

УДК 621.313.333

**Ю. М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О. А. ГЕРАСКІН****ДІАГНОСТИКА КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ОБМОТЦІ ЗБУДЖЕННЯ ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ**

За допомогою математичного моделювання було виявлено та проаналізовано діагностичні ознаки, що виникають в спектрах віброзбуджуючих сил при короткому замиканні витків обмотки збудження синхронного генератора. Встановлено, що основною діагностичною ознакою, яка може використовуватися в системі вібраційної діагностики і свідчити про наявність зазначеного uszkodження, є поява в спектрі віброзбуджуючих сил гармоніки, частота якої кратна частоті обертання ротора. Досліджені діагностичні ознаки можна використовувати в системах вібраційного контролю та діагностики технічного стану потужних СГ для виявлення коротких замикань в обмотці збудження.

**Ключові слова:** вібрація, спектр, діагностика, синхронний генератор, обмотка збудження.

**Вступ.** В системах генерації електричної енергії широко застосовуються різні типи синхронних генераторів (СГ). На сьогоднішній день значна кількість потужних СГ, що знаходяться в експлуатації, у тому числі явнопольосні СГ, вичерпала гарантійні терміни роботи, які встановлені заводами – виготовлювачами. З огляду на те, що зазвичай можливості своєчасної заміни потужного обладнання електростанцій обмежені, актуальним є забезпечення надійної його роботи в умовах невеликого залишкового ресурсу. Певне вирішення зазначеної проблеми можливе шляхом створенням методів і засобів діагностування дефектів та uszkodжень обладнання, що дає можливість своєчасно виводити обладнання в ремонт без аварій з суттєвими економічними наслідками.

Одним з характерних uszkodжень явнопольосних СГ є короткі замикання витків обмотки збудження. Загальна кількість витків обмотки збудження в багатопольосних СГ є достатньо великою. Тому прості методи виявлення відносно невеликої кількості короткозамкнених витків, наприклад, контролем зміни величини загального активного опору обмотки збудження, є недостатньо чутливими. Ці методи дають достовірні результати тільки при значних uszkodженнях обмотки збудження, коли режим роботи СГ наближається до аварійного і його потрібно терміново виводити в ремонт. Зазвичай uszkodження обмеженої кількості поруч розташованих витків виникає на одному з полюсів ротора. Розміщення короткозамкнених витків на одному полюсі навіть при невеликій їх кількості може суттєво впливати на роботу СГ і призводити до ряду негативних явищ. Так, через зменшення потоку збудження uszkodженого полюсу ротора розподіл магнітного поля в повітряному проміжку СГ стає несиметричним, ЕРС, що індукуються в окремих паралельних гілках обмотки статора, мають різну величину, що призводить до появи урівнюючих струмів, збільшення електричних втрат і зменшення ККД СГ. Слід також зазначити, що існує велика ймовірність подальшого руйнування обмотки збудження на вже uszkodженому полюсі. Для запобігання цим негативним процесам актуальним є застосування більш чутливих методів діагностування короткозамкнених витків.

**Аналіз основних досягнень.** На сьогоднішній

день існує велика кількість неруйнівних методів діагностування uszkodжень синхронних машин, наприклад, метод спектрального аналізу споживаного струму статора і миттєвої споживаної потужності, метод вібраційної діагностики та інші методи. Проведений аналіз показав, що найбільш чутливий метод діагностики потужних електричних машин базується на обробці та аналізі вібраційних характеристик машин. Цей метод є основою функціональної (експлуатаційної) діагностики. Комплекс параметрів вібрації практично повністю характеризує технічний стан працюючого агрегату і дозволяє прогнозувати виникнення uszkodжень і аварій електромеханічного устаткування.

В останні десятиліття у вітчизняній і зарубіжній літературі опубліковані результати численних досліджень з вібраційного діагностування дефектів гідро- та парових турбін, підшипників, електромагнітних дефектів електричних машин [4-7] тощо. Дослідженню uszkodжень обмоток збудження синхронних генераторів присвячені роботи [8, 9].

Значну роль в обґрунтуванні та дослідженні діагностичних ознак uszkodженого обладнання відіграють методи математичного моделювання. Аналітичні методи розрахункового визначення вібрацій СГ при зміні досліджуваних параметрів відрізняються значною складністю або необхідністю прийняття суттєвих припущень. Ефективні результати досліджень можна отримати при застосуванні польових математичних моделей, які реалізуються чисельними методами [3]. Використання цих моделей дозволяє виявити та обґрунтувати достовірні діагностичні ознаки різних uszkodжень СГ, зокрема, його обмотки збудження.

**Мета досліджень.** Метою статті є дослідження методами математичного моделювання змін віброзбуджуючих сил в явнопольосному СГ, які виникають внаслідок коротких замикань в обмотці збудження, та виявлення діагностичних ознак, які можуть використовуватися в системі вібраційної діагностики. Теоретична і практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при створенні інформаційної бази знань, яка входить до складу вібродіагностичних комплексів.

