МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Кузнецов Віталій Вадимович

УДК: 621.31

ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В МЕРЕЖАХ З НЕЯКІСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2013

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі електротехніки та енергетичного менеджменту Запорізької Державної інженерної академії Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Качан Юрій Григорович, завідувач кафедри електротехніки та енергетичного менеджменту Запорізької Державної інженерної академії Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Чорний Олексій Петрович, директор Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України

кандидат технічних наук, доцент

Маренич Констянтин Миколайович, професор кафедри гірничої електротехніки і автоматики ім. Р.М. Лейбова Державного ВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться _____ о _____ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 в Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19.

Автореферат розіслано «_____»_____2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент **О.В. Остапчук**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку з існуючою проблемою енергозбереження на промислових підприємствах України велика увага приділяється впровадженню заходів, здатних забезпечити виконання основних технологічних процесів із значною економією енергоресурсів. При організації електропостачання та електроспоживання існує одна загальна і досить серйозна задача − поліпшення і оптимізація показників якості електроенергії (ПЯЕ) з метою підвищення ефективності її використання і забезпечення надійності роботи електроустаткування.

На багатьох підприємствах широко використовується нерегульований електропривод (ЕП), основним устаткуванням якого більш ніж в 90% випадків є асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором. Робота АД в мережах з неякісною електроенергією призводить до зниження працездатності і надійності такого класу устаткування.

Проте відомі результати досліджень не містять оцінки отримуваних при цьому втрат електричної енергії. Розглянутий в них вплив неякісної електроенергії на роботу двигуна не зачіпає головного − фінансового аспекту проблеми. Питання вартісного характеру до теперішнього часу практично не вивчені і, як наслідок, відсутні можливості щодо проведення порівняльної оцінки економічного збитку, пов'язаного з величиною параметрів, що характеризують якість електроенергії, і необхідних для забезпечення цієї якості витрат.

Вартість електроенергії є домінуючою складовою сумарних грошових надходжень, необхідних для експлуатації електроустаткування. Тому, навіть незначне збільшення втрат, пов'язаних з погіршенням ПЯЕ призводить до істотного збільшення річних витрат на експлуатацію електроприводів, що потребує здійснення заходів щодо попередження збитків, обумовлених низькою якістю електроенергії в мережі підприємства. При цьому, впровадження відповідних технічних засобів має бути економічно доцільним й враховувати специфіку виробництва і устаткування, що на ньому використовується. Але в даний час не існує відповідних інструментів, що забезпечують економічне обгрунтування доцільності заходів щодо боротьби з негативними наслідками при експлуатації електродвигунів в умовах неякісної електроенергії. Це пов'язано, перш за все, з неможливістю здійснення точного прогнозу збитку, заподіяного впливом останньої.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розробка нового універсального інструментарію, що дозволяє персоналу підприємства оперативно оцінювати економічні показники асинхронних двигунів, які працюють в мережах з неякісною електроенергією і вибирати прийнятні засоби щодо підвищення їх ефективності з урахуванням випадкових змін ПЯЕ та специфіки конкретного технічного і технологічного устаткування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором впродовж 2007-2012 р.р. Робота відповідає закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», в особливості п.6 ст.7 «Новітні технології і

ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі» і спрямованості тематики науково - дослідницьких робіт кафедр: електротехніки і енергетичного менеджменту Запорізької державної інженерної академії та електротехніки і електроприводу Національної металургійної академії України Міністерства освіти і науки України. Вказані матеріали роботи є частиною держбюджетної НДР «Дослідження організаційно - економічних і технічних аспектів енерговикористання і узгодження відповідних механізмів підвищення енергоефективності суспільного виробництва» (№ ДР 0109U000651) і госпдоговірної НДР «Дослідження впливу якості електричної енергії на техніко-економічні параметри асинхронного двигуна» (№ ДР 0110U002125), в яких автор був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методологічних основ вибору ефективних і економічно доцільних засобів підвищення енергоефективності АД, що працюють в конкретних цехових мережах з неякісною електроенергією.

Для досягнення мети в роботі поставлені і вирішені наступні завдання досліджень:

- удосконалення електромагнітної моделі АД, яка дозволяла б визначати його енергетичні показники при змінній у часі якості електроенергії;
- розробка моделі цехової електричної мережі, що дозволяє прогнозувати зміни ПЯЕ в останній;
- синтез алгоритму вибору і обгрунтування найбільш ефективного методу фільтрації напруги живлення в цехових мережах;
- розробка методу визначення теплового стану АД, що працює в мережі з неякісною електроенергією для оцінки складової збитку, пов'язаної зі скороченням терміну служби електромеханічного перетворювача;
- розробка техніко-економічної моделі асинхронного електродвигуна, що враховує всі складові збитку від експлуатації АД в мережі з неякісною електроенергією;
- розробка методу вибору економічно доцільних засобів покращення ПЯЕ в мережі де працює АД і визначення їх оптимальних параметрів;
- експериментальна перевірка адекватності розроблених моделей і ефективності запропонованих методів підвищення енергоефективності асинхронного двигуна, що працює в мережі з неякісною електроенергією.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та теплові процеси в асинхронному електродвигуні, який працює в мережі з неякісною електроенергією.

Предмет дослідження – методи і засоби оцінки та забезпечення енергетичних і економічних показників роботи АД при його експлуатації в мережі з неякісною електроенергією.

Методи дослідження. При вирішенні завдань дослідження використовувалися теорія імовірності, математична статистика, теорія диференційного числення, чисельного інтегрування – для складання математичних моделей АД і перевірки їх адекватності.

Основні наукові положення та результати, їх новизна.

Наукові положення.

- Середні значення та дисперсії реальної напруги в цеховій мережі з неякісною електроенергією та згенерованої запропонованою моделлю, незначимо відрізняються між собою лише у разі, якщо остання побудована на статистичних закономірностях не безпосередньо прогнозованої електричної величини, а амплітуд та початкових фаз присутніх у ній гармонік.

- Врахувати динаміку теплових процесів в асинхронному двигуні, що працює у мережі з неякісною електроенергією, при визначенні терміну придатності ізоляції його обмоток можливо, якщо перевищення її температурою допустимих значень у залежності, що використовується для цього, визначати як відношення суми добутків зазначеного перевищення та дискретних інтервалів, які розглядаються на проміжках часу, де воно спостерігається, до тривалості робочого циклу двигуна.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Синтезована нова стохастична модель цехової електричної мережі, яка дозволяє здійснювати прогноз як миттєвих значень напруги в ній, так і амплітуд і початкових фаз гармонійних складових у разі невідповідності електроенергії встановленим показникам її якості.

2. Вперше запропонований метод визначення параметрів засобів покращення показників якості електроенергії в цеховій мережі де працює АД, який враховує вплив на енергоефективність двигуна як наявність самого засобу так і закономірності коливання значень розглядуваних ПЯЕ.

3. Отримана можливість оцінити тривалість перевищення допустимої температури АД й зменшити похибку його одномасової теплової моделі за рахунок використання в якості значень її вхідних величин результатів прогнозу синтезованої електромагнітної моделі.

4. Вперше запропоновано для більш точного розрахунку збитку від скорочення терміну служби асинхронного двигуна, що працює в мережі з неякісною електроенергією, враховувати не тільки величину, але і тривалість перевищень допустимої температури в ньому.

5. Запропонований метод вибору засобів підвищення енергоефективності АД, що працює в мережі з неякісною електроенергією, який на відміну від відомих, передбачає оцінку їх економічної доцільності шляхом визначення розміру додаткового збитку від скорочення терміну служби двигуна в конкретному випадку.

