

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ В МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НА РОБОТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДІВ ДІАГНОСТИКИ

Е.В. Деменчук¹, В.П. Шайда², Л.В. Шилкова², О.Ю. Юр'єва²

¹ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча». 87504, м. Маріуполь, вул. Левченка, 1.

E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

E-mail: viktor.shaida@khi.edu.ua

Розглядаються питання впливу гармонік струму мережі живлення на роботу асинхронних двигунів в умовах сучасного енергоємного підприємства. Запропоновано використовувати динамічне тестування для діагностування роботи електричних двигунів змінного струму при живленні від загальної мережі. Визначено вплив роботи частотно-регульованих електроприводів на загальну мережу живлення. Відбувається спотворення синусоїдної форми струму мережі. Отримано гармонічний склад та величини амплітуд вищих гармонік в розподілах фазних напруг та струмів досліджуваних асинхронних двигунів. Проаналізовано роботу електричних двигунів змінного струму при живленні від загальної мережі з вимкненими та ввімкненими частотно-регульованими електроприводами. Виявлено наслідки роботи електричних двигунів змінного струму при роботі з несинусоїдним розподілом фазних струмів у часі. Виявлено відхилення в параметрах загальної мережі, від якої працюють електродвигуни, які можуть призвести до виходу з ладу електричних машин. Доведено, що при живленні електричних двигунів змінного струму від мережі з частотно-регульованими електроприводами в спектрі крутного моменту з'являються пульсації на частотах, не притаманних нормальній роботі. Виявлено особливості здійснення балансування обертових частин агрегатів при роботі частотно-регульованих електроприводів в загальній електричній мережі. Запропоновано способи вирішення цієї проблеми. Бібліогр. 11, рис. 17.

Ключові слова: асинхронний двигун, динамічне тестування, живлення від загальної мережі, частотно-регульовані електроприводи, вищі гармоніки напруги і струму, несинусоїдність розподілу фазних струмів у часі, спектр крутного моменту, балансування обертових частин

Безсумнівно найбільшу частку електричних машин, які використовуються в промисловості, становлять асинхронні двигуни (АД). Тому важливим є забезпечення їх ефективної роботи та вчасне виявлення причин, які можуть призвести до їх виходу з ладу. Відомо, що в АД найбільше зношуються та пошкоджуються підшипникові опори, обмотки і осердя магнітопроводу [1, 2].

Дефекти складових частин електромагнітної системи АД (дефекти осердь статора та ротора, нерівномірності повітряного проміжку) проявляються безпосередньо в спектрах струму, напруги і, як наслідок, обертового моменту. Отже, дефекти електромагнітної системи призводять до асиметрії та спотворення синусоїдного розподілу струму.

Натепер є велика кількість публікацій, присвячених методам контролю технічного стану та діагностування АД [3, 4]. Але мало які з методів контролю можуть точно визначити та вказати на відхилення та дефекти, що виникають при роботі двигуна. Зокрема, найпрогресивніший метод для електричних машин – вібродіагностика – не може точно і впевнено визначити місце виникнення дефекту.

Але не тільки дефекти самого АД призводять до спотворення синусоїдного розподілу напруги

та струму. Нестабільність величини напруги в мережі живлення, наявність супутнього електрообладнання та вмикання до мережі живлення великої кількості частотно-регульованих приводів – все це також призводить до того, що напруга мережі та струм мають спотворену синусоїду і містять значну кількість вищих гармонік з досить великими амплітудами [5]. Тобто крім внутрішніх причин є і зовнішні. Відхилення величини напруги та пульсації її гармонік в мережі живлення загального призначення нормовано відповідним стандартом [6], при цьому напруги інтергармонік поки не лімітуються взагалі через недостатнє дослідження їхнього впливу (рівень інтергармонік збільшується через зростання кількості перетворювачів частоти).

Основою системи частотного керування є перетворювач частоти, який формує напругу потрібної частоти, тобто впливає на якість напруги та струму живлення. І якщо АД з частотним керуванням мають певний захист від цього, то звичайні АД живляться тим, що є.

Метою роботи є оцінка впливу вищих гармонік струму, які виникають в мережі живлення, від роботи іншого електрообладнання, на роботу звичайного АД, який не має спеціальної системи живлен-

В.П. Шайда – <https://orcid.org/0000-0002-4281-5545>, Л.В. Шилкова – <https://orcid.org/0000-0003-0009-3502>,

О.Ю. Юр'єва – <https://orcid.org/0000-0002-4156-8087>

© Е.В. Деменчук, В.П. Шайда, Л.В. Шилкова, О.Ю. Юр'єва, 2021

ня і керування, в умовах сучасного енергоємного підприємства. Завданням роботи є надання рекомендацій щодо експлуатації двигунів в різних режимах їхньої роботи – ввімкнених та вимкнених до мережі живлення частотно-регульованих приводів.

Вплив вищих гармонік струму на роботу електричного обладнання. Метод визначення несправностей за допомогою аналізу спектрів струмів і обертового моменту заснований на тому, що несправності в роботі електричної та механічної частин електричного двигуна і пов'язаного з ним пристрою призводять до змін магнітного потоку в повітряному проміжку електричної машини, а отже, до модуляції вхідного струму [7]. Вимірювання напруги та струмів дозволяє визначити несиметрію, несинусоїдність і гармоніки, які виникають при роботі з частотно-регульованими електроприводами (ЧРЕ), тобто факторів, які впливають на строк служби двигуна. Вимірювання можуть виконуватись при підключенні датчиків струму і напруги вимірювального комплексу безпосередньо в щиті живлення без зміни режиму роботи електричної машини, тобто в будь-якому динамічному режимі під навантаженням.

