

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

**Ю.М. Васьковський<sup>1</sup>**, докт. техн.наук, **О.А. Гераскін<sup>2</sup>**, аспірант

1, 2 – Нац. техн. ун-т України «КПІ»,

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

*Розроблено польову математичну модель для аналізу сигналів датчиків вібрації, яка враховує переміщення ротора відносно статора та експериментальний стенд для вимірювання вібрації, що складається з апаратного і програмного комплексів і забезпечує вимірювання, числову обробку та візуалізацію сигналів вібродатчиків. Проведено порівняння розрахункових та експериментальних даних, яке підтвердило адекватність розробленої математичної моделі. Бібл. 6, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, вібрації, математична модель, експериментальні дослідження.

**Вступ.** Визначальним фактором ефективного функціонування систем діагностики дефектів та ушкоджень електричних машин є встановлення взаємно однозначної відповідності між параметрами діагностичних ознак, які визначаються за результатами поточних вимірювань характеристик машини, і видом її дефекту. В системах вібраційної діагностики параметрами, що аналізуються, є сумарний рівень і спектральний склад вібрацій машини. З огляду на велике різноманіття електричних машин та велику кількість можливих варіантів їх ушкоджень встановлення такої відповідності є складною задачею, яку неможливо вирішити тільки шляхом накопичення та аналізу експериментальних даних і узагальнення існуючого досвіду експлуатації машин. Для побудови систем вібраційної діагностики необхідно використання результатів математичного моделювання, отриманих на адекватних математичних моделях, які дають змогу визначити параметри вібрації машини при різних можливих варіантах її ушкодження. Тому розробка таких моделей є важливою складовою створення систем діагностики дефектів та ушкоджень електричних машин.

Математичні моделі вібраційних процесів поділяються на детерміновані та статистичні (стохастичні). Статистичні моделі успішно використовуються за наявності випадкових або погано обумовлених факторів, що суттєво впливають на досліджуваний процес. Серед наукових праць, присвячених розробці таких моделей, можна відмітити, наприклад, роботи [4, 5]. Часто для підвищення достовірності результатів діагностики доцільно використовувати обидва типи моделей.

У цій роботі розглядається детермінована математична модель вібраційних процесів електромагнітного походження, побудована на положеннях теорії електромагнітного поля. Польові математичні моделі електричних машин дають змогу докладно змоделювати дефекти її конструкції [1–3]. Такі моделі за результатами аналізу розподілу магнітного поля в активній зоні машини дають змогу розрахувати електромагнітні вібробуджуючі сили. При цьому моделі мають строго враховувати переміщення ротора відносно статора, що дає змогу в режимі реального часу змоделювати сигнали розміщених на корпусі статора датчиків вібрації.

Метою цієї статті є експериментальна апробація розробленої авторами математичної моделі електромагнітного поля і електромагнітних вібробуджуючих сил на прикладі асинхронного двигуна (АД).

**Математична модель.** Математичні моделі електромагнітного поля в АД розглянуто в працях багатьох науковців, у тому числі й роботах авторів статті, наприклад [1, 3]. Але в більшості таких моделей використовується припущення про умовну нерухомість ротора, яке дає змогу провести аналіз на основі незмінної геометрії розрахункової області, що спрощує чисельну реалізацію моделі і тому на сьогодні широко застосовується при розв'язанні різних задач. Такі моделі дають змогу визначити усереднені характеристики електромагнітного по-

ля і на їх основі обчислити спектри віброзбуджуючих сил та їх середньоквадратичне значення. Наведена у статті модель кардинально відрізняється тим, що в ній у режимі реального часу строго враховується зміна геометрії розрахункової області внаслідок переміщення ротора відносно статора. Це дало змогу перейти до моделювання сигналів датчиків вібрації у часі і отримати ряд нових результатів.