Практична цінність одержаних результатів.

Представлені в дисертаційній роботі теоретичні розробки дозволили:

1. Розробити і рекомендувати до використання методику обгрунтованого вибору технічних засобів по зниженню негативного впливу неякісної електроенергії на ефективність роботи асинхронних електродвигунів.

2. Скласти і рекомендувати до використання алгоритм для комплексної оцінки збитку, обумовленого низькою якістю електроенергії в цехових мережах підприємств, що дозволяє спрогнозувати техніко-економічні показники експлуатації асинхронних двигунів.

Результати роботи пройшли експериментальну перевірку в умовах експериментального цеху ВАТ «Укрспецсервіс», цеху № 1 ВАТ

«Дніпроспецсталь» і прийняті для включення до складу математичного і програмного забезпечення системи моніторніга ЕП змінного струму у ВАТ «Укрспецсервіс», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Здобувач самостійно сформулював завдання дослідження, наукову новизну одержаних результатів, виконав теоретичну частину роботи, брав безпосередню участь в проведенні експериметальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародних науково - технічних конференціях: «Інтегровані технології та енергозбереження (ITE-2009)» (Алушта, 2009 р.); «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», (Севастополь, 2009 р.); XIX конференції «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» (АР Крим, Миколаївка, 2012 р.); а також XV науково – технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів и викладачів ЗДІА «Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості» (Запоріжжя, 2010 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць з них 11 наукових статей в спеціалізованих виданнях, які входять до переліку ДАК України, 4 матеріали науково – технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації складає 244 сторінки друкованого тексту і містить вступ, п’ять розділів, висновки і 8 додатків. Основна частина викладена на 156 сторінках. Список використаних джерел складається з 98 найменувань і складає 12 сторінок. Дисертація містить 59 рисунків і 23 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність роботи і показаний зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і основні завдання дослідження, приведено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, рівень апробації одержаних результатів, кількість публікацій за темою дисертації і особистий внесок автора.

У першому розділі здійснений аналіз існуючих проблем і особливостей процесу функціонування АД, що працюють в мережах з неякісною електроенергією. Показано, що при використанні відомих методик з вибору засобів підвищення ефективності електроустаткування, яке працює у вказаних умовах, необхідно з'ясувати причини погіршення нормованих ПЯЕ, визначити їх фактичні значення і зіставити останні з допустимими. Таким чином, складається парадоксальна ситуація, коли використання гостування ПЯЕ виглядає як повчальне попередження про те, що технічні параметри електроспоживачів зміняться в гіршу сторону, якщо показники якості не відповідатимуть потрібним значенням, без оцінки того, до яких наслідків призведе забезпечення цих вимог в ситуації, що реально склалася на підприємстві. Відмічається, що не дивлячись на актуальність питання, на сьогодні відсутні відомості про комплексну оцінку стану якості електроенергії в мережах промислових підприємств, а на перший план виходить проблема

створення техніко-економічної моделі АД, що працює в в мережах з неякісною електроенергією, яка дозволяє приймати обгрунтовані рішення при виборі засобів підвищення енергоефективності асинхронних двигунів.

На підставі проведених теоретичних і практичних досліджень, що стосуються питань кількісної оцінки ПЯЕ в цехових мережах промислових підприємств, отримані осцилограми напруг в умовах конкретних промислових підприємств, які підтверджують відомості про наявність в їх електромережах неякісної електроенергії.

Проведена кількісна оцінка ПЯЕ в цехових мережах підприємств таких як ВАТ «Укртатнафта», ВАТ «Завод монтажних виробів», ВАТ «Запорізький трансформаторний завод» дозволила зробити висновок, про те, що якість електричної енергії в таких мережах у багатьох випадках не відповідає вимогам ГОСТу. А найголовнішим є те, що якість електроенергії на вході підприємства і в його цехах істотно відрізняється. Таким чином, однакові споживачі, що знаходяться в цих цехах, працюють з різною енергоефективністю, обумовленою відхиленнями ПЯЕ від ГОСТ, і вимагають індивідуального підходу при вирішенні питання про підвищення останньої.

Проаналізовані в роботі способи підвищення якості електроенергії в умовах промислових підприємств свідчать про те, що можливими шляхами вирішення цієї проблеми є застосування: «індивідуальних» LC-фільтрів для захисту особливо відповідальних ЕП; «групових» пристроїв для компенсації впливу неякісної електроенергії на рівні цеху, таких як силові активні випрямлячі; усунення викривлень живлячої напруги в місцях їх виникнення, тобто захист самої мережі. Все це визначається специфікою даного устаткування і може включати, модернізацію силової частини і систем автоматичного регулювання електроприводу, коректний вибір параметрів останнього і т. ін. Допускається і відмова від прийняття будь-яких заходів, у разі їх економічної недоцільності у випадку не відповідності вартості їх впровадження і очікуваного економічного ефекту.

На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання дисертаційної роботи, в яких особлива увага сконцентрована на розробці техніко-економічної моделі АД, що працює в умовах неякісної електроенергії, яка дозволяє приймати обгрунтовані рішення при виборі засобів підвищення енергоефективності електродвигуна.

У другому розділі проведено аналіз відомих до теперішнього часу математичних моделей АД і сфери їх застосування, виявлені їх переваги та недоліки. Зроблено припущення, що єдиної моделі, яка враховує всі ПЯЕ одночасно, та дозволяє оцінити енергетичну ефективність АД, не існує і найбільш гнучким та універсальним варіантом створення такого математичного аналога є безпосереднє інтегрування диференціальних рівнянь, що описують електродвигун.

При цьому для реалізації такої електромагнітної моделі доцільно використовувати систему диференціальних рівнянь у часовій області, або за допомогою просторово-часових комплексів (ПЧК), чи узагальнених векторів

величин, що періодично змінюються, представлених відносно їх миттєвих значень.

Записані відносно ПЧК рівняння Парка - Горєва, які є основою відомих моделей АД, мають вигляд:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_1}{dt}; \quad (1)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_2}{dt} - j\omega_r \underline{\Psi}_2, \quad (2)$$

де $\underline{U}_1$ - ПЧК напруги статора; $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ - ПЧК струмів статора, ротора, і струму намагнічення; $\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_2$ - ПЧК потокозчеплень статора і ротора; ω_r - кутова швидкість обертання АД; R_1, R_2 - активні опори статора і ротора.

Необхідно враховувати, що на динамічні і енергетичні показники асинхронних двигунів істотний вплив робить насичення магнітопровода. Існують різні методи врахування цього впливу. Якнайкраще поєднання точності і простоти розрахунків дає використання залежності головної взаємної індуктивності від величини струму намагнічення $L_{12}=f(I_0)$.Таким чином, в рівняннях для визначення потокозчеплень необхідно записувати:

$$\underline{\Psi}_1 = \underline{I}_1 \cdot L_1 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_2, \quad (3)$$

$$\underline{\Psi}_2 = \underline{I}_2 \cdot L_2 + L_{12}(I_0) \cdot \underline{I}_1, \quad (4)$$

де L_1, L_2, - індуктивності статора і ротора; L_{12} – їх взаємна індуктивність. Таким чином всі параметри в електромеханічній системі - напруга в колі намагнічення, струми статора і ротора розраховуються з урахуванням насичення в сталі.

