

$$\dot{B}_n = \dot{B}_y \cos \alpha + \dot{B}_x \sin \alpha = \left(y \dot{B}_y + x \dot{B}_x \right) / R_\delta, \quad (7)$$

де x, y – проекції радіус-вектора на осі системи координат; R_δ – радіус розточки статора. Надалі розглядаються радіальні вібрації, які відбуваються за рахунок дії нормальної складової тензора магнітного натягу. Вібрації досліджувалися у двох точках на коронках зубців статора, які відповідають місцям умовного розміщення датчиків вібрації. На рис. 1 позначено: 1 і 2 – точки розміщення першого і другого датчиків відповідно.

Сформульована математична модель (1)...(7) дає змогу змоделювати сигнали датчиків вібрацій (датчиків віброприскорення) як функції реального часу. Для цього в точках 1, 2 за виразом (6) розраховується нормальна складова тензора магнітного натягу, оскільки величина віброприскорення пропорційна величині віброзбуджуючої сили. Для урахування зміни тензора у часі модель передбачає зміну у часі конфігурації розрахункової області при переміщенні ротора відносно статора. Інтервал часу, на якому здійснювався аналіз сигналу, відповідає одному періоду – одному повному обороту ротора $t = (0...0,02)$ с. Кількість розрахункових кроків складала 200, тобто один крок за часом дорівнював $\Delta t = 10^{-4}$ с. За один крок ротор повертався відносно статора на третину зубцевої поділки, що задовольняє умовам точності.

Результати моделювання. Дослідження проводилися на прикладі турбогенератора потужністю 200 МВт типу ТГВ-200-2. На рис. 1 зображено миттєвий розподіл магнітної індукції і векторного магнітного потенціалу в момент часу $t = 0,02$ с в активній зоні ТГ в синхронному (рис. 1 а) та асинхронному (рис. 1 б) режимах роботи при однакових (номінальних) значеннях струму в обмотці статора $I_m = \sqrt{2} \cdot 8635$ (А). У синхронному режимі в роторі протікають струми тільки в обмотці ротора – в обмотці задано номінальний струм збудження, який дорівнює 1880 (А). На відміну від синхронного в асинхронному режимі роботи в зубцях і ярмі ротора протікають індуквані вихрові струми частоти ковзання. Величина номінального ковзання дорівнює $s = 0,002$. Результати розрахунків залежать також від стану обмотки збудження – обмотка в асинхронному режимі може бути розімкненою (струми в пазах ротора відсутні) або замкненою (в пазах ротора протікають індуквані в обмотці збудження струми).

