

УДК 255:29.1

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ У СИЛОВИХ КЛЮЧАХ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗІ СКАЛЯРНИМ КЕРУВАННЯМ
ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

А. В. Костенко, А. П. Калінов, В. П. Колосюк, А. М. Гуржій

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: annakostenko.knu@gmail.com

Обґрунтована необхідність оцінки впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна на тепловий стан силових напівпровідникових ключів автономного інвертора напруги частотно-регульованого електропривода зі скалярним керуванням. Доведено, що несиметрія обмоток статора двигуна призводить до несиметричного розподілу струмів, які протікають через транзистори та зворотні діоди інвертора. Внаслідок цього значно перевищуються втрати в окремих ключах, причому найбільш перевантаженими виявляються зворотні діоди тієї гілки мостової схеми, яка підключається до пошкодженої фази асинхронного двигуна. Показано, що застосування системи компенсації впливу несиметрії асинхронного двигуна дозволяє покращити умови роботи напівпровідникового перетворювача за рахунок перерозподілу втрат на силових ключах автономного інвертора напруги після компенсації впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна.

Ключові слова: перетворювач частоти, силові ключі, IGBT, транзистор, зворотній діод, автономний інвертор напруги, асинхронний двигун.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ КЛЮЧАХ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

А. В. Костенко, А. П. Калинов, В. П. Колосюк, А. Н. Гуржий

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: annakostenko.knu@gmail.com

Обоснована необхідність оцінки впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигателя на теплове состояние силових полупроводниковых ключей автономного инвертора напряжения частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением. Доказано, что несимметрия обмоток статора двигателя приводит к несимметричному распределению токов, протекающих через транзисторы и обратные диоды инвертора. Вследствие этого значительно превышаются потери в отдельных ключах, причем наиболее перегруженными оказываются обратные диоды того плеча, которое подключено к поврежденной фазе асинхронного двигателя. Показано, что применение системы компенсации влияния несимметрии асинхронного двигателя позволяет улучшить условия работы полупроводникового преобразователя за счет перераспределения потерь на силовых ключах автономного инвертора напряжения после компенсации влияния несимметрии обмоток статора асинхронного двигателя.

Ключевые слова: преобразователь частоты, силовые ключи, IGBT, транзистор, обратный диод, автономный инвертор напряжения, асинхронный двигатель.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Енергозберігаючі технології на основі регульованого електропривода (ЕП) все ширше впроваджуються у різноманітні галузі промисловості. В свою чергу, частотно-регульований електропривод (ЧРЕП) зі скалярним керуванням на сьогодні є одним із основних видів регульованого ЕП енергоємних технологічних механізмів. Зазвичай це ЕП середньої та великої потужності, які працюють у тривалому режимі роботи, тому особлива увага приділяється показникам ефективності їх роботи в усталеному режимі. Широке розповсюдження даного виду ЕП зумовлене його високою енергетичною ефективністю, відносно низькою вартістю порівняно із системами векторного керування, можливістю регулювання швидкості у широкому діапазоні як вниз, так і вгору від номінальної, простою виробництва і експлуатації асинхронного двигуна (АД) із короткозамкнутим ротором [1].

Однак, незважаючи на описані переваги ЧРЕП, у процесі багаторічної експлуатації відбувається поступове зниження енергоефективності АД. Однією з причин цього є несиметрія параметрів двигуна. Вона може бути вихідною і з'являтися в результаті недосконалості технології виготовлення, або набутою і бути наслідком довготривалої експлуатації, неодноразових пошкоджень і ремонтів.

Аналіз статистики пошкоджень АД показав, що до основних причин появи набутої магнітної та електричної несиметрії АД належать електричні пошкодження обмоток, що найчастіше є наслідком пробів ізоляції та виникнення виткових замикань [2]. Останні викликають локальний перегрів, що, в результаті може призвести до обриву фази, паралельної секції або до фазного чи міжфазного короткого замикання. Ступінь несиметрії, спричиненої такими пошкодженнями, залежить від кількості паралельних гілок у фазі та елементарних провідників у пазу.