Оскільки в даному випадку аналізуються ПЧК всіх сигналів у часовій області, що дозволяє враховувати миттєві значення струмів і напруг, відпадає необхідність спектрального аналізу і складання рівнянь для кожної гармоніки. Крім того, такі рівняння фактично є згорнутим записом всіх трьох фаз, а це дає можливість враховувати в них і несиметрію напруги живлення. Дана система є, фактично, універсальною моделлю, що дозволяє аналізувати процеси як в сталих, так і в перехідних режимах (пуск, вибіг, зміна навантаження).

Оскільки аналітичний розв’язок системи рівнянь (1), (2) ускладнений і пов'язаний з рядом істотних припущень використано метод Ейлера, найпростіший з відомих чисельних методів, суть якого зводиться до представлення нескінченно малих приростів шуканої функції f(t) їх деякими кінцевими значеннями і записом рівнянь у формі Коші. В результаті зазначена функція має вигляд:

$$y_k = y_{k-1} + \frac{df(t)}{dt} h, \quad (5)$$

де h – крок інтегрування; y_k та y_{k-1} – значення величини, що інтегрується, відповідно на k-ому та (k-1)-ому кроках.

Використовуючи залежність (5) за початковими значеннями функції, покроково визначають масив перехідного процесу. При цьому електромагнітний момент АД щодо ПЧК виражається залежністю:

$$M = \frac{3}{2} p_\tau L_{12} \operatorname{Im}(\underline{I}_1^* \underline{I}_2), \qquad (6)$$

а, шукана система доповнена ще одним основним рівнянням динаміки:

$$M - M_c = J \frac{d\omega_r}{dt}, \qquad (7)$$

де M_c – статичний момент; J – момент інерції механічної частини приводу; p_τ – число пар полюсів електродвигуна.

Програмна реалізація запропонованої моделі АД апробована шляхом опису процесу пуску, накиду навантаження і сталого режиму двигуна типу МТКН 112-6 потужністю 5,3 кВт. В якості живлення спочатку використана ідеальна трифазна напруга, а потім - несиметрична несинусоїдна, що відповідає реально зафіксованій, годограф ПЧК якої представлений на рис. 1(а), а на рис. 1(б) наведені отримані графіки перехідних процесів при викривленій напрузі. Як видно наявність гармонійних складових напруги живленні АД призводить до виникнення пульсацій моменту на частоті другої гармоніки мережі (100 Гц).

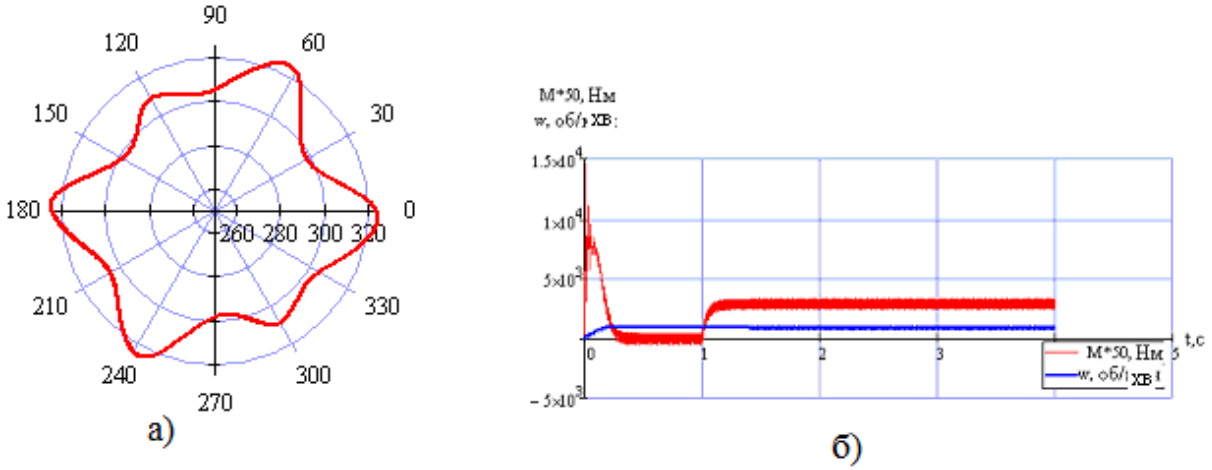

Рис.1. Годограф ПЧК (а) та момент і швидкість АД при пуску і накиді номінального навантаження (б) при несиметричній і несинусоїдній напрузі живлення.

За результатами експерименту, проведеного в умовах цеху ВАТ «Укрспецсервіс» було підтверджено адекватність розробленої моделі АД.

У розділі 3 здійснена розробка моделі напруг в цехових мережах промислових підприємств, обгрунтовано підходи щодо її створення.

Виходячи з особливостей функціонування АД в електричній мережі з неякісною електроенергією його модель має бути доповнена підсистемою імітації випадкових змін показників якості електроенергії. Остання може бути реалізована блоками формування лінійних напруг в електромережах цеху і розрахунку вказаних показників. Складність безпосередньої імітації лінійних напруг в мережі з неякісною електроенергією полягає в тому, що всі гармонійні складові мають фіксовані частоти їх коливань, на які лише накладаються випадкові зміни амплітуд і початкових фаз.

При цьому подальший аналіз енергетичних показників АД за його математичною моделлю вже припускає попереднє розкладання вказаних напруг на ці складові. Звідси витікає, що генерувати доцільніше не випадкові

послідовності напруг, а амплітуди і початкові фази присутніх в них гармонік, статистичні закономірності зміни яких мають бути отримані заздалегідь.

Запропонований варіант структури генератора випадкових змін лінійних напруг, що враховує вказане вище, представлений на рис. 2.