При несинусоїдності, несиметрії напруги і струму відбувається прискорене старіння ізоляції електричних машин, а також трансформаторів, конденсаторів і кабелів. При цьому в ізоляційних матеріалах при робочих температурах протікають хімічні реакції, що призводять до поступової зміни їх ізоляційних і механічних властивостей. Зі збільшенням температури ці процеси прискорюються, скорочуючи строки служби обладнання. Основними наслідками впливу вищих гармонік на обладнання є:

- зміна форми кривих (синусоїди) напруги та струму в мережі електропостачання;
- зниження ефективності процесів генерації, передачі, використання електроенергії;
- зміна теплових режимів, старіння ізоляції електрообладнання та скорочення внаслідок цього строку його служби;
- некоректна робота обладнання.

Крім цього, вищі гармоніки напруги та струму, що мають велику амплітуду, призводять до збільшення додаткових втрат в обмотках статора, а також в осердях статора та ротора. Додаткові втрати – одне з найбільш негативних явищ, що викликається гармоніками в обертових машинах. Вони призводять до підвищення загальної температури машини, до місцевих перегрівів в статорі і роторі [8]. Додаткові втрати в провідниках статора і ротора також можуть бути викликані збільшенням вихрових струмів (струмів Фуко). Втрати на вихрові струми обумовлені тим, що магнітні поля індукують ЕРС в сталевому осерді та провідни-

ках. Під дією цих ЕРС за наявності електричних кіл замикання по елементах електричних двигунів протікають струми. Саме ці струми викликають появу додаткових втрат. Вихрові струми створюють свої магнітні потоки, які при взаємодії з основним магнітним потоком призводять до додаткових механічних моментів на валу електричної машини. В результаті створюються пульсації крутного моменту на валу двигуна. В екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті обертової маси ротора, що призведе до накопичення втоми металу і згину або зламу вала електродвигуна.

Принципи проведення динамічного тестування електричних двигунів. Для оцінки наслідків несинусоїдності напруг і струмів через зовнішні причини (відхилення по нарузі та струму живлячої мережі в результаті роботи іншого електрообладнання) було проведено динамічне тестування звичайних АД для двох граничних випадків – при ввімкнених та вимкнених ЧРЕ до тієї самої мережі живлення.

Дослідження проводились для АД типу 4АМУ225М4 номінальною потужністю 55 кВт приводу вентилятора нагнітання повітря та АД типу FCMP3155-4 номінальною потужністю 110 кВт приводу насоса головної гідравлічної системи (рис. 1).

Тестування проводилось динамічним аналізатором Explorer4000 (MeggerBaker) [9]. Вимірювались фазні напруги та струми обмотки статора в реальному часі. Зафіксовані миттєві значення вимірюваних величин надаються у вигляді таблиць, залежностей, осцилограм через інтерфейс динамічного аналізатора. Відхилення розподілів напруг та струмів в часі від синусоїдної форми розраховуються програмним забезпеченням приладу на підставі технічних характеристик електричного двигуна. Залежності крутного моменту від частоти (спектри моментів) та часу отримуються через розв'язання математичної

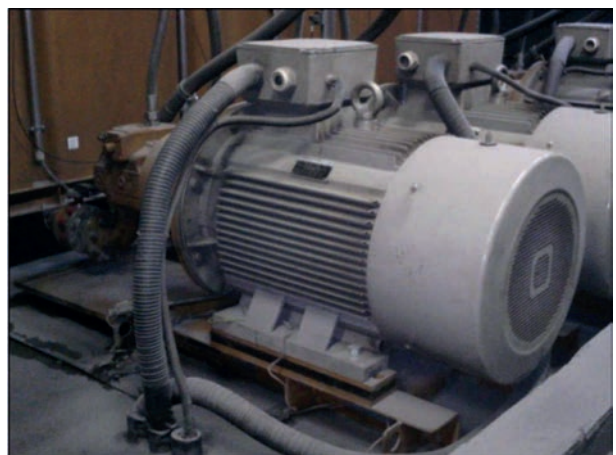


Рис. 1. Асинхронні двигуни насосів головної гідравлічної системи

моделі електричної машини з використанням програмного забезпечення динамічного аналізатора.

Поєднання з'єднувальної та пускової апаратури здійснювалось на щиті живлення для кожної системи керування (рис. 2).

Для визначення ступеня впливу роботи ЧРЕ на роботу вказаних АД було виконано низку тестів: при вмиканні ЧРЕ до однієї з досліджуваним двигуном мережі; при вимиканні ЧРЕ на час роботи двигуна; при приєднанні ЧРЕ та досліджуваного двигуна до різних мереж. Динамічне тестування проводилось в умовах реальної експлуатації, тобто режим роботи і навантаження АД визначались функціонуванням (циклом роботи) агрегатів.

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна 4АМУ225М4 при вимкнених ЧРЕ. При вимкнених ЧРЕ тестування АД показало, що при синусоїдній формі розподілу напруги розподіл струму дещо спотворюється (рис. 3). В розподілі струму спостерігаються вищі гармоніки, які додаються до першої основної. Вищі гармоніки струму обумовлюються явищами перетворення енергії в самому двигуні. Аналіз гармонічного складу фазних напруг і струмів (рис. 4) показує, що найбільшими є гармоніки 3-го, 5-го, 7-го та 11-го порядку.

