

УДК 621.313.333

**КОРЕКЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
З НЕСИМЕТРИЧНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ****А. В. Чумачова, А. П. Калінов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: cifirka2008@mail.ru

Обґрунтовано необхідність компенсації змінних складових трифазної активної потужності та електромагнітного моменту асинхронного двигуна, що викликані його несиметрією. Пропонується метод компенсації цих складових засобами частотно-регульованого електропривода. Обґрунтовано вирази для визначення корегуючої напруги для компенсації змінних складових трифазної активної потужності та електромагнітного моменту асинхронного двигуна, що викликані несиметрією фаз статора.

Ключові слова: несиметрія, миттєва потужність, складові потужності, компенсація, асинхронний двигун.**КОРРЕКЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
С НЕСИММЕТРИЧНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ****А. В. Чумачёва, А. П. Калинов**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: cifirka2008@mail.ru

Обоснована необходимость компенсации переменных составляющих трехфазной активной мощности и электромагнитного момента асинхронного двигателя, вызванные его несимметрией. Предлагается метод компенсации этих составляющих средствами частотно-регулируемого электропривода. Обоснованы выражения для определения корректирующего напряжения для компенсации переменных составляющих трехфазной активной мощности и электромагнитного момента асинхронного двигателя, вызванные несимметрией фаз статора.

Ключевые слова: несимметрия, мгновенная мощность, составляющие мощности, компенсация, асинхронный двигатель.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Основним видом регульованого електроприводу робочих механізмів є електропривод (ЕП) на базі системи "перетворювач частоти-асинхронний двигун". Широке розповсюдження частотно-регульованого електропривода (ЧРЕП) зумовлене його високою енергетичною ефективністю, хорошими регульовальними властивостями самого приводу та простотою виробництва й експлуатації асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором. Важливою проблемою таких ЕП є присутність неактивних складових потужності, таких, як реактивна потужність та змінні складові активної та реактивної потужностей, які виникають унаслідок несиметрії або нелінійності АД. Присутність цих складових значно погіршує ефективність перетворення енергії в АД. Очевидно, що змінна складова у трифазній миттєвій споживаній потужності АД призводить до появи змінної складової в електромагнітному моменті та швидкості двигуна, що, у свою чергу, викликає підвищення вібрації АД та збільшення втрат потужності.

До основних причин появи змінної складової у спектрі трифазної потужності АД належать нелінійності (ефект насичення електротехнічної сталі статора та витіснення струму в обмотках ротора) та вихідна або набута несиметрія його конструкції та електромагнітних параметрів. Причиною набутої несиметрії є, наприклад, пошкодження обмотки статора АД унаслідок короткого замикання в ній. Часто для скорочення обсягу ремонтних робіт пошкоджені секції такої обмотки в АД великої потужності не виймають з пазів, але виключають зі схеми обмотки, а кінці секцій, що залишилися, з'єднують в обхід несправних. У результаті таких операцій обмотка статора стає несиметричною (має різні значення

фазних активних та індуктивних опорів) і двигун надалі експлуатується з такою обмоткою [1]. Також до поширених причин появи неактивних складових потужності АД можна віднести динамічний та статичний дисбаланс двигуна та несиметрію магнітної системи, яка з'являється внаслідок пошкодження ізоляції між окремими листами електротехнічної сталі та проявляється у зниженні значення магнітної індукції [2].

З урахуванням насиченості парку електромеханічних перетворювачів промислових підприємств великою кількістю застарілих АД середньої та великої потужності, які внаслідок неодноразових пошкоджень та ремонтів мають високий ступінь вихідної та набутої несиметрії, постає актуальне завдання розробки комплексу заходів для компенсації змінних складових трифазної активної потужності та електромагнітного моменту АД.