В основі математичної моделі лежить рівняння електромагнітного поля в активній зоні АД. Розглядаються сталі процеси з припущенням, що всі польові функції змінюються у часі за гармонічним законом. Для двовимірних полів у поперечному перерізі АД рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осьової складової векторного магнітного потенціалу  $\dot{A}_z$  у статорній системі координат має такий вигляд:

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

де  $\omega$  – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу;  $\omega_R$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\mu$  – магнітна проникність;  $\gamma$  – електропровідність;  $\dot{J}_{z\text{стор}}$  – густина сторонніх струмів (у цьому випадку це щільність струмів у пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора);  $R$  – радіус-вектор довільної точки ротора. Для такої задачі доцільно використовувати роторну систему координат, в якій рівняння (1) набуває більш простого вигляду:

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

де  $s$  – ковзання ротора. Доцільність використання роторної системи координат обумовлена тим, що вихрові струми виникають тільки в елементах масивного ротора, а всі елементи конструкції статора АД можна вважати неелектропровідними (магнітопровід статора – шихтований, в пазах статора задаються тільки сторонні струми).

Джерелами поля є густина сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора:

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

де  $I_m$  – амплітуда струму в фазі обмотки статора;  $u_{II}$  – число послідовно з'єднаних провідників у 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 ярма статора, що обмежує розрахункову область. Величина  $\mu$  в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається по відповідних кривих намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються як

$$B_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, B_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (4)$$

За відомими проєкціями  $\dot{B}_x$ ,  $\dot{B}_y$  на внутрішній поверхні статора легко знайти  $\dot{B}_n$  – нормальну (направлену уздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці з координатами  $x, y$ ) і  $\dot{B}_\tau$  – тангенціальну (направлену уздовж дотичної до поверхні в цій же точці) проєкції вектора магнітної індукції:

$$\dot{B}_n = \left( y \dot{B}_y + x \dot{B}_x \right) / R_\delta; \quad \dot{B}_\tau = \left( y \dot{B}_x - x \dot{B}_y \right) / R_\delta, \quad (5)$$

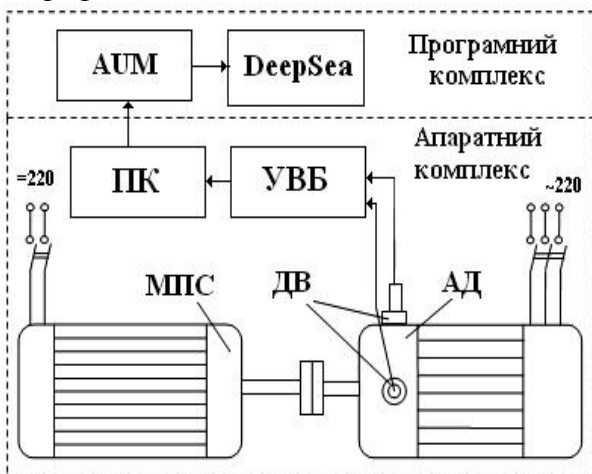
де  $R_\delta$  – радіус розточки статора. Щільність віброзбуджуючих сил *пропорційна тензору магнітного натягу*, який має фізичну розмірність тиску ( $\text{Н/м}^2$ ). Модулі нормальної та тангенціальної складових тензора магнітного натягу виражаються як

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

Надалі розглядаються радіальні вібрації, які відбуваються за рахунок дії нормальної складової тензора магнітного натягу. Вібрації досліджувалися в заданій точці на коронці зубця статора, яка відповідає місцю умовного розміщення датчика вібрації.

Чисельна реалізація математичної моделі (1)...(6) виконана в рамках програмного комплексу COMSOL 3.5. У точках розміщення датчиків розраховувалася нормальна складова тензора магнітного натягу, оскільки величина віброприскорення пропорційна величині вібробуджуючої сили. Для урахування зміни тензора у часі при обертанні ротора модель передбачає зміну у часі геометрії розрахункової області внаслідок переміщення ротора відносно статора. Інтервал часу, на якому здійснювався аналіз сигналу, відповідає одному періоду процесу – одному повному оберту ротора чотирьохполюсного асинхронного двигуна. При номінальному ковзанні  $s = 0,044$  в.о. розрахунковий інтервал за часом дорівнював  $T = 0 \dots 0,0418$  с. Кількість розрахункових кроків складала  $N = 360$ , тобто за один крок за часом  $\Delta t = T / N = 1,16 \cdot 10^{-4}$  с ротор повертався на кут  $1^\circ$ , що задовольняє умовам точності. Таким чином, повний розрахунок процесу на одному оберті ротора містить в собі  $N$  розрахунків поля при різних положеннях ротора.