**Математична модель.** Польова математична

модель досліджуваного СГ в синхронному режимі роботи базується на диференціальному рівнянні в часткових похідних відносно комплексної амплітуди аксіальної складової векторного магнітного потенціалу  $\dot{A}_z$ , яке чисельно розв'язується методом скінченних елементів в середовищі програми COMSOL Multiphysics в поперечному перетині активної зони СГ (рис. 1):

$$\Delta \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{\text{стор}} \quad (1)$$

де:  $\mu$  – магнітна проникність матеріалу, Гн/м;  $\dot{J}_{\text{стор}}$  – задана густина струмів в обмотках СГ, А/м<sup>2</sup>.

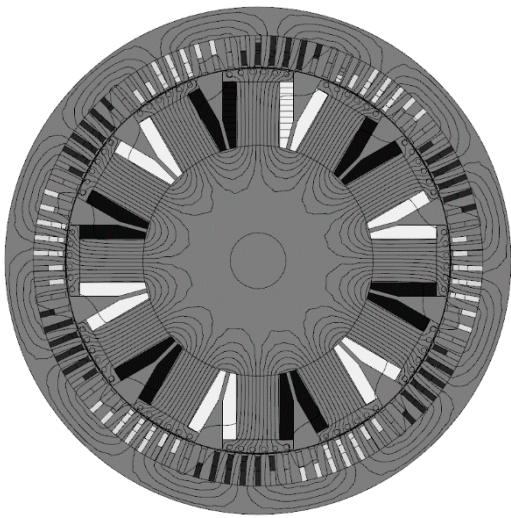


Рис. 1 – Поперечний перетин активної зони досліджуваного СГ

Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду  $A_z|_{G=0} = 0$  на лінії  $G$  зовнішньої поверхні яра статора.

Густини струмів в провідниках фаз обмотки статора задаються відповідно до формул:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} / S_{\Pi}, \\ \dot{J}_{B \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi}, \\ \dot{J}_{C \text{ стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $I_m$  – амплітуда струму в фазі обмотки статора;  $u_{\Pi}$  – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора;  $S_{\Pi}$  – площа перетину паза статора.

Густини струмів в обмотках ротора  $J_2$  задаються як сталі величини у відповідності з послідовною схемою з'єднання котушок полюсів.

Величина  $\mu$  в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається за відповідними кривими намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями:

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x, \quad (3)$$

Густина електромагнітних віброзбуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу Максвелла, який має розмірність тиску (Н/м<sup>2</sup>). Модулі нормальної (направлена вздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці) та тангенціальної (направлена вздовж дотичної до поверхні в заданій точці) складових тензора магнітного натягу виражаються як:

$$T_n = \frac{1}{2\mu} \left( \dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2 \right), \quad T_\tau = \frac{1}{\mu} \left( \dot{B}_n \cdot \dot{B}_\tau \right), \quad (4)$$

де  $\dot{B}_n, \dot{B}_\tau$  – відповідно нормальна і тангенціальна проекції вектора магнітної індукції, які легко знаходяться через відомі складові індукції в декартових координатах.

Можна показати [1], що сигнали п'єзоелектричних датчиків віброприскорення, які встановлюються на статорі машини і вимірюють її вібрації, пропорційні нормальній складовій тензора магнітного натягу. Тому результати аналізу зміни складової тензора  $T_n$  дозволяють зробити обґрунтовані висновки щодо зміни вібрацій машини. При дослідженні віброзбуджуючих сил виконується їх спектральний аналіз, в результаті чого з спектрів сил виділяються і аналізуються характерні гармоніки.

Номінальний кут навантаження СГ відповідає номінальному електромагнітному моменту, який розраховується через тангенціальну складову тензора натягу [3].

При короткому замиканні частини витків обмотки збудження утворюється струмопровідна ділянка, через яку проходить струм до решти неушкоджених витків, оминаючи ушкоджені витки електричного кола збудження. В математичній моделі реалізація такого ушкодження здійснюється тим, що в частині ушкоджених витків обмотки збудження на одному полюсі задається густина сторонніх струмів  $J_2=0$ , оскільки ЕРС в витках обмотки збудження не індукуються. Причому існує суттєва різниця на якій стороні котушки збудження розташовані закорочені витки, оскільки витки, що розташовані ближче до центру ротора мають гіршу вентиляцію і можуть більше перегріватися ніж витки, що розташовані ближче до полюсних наконечників. Всі котушки обмотки збудження на полюсах з'єднані послідовно. Ушкодження ротора СГ призводить до спотворення магнітного поля машини в порівнянні з неушкодженим СГ. Це спотворення обертається разом з ротором і викликає появу в сигналах датчиків збурень, що мають частоту обертання.