Найпоширенішим і найефективнішим засобом компенсації небажаних складових потужності у трифазних мережах є активний кондиціонер гармонік (Active Harmonic Conditioner – АНС), що підключається паралельно нелінійному навантаженню. Принцип дії такого силового активного фільтру (САФ) заснований на аналізі гармонік струму нелінійного навантаження й генерування у розподільну мережу тих же гармонік струму, але з протилежною фазою. Як результат цього, вищі гармонічні складові струму нейтралізуються в точці підключення САФ. Це означає, що вони не поширюються від нелінійного навантаження в мережу й не спотворюють напруги первинного джерела енергії [3].

Для правильного налаштування та розрахунку струмів компенсації САФ необхідно мати чітку та

достовірну, фізично та математично обґрунтовану інформацію про складові потужності в трифазних електричних колах.

Наразі розглядається декілька теорій, які пропонують математичний опис і тлумачення складових трифазної потужності в електричних мережах, а також методики налаштування САФ для компенсації небажаних складових потужності. Їх класифікація та основний зміст наведено в роботі [4].

Більшість із цих теорій передбачає наявність активного компенсатора, тобто джерела компенсаційного струму (САФ). Для подібних задач, але у застосуванні до АД, можливо розробити підхід з використанням перетворювача частоти (ПЧ) у складі ЧРЕП зі скалярним керуванням. Більшість промислових ПЧ є перетворювачами з ланкою постійного струму, які мають автономний інвертор напруги (АІН). Цей блок може виступати для АД не тільки як джерело потужності, а й одночасно як компенсатор. Тобто на основі існуючих методів розрахунку компенсуючих впливів можливо формувати на виходах АІН напругу специфічної форми з урахуванням, що об'єктом компенсації є електричний двигун змінного струму [5].

Метою дослідження є корекція режиму роботи частотно-регульованого електропривода за рахунок компенсації змінних складових активної потужності та електромагнітного моменту, які викликані несиметрією асинхронного двигуна.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. На базі проведеного авторами аналізу теорій миттєвої потужності для компенсації несиметрії АД як базової була обрана методика розрахунку сигналів завдань з використанням крос-векторної теорії [6], яка передбачає використання реальних, без проміжного перетворення, сигналів струму та напруги, що значно спрощує математичні розрахунки у системі керування [7]. Недоліком цієї теорії потужності є те, що вона не дозволяє контролювати струми в нульовому проводі незалежно від фазних струмів та не забезпечує повної компенсації струму в нульовому проводі, якщо напруги містять нульову послідовність. Однак це є прийнятним, оскільки частіше за все обмотки статора, особливо в АД середньої та великої потужності, з'єднуються за схемою "зірка без нуля".

Згідно з крос-векторною теорією струми завдання на компенсатор визначаються як

$$i_{cs}^* = \frac{\tilde{p}_c \cdot u_s}{u \cdot u} + \frac{q_c \times i_s}{u \cdot u}, \quad (1)$$

де \tilde{p}_c – змінна складова трифазної активної потужності; q_c – реактивна потужність; u – вектор напруг статора АД; u_s – напруга відповідної фази.

Якщо як об'єкт компенсації виступає АД, то питання компенсації реактивної потужності не ставиться взагалі, принаймні для перших гармонік напруг та струмів. Першочерговою задачею є усунення змінної складової трифазної активної потужності та електромагнітного моменту, однак дослідження показують, що врахування реактивної складової дозволить стабілізувати момент АД при компенса-

ції. Для розв'язання цієї задачі засобами ЧРЕП потрібно розрахувати специфічні форми кривих трифазної напруги. Причому варто зауважити, що формування сигналів завдань на компенсатор буде відрізнятися залежно від того, що компенсується: змінна складова електромагнітного моменту чи трифазної активної потужності.

Компенсація змінної складової трифазної активної потужності. Скориставшись (1), можна аналогічно записати вираз для розрахунку корегуючої напруги для випадку, коли повинна бути зкомпенсована змінна складова активної потужності АД, яка викликана несиметрією його параметрів:

$$u_{ps}^* = \frac{\tilde{p}_c}{i} \cdot \frac{i_s}{i} + \frac{q_c \times i_s}{i^2}, \quad (2)$$

де i_s – струм відповідної фази статора; i – вектор струмів статора АД.