**Експериментальний стенд.** На кафедрі електромеханіки НТУУ «КПІ» сумісно з фірмою «Береста» був розроблений експериментальний стенд, призначений для досліджень вібрацій електричних машин. На рис. 1 а зображено блок-схему стенда, а на рис. 1 б – його фотографію.



а



б

Рис. 1

Експериментальний стенд складається з апаратного і програмного комплексів. Апаратний комплекс включає:

1. Два датчики вібрації (ДВ) типу ДН-3-М1, які кріпляться на корпусі електричної машини в точках вимірювання. Датчики мають робочий діапазон частот  $5 \dots 4800$  Гц і перетворюють механічні коливання корпусу датчика в електричні сигнали, пропорційні його прискоренню. Принцип дії датчиків базується на п'єзоелектричному ефекті.

2. Двоканальний узгоджувально-вимірювальний блок (УВБ) призначений для перетворення аналогових сигналів датчиків вібрації у цифрові сигнали з параметрами, які забезпечують необхідну точність вимірювань. Він має дві плати, до кожної з яких підключається екранований кабель від датчика вібрації. Конструктивно плата кожного каналу має різні види входів, що передбачають підключення датчиків різного принципу дії: відкритий і закритий диференціальні входи для підключення датчиків напруги і осцилографа відповідно; струмовий вхід для підключення струмових датчиків зі струмами від  $1$  мкА до  $10$  мА; заря-

довий вхід для підключення датчиків вібрації; корпусний вхід і вхід для тестування режимів роботи самого блока. Аналоговий сигнал від вібродатчика по кабелю надходить на блок УВБ, де він узгоджується за амплітудою і частотним діапазоном і за допомогою аналогово-цифрового перетворювача перетворюється в цифрову форму для подальшої обробки.

3. Персональний комп'ютер (ПК), на який через мережевий кабель передаються сигнали з УВБ і на якому відбувається обробка сигналів за допомогою програм AUM і DeepSea.

Програмний комплекс включає:

1. Спеціальну програму AUM (адаптивний керуючий монітор), яка дає змогу проводити попередню обробку, візуалізацію та зберігання отриманих сигналів вібрації у вигляді проектних файлів. Програма AUM дозволяє візуалізувати отримані сигнали як у вигляді функцій часу (первинні сигнали), так і у вигляді їх спектрограм.

2. Спеціальну програму DeepSea, яка дає змогу виконати подальшу детальну обробку, аналіз та дослідження отриманих сигналів, що збережені в проектних файлах AUM. З цією метою в DeepSea запрограмований ряд спеціальних математичних методів обробки сигналів, які дозволяють обробити та представити сигнали у вигляді осцилограм, спектрограм, сонограм, гістограм, розрахувати взаємні функції (функцію когерентності, передаточну функцію тощо). Загальний вигляд інтерфейсу програми DeepSea показано на рис. 2.