Відносні амплітуди гармонік фазних напруг знаходяться в межах допустимого стандартом відхилення [6]. Так, для гармонік 3-го порядку середня (поміж трьох фазними) відносна амплітуда напруги становить 0,223 % (при нормованому максимальному значенні 3 %), 5-го – 0,173 % (при 5 %), 7-го – 0,387 % (при 4 %), 11-го – 0,176 % (при 3 %). Такі відхилення свідчать про однаковість та синусоїдність фазних напруг. Середні значення коефіцієнтів нелінійних спотворень на-

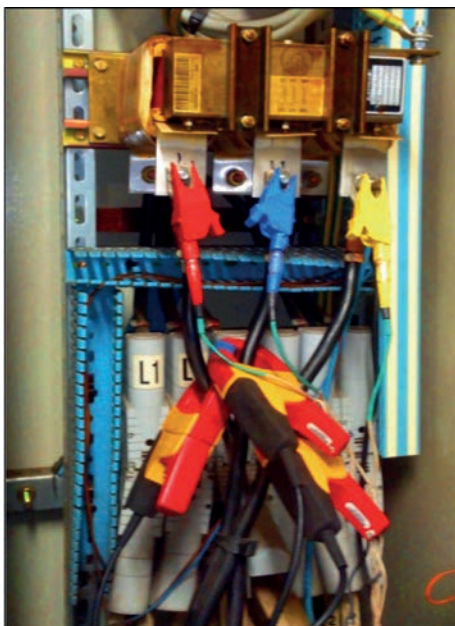


Рис. 2. Підключення датчиків напруги та струму в щиті живлення

пруги (THD V) становлять 0,5 %, струму (THD I) – 3,1 % (рис. 5). Отже, якість напруги за гармонічним складом є задовільною.

За відсутності впливів з боку мережі розподіл фазних струмів асинхронного двигуна визначається властивостями самого двигуна. Поява вищих гармонік в розподілі струму в часі свідчить про несинусоїдність розподілу МРС в повітряному проміжку асинхронного двигуна. Ця несинусоїдність обумовлена як будовою двигуна, так і дефектами, які виникли при експлуатації або ремонті, що призводить до електричної та магнітної несиметрії фазних обмоток статора. Наявність парних гармонік обумовлюється магнітною несиметрією асинхронного двигуна через різну кількість витків фазних обмоток статора або ексцентриситет ротора. Якщо фазні струми асинхронного двигуна однакові, то електрична та магнітна несиметрія від обмотки статора відсутня. Стосовно досліджуваного асинхронного двигуна можна зробити такі висновки: через те, що амплітуда парних гармонік не перевищує 0,25 % від амплітуди першої гармоніки, ексцентриситет ротора знаходиться в межах допустимого. Непарні гармоніки існують в розподілі фазних струмів через особливості конструктивного виконання обмоток статора машин змінного струму – обмотки розподілені по пазах. Амплітуда гармонік зменшується зі збільшенням номеру гармоніки і після одинадцятої стає зникаюче малою. Гармоніки струму третього і кратного трьом порядку знищуються повністю при з'єднанні фазних обмоток статора за схемою «зірка» і не передаються до мережі. Для досліджуваного двигуна середні значення гармонік 3-го порядку для фазних струмів становить 1,446, 5-го – 2,375, 7-го – 1,228, 11-го – 0,399 %. Наявність вищих гармонік в розподілах фазних напруг і струмів спричиняє пульсації крутного моменту, що в свою чергу призводить до підвищеної вібрації асинхронного двигуна та всього агрегату в цілому. За спектром крутного моменту асинхронного двигуна виявляються причини вібрації.

У спектрі крутного моменту спостерігаються піки, які мають електромагнітну або електродинамічну природу походження, тобто пов'язані з принципом дії електричної машини, завжди супроводжують її роботу і не завжди є ознакою дефектів [10]. На частоті 50 Гц, тобто частоті мережі живлення, пік моменту відповідає пульсації електромагнітного моменту двигуна. Піки моментів, які спостерігаються на частотах, кратних подвійній частоті мережі живлення, тобто 100, 200, 300 Гц і т. д., пов'язані з магнітострикцією – явищем, яке відбувається при обертанні магнітного поля електричної машини. При кожному оберті магнітного поля відбувається подвійне змінювання просторової орієнтації доменів (елементарних намагнічених

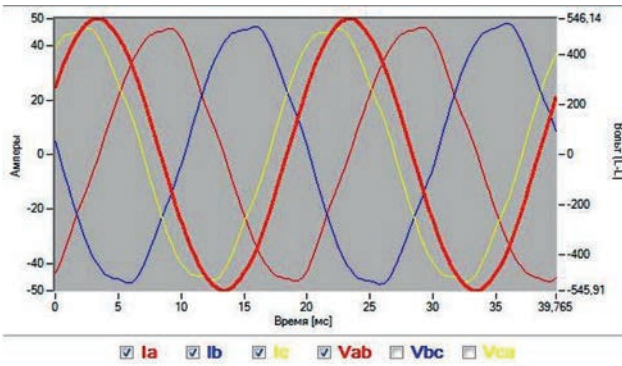


Рис. 3. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальної потужністю 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