У виразі (2) складові \tilde{p}_c/i і q_c/i визначають бажані амплітудні значення гармонік корегуючої напруги, а складова i_s/i є нормованим струмом фази статора, яка визначає частоту та фазу корегуючої напруги відповідної фази АД.

Додавання корегуючих напруг, які розраховані за виразом (2), до системи базових трифазних симетричних напруг номінальної амплітуди та частоти дозволяє отримати таку напругу на обмотках фаз статора, яка призведе до формування трифазної активної потужності АД без тих змінних складових, поява яких була викликана несиметрією струмів у фазах статора.

Компенсація змінної складової електромагнітного моменту. За аналогією з трифазною потужністю у електромагнітному моменті також можна виділити "активну" \tilde{m}_p та "реактивну" m_q складові. Таким чином, подібно до виразу (2) можна розрахувати корегуючі сигнали напруги для випадку, коли повинна бути зкомпенсована змінна складова електромагнітного моменту:

$$u_{ms}^* = \frac{\tilde{m}_p}{i} \cdot \frac{i_s}{i} + \frac{m_q \times i_s}{i^2}. \quad (3)$$

При цьому електромагнітний момент розраховується за виразом

$$m = \frac{p}{\sqrt{3}} ((\psi_C - \psi_B) i_A + (\psi_A - \psi_C) i_B + (\psi_B - \psi_A) i_C),$$

де ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокозчеплення фаз статора; i_A, i_B, i_C – струми фаз статора; p – кількість пар полюсів АД.

Варто зауважити, що алгоритм розрахунку корегуючих сигналів є однаковим як для випадку компенсації змінної складової трифазної активної потужності, так і для компенсації змінної складової моменту. Відмінність полягає лише у вхідних сигналах системи керування: для першого випадку це будуть миттєві значення струмів та напруг фаз статора АД, а для другого – миттєві значення потокозчеплень та струмів фаз статора.

Для реалізації запропонованого методу пропонується функціональна схема ЧРЕП із системою компенсації несиметрії АД (рис. 1), де блоками позна-

чено: ПЧ – перетворювач частоти, В – трифазний випрямляч, ЛПС – ланка постійного струму, АІН – автономний інвертор напруги, ДН і ДС – датчики напруги і струму, СК – система керування, u_{cA}, u_{cB}, u_{cC} – корегуючі напруги.

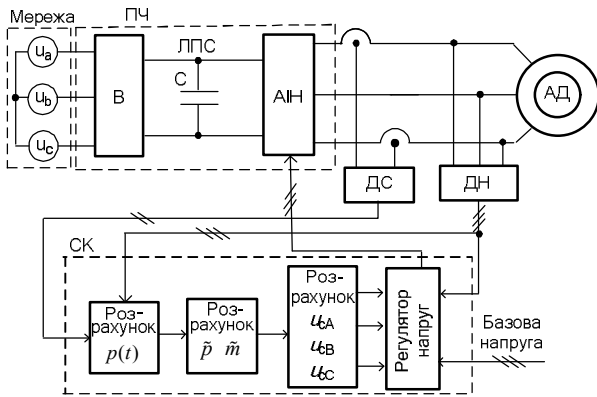


Рисунок 1 – Функціональна схема ЧРЕП із системою компенсації несиметрії АД

Перевірка запропонованого підходу здійснювалася шляхом моделювання роботи системи ПЧ–АД у трифазній системі координат при номінальному навантаженні для різних ступенів несиметрії фаз статора (1, 2, 5 і 10 %) та для випадків компенсації змінної складової трифазної активної потужності та змінної складової електромагнітного моменту. При моделюванні несиметричних режимів враховувалася зміна індуктивного, індуктивного опорів обмотки та зміна індуктивності контуру намагнічування [8].