При розрахунках ушкодженого СГ необхідно врахувати також збільшення струму збудження через зменшення електричного опору, викликаного закороченням частини витків. Номінальний струм обмотки збудження помножається на коефіцієнт  $k_{OZ.i}$ :

$$k_{OZ.i} = 2p / ((2p-1) + 1 \cdot k_{\text{пол.}i})$$

де  $k_{\text{ПОЛ}_1}$  – коефіцієнт, що характеризує процентне співвідношення неушкоджених витків полюса  $W_{\text{неушкод}}$  до повної кількості витків одного полюса  $W_{\text{нов}}$ :

$$k_{\text{ПОЛ}_1} = W_{\text{неушкод}} / W_{\text{нов}}$$

Для знаходження діагностичних ознак ушкоджень, які з'являються в спектрах вібробуджуючих сил синхронного генератора при появі ушкоджень, необхідно досліджувати зміну амплітуд певних гармонік в порівнянні з неушкодженим СГ. Зокрема можливо аналізувати зміни наступних складових в спектрі вібробуджуючих сил.

1. Величину постійної складової спектру віброприскорення  $T_{a_0}$ .

2. Амплітуду обертової складової спектру віброприскорення  $T_{a_{ob}}$ , що має частоту  $f_{a_{ob}}$ , яка визначається за формулою:

$$f_{a_{ob}} = f / p$$

Для досліджуваного далі СГ  $f_{a_{ob}} = 50 \text{ Гц} / 6 = 8,33 \text{ Гц}$ .

3. Амплітуду складової подвійної частоти спектру віброприскорення  $T_{a_{100}}$ , яка має частоту 100 Гц.

4. Амплітуду зубцевої гармоніки віброприскорення  $T_{a_z}$ , що має частоту  $f_z$ , яка визначається за формулою:

$$f_z = f_{a_{ob}} \cdot z_1$$

Для досліджуваного СГ:  $f_z = 8,33 \text{ Гц} \cdot 90 = 749,7 \text{ Гц}$ .

5. Середньоквадратичне значення віброприскорення  $T_{a_{SKZ}}$ , що визначається за формулою:

$$T_{a_{SKZ}} = \sqrt{(T_{a_1}^2 + T_{a_2}^2 + T_{a_3}^2 + \dots + T_{a_n}^2) / n}$$

6. Середньоквадратичне значення шумових гармонік спектру віброприскорення  $T_{a_{SKZ_{sh}}}$ . Шумовими гармоніками називаються гармоніки, що нижчі по амплітуді певного встановленого рівня (наприклад 10-15% від амплітуди гармоніки  $T_{a_{100}}$ ) і не є кратними основній  $T_{a_{100}}$  і зубцевим гармонікам  $T_{a_z}$ .

Для дослідження та аналізу відносної зміни вібробуджуючих сил при ушкодженні СГ можна ввести наступну систему діагностичних коефіцієнтів:

1. Коефіцієнт зміни постійної складової спектру:

$$k_{a_0} = T_{n_{y_0}} / T_{n_{БМ_0}}$$

де  $T_{n_{y_0}}$ ,  $T_{n_{БМ_0}}$  – відповідно величини постійної складової тензора магнітного натягу ушкодженого і неушкодженого СГ.

2. Коефіцієнт зміни амплітуди обертової гармоніки віброприскорення.

$$k_{a_{ob}} = T_{n_{y_{a_{ob}}}} / T_{n_{БМ_{a_{100}}}}$$

де  $T_{n_{y_{a_{ob}}}}$ ,  $T_{n_{БМ_{a_{100}}}}$  – відповідно амплітуди обертової гармоніки нормальної складової тензора магнітного натягу ушкодженого СГ і амплітуда гармоніки частоти 100 Гц нормальної складової тензора магнітного натягу неушкодженого СГ.

3. Коефіцієнт зміни амплітуди гармоніки подвійної частоти віброприскорення:

$$k_{a_{100}} = T_{n_{y_{a_{100}}}} / T_{n_{БМ_{a_{100}}}}$$

де  $T_{n_{y_{a_{100}}}}$ , – амплітуда гармоніки подвійної частоти 100 Гц нормальної складової тензора магнітного натягу ушкодженого СГ.

4. Коефіцієнт зміни амплітуди зубцевої гармоніки віброприскорення:

$$k_{a_z} = T_{n_{y_{a_z}}} / T_{n_{БМ_{a_z}}}$$

де  $T_{n_{y_{a_z}}}$ ,  $T_{n_{БМ_{a_z}}}$  – відповідно амплітуди зубцевої гармоніки нормальної складової тензора магнітного натягу ушкодженого і неушкодженого СГ.