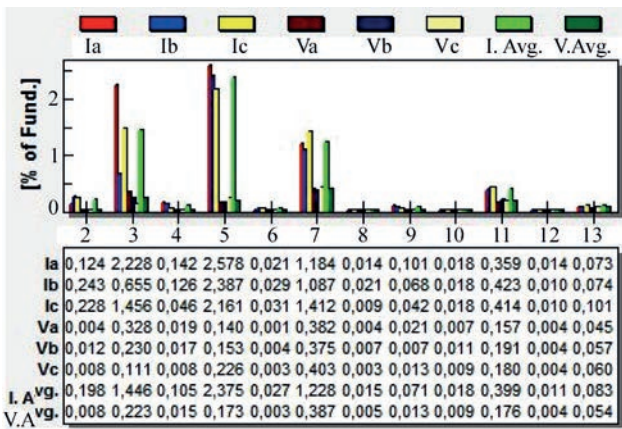


Рис. 4. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальної потужністю 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

	A	B	C	Average
THD v [%]	0,6	0,5	0,5	0,5
THD I [%]	3,6	2,8	3,0	3,1

Рис. 5. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальної потужністю 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

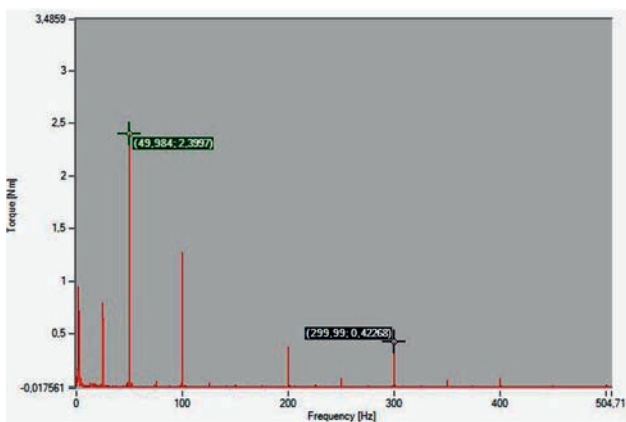


Рис. 6. Спектр моменту асинхронного двигуна номінальної потужністю 55 кВт при вимкнених ЧРЕ

ферромагнітних частинок матеріалів осердь), що й викликає вібрації осердь електричної машини.

Пік моменту на частоті до 10 Гц виникає в асинхронних двигунах через наявну різницю між частотами обертання магнітного поля статора та саме ротора. Ця частота отримала назву «частота ковзан-

ня». Пік моменту на частоті 25 Гц спостерігається в чотирьохполюсних електричних машинах.

Ознакою наявності дефекту в електричній машині є збільшення амплітуди піків в спектрі крутного моменту вище деякого рівня, який є межею нормального стану обладнання.

При роботі асинхронного двигуна 4АМУ225М4 при вимкнених ЧРЕ в спектрі моменту спостерігаються піки, які обумовлюються принципом дії двигуна (рис. 6). Значення піків моментів на частотах, які не дорівнюють частоті мережі, не перевищують піку електромагнітного моменту. Так, пік моменту на частоті 50 Гц становив 2,4 Н·м, на частоті 300 Гц – 0,4 Н·м.

На підставі аналізу спектра моменту можна виявити ознаки незбалансованості агрегату або дефекти електричного двигуна. Піки моменту на певній частоті свідчать про можливу наявність конкретного виду дефекту. Але впевнено про наявність дефекту можна говорити тільки при наявності серій тестів, виконаних за деякий проміжок часу при однакових режимах роботи обладнання та електромережі. Наявність вищих гармонік у розподілі фазних струмів, піків у спектрі моменту АД призводять до появи пульсацій крутного моменту. Саме ці пульсації викликають вібрацію електричної машини та підвищений нагрів. Величина пульсацій крутного моменту визначається як різниця максимального та усталеного моментів. Для відносного значення пульсацій використовується відсоткове відношення різниці моментів до усталеного моменту.

Для асинхронного двигуна 4АМУ225М4 при вимкнених ЧРЕ пульсації крутного моменту упродовж часу роботи сягають 164 % від робочого моменту (рис. 7).

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна 4АМУ225М4 при ввімкнених ЧРЕ. Для виявлення впливу працюючих ЧРЕ

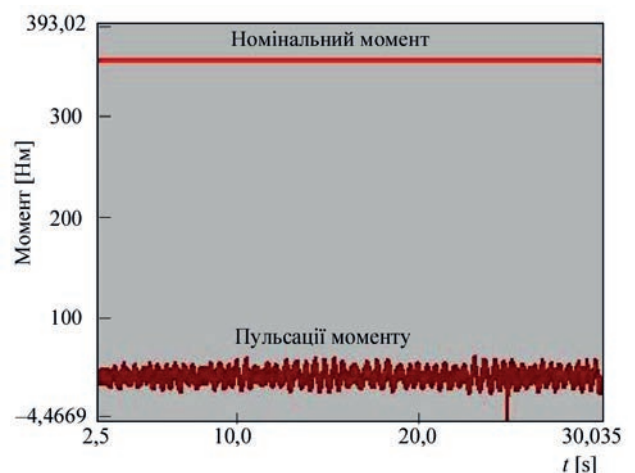


Рис. 7. Графік нерівномірності крутного моменту асинхронного двигуна номінальної потужністю 55 кВт при вимкнених ЧРЕ. Нерівномірність крутного моменту 164,24%, завантаження 11,4%, ефективність 0,11