Отримані результати (рис. 2–5) показують, що після ввімкнення компенсатора суттєво зменшується середньоквадратичне значення змінної складової трифазної активної потужності та, як наслідок, змінної складової електромагнітного моменту. Так, при моделюванні режиму роботи АД типу 4А ($P_n = 5,5$ кВт, $I_n = 11,5$ А, $n_n = 1458$ об/хв, $\eta_n = 85,5$ %), що має 5 % несиметрії обмоток статора, з пуском без навантаження та при накиді номінального моменту опору середньоквадратичне значення змінної складової \tilde{m} до компенсації складало 10 % від номінального значення моменту, а після ввімкнення компенсатора знизилось до 0,7 % (рис. 2,а).

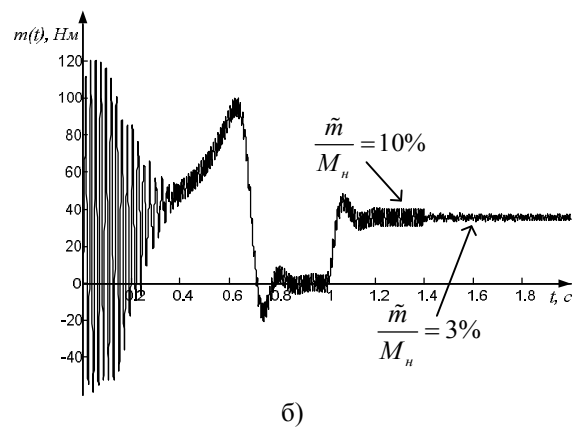
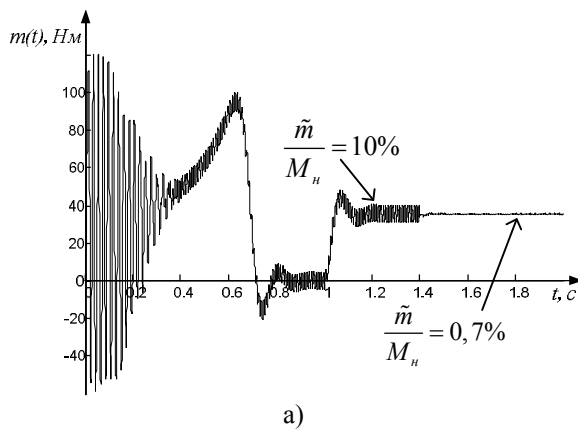


Рисунок 2 – Електромагнітний момент АД при 5%-ій несиметрії фаз до і після ввімкнення компенсатора: а) при компенсації неактивних складових електромагнітного моменту, б) при компенсації неактивних складових трифазної активної потужності

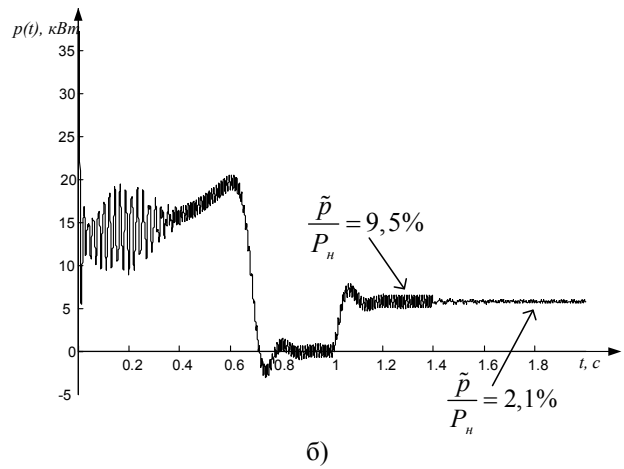
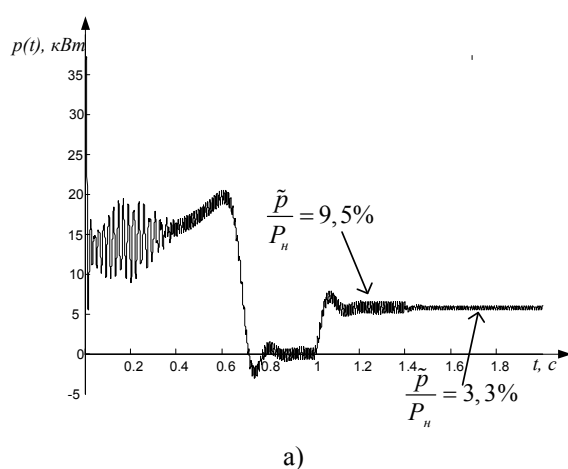