5. Коефіцієнт зміни середньоквадратичного значення віброприскорення:

$$k_{a_{skz}} = T_{SKZ_y} / T_{SKZ_{БМ}}$$

де  $T_{SKZ_y}$ ,  $T_{SKZ_{БМ}}$  – відповідно середньоквадратичне значення віброприскорення ушкодженого і неушкодженого СГ.

6. Коефіцієнт зміни середньоквадратичного значення шумових гармонік в спектрі віброприскорення:

$$k_{a_{SKZ_{sh}}} = T_{SKZ_{sh_y}} / T_{SKZ_{sh_{БМ}}}$$

де  $T_{SKZ_{sh_y}}$ ,  $T_{SKZ_{sh_{БМ}}}$  – відповідно середньоквадратичне значення шумових гармонік в спектрі віброприскорення ушкодженого і неушкодженого СГ.

**Результати моделювання.** Наведемо результати моделювання і дослідження вібробуджуючих сил, що виникають при коротких замиканнях обмотки збудження на прикладі явноплюсного СГ потужністю 500 кВт, який має наступні дані (рис. 2): номінальна напруга статора – 6 кВ, номінальна напруга ротора – 65 В, номінальний струм статора – 57 А, номінальний струм ротора – 320 А, кількість полюсів – 12, кількість витків обмотки збудження – 384, номінальна частота обертання 500 об/хв, кількість пазів статора – 90, номінальний кут навантаження  $\theta = 23,5^\circ$ .

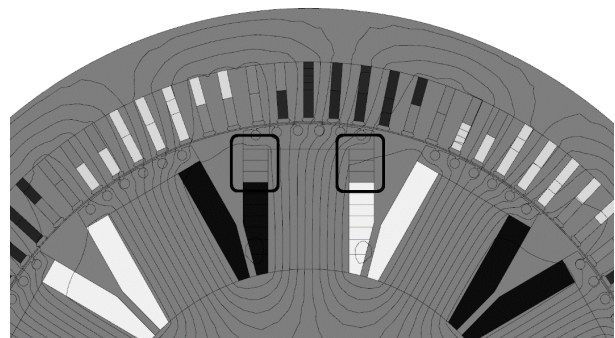


Рис. 2 – Картина поля при короткому замиканні 30% витків одного полюса синхронного генератора

В загальному випадку вібрація електричної машини складається з вібрацій електромагнітного і механічного походження. Прийнято припущення, що рівень вібрації механічного походження (тертя в підшипниках, аеродинамічне тертя та ін.) при однаковій швидкості обертання ротора СГ не змінюється і його

можна виділити і вилучити із загального сигналу вібрації за допомогою дослідів номінального навантаження і неробочого ходу СГ, і надалі аналізувати тільки інформативний сигнал вібрації електромагнітного походження. Причому для задач діагностики необхідно розглядати *різницевий сигнал (тензор)*, який отримують відніманням характеристик тензора ушкодженого СГ і неушкодженого СГ. Причому для неушкодженого СГ різницевий тензор завжди дорівнює нулю, що робить зручним його використання при аналізі змін вібрацій.

Тензор магнітного натягу розрахований далі із врахуванням реальної довжини СГ (помножений на довжину СГ) і тому має розмірність Н/м. Величини досліджуваних параметрів для неушкодженого СГ і СГ, в якому на одному з полюсів закорочено різну кількість витків, наведені в табл. 1.

З табл. 1 видно, що суттєво зростає складова частоти обертання  $T_{a_{ob}}$ , а інші складові змінюються мало.

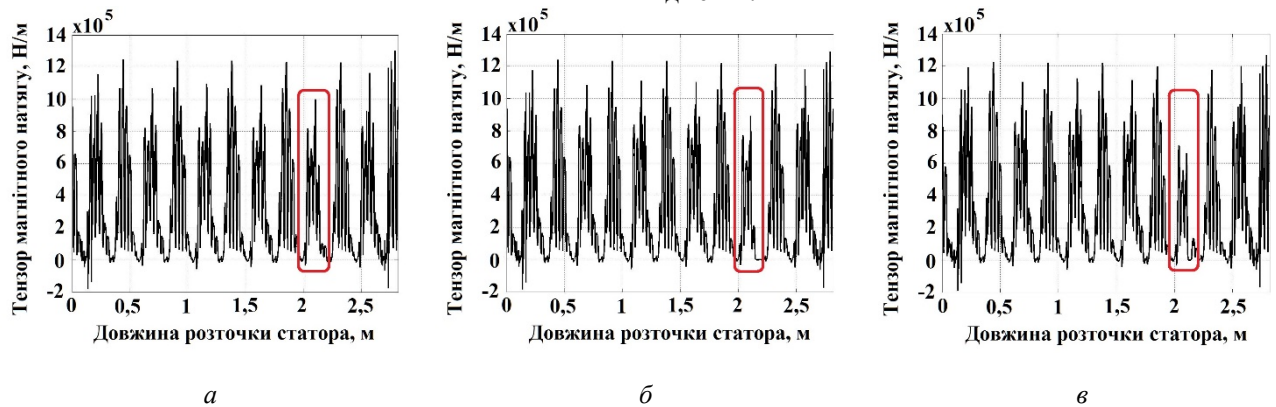


Рис. 3 – Розподіл тензора магнітного натягу вздовж розтки статора при ушкодженні витків обмотки збудження: а – ушкоджено 30% витків, б – ушкоджено 70% витків, в – ушкоджено 100% витків