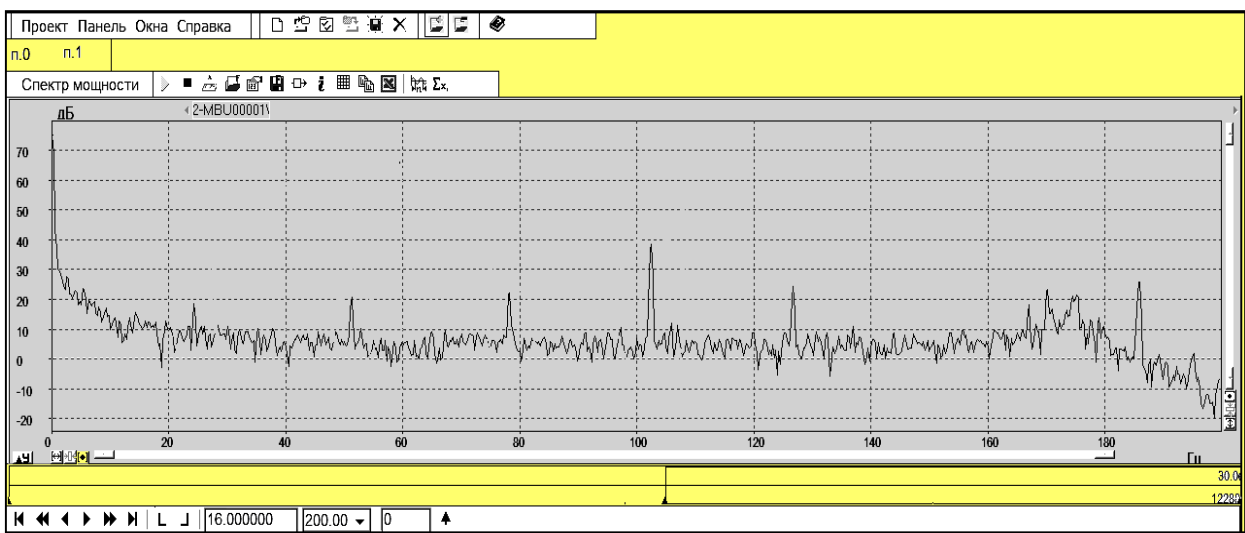


Рис. 2

Проводились вимірювання вібрації асинхронного двигуна, з'єданого одним валом з навантажувальною машиною постійного струму (МПС).

**Аналіз розрахункових і експериментальних даних.** Дослідження проводилися на серійному двигуні 4A100S4Y3, що мав такі дані: номінальна потужність – 3 кВт; кількість пар полюсів – 2; номінальна лінійна напруга живлення обмотки статора – 220 В; номінальний фазний струм – 11,6 А; кількість пазів статора – 36; кількість пазів ротора – 28; номінальне ковзання – 0,044 в.о.; повітряний проміжок – 0,3 мм; матеріал стержнів ротора – алюміній. Вимірювальні датчики встановлювалися на статорі на двох ортогональних осях – вертикальній та горизонтальній поперечних осях АД і вимірювалася радіальна вібрація.

Реальний сигнал датчика містить у собі усі складові вібрації, викликані чинниками різної фізичної природи, основними з яких є електромагнітні, механічні і аеродинамічні. Для зменшення впливу вібрацій механічного походження попередньо були проведені ретельні налагодження валу агрегату АД – МПС (контроль стану підшипників, ретельна перевірка співвісності валів АД і МПС тощо). Оскільки досліджувалися електромагнітні вібрації, то для адекватного порівняння експериментальних і розрахункових даних необхідно з реального сигналу датчика видалити механічну і аеродинамічну складові вібрацій. Для цього було використано методику, описану в роботі [6]. Спочатку виконувався допоміжний експеримент: АД відключався від електроживлення і приводився в рух за допомогою МПС, що пра-

цювала в режимі двигуна. Вібродатчик фіксував сигнал  $U_1(t)$ , який характеризує вібрації АД механічного і аеродинамічного походження. У другому експерименті АД живився від мережі і обертав МПС, що працює як навантажувальний генератор. Швидкість обертання ротора підтримувалася такою ж, як і в першому експерименті, за рахунок регулювання моменту МПС. У другому експерименті вібродатчик фіксував сигнал  $U_2(t)$ , який містить вібрації як механічного, аеродинамічного, так і електромагнітного походження. Подальшому аналізу підлягає різниця сигналів  $U_d(t) = U_2(t) - U_1(t)$ , яка характеризує електромагнітні вібрації.