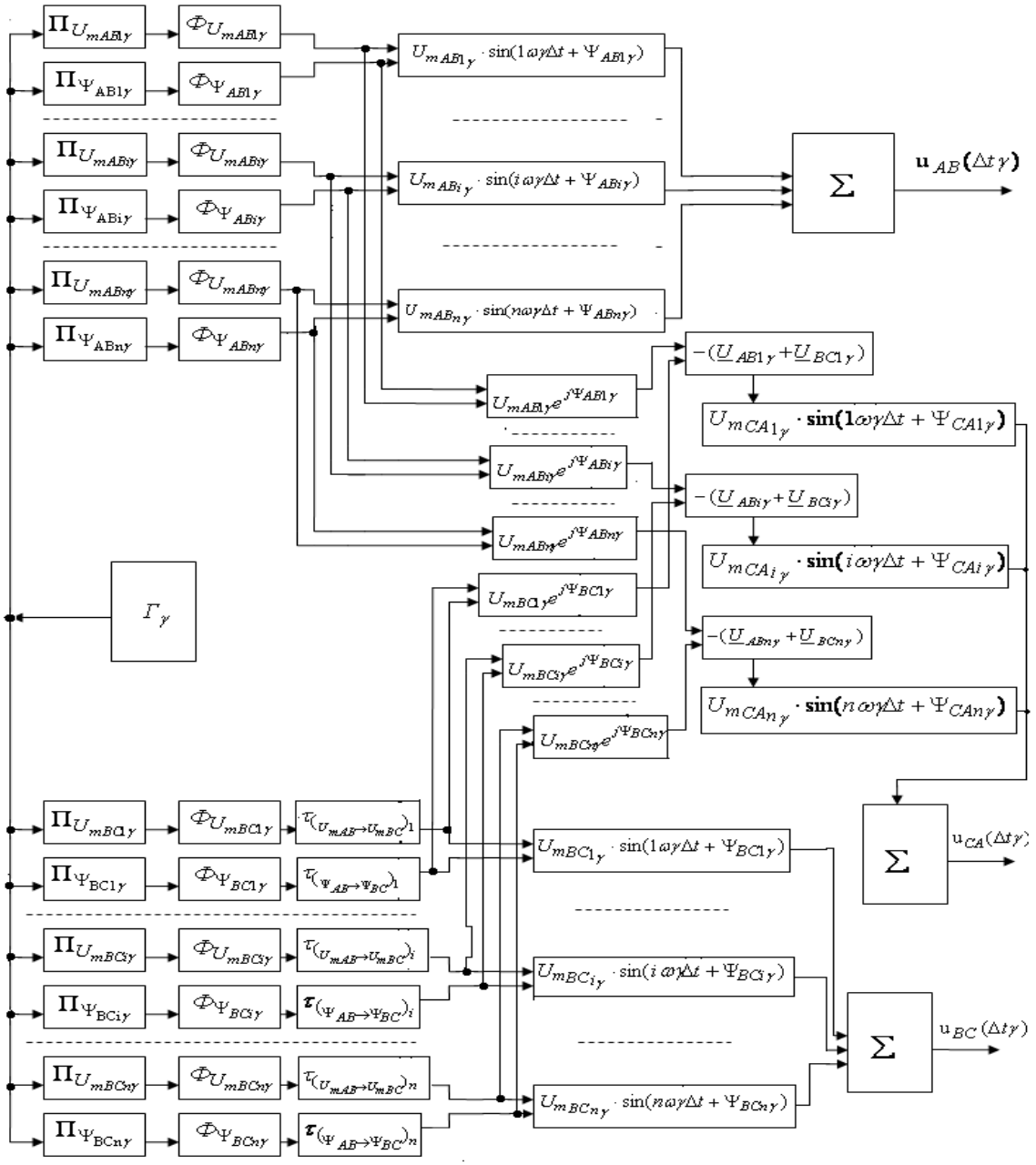

Рис. 2. Структурна схема генератора лінійних напруг.

На рис. 2 зображено: Γ_γ – генератор значень т.з. псевдовипадкової послідовності (ПВП), що відповідають моментам часу $\Delta t\gamma$; $\Pi_{U_{mABi\gamma}}$, $\Pi_{U_{mBCi\gamma}}$ і $\Pi_{\Psi_{ABi\gamma}}$, $\Pi_{\Psi_{BCi\gamma}}$ – перетворювачі законів розподілів амплітуд і початкових фаз $i=\overline{1,n}$ – гармонік лінійних напруг U_{mAB} и $U_{mBC,}$ відповідно; $\Phi_{U_{mABi\gamma}}$, $\Phi_{U_{mBCi\gamma}}$ і $\Phi_{\Psi_{ABi\gamma}}$, $\Phi_{\Psi_{BCi\gamma}}$ –фільтри, що формують корельовані амплітуди і гармоніки лінійних напруг U_{AB} и $U_{BC,}$ відповідно; $\tau_{(U_{mAB}\to U_{mBC})i}$ та $\tau_{(\Psi_{AB}\to\Psi_{BC})i}$ – зсув амплітуди і початкової фази i - гармоніки лінійної напруги U_{BC} відносно i – гармоніки лінійної напруги U_{AB} по осі τ. По відтворених таким чином

випадкових змінах амплітуд (U_{mABi},U_{mBCi},U_{mCAi}) і початкових фаз (ψ_{ABi},ψ_{BCi},ψ_{CAi}) гармонійних складових лінійних напруг визначаються їх миттєві значення. Потім останні алгебраїчно додаються в суматорах, формуючи випадкові послідовності $u_{AB}(\Delta t\gamma)$, $u_{BC}(\Delta t\gamma)$ та $u_{CA}(\Delta t\gamma)$.

Генерування ПВП виконано за традиційною схемою: 1) перетворення рівномірнорозподіленої випадкової величини в інтервалі [0;1] до некорельованої послідовності із заданим законом розподілу за методом зворотних функцій, 2) перетворення некорельованої послідовності до послідовності з заданою авто- і взаємокореляційною функціями за методом нерекурсивної фільтрації.

Випадкова зміна лінійної напруги $\underline{U}_{BC}$ формується за її взаємокореляційною функцією з напругою $\underline{U}_{AB}$. Найпростіший варіант рішення цієї задачі полягає в генеруванні ПВП із заданим видом кореляційної функції і її затримці на відповідний часовий інтервал. Саме цим і пояснюється наявність в структурній схемі блоків $\tau_{(U_{mAB}\to U_{mBC})i}$ та $\tau_{(\Psi_{AB}\to\Psi_{BC})i}$. Визначення миттєвого значення лінійної напруги $u_{CA}(t)$ здійснюється за відомим співвідношенням:

$$\underline{U}_{CA} = -(\underline{U}_{AB}+\underline{U}_{BC}) \qquad (8)$$

Очевидно, що використання залежності (8) приведе до утворення систематичної помилки за рахунок того, що значення лінійної напруги $\underline{U}_{CA}$ не відповідатимуть характерному для неї закону розподілу. Остання усунена шляхом здійснення випадкового вибору послідовності (рандомізації) генерування лінійних напруг.

Запропонована модель була налаштована на електричну мережу прокатного цеху № 1 ВАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя), для чого заздалегідь отримані реалізації випадкових послідовностей лінійних напруг в ній тривалістю 22…24 години. Останні було перевірено на стаціонарність середнього за критерієм інверсій. В результаті уточнені стаціонарні ділянки отриманих у ході промислового експерименту послідовностей, амплітуди і фази гармонійних складових лінійних напруг на яких вважалися незмінними.

Виходячи із особливостей роботи пристроїв електроустаткування була висунута гіпотеза про нормальний закон розподілу параметрів гармонійних складових лінійних напруг. Дана гіпотеза була підтверджена за критерієм Шапіро-Уілка.

Враховувалося і те, що зміни амплітуд і фаз гармонійних складових лінійних напруг відбуваються через випадкові тимчасові інтервали. Аналіз числових характеристик останніх і подальша перевірка декількох гіпотез щодо законів їх розподілу (нормального, експоненціального, рівномірного) за критерієм Пірсона показали, що найбільш прийнятним у даному випадку є експоненціальний закон з середнім значенням $\Delta T_{\text{сер}} = 18$ хв і інтенсивністю $\lambda = 1/\Delta T_{сер} = 1/18$ хв$^{-1}$:

$$f(\Delta T) = \frac{1}{18} e^{-\frac{1}{18}\cdot\Delta T}. \qquad (9)$$

Для виявлення тісноти зв'язку між амплітудами (фазами) гармонік лінійних напруг однакових частот були розраховані автокореляційні і взаємокореляційні функції, в якості аргументів яких було прийнято номер стаціонарної ділянки. Це дозволило оцінити статистичну залежність амплітуд (фаз) гармонійних складових при вмиканні/вимиканні електроустаткування в цеху, що відбуваються у випадкові моменти часу.

Для апроксимації автокореляційної і взаємокореляційної функцій гармонійних складових вибрані типові криві, які описуються аналітичними виразами відповідного виду:

$$R(i)=\sigma^2 e^{-j\cdot i}\cos(\theta\cdot i) \qquad (10)$$

$$R(i)=\sigma^2 e^{-j\cdot i}\cos(\theta\cdot i-m) \qquad (11)$$

де j та θ - коефіцієнти кривої, σ - середньоквадратичне відхилення випадкової функції; m – величина зсуву гармоніки по осі абцис відповідно.

Перевірка розробленої цифрової моделі лінійних напруг в цеховій електромережі вказаного підприємства показала, що статистичні характеристики гармонік, що генеруються, несуттєво відрізняються від гіпотетичних. Отже, настроєна таким чином модель може вважатися адекватною.