Рисунок 3 – Трифазна активна потужність АД при 5 %-ій несиметрії фаз до і після ввімкнення компенсатора: а) при компенсації неактивних складових електромагнітного моменту, б) при компенсації неактивних складових трифазної активної потужності

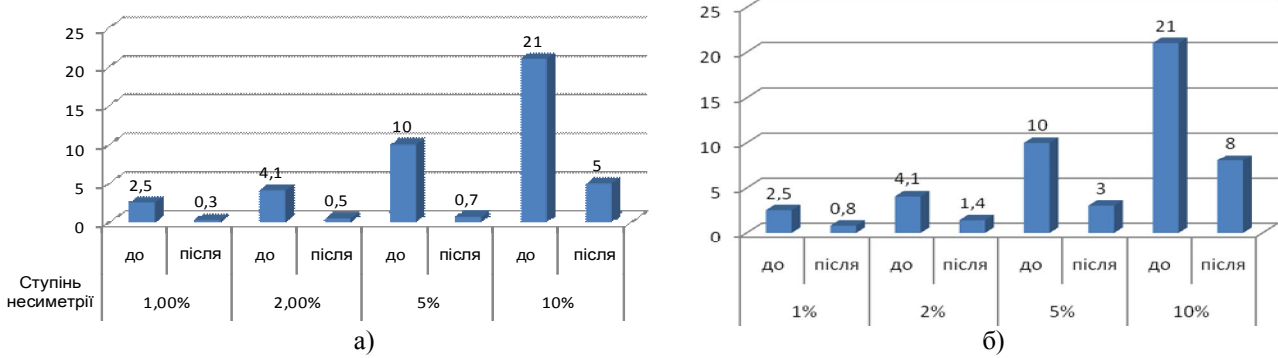


Рисунок 4 – Відносне значення змінної складової електромагнітного моменту АД при різних ступенях несиметрії до і після включення компенсатора: а) при компенсації неактивних складових електромагнітного моменту, б) при компенсації неактивних складових трифазної активної потужності

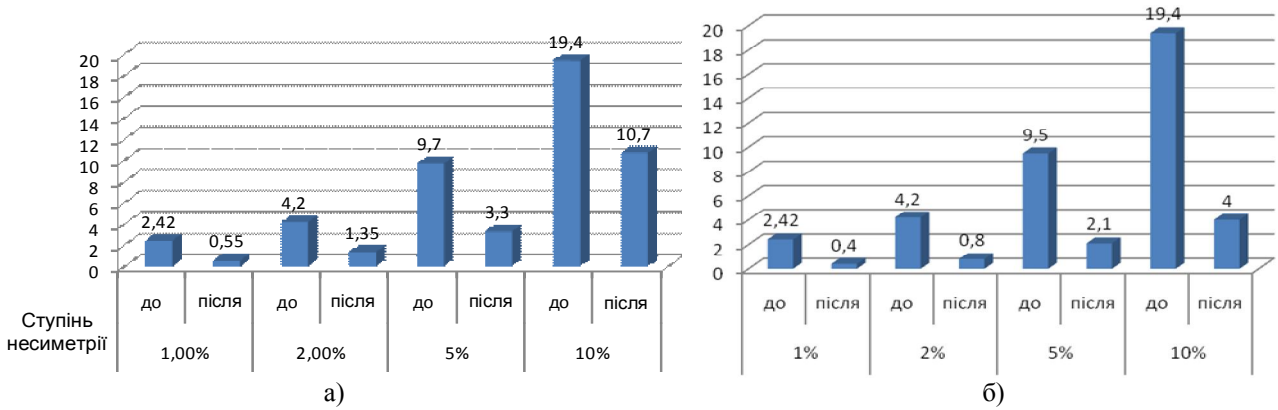


Рисунок 5 – Відносне значення змінної складової трифазної активної потужності АД при різних ступенях несиметрії до і після включення компенсатора: а) при компенсації неактивних складових електромагнітного моменту, б) при компенсації неактивних складових трифазної активної потужності