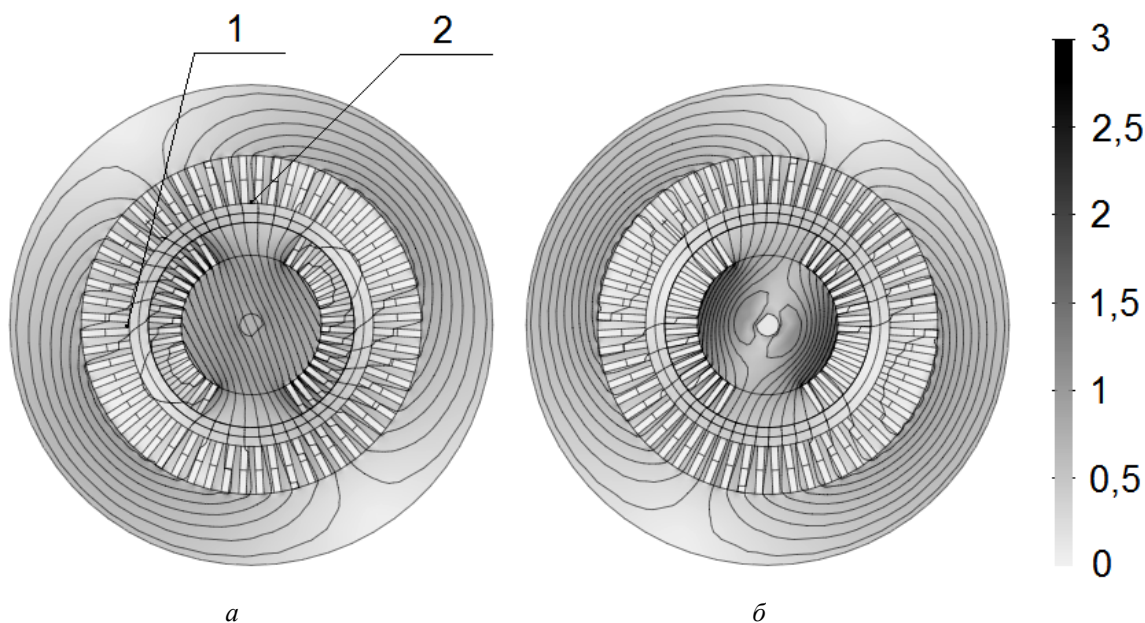


Рис. 1

На рис. 1 видно суттєво різний характер розподілу електромагнітного поля в активній зоні ТГ у двох зазначених режимах його роботи. Для моменту часу $t = 0,02$ с на рис. 2 зображено просторовий розподіл тензора магнітного натягу уздовж поверхні розточки статора для синхронного (рис. 2 а) і асинхронного (рис. 2 б) режимів роботи. Криві мають характерний зубцевий характер, пов'язаний зі значною відмінністю величин магнітної індукції, а значить, і тензора натягу, на коронках зубців статора і суміжних ділянках пазів статора.

На рис. 3 зображено розрахункові функції тензора магнітного натягу у часі у точках 1 і 2 на коронках зубців статора, де розташовані датчики віброприскорення. Ці функції в пев-

ному масштабі відображають зміну у часі сигналів зазначених датчиків віброприскорення.

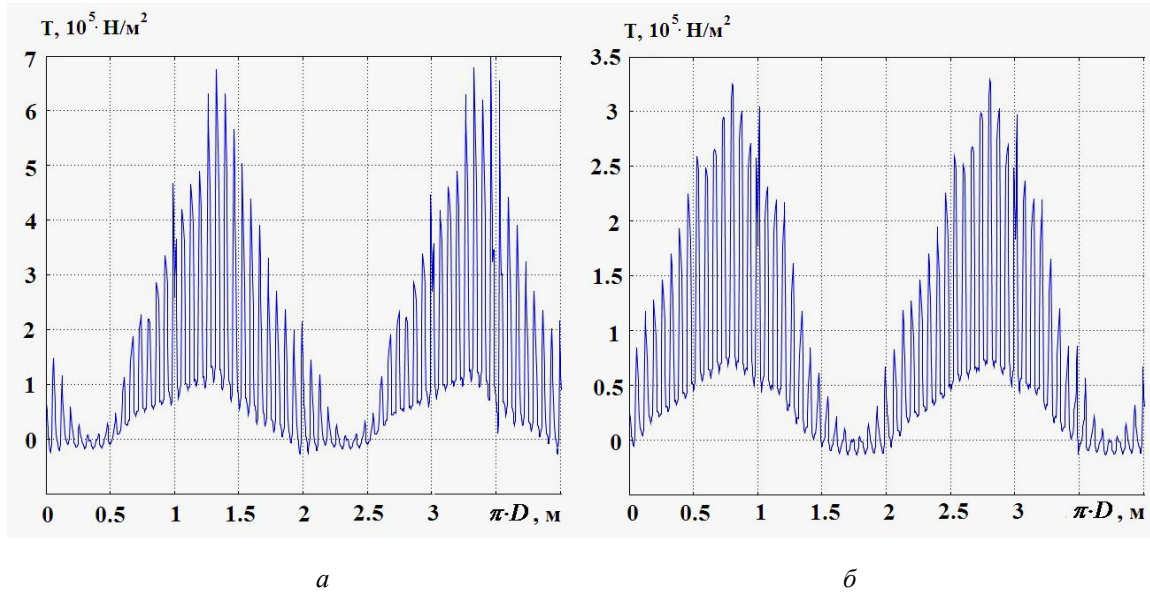


Рис. 2

На рис. 3 *а* показано сигнали для синхронного режиму роботи, а на рис. 3 *б* – для асинхронного режиму ТГ при розімкнутій обмотці збудження. З рис. 3 видно, що сигнали датчиків 1 і 2 між собою за амплітудою і формою сигналу на обох рисунках практично однакові, але зміщені у часі по фазі, що відповідає їх просторовому зсуву на 90° уздовж розтки статора. Частота основної гармоніки в сигналах становить 100 Гц, що відповідає основній частоті електромагнітних вібрацій.