Методика порівняння експериментальних і розрахункових даних полягає у наступному. Згідно з паспортними даними п'єзоелектричного датчика напруга (сигнал)  $U_d$  на його виході лінійно залежить від величини зовнішньої механічної сили, яка деформує закріплений в корпусі датчика елемент, виконаний з п'єзоелектричного матеріалу. При вимірюванні вібрацій датчик щільно закріплюється на статорі двигуна, і тому корпус датчика повторює вібрації АД в точці М, де він розміщений. При цьому деформація п'єзоелемента усередині датчика відбувається під дією сил інерції, викликаних миттєвими знакозмінними прискореннями корпусу датчика в результаті дії віброзбуджуючих сил. Таким чином, миттєве значення віброприскорення корпусу датчика  $a_E(t)$  визначається в експерименті як  $a_E(t) = U_d(t) / k$ , де  $k$  – коефіцієнт перетворення датчика. Згідно з паспортними даними п'єзоелектричного вібродатчика типу ДН–3–М1 номінальне значення його коефіцієнта перетворення на частоті 160 Гц складає  $k = 10 \pm 0,6$  мВ·с<sup>2</sup>/м. Таким чином, миттєвому значенню прискорення  $a = 1$  м/с<sup>2</sup> на виході датчика відповідає миттєве значення напруги  $U_d = 10$  мВ. Через відоме значення віброприскорення легко знайти віброшвидкість  $v_P(t) = \int a_P(t) dt$ . За результатами спектрального аналізу експериментальних сигналів розраховуються середньоквадратичні (діючі) значення (СКЗ) віброприскорення і віброшвидкості:  $a_{E\_СКЗ}$  і  $v_{E\_СКЗ}$ .

З іншого боку, віброприскорення  $a_P(t)$ , отримане за результатами розрахунків по математичній моделі, можна визначити згідно з основним рівнянням динаміки як

$$a_P(t) = T_{nM}(t) \cdot S / m_e, \quad (7)$$

де  $T_{nM}(t)$  – розрахована нормальна складова тензора магнітного натягу (поверхневої густини віброзбуджуючої сили) у точці М;  $S$  – площа поверхні розточки статора, на яку з боку повітряного проміжку діють електромагнітні віброзбуджуючі сили;  $m_e$  – еквівалентна приведена маса, що характеризує здатність статора протидіяти радіальним віброзбуджуючим силам. Еквівалентна приведена маса  $m_e$  є значно більшою за власну масу статора АД. Вона визначається інерційними і пружними властивостями конструкції статора АД, у тому числі способом його закріплення до фундаменту, і не залежить від режиму роботи двигуна. З огляду на складність конструкції АД безпосередній розрахунок величини  $m_e$  є досить важкою для розв'язання задачею. Масу  $m_e$  можна визначити на основі експериментально-розрахункової методики за допомогою формули [2]

$$m_e = \frac{1}{v_{E\_СКЗ} \sqrt{2\pi f_1}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{|T_{ni}|}{i} \right)^2}, \quad (8)$$

де  $T_{ni}$  – амплітуда  $i$ -ї гармоніки нормальної складової тензора магнітного натягу.

Проведено серію експериментів при різних струмах навантаження обмотки статора, в яких вимірювалися вібрації АД. У таблиці наведено:  $I_1$  – струм навантаження,  $s$  – експериментально визначене ковзання ротора,  $a_{E\_СКЗ}$  і  $v_{E\_СКЗ}$  – експериментально визначені СКЗ віброприскорення і віброшвидкості, а також розрахункове значення коефіцієнта

$\sqrt{\sum_{i=1}^N (|T_{ni}|/i)^2}$ ,

який отримано розрахунком при заданих експериментальних значеннях  $I_1$  і  $s$ , та знайдено за виразом (8) еквівалентну приведену масу  $m_e$ . Збільшене значення ковзання в номінальному режимі є наслідком зниженої напруги мережі живлення.