Варто зауважити, що при дослідженні роботи системи компенсації необхідно контролювати не тільки змінну складову трифазної активної потужності та електромагнітного моменту АД, але й грюючі втрати у фазах, оскільки несиметрія параметрів може призвести до суттєвого перегріву окремої обмотки навіть за умови незначного збільшення сумарних втрат. Перегрів такого (рис. 5) рівня стане причиною скорочення терміну експлуатації всього двигуна.

Як показують результати моделювання (рис. 5), після включення компенсатора змінюється перероз-

поділ втрат за фазами АД. При цьому зменшується різниця між електричними втратами у фазах і, як наслідок, відбувається зниження теплового перевантаження окремих обмоток. Відносне значення зміни електричних втрат у фазах розраховується за виразом

$$\Delta P_{m1s}^* = \frac{\Delta P_{m1i}^{A,B,C} - \Delta P_{m1s}^{A,B,C}}{\Delta P_{m1s}^{A,B,C}} \quad (4)$$

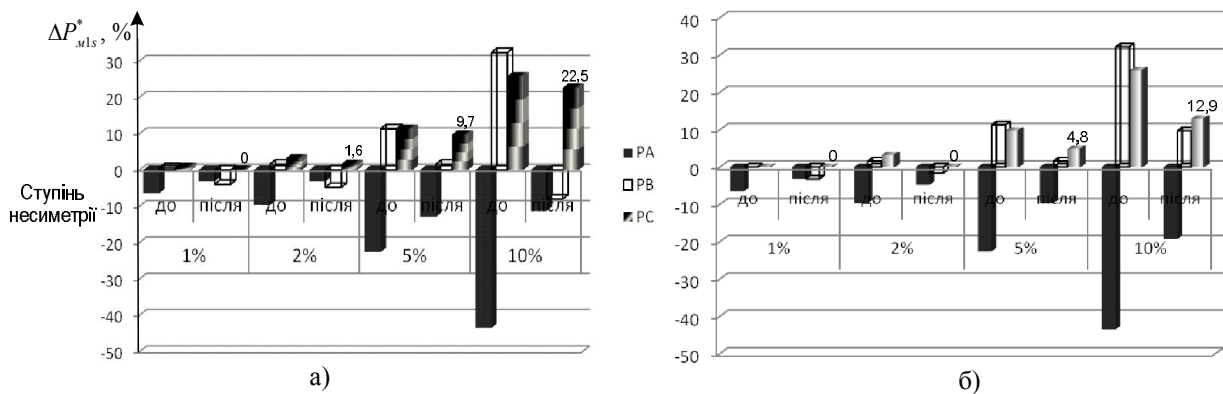


Рисунок 6 – Відносне значення зміни електричних втрат у фазах статора АД при різних ступенях несиметрії до і після включення компенсатора: а) при компенсації неактивних складових електромагнітного моменту; б) при компенсації неактивних складових трифазної активної потужності

З точки зору зменшення теплового перевантаження окремих фаз кращі результати показує робота ЕП з налаштуванням системи керування на компенсацію змінних складових трифазної активної потужності (рис. 6,а), але при цьому знижується рівень компенсації змінної складової електромагнітного моменту. Так, за результатами моделювання перевищення втрат у міді фази С після включення компенсатора знижується з 25,8 до 22,6 % при компенсації змінної складової електромагнітного моменту та до 12,9 % при компенсації змінної складової активної потужності. Зважаючи на це, стратегію компенсації потрібно обирати з погляду на вимоги до роботи конкретного ЕП робочого механізму.