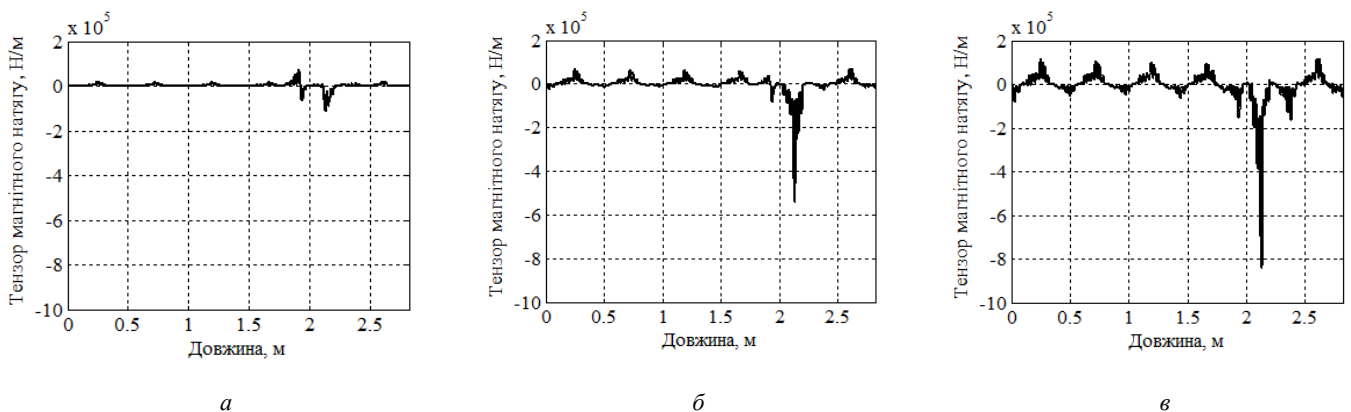


Рис. 4 – Розподіл різницевого тензора вздовж розтки статора при ушкодженні витків обмотки збудження: а – ушкоджено 30% витків, б – ушкоджено 70% витків, в – ушкоджено 100% витків

В неушкодженому СГ обертова гармоніка відсутня. В розподілі тензора магнітного натягу неушкодженого СГ (рис.3, а) присутні 12 максимумів відповідно до полюсності машини. При обертанні магнітного поля разом з ротором повз датчика вібрації, що розташований на поверхні статора, в датчику наводиться сигнал з частотою 100 Гц. При

Таблиця 1 – Числові значення досліджуваних величин

Позначення величини	Значення величини при ушкодженні витків зверху, Н/м			
	Неушкоджений СГ	Ушкоджено 30% витків	Ушкоджено 70% витків	Ушкоджено 100% витків
$T_{a_0}$	307171	305802	302269	298041
$T_{a_{ob}}$	0	9516	22976	33463
$T_{a_{100}}$	327682	328894	325921	316971
$T_{a_z}$	225054	224423	221708	218592
$T_{a_{SKZ}}$	25063	25158	25141	24857
$T_{a_{SKZ sh}}$	7231	7385	8507	9170

На рисунках 4 та 5 наведено: розподіли тензора магнітного натягу (рис. 3) і розподілу різницевого тензора вздовж розтки статора (рис. 4) в залежності від різної кількості ушкоджених витків обмотки збудження.

Різницевий тензор, обертаючись разом з ротором, проходить повз датчика вібрації і індукує в ньому сигнал з частотою обертання ротора. Чим більше кількість ушкоджених витків на полюсі синхронної машини, тим більше величина різницевого тензора (рис.4) і, відповідно, амплітуда обертової гармоніки, що має частоту 8,33 Гц.

Слід зазначити, що збільшення амплітуд гармонік, що відповідають частоті 100 Гц відповідно до полюсності СГ (рис. 4), пояснюється тим, що в моделі враховувалось зростання струму збудження при збільшенні кількості ушкоджених витків полюса.