З таблиці видно, що при збільшенні струму навантаження обмотки статора вібрація АД зменшується. Це пояснюється зменшенням магнітного потоку (індукції) в зазорі двигуна внаслідок збільшення падіння напруги на електричних опорах обмотки статора при збільшенні струму. Наведені дані також показують, що при зміні струму статора на 53 % еквівалентна приведена маса  $m_e$  змінюється всього на 1,7 %, і тому у подальших розрахунках її величину можна використовувати як узагальнений параметр АД.

N з/п	$I_1$ , А	$s$ , в.о.	$a_{E\_CK3}$ , мм/с <sup>2</sup>	$v_{E\_CK3}$ , мм/с	$\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{ni}/i)^2}$ , Н/м <sup>2</sup>	$m_e$ , кг
1	8,5	0,04	79,5	0,659	5333	36450
2	9,8	0,053	74,9	0,623	4983	36200
3	11,2	0,067	69,3	0,574	4590	36020
4	13	0,08	68,1	0,563	4447	35850

Амплітуда сигналу  $U_1(t)$  власних механічних коливань при наближеній до номінальної швидкості обертання ротора АД дорівнює  $\sim 20$  мм/с<sup>2</sup>, що складає 15...20 % від амплітуди сигналу електромагнітних коливань. У режимі номінального навантаження АД середня амплітуда сигналу електромагнітних коливань першого датчика, що розміщений у горизонтальній площині (збоку) склала  $\sim 130$  мм/с<sup>2</sup>, а другого, розташованого у вертикальній площині (зверху), склала  $\sim 110$  мм/с<sup>2</sup>. На рис. 3 показано розподіл експериментального (рис. 3 а) і змодельованого (рис. 3 б) сигналів першого вібродатчика за час одного повороту ротора. Кожний сигнал, відображений у термінах віброприскорення, містить по чотири амплітуди коливань, що відображає основну частоту електромагнітних вібрацій 100 Гц.

Величини амплітуд розрахункового і експериментального сигналів є близькими, що в цілому підтверджує достовірність моделі. Причому спостерігалися невеликі коливання амплітуди експериментального сигналу, що обумовлено причинами випадкового (стохастичного) характеру. Розрахунковий сигнал на відміну від експериментального містить в собі суттєві зубцеві гармоніки, що пояснюється наступним чином. Віброзбуджуючі електромагнітні сили формуються на внутрішній поверхні статора, що межує з повітряним проміжком. При обертанні ротора в розрахункових точках на коронках зубців статора спостерігаються суттєві коливання магнітної індукції і відповідно тензора магнітного натягу, що обумовлено малою величиною повітряного проміжку (0,3 мм) у порівнянні з шириною пазів статора (3 мм) і ротора (1 мм). У той же час на практиці вібродатчики встановлюють на поверхні корпусу статора, а сигнали вібрацій розповсюджуються від поверхні розточки статора до датчиків через пружні коливання зубців і ярма статора. І якщо для низькочастотних коливань, у тому числі для частоти 100 Гц статор є "прозорим", то високочастотні зубцеві коливання (частота вище 1000 Гц) швидко затухають при своєму розповсюдженні.