Використання розроблених генераторів лінійних напруг в цеховій електричній мережі з неякісною електроенергією дозволяє на основі обчислювальних досліджень оцінювати енергоефективність АД, які в ній працюють.

Четвертий розділ дисертації присвячений розробці методу визначення типу і параметрів засобів захисту асинхронних двигунів, що працюють в мережах з неякісною електроенергією.

В процесі досліджень ефективності використання різних засобів забезпечення якості електроенергії, яку споживає АД, встановлено, що найбільш доцільним є застосування схем, показаних на рис. 3. Реалізований таким чином фільтр, є комбінацією загороджувального, включеного послідовно з навантаженням для забезпечення резонансу струмів на частоті однієї з вищих гармонік, і додаткового елементу (ємності або індуктивності) для забезпечення контуру короткого замикання для іншої гармоніки. Вибір тієї або іншої структури фільтру, що відрізняються типом зазначеного елементу пов'язаний з необхідністю забезпечення різних резонансних частот для тієї його частини, що загороджує - f_1 і для кола «фаза - нульова точка» - f_2.

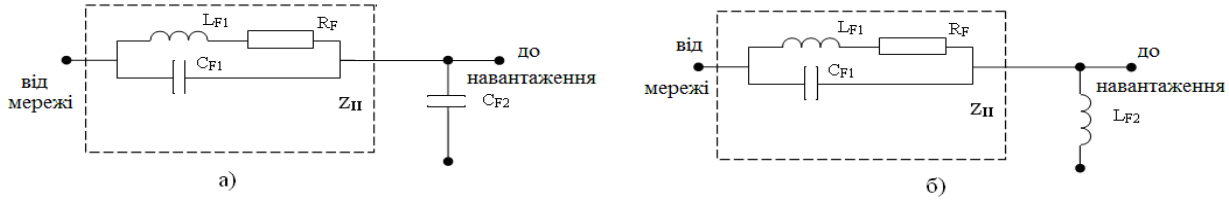

Рис. 3. Варіанти реалізації комбінованого Г-подібного LC-фільтра другого порядку з додатковими ємнісним (а) і індуктивним (б) елементами.

На рис. 4 наведена тривимірна залежність ККД від резонансних частот f_1 і f_2, (а), і її проекція в площині частот (б). Аналіз представленої поверхні показує, що результуючий ККД електродвигуна збільшується в тому випадку, коли

частота резонансу струмів вища, ніж частота резонансу напруги $f_1>f_2$. Це пов'язано з тим, що при настроюванні загороджуючого фільтру на якусь частоту f_1, для всіх гармонік з частотами нижче неї ця частина фільтру є індуктивним опором. Таким чином, відбувається додаткове зниження рівня втрат, обумовлених впливом вищих гармонік напруги живлення.

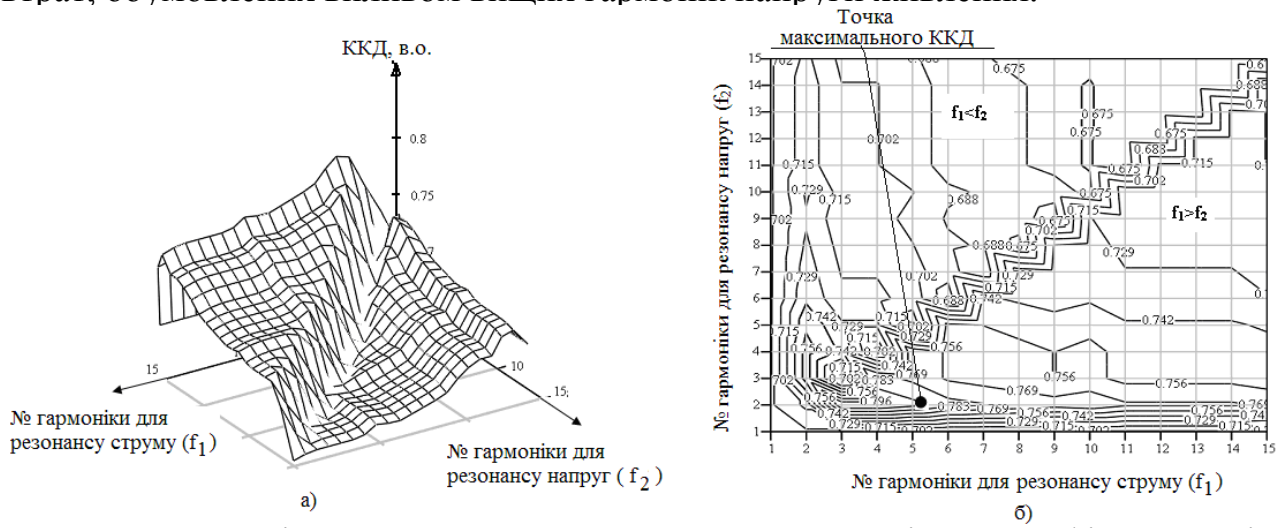

Рис. 4. Залежність ККД асинхронного двигуна з комбінованим фільтром від резонансних гармонік (а) і її проекція (б).

Проведені обчислювальні експерименти з налагодження фільтру показали**,** що для підвищення ККД АД, що працюють в мережі з неякісною електроенергією експериментального цеху ВАТ «Укрспецсервіс», найбільш доцільно застосовувати комбінований фільтр, що представляє собою послідовно з'єднаний загороджуючий фільтр в кожній фазі і ємностей, що з'єднані у зірку. Найбільший ККД електродвигуна з таким фільтром досягається, якщо загороджувальний фільтр налаштований на резонансну частоту 100 Гц, а резонанс напруги забезпечується на частоті 500 Гц. Застосовувати пасивні комбіновані фільтри доцільно тільки для електродвигунів малої і середньої потужності (до 45 кВт). Розроблений в даному розділі метод дозволяє налаштувати параметри засобів захисту АД на конкретні умови його експлуатації.

У розділі 5 розроблено метод визначення економічного збитку від роботи АД в умовах неякісної електроенергії і виконано його оцінку.

Оскільки в роботі були розглянуті такі агрегати і технологічні лінії, параметри якості напруги живлення яких не робить істотного впливу на їх продуктивність і якість продукції що виробляється, а вони, як відомо, є основними споживачами електроенергії, тому визначення технологічної складової збитку не розкрито.

Оцінка ж електромагнітної (енергетичної) складової є достовірною і прогнозованою, оскільки ця компонента пов'язана з розрахунком вартості електроенергії, що додатково споживається електродвигуном в умовах, коли напруга в мережі не відповідає ПЯЕ. Але і в цьому випадку існує багато суперечностей щодо визначення економічного збитку, тому в роботі розглянуто найбільш поширену з них.

Додаткова потужність, що споживається АД внаслідок несиметрії напруги живлення, розраховується наступним чином:

$$\Delta P_{нсм} = 2{,}41 \cdot k_n^2 \cdot \Delta P_{ном} \cdot K_{2U}^2 \ , \qquad (12)$$

де k_n - кратність пускового струму, $\Delta P_{ном}$ - втрати в електродвигуні при ідеальній напрузі живлення, K_{2U} - коефіцієнт зворотної послідовності. Витрати, пов'язані з протіканням несинусоїдних струмів традиційно розраховуються також через збільшення теплових втрат таким чином :

$$\Delta P_{несин} = \Delta P_{м.ном} \cdot k_n^2 \sum_{\nu} \left(\frac{U_\nu^2}{\nu} \right)^2 \left(\sqrt{\nu} + \sqrt{\nu \pm 1} \right), \qquad (13)$$

де $\Delta P_{м.ном}$ - втрати у міді електродвигуна при ідеальній напрузі живлення, U_ν - діюче значення напруги ν-ї гармонійної складової. Знак «+» у підкорінному виразі формули (13) ставиться у разі парної, а «-» - непарної гармоніки.