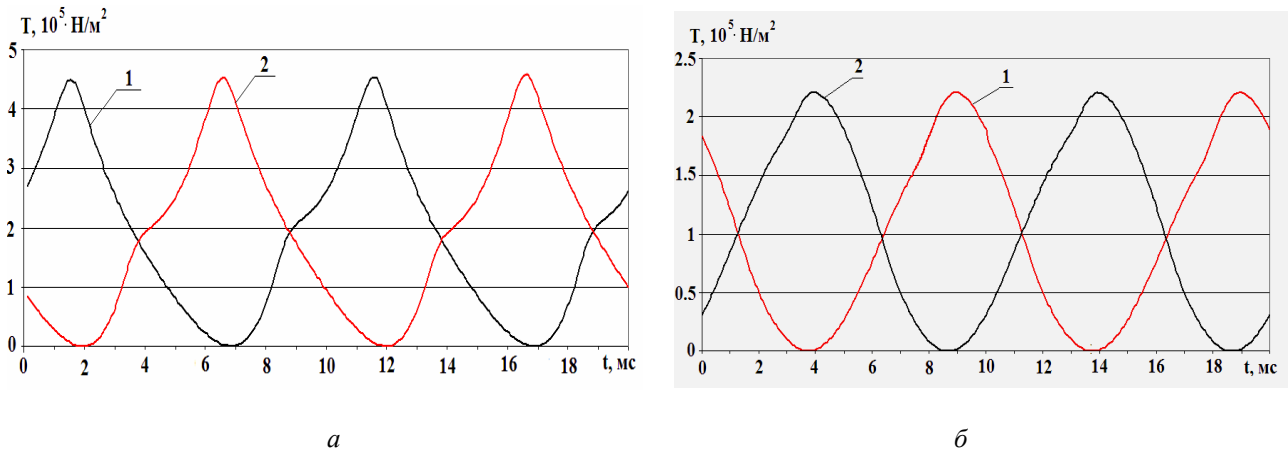


Рис. 3

Порівняльний аналіз отриманих кривих дозволяє зробити такі висновки.

По-перше, в асинхронному режимі роботи сигнали датчиків більш наближені до “чистої” синусоїди. Це пояснюється більш рівномірним розподілом вихрових струмів у масивному роторі і, як наслідок, більш синусоїдальною формою розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку. В синхронному режимі струми ротора зосереджені тільки в пазах, і тому в зоні великих зубців ротора спостерігається спотворення форми поля, яке впливає на форму сигналу датчика. В сигналах також практично відсутні гармоніки, які обумовлені зубчатою структурою ротора, що пояснюється великим розміром повітряного проміжку ТГ ($\delta = 100$ мм) і затуханням у ньому магнітних потоків вищих і зубцевих гармонік ротора.

По-друге, амплітуда сигналу вібрації в асинхронному режимі ($2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) в 1,92 разу менша у порівнянні з синхронним режимом ($4,22 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$).

Важливе значення для аналізу віброзбуджуючих сил має розгляд їх спектрального складу. На рис. 4 зображено спектральні діаграми сигналу першого датчика для наступних режимів роботи ТГ: синхронного (рис. 4 а), асинхронного режиму з розімкненою обмоткою