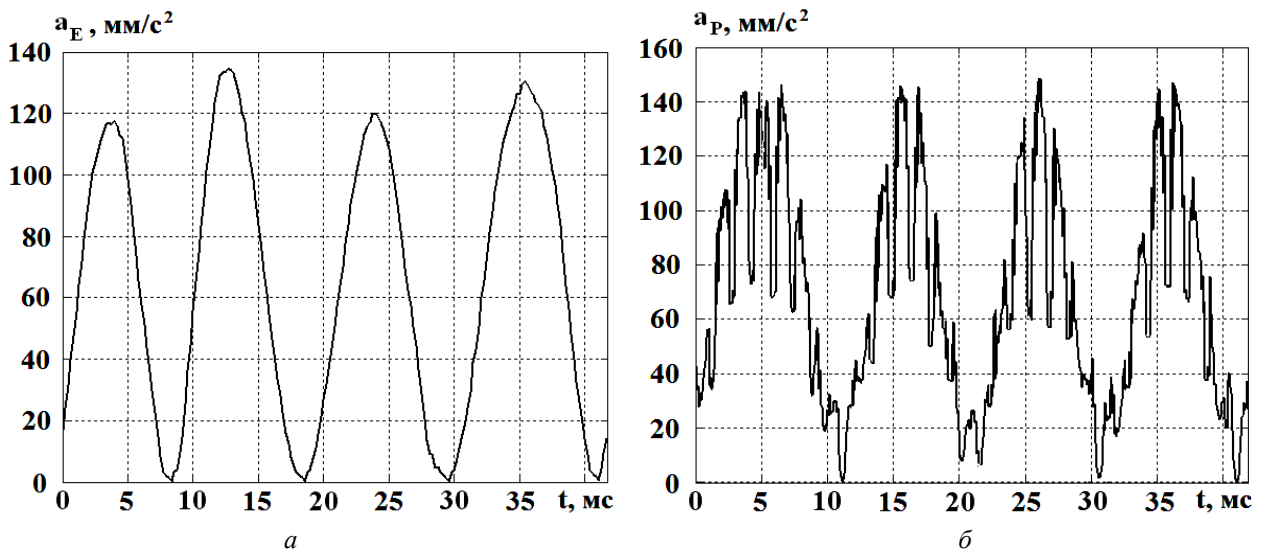


Рис. 3

Для дослідження сигналів доцільно використовувати спектральні методи. На рис. 4 представлено спектрограми експериментального (рис. 4 а) і розрахункового (рис. 4 б) сигналів, які були зображені на рис. 3.

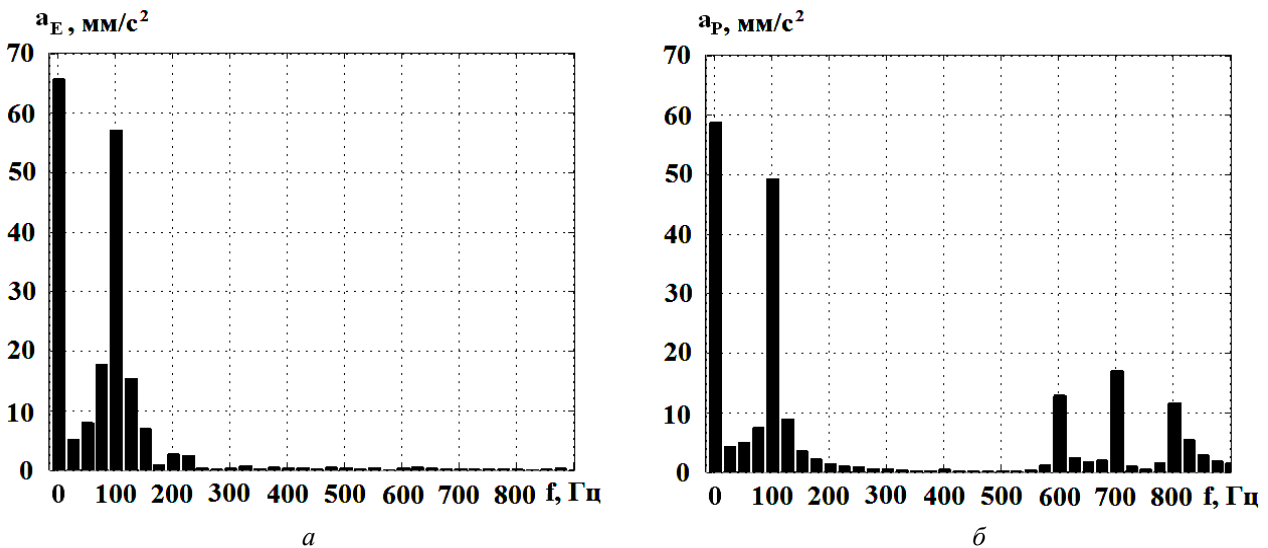


Рис. 4

Порівняння спектрограм дає змогу зробити такі висновки. В експериментальному сигналі як постійна складова, так і гармоніка частотою 100 Гц є більшими, ніж у розрахункового сигналу. Але це перевищення складає відповідно 11 і 15 %, що є допустимим. Спектр розрахункового сигналу містить також високочастотні зубцеві складові. Для характеристики сумарної вібрації використовують середньоквадратичне значення (СКЗ) всіх її гармонік. Для експериментального сигналу СКЗ дорівнює  $a_{E\_СКЗ} = 69 \text{ мм/с}^2$ , а для розрахункового сигналу  $a_{E\_СКЗ} = 61,6 \text{ мм/с}^2$ , тобто відмінність в СКЗ складає ~12 %.