На рис. 5 наведені співставлення результатів розрахунків даної складової збитку виконаних за допомогою розробленої електромагнітної моделі АД та за формулами (12),(13) для електродвигуна типу АИР.

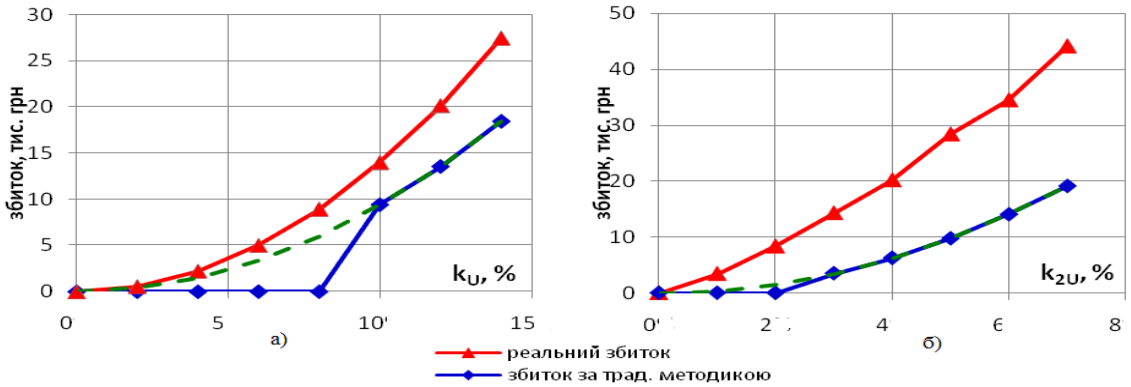

Рис. 5. Залежності енергетичної складової збитку від роботи АД потужністю 7,5 кВт з річним фондом робочого часу 7200 годин від величини коефіцієнтів несинусоїдності живлячої напруги (а) і несиметрії (б).

Аналіз представлених залежностей свідчить про те, що наведені формули «недооцінюють» збиток, обумовлений неякісною електроенергією. Це пов'язано з їх неточністю щодо двигунів певних класів і потужності.

Оскільки при аналізі енергетичних параметрів АД, необхідно враховувати динаміку теплових процесів і тривалість роботи електроустаткування при конкретній якості електроенергії, електромагнітна модель асинхронного двигуна доповнена тепловою складовою. Входом останньої є часова залежність споживаної потужності, яка визначається відповідно до режиму роботи конкретного приводу і враховує поточні зміни ПЯЕ. В початковому варіанті використана одномасова теплова модель електродвигуна:

$$\Delta P = A \cdot \tau + \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot C, \qquad (14)$$

де ΔP – потужність теплових втрат, що виділяються в електродвигуні; τ – перевищення температури АД над температурою навколишнього середовища; $\Delta \tau$ – приріст температури двигуна за час Δt; A – коефіцієнт тепловіддачі двигуна, Дж/(сек·ºС), C – теплоємність двигуна, Дж/°С.

Миттєве значення температури в робочому циклі визначається шляхом чисельного інтегрування рівняння (14):

$$\tau_k = \tau_{k-1} + \frac{1}{C}(\Delta P - A\tau_{k-1})h, \qquad (15)$$

де τ_k, τ_{k-1} - перевищення температури на k-му і (k-1)-му кроках інтегрування; ΔP – поточні теплові втрати; h – крок інтегрування (приймається 1 хв.).

При перевірці адекватності теплової складової моделі відносна середньоквадратична похибка прогнозу склала 3,2%, що свідчить про припустимість її використання. На рис. 6 наведені отримані за допомогою результуючої електромагнітної моделі добові перевищення температури АД потужністю 7,5 кВт з наступними параметрами теплової складової: теплоємність двигуна - 5,0 кДж/град, коефіцієнт тепловіддачі - 6,74 Вт/град, теплова постійна часу - 12,5 хв. Сірим тоном виділені ділянки часу, на яких з'являються викривлення синусоїдності або симетрії. По основній вісі відкладений рівень відповідного показника, а по допоміжній - температура двигуна.

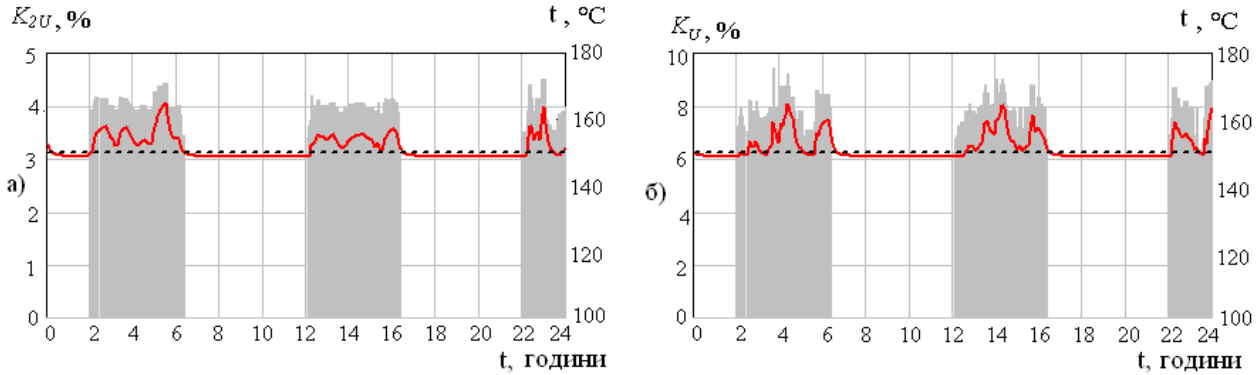

Рис. 6. Результати моделювання теплового стану асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт при несиметрії (а) і при несинусоїдності (б) напруги живлення.

На підставі отриманих таким чином результатів скорегована традиційна залежність, за якою розраховується термін придатності ізоляції електродвигуна:

$$T = T_H \cdot e^{-\frac{\ln 2}{\Delta\theta}\cdot\alpha'}, \qquad (16)$$

де $\alpha' = \frac{1}{T_Ц}\sum_n (\Delta\tau_n \cdot t_n)$ - еквівалентне перевищення температури ізоляції АД допустимих значень; $T_Н$ – термін придатності ізоляції при номінальній температурі; $\Delta\theta$ - коефіцієнт, що залежить від класу ізоляції; t_n - крок дискретизації проміжків часу, на яких спостерігаються перевищення температури ізоляції допустимого значення; $\Delta\tau_n$ - зазначені перевищення температури ізоляції; $T_Ц$ – тривалість робочого циклу.

В результаті складена узагальнена динамічна модель сумарного економічного збитку від роботи АД в умовах неякісної електроенергії. У таблиці 1 наведено співставлення техніко-економічних показників, отриманих за допомогою сукупності розроблених і програмно реалізованих моделей для двигуна потужністю 7,5 кВт, який протягом 80% робочого циклу споживає неякісну електроенергію в умовах експериментального цеху ВАТ «Укрспецсервіс».