На основі отриманих результатів проведено оцінювання впливу несиметрії фаз на термін служби АД з і без використання режиму компенсації. Кількісно оцінити такий вплив можливо, скориставшись правилом «восьми градусів» [9]. Для цього за результатами моделювання визначається перевищення температури ізоляції обмоток з і без компенсації. При розрахунках зроблено допущення, що температура ізоляції обмоток змінюється пропорційно гріючим втратам двигуна і термін експлуатації АД дорівнює терміну служби ізоляції його обмоток.

Згідно з результатами моделювання, до компенсації найбільш перегрітою є фаза В (при 10 %-ій несиметрії електричні втрати в обмотці перевищують номінальні більш ніж на 30 %), тому й розрахунок залишкового ресурсу АД проводиться для найбільш перегрітої обмотки:

$$\tau(\varepsilon) = T_0 e^{-b \cdot \Theta(\varepsilon)}, \quad (5)$$

де T_0 – умовний термін служби ізоляції при температурі $\Theta = 0$; $\Theta(\varepsilon) = \Theta_n \frac{\Delta Pgr(\varepsilon)}{\Delta Pgr_n}$ – температура

ізоляції обмоток при заданому ступені несиметрії [5]; b – коефіцієнт, що залежить від класу ізоляції двигуна; Θ_n – номінальна температура ізоляції обмоток, що визначається класом ізоляції АД; ΔPgr_n – номінальні гріючі втрати; $\Delta Pgr(\varepsilon)$ – поточні гріючі втрати при заданому ступені несиметрії, ε – ступінь несиметрії.

За результатами моделювання (рис. 5) розраховується термін служби АД з та без компенсації для кожного ступеня несиметрії за виразом (5) (табл. 1).

Таблиця 1 – Розрахунок терміну служби АД з та без компенсації

Ступінь несиметрії, %	Перевищення температури ізоляції найбільш перегрітої фази порівняно із симетричним режимом θ , %		Термін служби ізоляції τ , роки	
	Без	З	Без	З
1	1 (фаза В)	0 (фаза С)	6,6	7
2	2,86 (фаза С)	0 (фаза С)	5,2	7
5	11,5 (фаза С)	4,8 (фаза С)	2,5	4,5
10	32,4 (фаза В)	13,3 (фаза С)	0,37	2,2

Таким чином, розроблена система керування дозволяє компенсувати змінні складові потужності й електромагнітного моменту АД, що викликані несиметрією параметрів самого двигуна, та збільшити термін експлуатації двигуна за рахунок перерозподілу гріючих втрат у фазах двигуна.

ВИСНОВКИ. На відміну від існуючих теорій та методик компенсації неактивних складових потужності трифазних систем, які передбачають наявність активного компенсатора, пропонується методика компенсації вказаних складових трифазної активної потужності та електромагнітного моменту асинхронного двигуна, що викликані його несиметрією, засобами ЧРЕП на основі крос-векторної теорії потужності.

Проведене математичне моделювання показало ефективність запропонованого підходу, оскільки після включення компенсатора майже на порядок зменшується небажана змінна складова електромагнітного моменту, і, як наслідок, зменшується вібрація та покращуються умови роботи електропривода загалом.

При дослідженні роботи системи компенсації необхідно контролювати не тільки змінну складову трифазної активної потужності та електромагнітного моменту АД, але й гріючі втрати у фазах, оскільки несиметрія параметрів може призвести до суттєвого перегріву окремої обмотки навіть за умови невеликого збільшення сумарних втрат. Застосування запропонованої системи компенсації призводить до зменшення теплового перевантаження окремих фаз, що, у свою чергу, збільшує термін експлуатації двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Омон О.Б. Электромеханические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при несимметрии обмотки статора: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.01. «Электромеханика и электрические аппараты». – Самара, 2009. – 21 с.
2. Прус В.В., Родькин Д.И. Исследование электрических и магнитных свойств электротехнической стали после температурных воздействий // Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета “Проблемы создания новых машин и технологий”. – Кременчуг: КГПУ. – Вып. 2/2000 (9). – С. 228–234.
3. Кумаков Ю.А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36). – С. 27–38.
4. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Крилов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // Техн. электродинамика. – 2004. – Тем. выпуск. – С. 80–91.
5. Чорний А.П., Родькин Д.И., Калінов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: монография. – Кременчуг, 2008. – 244 с.