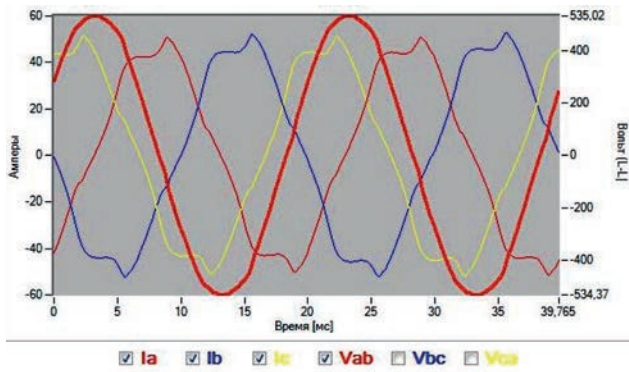


Рис. 8. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

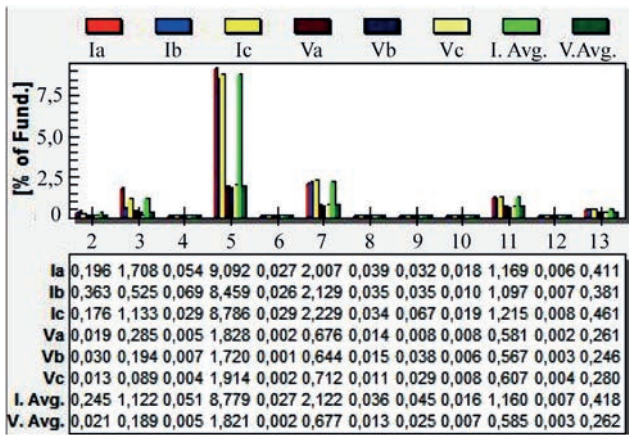


Рис. 9. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

	A	B	C	Average
THD v [%]	2,1	2,0	2,2	2,1
THD I [%]	9,6	8,8	9,2	9,2

Рис. 10. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

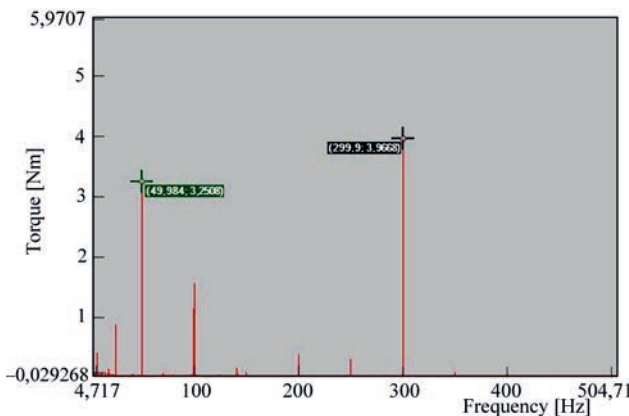


Рис. 11. Спектр моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ

на роботу електричних двигунів асинхронний двигун 4АМУ225М4 тестувався при всіх ввімкнених у спільну мережу ЧРЕ. Синусоїдна форма розподілу напруги зберігалася, що свідчило про правильність влаштування трифазної електричної

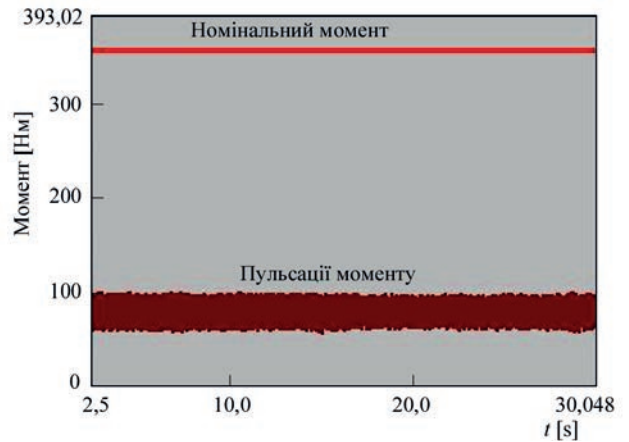


Рис. 12. Графік нерівномірності крутного моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 55 кВт при ввімкнених ЧРЕ. Нерівномірність крутного моменту 60,69%, завантаження 22,1%, ефективність 0,22

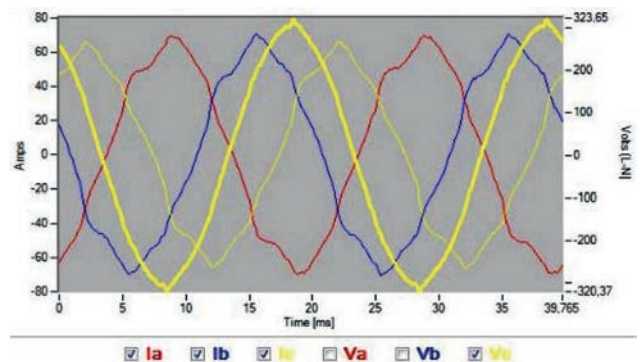


Рис. 13. Розподіли фазних напруг і струмів для асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

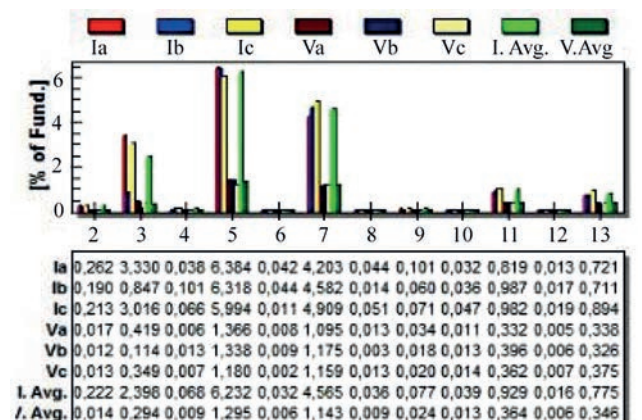


Рис. 14. Гармонічний склад розподілу напруг і струмів асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

мережі. Розподіл струму (рис. 8) спотворюється значно сильніше, ніж при ввімкнених ЧРЕ.