Таблиця 1 Техніко - економічні показники роботи АД потужністю 7,5 кВт в умовах експериментального цеху ВАТ «Укрспецсервіс»

Показник	Од. виміру	Величина
Номінальна потужність двигуна	кВт	7,5
Коефіцієнт викривлення синусоїдності	%	9
Коефіцієнт зворотної послідовності	%	3
Річний збиток, заподіяний несинусоїдністю	тис. грн	1,11
Річний збиток, заподіяний несиметрією	тис.грн	1,212
Збиток від скорочення терміну служби АД	тис. грн	2,600
РАЗОМ, сумарний збиток	тис.грн	4,922
Вартість пасивного фільтру	тис.грн	0,42
Вартість активного фільтру	тис. грн	6,00

На підставі виконаних досліджень можна зробити висоновок, що прийняття рішення про застосування заходів щодо негативного впливу неякісної електроенергії на техніко-економічні показники АД повинно робитися у кожному конкретному випадку виходячи із співставлення величини передбачуваного збитку і вартості запобіжних технічних засобів, що пропонуються.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науковою працею, на основі отриманих теоретичних і прикладних результатів і їх систематизації вирішене актуальне наукове завдання з розробки методологічних основ вибору економічно доцільних засобів захисту АД, що працює в конкретній цеховій мережі з неякісною електроенергією. Виконані дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки :

1. Результати проведеного експериментального аналізу якості електроенергії на промислових підприємствах України показали, що в їх цехових мережах спостерігаються перевищення допустимих рівнів як мінімум одного з нормованих показників якості електроенергії, тоді як інтегральні показники симетрії і синусоїдності часто знаходяться в нормі, коли коефіцієнти окремих гармонійних складових значно перевищують гранично допустимі величини.

2. Доведено доцільність застосування єдиної техніко-економічної моделі асинхронних двигунів, що працюють в мережі з неякісною електроенергією, яка дозволяє прийняти обгрунтовані рішення щодо підвищення їх енергоефективності.

3. Вдосконалена універсальна динамічна електромагнітна модель асинхронного двигуна, що дозволяє аналізувати статичні і динамічні процеси в електромеханічній системі при несинусоїдному і несиметричному живленні статора. Підтверджена адекватність вищезгаданого математичного аналога свідчить про можливість його використання для завдань обчислювальних досліджень енергетичної ефективності АД.

4. Доведено, що дослідження ефективності використання електроустаткування в електричних мережах з неякісною електроенергією доцільно здійснювати на основі обчислювальних досліджень з використанням імовірнісної моделі цехової

електромережі, розробленої на основі методу статистичних випробувань. При цьому моделювання лінійної напруги в таких мережах потрібно виконувати, з огляду на те, що всі їх гармонійні складові мають фіксовані частоти коливань на яких лише накладаються зміни амплітуд і початкових фаз, доцільно здійснювати шляхом генерування випадкових послідовностей останніх.

5. Обгрунтовано, що для підвищення ККД асинхронних двигунів, що працюють в мережах з неякісною електроенергією, найбільш доцільним є застосування комбінованого фільтру, який представляє собою послідовно з'єднаний загороджувальний фільтр в кожній фазі і ємностей, з'єднаних в зірку. Найбільший ККД електродвигуна з таким фільтром в умовах ВАТ «Укрспецсервіс» досягається, коли загороджувальний фільтр налаштований на резонанс струмів на частоті 100 Гц, а резонанс напруги - на частоту 500 Гц, при цьому застосування пасивних комбінованих фільтрів найдоцільніше для АД малої і середньої потужності (до 45 кВт).

6. Доведено, що традиційні методи оцінки електромагнітної складової економічного збитку, заподіяного живленням АД неякісною електроенергією, занижують величину останнього, особливо у разі, коли ПЯЕ незначно відрізняються від нормально допустимих значень.

7. Показано, що скорочення терміну придатності ізоляції АД може бути спрогнозовано на основі непрямої оцінки визначення його температури в ході експлуатації, отриманої за допомогою синтезованої в роботі одномасової динамічної теплової моделі, теплові втрати для добового циклу експлуатації АД в якій розраховують, використовуючи електромагнітну модель, з урахуванням імовірнісних характеристик показників якості електроенергії. При цьому оцінка скорочення терміну придатності включає не тільки величину перевищення допустимої температури електродвигуна, але і тривалість його роботи з конкретним перевищенням.

8. Розроблені в роботі метод вибору економічно доцільних засобів підвищення енергоефективності АД і алгоритм обчислення сумарного економічного збитку при роботі останнього в умовах неякісної електроенергії дозволяють приймати економічно обгрунтоване рішення щодо вибору засобів компенсації негативного впливу неякісної електроенергії на техніко-економічні показники АД виходячи із співставлення величини збитку, вартості електродвигуна і запропонованих технічних засобів. Вищезгаданий метод розрахунку збитку, враховує збільшення споживання електроенергії двигуном, а також скорочення терміну придатності його ізоляції внаслідок перегріву, обумовленого неякісною електроенергією.

9. Результати проведених досліджень прийняті для використання у ВАТ «Укрспецсервіс». Вони розширюють інструментарій енергоменеджменту промислових підприємств і можуть бути використані у навчальному процесі ВНЗ при підготовці фахівців зі спеціальностей: «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»; «Електричні машини та апарати»; «Електричні системи і комплекси»; «Електромеханічні системи і комплекси»; «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»; «Електропривод і автоматизація промислових установок» «Енергетичний менеджмент» і перепідготовці фахівців в області енергоефективності підприємств.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Качан Ю.Г. О технико–экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.80. – Дніпропетровськ, 2008. – С.58-62.

2. Качан Ю.Г. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.81. –Дніпропетровськ, 2008. – С.154-162.

3. Качан Ю.Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Остроградського. – Кременчук, 2009. – №3. – С.150-153.

4. Качан Ю.Г. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.83.–Дніпропетровськ, 2009.– С.113 - 117.

5. Качан Ю.Г. О выборе средств обеспечения качества питающего напряжения асинхронных двигателей / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук, 2010.– №4 (63). –Ч.3. – С.61-64.

6. Качан Ю.Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.84.–Дніпропетровськ, 2010.–С.9–16.

7. Качан Ю.Г. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.85.–Дніпропетровськ, 2010.–С.147-151.

8. Качан Ю.Г. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1 (17). – С.87-90.

9. Качан Ю.Г. О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково – виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2011. – Вип.4(16). – С.53–57.

10. Качан Ю.Г. Оценка алгоритма выбора средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.87 –Дніпропетровськ, 2011. – С.106 – 110.

11. Качан Ю.Г. О моделировании напряжений в электрических сетях промышленных предприятий / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електротехніка і електроенергетика: Науковий журнал.–Запоріжжя:ЗНТУ, 2012.– № 1. – С.72–75.

12. Качан Ю.Г. Усовершенствование средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнегрии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково – виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2012. – Вип.3(19). – С.128–132.

13. Качан Ю.Г. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ»,2009. – №3. – С.70-74.

14. Качан Ю.Г. Моделирование асинхронного двигателя для условий некачественного питания / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в энергетических системах». – Севастополь. – 2009. –С. 55-56.

15. Новікова Ю.О. Вплив якості електричної енергії на роботу асинхронного двигуна / Ю.О. Новікова, В.В. Кузнецов // Матеріали XV науково – технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості. Запоріжжя:Видавництво ЗДІА. –2010. – Ч.1. –С.236.