На рисунках 5 та 6 показано залежності діагностичних коефіцієнтів, від процентного

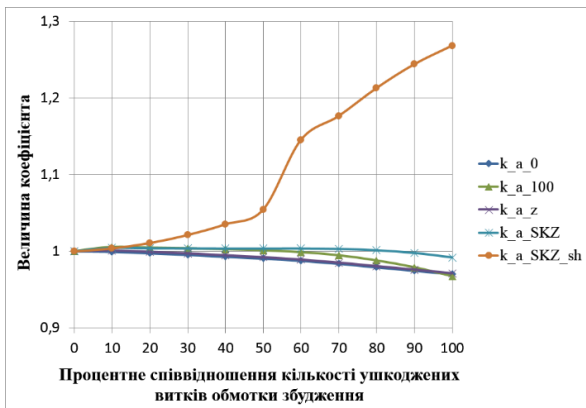


Рис. 5 – Залежність діагностичних коефіцієнтів від процентного співвідношення кількості ушкоджених витків на полюсі СГ

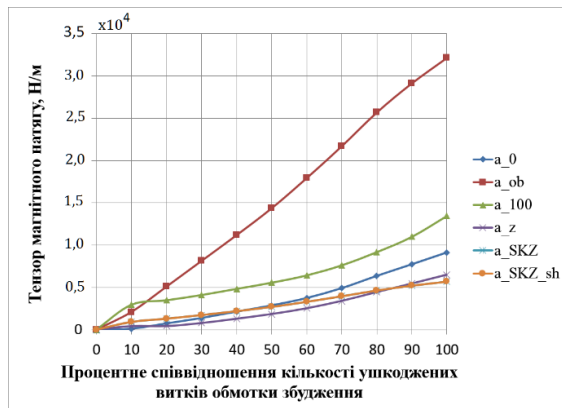


Рис. 7 – Залежності величин гармонік різницевого тензора від процентного співвідношення кількості ушкоджених витків на полюсі СГ.

Гармоніки різницевого тензора доцільно відображати в абсолютних одиницях (рис. 7) оскільки в неушкодженому СГ вони дорівнюють нулю. Визначати відносну зміну амплітуди обертової гармоніки можна різними способами: а) в порівнянні з амплітудою обертової гармоніки неушкодженого СГ; б) в порівнянні з амплітудою складової подвійної частоти неушкодженого СГ. Порівняння амплітуди обертової гармоніки з амплітудою частоти 100 Гц пов'язане з відсутністю обертової гармоніки в неушкодженому СГ, а при зростанні кількості ушкоджених витків обе-

співвідношення кількості ушкоджених витків на полюсі СГ. При ушкодженні 100% витків котушки полюса найбільш суттєво зростає обертова складова віброприскорення – від 0% до 10,2 %, в порівнянні з амплітудою складової подвійної частоти.

При повному ушкодженні котушки обмотки збудження полюса величина постійної складової зменшується на 3%, амплітуда складової подвійної частоти спектру зменшується на 3,2%, амплітуди зубцевої гармоніки віброприскорення зменшується на 3%, середньоквадратичне значення шумових гармонік збільшується на 27%.



Рис. 6 – Залежність коефіцієнту обертової гармоніки від процентного співвідношення кількості ушкоджених витків на полюсі СГ

ртова складова починає зростати, поки не стане співрозмірною з амплітудою складової подвійної частоти.

На рис. 8 та 9 показано залежності тензора магнітного натягу при збільшенні кількості ушкоджених витків обмотки збудження. Літерою  $a$  позначена залежність у випадку коли кількість ушкоджених витків збільшується знизу полюса, а літерою  $b$  – при збільшенні витків зверху полюса. Виявлено, що амплітуди різних гармонік змінюються не однаково.

На рис. 10 та 11 показано порівняння складових спектру тензора магнітного натягу в залежності від місця розташування 10% і 30% ушкоджених витків обмотки збудження. Виявлено, що місце розташування ушкоджених витків може впливати на величини різних гармонік. Найбільш інформативною виявилась амплітуда обертової гармоніки – при розміщенні 10% ушкоджених витків під полюсним наконечником (зверху), її значення в 2,8 разів більше в порівнянні з розташуванням витків зі сторони валу (знизу). При 30% ушкоджених витків зверху полюса (рис. 2) її значення більше в 3,46 рази в порівнянні з розташуванням ушкоджених витків знизу полюса.

Виявлення цього фактора дозволяє в процесі вібраційної діагностики визначати не тільки наявність і кількість, а й місце розташування ушкоджених витків обмотки збудження.