За гармонічним складом розподілу фазних струмів було виявлено збільшення номерів та амплітуд вищих гармонік (рис. 9). Так, 5-а гармоніка збільшилась у 3,7, 7-а – у 2,9, 11-а – у 2,9, 13-а – у 2,8 разів.

Середні значення коефіцієнтів нелінійних спотворень напруги (THD V) збільшуються в 4 рази, струму (THD I) – у 3 рази (рис. 10) у порівнянні з ввімкненими ЧРЕ.

Таке збільшення порядків та амплітуд вищих гармонік призвело до підвищення значень піків моментів в спектрі (рис. 11). Показовим було значення піку моменту на частоті 300 Гц, яке становило 4 Н·м, що перевищувало в 10 разів пік моменту на тій самій частоті при вимкнених ЧРЕ. Крім того, це значення перевищило пік моменту на частоті 50 Гц на 23 %.

Пульсації крутного моменту упродовж часу роботи становили 61 % від робочого моменту (рис. 12).

Особливості балансування обертових частин агрегатів з електричними двигунами, які живляться від мережі з ввімкненими та вимкненими ЧРЕ. Зменшення пульсацій крутного моменту при ввімкнених ЧРЕ порівняно з вимкненими пояснюється тим, що балансування робочого колеса насоса нагнітання повітря (установки, де працює досліджуваний двигун) здійснювалось при ЧРЕ, ввімкнених у загальну мережу в тому самому складі та в тих самих режимах роботи, при яких відбувалось динамічне тестування асинхронного двигуна.

Роботи по балансуванню робочого колеса такого агрегату досить складні, бо вимагають балансування окремо колеса і лише потім остаточне балансування всього агрегату. При проведенні робіт з балансування робочого колеса в складі агрегату з'ясувалося, що кут зсуву фаз гармонічних складових коливань постійно змінюється в часі, спостерігається нестаціонарний дисбаланс [10]. Виявлено прямий вплив режимів роботи сусідніх електричних машин з ЧРЕ (пуск або зупинка). Отже, при таких умовах роботи мережі досить складно виконувати балансування обладнання через істотні відхилення параметрів електромережі.

При ввімкненні ЧРЕ амплітуди вищих гармонік зростають в декілька разів. Так, значення піку моменту на частоті 300 Гц зросло в 10 разів в порівнянні з тестом при вимкнених ЧРЕ. В той самий час при вимкненні ЧРЕ пульсації крутного моменту протестованого асинхронного двигуна збільшуються в 2,7 рази (з 61 до 164 %). Такий рівень пульсацій, а, отже, й вібрації, неприпустимий та є руйнівним для агрегату. Але цей вплив залежить від балансування робочого колеса вентилятора, тобто не від параметрів системи живлення. При балансуванні усуваються або компенсуються наслідки спотворення розподілу фазних струмів у часі та пульсацій в спектрі моменту. Але при зміні режиму роботи ЧРЕ, їх вмиканні або вимиканні пульсації крутного моменту збільшуються і стають непередбачуваними.

Результати динамічного тестування асинхронного двигуна типу FCMP3155-4 при ввімкнених ЧРЕ. Динамічне тестування асинхронного двигуна відбувалось при вимкнених та ввімкнених ЧРЕ. При вимкнених ЧРЕ зафіксова-

но середнє значення коефіцієнту THD V 0,5 %, що свідчить про задовільний стан мережі електропостачання. При ввімкнених ЧРЕ спостерігалось погіршення якості напруги мережі, про що свідчить форма розподілу фазної напруги у часі (рис. 13).

Несинусоїдність фазної напруги та вплив ЧРЕ призвела до збільшення порядків та амплітуд вищих гармонік (рис. 14).

Спостерігалась поява 13-ї гармоніки та збільшення амплітуди 3-ї, 5-ї та 7-ї гармонік. Середнє значення гармоніки струму п'ятого порядку становила 6,232, сьомої – 4,565, одинадцятої – 0,929, тринадцятої – 0,775 %. Середнє значення коефіцієнту THD V становило 1,9 %, THD I – 8,3 % (рис. 15).

У спектрі моменту спостерігався пік моменту 6,24 Н·м при частоті 300 Гц, що є співмірним з піком моменту на основній частоті (рис. 16). Це підтвердило результати, отримані при тестуванні АД типу 4АМУ225М4. Там теж зростала величина піку на частоті 300 Гц. Пульсації крутного моменту для АД типу FCMP3155-4 становили 126,24 %.

Негативний вплив несинусоїдності фазних струмів дозволяє виявити тепловізійна зйомка. Кількісний аналіз термограм дозволяє оцінити ступінь відхилень за тепловим режимом електродвигунів. Термографія одних і тих самих асинхронних двигунів, які працювали з однаковим навантаженням в однаковому робочому середовищі і при однаковому охолодженні, дозволила підтвердити вплив несинусоїдності фазних струмів на тепловий стан двигунів (рис. 17).