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1] – аналіз досліджень про вплив відхилення ПЯЕ від гостуємих значень на роботу АД; [2] – аналіз існуючих математичних моделей АД; [3] – програмна реалізація математичного аналога АД; [4] – проведення моделювання роботи двигунів в діапазоні потужностей 0,75 - 250 кВт; [5] – виконаний аналіз існуючих засобів підвищення енергоефективності АД від впливу неякісної електроенергії; [6] – проведений експеримент за оцінкою якості електроенергії в цехах підприємства ВАТ «Запорізький трансформаторний завод»; [7] – здійснений синтез теплової моделі АД; [8,13] – проведений промисловий експеримент по дослідженню теплового стану АД в умовах ВАТ «Укрспецсервіс»; [9] – одержана сукупність програмно-реалізованих математичних моделей, яку можна розглядати як техніко-економічну модель АД; [10] – складання алгоритму вибору засобів підвищення енергоефективності АД; [11] – виконання програмної реалізації стохастичного генератора напруг в цеховій електромережі промислового підприємства; [12] – виконаний пошук найліпшого поєднання резонансних частот комбінованого фільтру; [14] – проведені дослідження на математичній моделі АД і одержані значення його енергетичних показників при полігармонійному сигналі живлячої напруги; [15] – виконаний аналіз про негативний вплив неякісної електроенергії на техніко-економічні показники роботи АД.

Анотація

Кузнецов В.В. Засоби підвищення енергоефективності асинхронних двигунів, що працюють в мережах з неякісною електроенергією. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2013.

Дисертація присвячена розробці методологічних основ вибору ефективних і економічно доцільних засобів підвищення енергоефективності АД, що працюють в конкретних цехових мережах з неякісною електроенергією.

Розроблено математичний аналог АД, що дозволяє визначити його енергетичні показники при якості електроенергії, яка довільно змінюється в часі. За результатами експерименту, проведеного в умовах «Укрспецсервіс» було підтверджено адекватність розробленої моделі АД.

Створено стохастичну модель напруг в цехових мережах промислових підприємств. Перевірка розробленої цифрової моделі лінійних напруг в цеховій електромережі ВАТ «Укрспецсервіс» показала, що статистичні характеристики гармонік, що генеруються, незначно відрізняються від гіпотетичних, тому, модель може вважатися адекватною.

Показано, що скорочення терміну придатності ізоляції АД може бути спрогнозовано на основі непрямої оцінки його температури в ході експлуатації, отриманої за допомогою синтезованої в роботі одномасової динамічної теплової моделі, теплові втрати в якій розраховують шляхом використання електромагнітної моделі, з урахуванням імовірнісних характеристик показників якості електроенергії.

Розроблено метод вибору економічно доцільних засобів підвищення енргоефективності АД і алгоритм обчислення сумарного економічного збитку при роботі останнього в умовах неякісної електроенергії, які дозволяють прийняти економічно обгрунтоване рішення щодо вибору засобів компенсації негативного впливу неякісної електроенергії на техніко-економічні показники АД.

Ключові слова: показники якості електроенергії, асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, економічний збиток, засоби підвищення енергоефективності електродвигунів.

Аннотация

Кузнецов В.В. Средства повышения энергоэффективности асинхронных двигателей, которые работают в сетях с некачественной электроэнергией. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2013.

Диссертация посвящена разработке методологических основ выбора эффективных и экономически целесообразных средств повышения энергоэффекттивности асинхронных двигателей, которые работают в конкретных цеховых сетях с некачественной электроэнергией.

Разработана математическая электромагнитная модель АД, которая позволяет определить его энергетические показатели при качестве электроэнергии, которая произвольно изменяется во времени. Проверка адекватности модели проведена в условиях экспериментального цеха ОАО «Укрспецсервис». Получены значения относительной среднеквадратичной погрешности прогноза соответственно для КПД, коэффициента мощности и измеренных энергетических потерь составили 2,72; 3,0; 3,99% соответственно, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и возможности ее использования для заданий вычислительных исследований энергетической эффективности АД.

Создана стохастическая модель напряжений в цеховых сетях промышленных предприятий. Проверка разработанной цифровой модели линейных напруг в цеховой электросети ОАО «Укрспецсервис» показала, что статистические характеристики гармоник, которые генерируются, незначительно отличаются от гипотетических, потому, настроенная данным образом модель может считаться адекватной. Использование вышеупомянутого аналога в цеховой электрической сети с некачественной электроэнергией позволяет на основе вычислительных исследований оценивать энергоэффективность АД, которые в ней работают.

Доказано, что традиционные методы оценки электромагнитной составляющей экономического убытка, причиненного питанием АД некачественной электроэнергией, занижают величину последнего, особенно в случае, когда показатели качества электроэнергии незначительно отличаются от нормально допустимых значений.

Показано, что сокращение срока службы изоляции АД может быть спрогнозировано на основе косвенной оценки определения его температуры в ходе эксплуатации, полученной с помощью синтезированной в работе одномассовой динамической тепловой модели, тепловые потери в которой рассчитывают с помощью электромагнитной модели для суточного цикла эксплуатации АД, с учетом вероятностных характеристик показателей качества электроэнергии. При этом оценка сокращения срока службы включает, таким образом, не только величину превышения допустимой температуры электродвигателя, но и длительность его работы, с конкретным превышением.

Разработан метод выбора экономически целесообразных средств защиты АД и алгоритм вычисления суммарного экономического ущерба при работе последнего в условиях некачественной электроэнергии позволяют принять экономически обоснованное решение о выборе средств компенсации негативного влияния некачественной электроэнергии на технико-экономические показатели АД, которое принимается исходя из сопоставления величины ущерба, стоимости электродвигателя и предложенных технических средств его защиты. Вышеупомянутый метод расчета убытка, учитывает увеличение потребления электроэнергии двигателем, а также сокращение срока службы его изоляции в результате перегрева, обусловленного некачественной электроэнергией.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, асинхронный двигатель с короткозамкутым ротором, экономический ущерб, средства повышения энергоэффективности электродвигателей.

Annotation

Kuznetsov V. V. Means of increase of an energy efficiency of asynchronous motors working in networks with the unquality electric power. − On the right of manuscript.

Dissertation on reception of a scientific degree of the candidate of technical sciences on the speciality 05.09.03 – «Electrotechnical complexes and systems».- National Mining University, Dniepropetrovsk, 2013.

The dissertation is devoted to development of the basic scientific provisions concerning creation of a methodology's choice of effective and economically reasonable remedies of asynchronous engines which work in specific shop networks with the unquality electric power.

The likelihood model of tension in shop networks of industrial enterprises is created. Check of developed digital model linear strains in the shop power supply network of public corporation "Ukrspetsservice" showed that statistical characteristics of harmonicas which are generated, slightly differ from hypothetical therefore, the model adjusted by this image can be considered as the adequate. Use of aforementioned analog in a shop electric network with the unquality electric power allows to estimate on the basis of computing researches an energy efficiency the asynchronous motor which in it work.

It is shown that reducing service life of isolation the asynchronous motor can be predicted on the basis of an indirect assessment of determination of its temperature during the operation received by means of one-mass dynamic thermal model synthesized in work heating losses in which calculate by means of electromagnetic model for a daily cycle of operation the asynchronous motor, taking into account likelihood characteristics of indicators of electric power's quality.

The methodology's choice of economically reasonable remedies the asynchronous motor and total calculation's algorithm of an economic damage of the asynchronous motor which working in the conditions of the unquality electric power are allowed to make economically reasoned decision on a choice of means of compensation of the unquality electric power's negative impact on technical and economic indicators the asynchronous motor which is accepted proceeding from comparison of size of a damage, cost of the electric motor and the offered means of its protection. The aforementioned design procedure of a loss, considers increase in electricity consumption by the engine, and also reducing service life of its isolation as a result of an overheat caused by the unquality electric power.

Keywords: indicators of the electric power's quality, the asynchronous engine with a short-circuit rotor, an economic damage, means of increase of an energy efficiency of electric motors.