6. Chumachova A.V., Kalinov A.P. Approach to the compensation of the induction motor parameters asymmetry by means of the frequency-controlled electric drive // XIII International PhD Workshop OWD'2011. Conference Archives PTETiS, Poland. – 2011. – Iss. 25. – PP. 402–406.

7. Peng Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonics and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems // IEEE Trans. Power Electronics. – 1998. – Iss. 13. – № 6. – PP. 1174–1181.

8. Мельников В.В., Калінов А.П., Мамчур Д.Г., Огарь В.О. Экспериментальна оцінка достовірності математичної моделі асинхронного двигуна з несиметрією обмоток статора // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 2 (18). – С. 31–35.

9. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. "Электромеханика". – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.

COMPENSATION OF THE INDUCTION MOTOR PARAMETRIC ASYMMETRY BY MEANS OF THE FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

A. Chumachova, A. Kalinov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: cifirka2008@mail.ru

This paper grounds the necessity of compensation of the variable components of the three-phase induction motor active power and the electromagnetic torque, which are caused by the asymmetry of its parameters. The method of compensation of these components by means of variable-frequency electric drive is proposed. The paper justifies the expressions to identify the corrective voltage for compensation of the variable components of the induction motor active power and electromagnetic torque, which caused by stator phases asymmetry.

Key words: asymmetry, instantaneous power, power components, compensation, induction motor.

REFERENCES

1. Omon O.B. *Electromechanical characteristics of the three-phase induction motor at the asymmetry of the stator windings*: thesis for the scientific degree of Cand.Sc. (Eng.) in the 05.09.01 specialty "Electromechanics and electrical apparatus". – Samara, 2009. – 21 p. [in Russian]

2. Prus V.V., Rodkin D.I. Research of the electric and magnetic properties of the electro-technical steel after thermal effects // *Scientific papers Kremenchuk State Polytechnic University "Problems creation of new machines and technologies"*. – Kremenchuk: KSPU. – № 2/2000 (9). – PP. 228–234. [in Russian]

3. Kumackov Yu.A. Voltage invertors with stepwise modulation and active filtering of the higher harmonics // *Electrical news*. – 2005. – № 6 (36). – PP. 27–38. [in Russian]

4. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Krilov D.S., Sokol E.I. Modern power theories and their application in converting systems of the power electronics // *Technical Electrodynamics*. – 2004. – Them. iss. – PP. 80–91. [in Russian]

5. Chorniy A.P., Rodkin D.I., Kalinov A.P., Vorobeichik O.S. *Monitoring of the electrical motors parameters in the electromechanical systems: Monograph*. – Kremenchuk, 2008. – 244 p. [in Russian]

6. Chumachova A.V., Kalinov A.P. Approach to the compensation of the induction motor parameters asymmetry by means of the frequency-controlled electric drive // XIII International PhD Workshop OWD'2011. Conference Archives PTETiS, Poland. – 2011. – Iss. 25. – PP. 402–406.

7. Peng Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonics and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems // IEEE Trans. Power Electronics. – 1998. – Iss. 13. – № 6. – PP. 1174–1181.

8. Melnikov V.V., Kalinov A.P., Mamchur D.G., Ogar V.O. Experimental evaluation of the mathematical model reliability of the induction motor with stator winding asymmetry // *Electromechanical and energy-saving systems*. – 2012. – Iss. 2 (18). – PP. 31–35. [in Ukrainian]

9. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. *Testing and reliability of the electrical machines: Tutorial for institutes of higher education with "Electromechanics" department*. – M.: Visshaya shkola, 1988. – 232 p. [in Russian]

Стаття надійшла 21.07.2012.

Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.