Спостерігалось підвищення загальної температури асинхронного двигуна, збільшення площі поверхні нагрівання корпусу при роботі з відхиленнями якості електроенергії. Температури кон-

	A	B	C	Average
THD v [%]	1,9	1,9	1,8	1,9
THD I [%]	8,4	8,0	8,4	8,3

Рис. 15. Коефіцієнти нелінійних спотворень напруги та струму (за фазами та середній) асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт при ввімкнених ЧРЕ

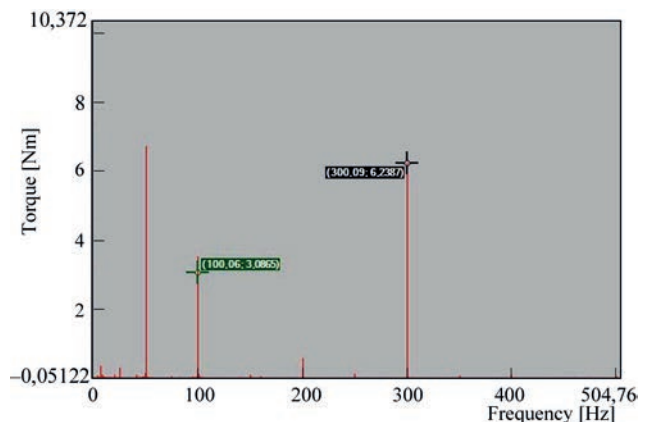


Рис. 16. Спектр крутного моменту асинхронного двигуна номінальною потужністю 110 кВт

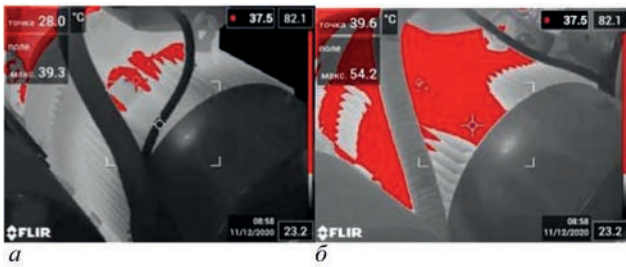


Рис. 17. Термограми корпусу асинхронного двигуна потужністю 110 кВт: *а* – з вимкненими ЧРЕ; *б* – з ввімкненими ЧРЕ
 трольних зон на корпусі двигуна змінилася від 39,3 °С при вимкнених ЧРЕ до 54,2 °С при ввімкнених ЧРЕ.

Висновки

В останні кілька десятків років відбуваються зміни характеру навантаження електромереж. Впровадження на підприємствах частотно-регульованих електроприводів, перетворювальних установок, електронних регуляторів частоти обертання двигунів призводить до різкого збільшення вищих гармонік струму в електромережі. Потужність гармонік, що віддаються навантаженням до електромережі, в найближчі роки буде тільки збільшуватися. Виникає необхідність контролю гармонік напруги та струмів і їхнього впливу на електричні машини.

Рівень гармонік повинен постійно перебувати в допустимих межах згідно з стандартами та вимогами експлуатації обладнання. Порушення допустимого рівня призводить до перебоїв у роботі та відмов обладнання: згоряння обмоток електродвигунів, непередбачуваної вібрації та виходу з ладу підшипників електричних машин, хибних спрацьовувань захисної апаратури.

Метод динамічного тестування найбільш ефективно дозволяє виявляти відхилення в якості споживаної електроенергії, дефекти електричних машин при працюючому обладнанні. З наведених результатів динамічного тестування видно, що перешкоди, які виникають в мережі живлення, мають високочастотні складові – гармоніки третього, п'ятого, сьомого, одинадцятого та навіть тринадцятого порядків. Додаючись до основної гармоніки, вищі гармоніки обумовлюють підвищення діючого значення напруги на електричних двигунах та спотворення синусоїдного розподілу напруги в часі.

Найуразливішими в АД є кола обмоток статора та ротора, де виникають додаткові електричні втрати. Несинусоїдний розподіл магнітного поля в асинхронному двигуні обумовлює виникнення додаткових магнітних втрат в осердях статора та ротора. При наявності цих негативних факторів збільшується вібрація в опорах електричних двигунів, пошкоджуючи підшипникові вузли.

Поліпшення якості електричної енергії дозволить збільшити строк служби електричних машин, підвищити їхню надійність і економічну ефективність через зниження втрат електроенергії. Зниження впливу вищих гармонік струму та напруги є однією з важливих задач підвищення якості електроенергії.

Для зниження рівня вищих гармонік в електричних мережах, особливо при наявності частотно-регульованих електроприводів, необхідно створювати раціональну схему електропостачання із застосуванням фільтрокомпенсуючих пристроїв, антигармонічних реакторів, лінійних дроселів, активних та пасивних фільтрів та конденсаторів гармонік, LC-фільтрів [11].

Слід зауважити, що головна особливість сучасних фільтрів – це їхня багатофункціональність, тобто позитивний вплив на кілька параметрів якості електроенергії систем електропостачання.

Список літератури

1. Губаревич О.В. (2016) *Надійність і діагностика електрообладнання: підручник*. Северодонецьк, Вид-во СХУ ім. В. Даля.
2. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. (2012) Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, **12b**, 221–224.
3. Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., Pineda-Sanchez, M. et al. (2017) The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the Fault Diagnosis in Induction Motors Under Time-Varying Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **32(1)**, 244–256.
4. Сьомка О.О., Прус В.В. (2015) Комп'ютеризований діагностичний комплекс для випробувань електричних машин на надійність. *Електротехніка і Електромеханіка*, **3**, 27–30.
5. Park, B., Lee, J., Yoo, H., Jang, G. (2021) Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study in a Steel Mill Power System. *Energies* **14**, 2278.
6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2007, IDT) (2014) *Характеристики напруги електроживлення, постачаної розподільчими мережами загальної призначеності*. Київ, Мінекономрозвитку України.
7. ДСТУ ISO 17359:2019 *Моніторинг стану та діагностика машин*. Загальні настанови.
8. Остащевський М.О., Юр'єва О.Ю. (2017) *Електричні машини і трансформатори: навч. Посібник*. Мілих В.І. (ред.). Харків, ФОП Панов А.М.
9. *Офіційний сайт Megger*. Режим доступу : <https://megger.com/dynamic-motor-analyzer-baker-exp4000>.
10. Русов В.А. (2012) *Діагностика дефектів вращающегося оборудования по вибрационным сигналам*. Пермь, РФ.
11. Волков И.В., Курильчук М.Н., Пентегов И.В., Рымар С.В. (2005). Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2. Енергетика*, **15**, 15–19.