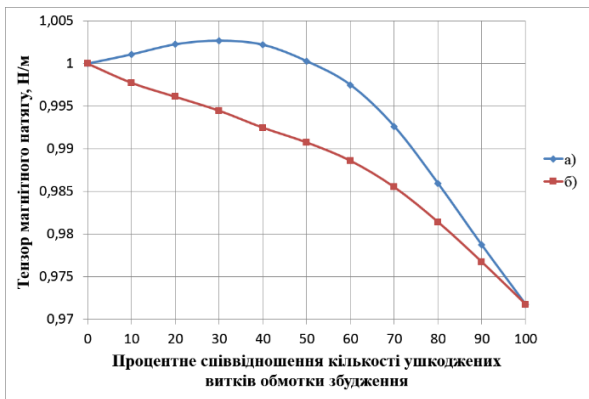


Рис. 8 – Величина постійної складової тензора в залежності від локалізації uszkodження і від кількості uszkodжених витків: *a* – знизу, *б* – зверху

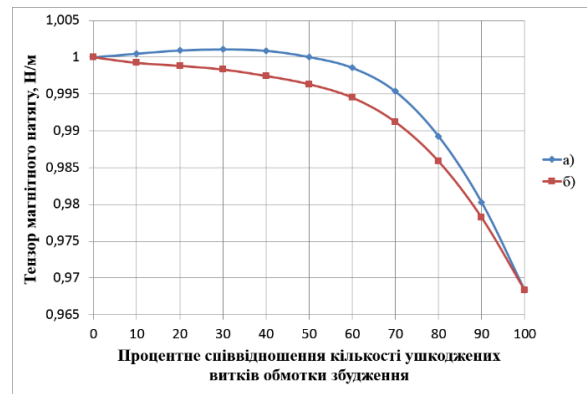


Рис. 9 – Величина гармоніки 100 Гц в залежності від локалізації uszkodження і від кількості uszkodжених витків: *a* – знизу, *б* – зверху

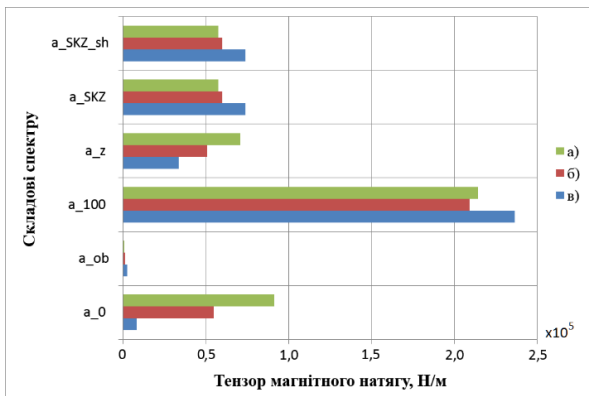


Рис. 10 – Величини гармонік в залежності від розміщення 10% uszkodжених витків на полюсі: *a* – знизу, *б* – по центру, *в* – зверху

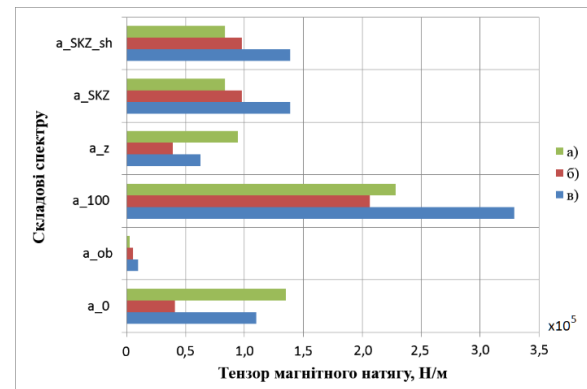


Рис. 11 – Величини гармонік в залежності від розміщення 30% uszkodжених витків на полюсі: *a* – знизу, *б* – по центру, *в* – зверху

Відмінність в величинах амплітуд гармонік при розташуванні uszkodжених витків обмотки збудження зверху і знизу полюса може в процесі вібраційного моніторингу uszkodжень СГ призвести до неточного трактування результатів вібраційної діагностики. Тому при створенні інформаційної бази знань вібродіагностичних систем для даного СГ необхідно визначити певні діапазони значень віброзбуджуючих сил з урахуванням конкретних геометричних і обмотувальних даних полюсів СГ.

Слід зазначити, що з урахуванням невеликої частоти обертання ротора явнополюсних СГ величина обертової гармоніки *віброшвидкості*, яка отримується інтегруванням даної гармоніки віброприскорення, є суттєво більшою і складає 289% від гармоніки віброшвидкості основних електромагнітних вібрацій, що уможлиблює надійне її виявлення відповідними вимірювальними датчиками віброшвидкості.

**Висновки.** Методами математичного моделювання віброзбуджуючих сил в СГ при коротких замиканнях витків обмотки збудження досліджено наявні діагностичні ознаки, що виникають в спектрах сил при появі зазначеного uszkodження.

Встановлено, що основною діагностичною ознакою, яка може використовуватися в системі вібраційної діагностики і свідчити про наявність коротких замиканнях витків обмотки збудження, є поява в спектрі віброзбуджуючих сил гармоніки, частота якої кратна частоті обертання ротора. При кількості uszkodжених витків на полюсі 30% і 100% амплітуда обертової гармоніки віброприскорення складає відповідно 2,8% і 10,2% від амплітуди основної гармоніки електромагнітної вібрації 100 Гц. Амплітуди інших гармонік спектру змінюються мало і не можуть використовуватися для надійного діагностування uszkodжень витків обмотки збудження.