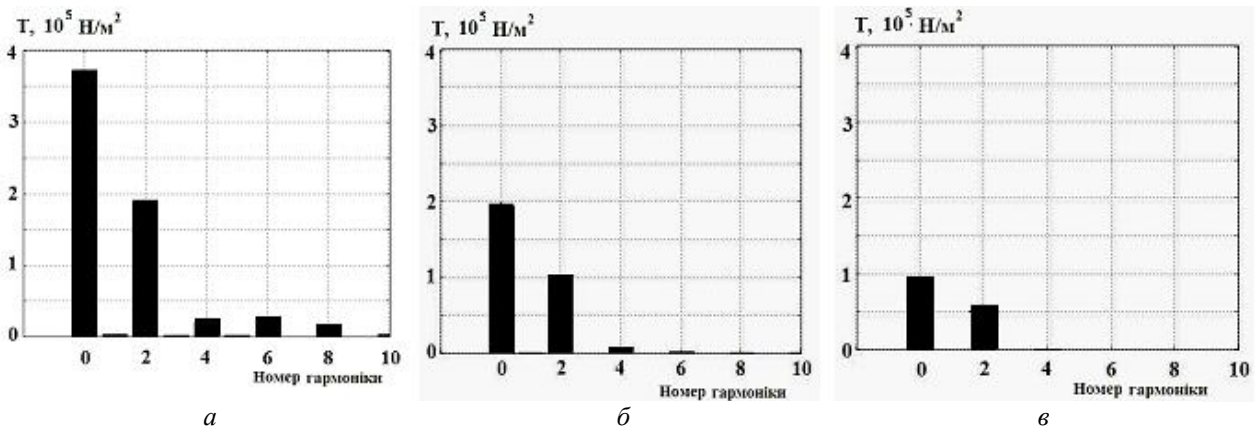


Рис. 4

ротора (рис. 4 б) та асинхронного режиму з замкненою накоротко обмоткою ротора (рис. 4 в). Спектри отримано шляхом розкладання показаних на рис. 3 функцій тензора натягу за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Постійна складова тензора, яка характеризує постійно діюче електромагнітне зусилля між статором і ротором, становить в синхронному режимі $3,75 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з розімкненою обмоткою ротора – $1,95 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, а в асинхронному з замкненою обмоткою ротора – $0,987 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Тобто при переході в асинхронний режим постійна складова електромагнітних зусиль зменшується відповідно у 1,9 і 3,8 разу. Аналогічні співвідношення спостерігаються і для основної гармоніки електромагнітних віброзбуджуючих сил частотою 100 Гц. У синхронному режимі амплітуда гармоніки складає $1,9 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з розімкненою обмоткою ротора – $1,03 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з замкненою на коротко обмоткою ротора – $0,62 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Тобто при переході в асинхронний режим основна гармоніка електромагнітних віброзбуджуючих сил частотою 100 Гц зменшується відповідно у 1,84 і 3,06 разу. Окрім того, в спектрі вібрацій синхронного режиму спостерігаються електромагнітні зусилля, які створюють вібрації на частотах 200, 300, 400 Гц. Це може призвести до резонансних коливань окремих елементів конструкції статора, які мають частоти власних коливань такі ж, як і частота віброзбуджуючої сили. В асинхронних режимах зазначених складових вищих частот у віброзбуджуючій силі практично немає. Середнє квадратичне значення сумарних вібрацій від дії всіх складових гармонік у синхронному режимі становить $2,973 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з розімкненою обмоткою ротора складає $1,553 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, а в асинхронному режимі з замкненою обмоткою ротора – $0,975 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Отже, в асинхронних режимах сумарна вібрація зменшується відповідно в 1,91 і 3,1 разу.

Розроблена математична модель дозволяє розрахувати не тільки радіально направлені віброзбуджуючі сили, але й сили, направлені уздовж вектора дотичної до поверхні статора (тангенціально направлені сили), які викликають вібрації моменту. На рис. 5 зображено розрахункові функції тангенціальної складової тензора магнітного натягу у часі в точці 1 статора для синхронного (рис. 5 а) та асинхронного режимів з розімкненою обмоткою ротора (рис. 5 б). З наведених рисунків видно, що на відміну від радіальних тангенціальні вібрації мають знакозмінний характер. Спектральний аналіз цих функцій показав, що постійна складова тензора становить у синхронному режимі $1,35 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з розімкненою обмоткою ротора складає $0,25 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. Основна гармоніка електромагнітних віброзбуджуючих сил частотою 100 Гц в синхронному режимі складає $1,1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, в асинхронному з розі-