References

1. Hubarevych, O.V. (2016) *Reliability and diagnostics of electrical equipment: Textbook*. Severodonetsk, Vyd-vo SNU [in Ukrainian].
2. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. (2012) Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, **12b**, 221–224.
3. Sapena-Bano, A., Burriel-Valencia, J., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., RieraGuasp, M. (2017) The harmonic

- order tracking analysis method for the fault diagnosis in induction motors under time-varying conditions. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 32(1), 244–256.
4. Somka, O.O., Prus, V.V. (2015) Computerized diagnostic system for testing electrical machines for reliability. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 3, 27–30 [in Ukrainian].
 5. Park, B., Lee, J., Yoo, H., Jang, G. (2021) Harmonic mitigation using passive harmonic filters: Case study in a steel mill power system. *Energies* 14, 2278.
 6. DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2007, IDT) *Characteristics of power supply voltage supplied by general purpose distribution networks*. Kyiv, Ministry of Economic Development of Ukraine [in Ukrainian].
 7. DSTU ISO 17359:2019: *Machine condition monitoring and diagnostics. General guidelines* [in Ukrainian].
 8. Ostashevskiy, M.O., Yurieva, O.Yu. (2017) *Electric machines and transformers: Textbook*. Ed. by V.I. Milykh. Kharkiv, IE Panov A.M. [in Ukrainian].
 9. *Megger official site*. <https://megger.com/dynamic-motor-analyzer-baker-exp4000>.
 10. Rusov, V.A. (2012) *Diagnosis of defects of the rotating equipment on vibration signals*. Perm, RF [in Russian].
 11. Volkov, I.V., Kurlchuk, M.N., Pentegov, I.V., Rymar, S. (2005). Improvement of power quality in the industrial enterprise networks by means of current filters of the supreme harmonics. *Visnyk Pryazov. DTU, Pt.2: Energetyka*, 15, 15–19 [in Russian].

DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTORS BY USING THE INFLUENCE OF HIGHER CURRENT HARMONICS

E.V. Demenchuk¹, V.P. Shaida², L.V. Shilkova², O.Yu. Yurieva²

¹PJSC «Ilyich Iron and Steel Works». 1 Levchenko str., 87504, Mariupol, Ukraine.

E-mail: eduard.demenchuk@metinvestholding.com

²National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: viktor.shaida@khp.edu.ua

The questions of the influence of current harmonics of a power supply network on the work of induction electric motors in the conditions of the modern energy-intensive enterprise are considered. It is proposed to use dynamic testing to diagnose the operation of AC motors powered by the general network. The influence of frequency-regulated electric drives on the general power supply network is determined. The sinusoidal shape of the network current is distorted. The harmonious composition and magnitudes of the amplitudes of higher harmonics in the distributions of phase voltages and currents of the studied induction motors are obtained. The operation of AC motors, when powered from the general network with connected and unconnected frequency-regulated electric drives, is analyzed. The consequences of the operation of AC motors when working with the non-sinusoidal distribution of phase currents in time are revealed. Deviations in the parameters of the general network, powering the electric motors, which can lead to failure of electric machines, are determined. It is proved that when AC motors are powered from a network with frequency-regulated electric drives, there appear pulsations in the torque spectrum at frequencies that are not inherent in normal operation. Peculiarities of balancing the rotating parts of the units during operation of frequency-regulated electric drives in the general electric network are revealed. Ways to solve this problem are suggested. 11 Ref., 17 Fig.

Keywords: induction motor, dynamic testing, general power supply network, frequency-regulated electric drives, higher harmonics of current and voltage, non-sinusoidal distribution of phase currents in time, torque spectrum, balancing of rotating parts

Надійшла до редакції 22.03.2021

ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАЯВНОСТІ ТРІЩИН В НАРІЗНИХ З'ЄДНАННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Призначення: вихорострумівий портативний пристрій індикаторного типу, для виявлення дефектів в металевих виробках.

Область застосування: енергетика, машинобудування, транспорт, видобувна промисловість.

Прилади комплектуються датчиками, що забезпечують контроль деталей різної конфігурації, в тому числі пристосуваннями для виявлення дефектів в металевих виробках. Залежно від виду об'єкта та умов контролю (наприклад, виявлення тріщин в деталях нарізних з'єднань або відшарування бабіту у підшипниках ковзання, теплових канавках роторів), пристрій оснащується датчиками відповідної конструкції та чутливості.

Основні технічні характеристики та переваги:

- Мінімальна глибина реєстрованого дефекту, мм... 0,5;
- Товщина ізолюючого покриття, мм, не більше 3;
- Виявлення дефектів у різі глибиною до 4 мм для феромагнітних та до 10 мм для неферомагнітних металів.
- Габаритні розміри, мм..... 63 x 83 x 30;
- Вага, кг 0,2;
- Живлення автономне напругою, В..... 1,5.



Інститут проблем машинобудування
НАН України ім. А.М. Підгорного