Таким чином, експериментальні дані з достатньою для практики точністю підтверджують достовірність розробленої польової математичної моделі. Зокрема, модель дає змогу змодельовати електромагнітні поля і віброзбуджуючі сили в асинхронних двигунах, що мають ушкодження, наприклад, дефекти короткозамкненої обмотки ротора [2, 3]. Модель дає змогу відобразити широкий спектр дефектів та ушкоджень в машинах різної потужності та конструкції, оскільки електромагнітне поле в активній зоні машини аналізується зі строгим урахуванням особливостей її геометрії та швидкості обертання ротора. Тому зазначена мо-

дель актуальна для подальшого використання в системах вібраційної діагностики електричних машин, наприклад, потужних асинхронних двигунів.

**Висновки.** 1. Розроблено польову математичну модель електромагнітного поля і вібробуджуючих сил для аналізу сигналів датчиків радіальної вібрації короткозамкненого АД, яка в режимі реального часу строго враховує зміну конфігурації розрахункової області внаслідок переміщення ротора відносно статора.

2. Підтверджена адекватність розробленої математичної моделі шляхом порівняння результатів моделювання з результатами вимірювань вібрацій АД на вібродіагностичному експериментальному стенді.

3. Подальше використання розробленої математичної моделі доцільно при створенні багатофункціональних систем вібраційної діагностики ушкоджень електричних машин.

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 191 с.
2. Васьковський Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 12–17.
3. Васьковський Ю.Н., Гераскин А.А. Вибровозмущающие электромагнитные силы в короткозамкнутых асинхронных двигателях при наличии повреждения их конструкции // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 31–38.
4. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. – К.: Наук. думка, 1992. – 195 с.
5. Мислович М.В., Сисак Р.М., Улітко О.В. Імітаційне моделювання процесів акустичної емісії при вирішенні задачі діагностування електротехнічного обладнання // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 71–76.
6. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

УДК 621.314: 621.391

**Ю.Н. Васьковский<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **А.А. Гераскин<sup>2</sup>**, аспирант

1, 2 – Нац. техн. ун-т України «КПІ»,  
пр. Победы 37, Киев-56, 03056, Украина

**Математическое моделирование и экспериментальные исследования вибраций асинхронных двигателей**

*Разработана полевая математическая модель для анализа сигналов датчиков вибрации, которая учитывает перемещение ротора относительно статора и экспериментальный стенд для измерения вибрации, который состоит из аппаратного и программного комплексов и обеспечивает измерение, числовую обработку и визуализацию сигналов вибродатчиков. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, которое подтвердило адекватность разработанной математической модели. Библиограф. 6, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, вибрации, математическая модель, экспериментальные исследования.

**Yu.M. Vas'kovskiy<sup>1</sup>**, **A.A. Geraskin<sup>2</sup>**

1, 2 – National Technical University of Ukraine «Kyiv's Polytechnic Institute»,  
Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

**Mathematical design and experimental researches of vibrations of asynchronous motors**

*The field mathematical model is developed for the analysis of sensor signals of vibration which takes into account rotor moving. An experimental stand is developed for measuring of vibration, which consists of vehicle and programmatic complexes and provides measuring, numerical treatment and visualization of signals of vibro-pickups. Comparison of calculation and experimental information, which confirmed adequacy of the developed mathematical model, is conducted. References 6, figures 4, table.*

**Key words:** asynchronous motor, vibrations, mathematical model, experimental researches.

Надійшла 25.05.2011

Received 25.05.2011