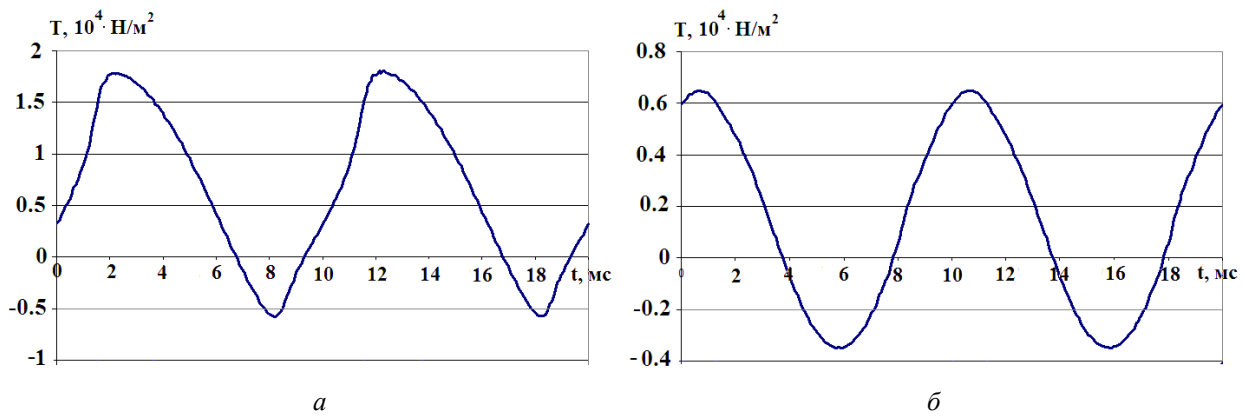


Рис. 6

мкненою обмоткою ротора – $0,5 \cdot 10^4$ Н/м². Середнє квадратичне значення сумарних вібрацій від дії всіх складових гармонік тангенціальної складової тензора магнітного натягу в синхронному режимі становить $1,231 \cdot 10^4$ Н/м², а в асинхронному – $0,395 \cdot 10^4$ Н/м². У цілому тангенціальні віброзбуджуючі сили в 2,5...4 рази менші за радіальні, причому при переході в асинхронний режим сумарні вібрації від тангенціальної складової також суттєво зменшуються (у даному випадку в 3,1 разу).

Таким чином, перехід ТГ з синхронного в асинхронний режим роботи супроводжується, при інших рівних умовах, суттєвим зменшенням рівня вібрацій осердя статора. Зазначене явище пояснюється тим, що амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку в асинхронному режимі ТГ зменшується, а функція розподілу магнітного поля уздовж полюсної поділки містить менше вищих гармонік, ніж у синхронному режимі. Це обумовлено покращеним характером розподілу магнітного поля в активній зоні під впливом розподілених вихрових струмів, які індукуються в масивних елементах ротора при появі ковзання. В разі, якщо струми частоти ковзання індукуються також і в короткозамкненій обмотці ротора, величина робочого ковзання зменшується, а форма розподілу магнітного поля наближається до “чистої” синусоїди.

Отримані результати свідчать, що з точки зору зменшення вібрацій статора робота ТГ в асинхронному режимі є більш доцільною. Цей факт у цілому сприяє подальшій розробці і впровадженню синхронно-асинхронних турбогенераторів, які мають працювати в асинхронних режимах протягом тривалого часу.

Висновки. 1. Розроблено польову математичну модель для аналізу електромагнітних віброзбуджуючих сил потужних турбогенераторів у синхронному та асинхронному режимах. Модель строго враховує переміщення ротора і дозволяє проаналізувати сигнали датчиків вібрації у режимі реального часу.

2. Показано, що при переході з синхронного в асинхронний режим роботи турбогенератора спостерігається суттєве зменшення амплітуд віброзбуджуючих сил. Спектр вібрації ТГ в асинхронному режимі відрізняється від спектра вібрації синхронного режиму і не містить складових віброзбуджуючих сил підвищеної частоти.

3. При експлуатації турбогенераторів нового типу – синхронно-асинхронних, їх вібрації в асинхронних режимах будуть незначними.

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.
2. Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А. Принцип относительности и выбор системы координат при анализе электромагнитного поля в электрических машинах // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 11–14.
3. Тутко А.И., Васьковський Ю.Н. Синхронно-синхронные турбогенераторы – К.: Наук. думка, 2010. – 240 с.

Ю.Н. Васьковський¹, докт. техн. наук, А.И. Турчин², магістр, А.А. Гераскин³, аспірант

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна;

3 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Исследование вибровозмущающих электромагнитных сил мощных турбогенераторов в синхронном и асинхронном режимах

Разработана математическая модель для анализа электромагнитных вибровозмущающих сил турбогенераторов большой мощности в синхронном и асинхронном режимах работы. Проведен сравнительный анализ этих сил в указанных режимах и сделаны выводы о характере вибраций турбогенератора в асинхронном режиме. Библ. 3, рис. 6.

Ключевые слова: турбогенератор, вибровозмущающие силы, электромагнитное поле, ротор, статор, синхронный и асинхронный режимы.

Yu.M. Vaskovskiy¹, O.I.Turchin², O.A. Geraskin³

1, 2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine;

3 – National Technical University of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”,
Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Research of vibrating electromagnetic forces of the high-power turbogenerators in synchronous and asynchronous modes

The mathematical model of sensing transducers signals of electromagnetic disturbing forces of a high power turbogenerator in synchronous and asynchronous operating modes is developed. The comparative analysis of these signals in the specified regimes is carried out and leading-outs concerning character of vibrations of the turbogenerator in an asynchronous regime are drawn. References 3, figures 6.

Key words: turbogenerator, vibrating electromagnetic forces, electromagnetic field, rotor, stator, synchronous and asynchronous operating modes.

Надійшла 26.01.2011

Received 26.01.2011