Досліджені діагностичні ознаки можна використовувати в системах вібраційного контролю та діагностики технічного стану потужних СГ для виявлення коротких замикань в обмотці збудження на ранній стадії їх розвитку.

**Список літератури:** 1. Васильовский Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // Электротехника і електромеханіка.– 2010. – Вип. 5. – С. 12-16. 2. Васильовский Ю.Н., Гераскин А.А. Математическое моделирование электромагнитных полей в

короткозамкнутым асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора // Технична електродинаміка. – 2010. – Вип. 2. – С. 56-61. 3. Васковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 191с. 4. Барков, А. В. "Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы." [Электронный ресурс] / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А. А. Борисов // Режим доступа до книги: <http://www.vibrotek.ru/russian/www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Vibrodiagnostika%20elektronnih%20mashin.pdf>. 5. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика [Электронный ресурс] / В.А. Русов // Режим доступа до книги: <http://www.vibrocenter.ru/book8.htm>. 6. Bruzzese, Claudio, and Gojko Joksimovic. "Harmonic signatures of static eccentricities in the stator voltages and in the rotor current of no-load salient-pole synchronous generators." *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 5(58) (2011): 1606–1624. 7. Freire, N. M. A., Estima, J. O., & Marques Cardoso, A. J. "Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications". *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 9 (60) (2013): 3957–3967. Print. 8. Полищук, А. А., Хамухин, А. А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Вип. 323(5). – С. 85-93. 9. Розум Т.И., Полищук В.И. Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–5. – С. 1061-1065.

vibrovozmuschayuschih elektromagnitnyh sil." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 5 (2010): 12–16. Print. 2. Vaskovskiy, Yu.N., and Geraskin A.A. "Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnyh poley v korotkozamknutom asinhronnom dvigatele s povrezhdennoy obmotkoy rotora" *Tekhnichna elektrodinamika* 2 (2010): 56–61. Print. 3. Vaskovskiy, Yu.M. "Poloviy anallz elektrichnih mashin." – Kiyv: NTUU «KPI», 2007. Print. 4. Barkov, A. V., N.A. Barkova and A. A. Borisov. Vibratsionnaya diagnostika elektricheskikh mashin v ustanovivshihsiya rezhimah raboty. 30 October 2009. Web. 20 January 2013 <[http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Vibrodiagnostika\\_elektronnih\\_mashin.pdf](http://www.vibrotek.ru/russian/UsersFiles/File/statiy/Vibrodiagnostika_elektronnih_mashin.pdf)>. 5. Rusov, V.A. Spektralnaya vibrodiagnostika. 30 October 2012. Web. 20 January 2014 <<http://www.vibrocenter.ru/book8.htm>>. 6. Bruzzese, Claudio, and Gojko Joksimovic. "Harmonic signatures of static eccentricities in the stator voltages and in the rotor current of no-load salient-pole synchronous generators." *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 5 (58) (2011): 1606–1624. Print. 7. Freire, N. M. A., J. O. Estima and Marques Cardoso A. J. "Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications". *Industrial Electronics, IEEE Transactions* 9 (60) (2013): 3957–3967. Print. 8. Polischuk, A. A., and Hamuhin, A. A. "Vyiyavlenie vitkovyih zamyikaniy obmotki rotora sinhronnogo generatora na osnove veyvlet-analiza magnitnyh potokov rasseyaniya" *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* 5 (323) (2013): 85–93. Print. 9. Rozum, T.I., and Polischuk, V.I. "Metod vyiyavleniya vitkovyih zamyikaniy v obmotke возбуждения синхронного генератора" *Fundamentalnyie issledovaniya* 8 (2013): 1061–1065. Print.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vaskovskiy, Yu.N., and Geraskin A.A. "Analiz signalov datchikov vibratsii v korotkozamknutyih asinhronnyih dvigatelyah na osnove matematicheskikh modeley

Надійшла (received) 31.07.2015

«Відомості про авторів / About the Authors»

**Васковський Юрій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри електромеханіки; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kiyv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Electromechanics, tel.: (050) 10-220-10; e-mail: [vun157@gmail.com](mailto:vun157@gmail.com).

**Гераскін Олександр Анатолійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», асистент кафедри електромеханіки; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).

**Geraskin Alexandr Anatolievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University of Ukraine «Kiyv Polytechnic Institute», Assistant at the Department of Electromechanics, tel.: (099) 364-75-94; e-mail: [nirbikalpasamadhi@ukr.net](mailto:nirbikalpasamadhi@ukr.net).