У потужних (≥ 100 кВт) багатополосних двигунах ($2p \geq 4$) обмотки зазвичай виконуються зі значною кількістю паралельних гілок і додатковим розподілом ефективного провідника на декілька елементарних, з'єднаних паралельно. Через це при пошкодженні одного провідника або паралельної гілки двигуни такого типу можуть працювати при зниженому навантаженні в несиметричному режимі досить довго без спрацювання систем захистів, але із суттєвим погіршенням ефективності роботи.

Режим роботи ЧРЕП із несиметричним АД характеризується зниженими показниками ефективності перетворення енергії внаслідок появи змінних скла-

дових споживаної потужності, електромагнітного моменту АД і кутової швидкості, підвищеної вібрацією і підвищення втрат енергії. Наразі у деяких роботах [3, 4] виконуються дослідження і пропонуються стратегії та методи компенсації впливу несиметрії АД на режими його роботи. Дані дослідження розглядають як об'єкт компенсації асинхронний двигун і, відповідно, пропонують методи покращення його енергетичних характеристик, не приділяючи при цьому уваги тепловому стану та режиму роботи силового напівпровідникового перетворювача, який є невід'ємною складовою ЧРЕП. Наразі найпоширенішою структурою ПЧ є структура «некерований випрямляч – ланка постійного струму – автономний інвертор напруги (АІН)». АІН становить трифазну мостову схему, що реалізується на біполярних транзисторах з ізольованим затвором IGBT [5].

У роботі [3] пропонується метод компенсації впливу несиметрії обмоток статора АД на режими його роботи шляхом компенсації змінних складових потужності та електромагнітного моменту АД засобами АІН. Проте несиметрія параметрів АД негативно впливає і на режим роботи ПЧ, оскільки нерівномірне струмове завантаження обмоток фаз двигуна призводить і до перерозподілу струмів у ключах інвертора. У технічній документації до більшості промислових ПЧ указується їх здатність витримувати максимальне струмове перевантаження (130–150 %) протягом нетривалого часу (60 с згідно з інструкцією з експлуатації перетворювача частоти SINAMICS G120D з керуючим модулем: CU240D-2 і силовим модулем: PM250D), а несиметрія статора АД уже в 10 % призводить до струмового перевантаження окремих фаз у 130 %.

Мета роботи – дослідження втрат потужності у силових ключах напівпровідникового перетворювача частоти у складі частотно-регульованого електропривода зі скалярним керуванням при компенсації впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Дослідження роботи і втрат силових ключів АІН при компенсації впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна засобами ЧРЕП виконується на математичній моделі ЕП, силова частина якого приведена на рис. 1. АД у даній схемі представляється математичною моделлю в трифазній системі координат, у якій за допомогою коефіцієнта ε враховується зміна активного опору, індуктивності розсіювання та взаєміндукції внаслідок несиметрії обмоток статора [6]. Згідно із даною моделлю рівняння електричної рівноваги АД із коротко замкнутим ротором має вигляд:

$$\begin{cases} \bar{U}_s = \bar{i}_s R_s \varepsilon + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt}; \\ 0 = \bar{i}_r R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де $\bar{U}_s = [u_a \ u_b \ u_c]^T$ – вектор напруг статора; $\bar{i}_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ – вектор струму статора; $\bar{i}_r = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$ – вектор струму ротора; $\bar{\Psi}_s = [\Psi_{sa} \ \Psi_{sb} \ \Psi_{sc}]^T$ – вектор потокозчеплення статора; $\bar{\Psi}_r = [\Psi_{ra} \ \Psi_{rb} \ \Psi_{rc}]^T$ – вектор потокозчеплення ротора; R_s, R_r – активні опори обмоток статора та ротора.

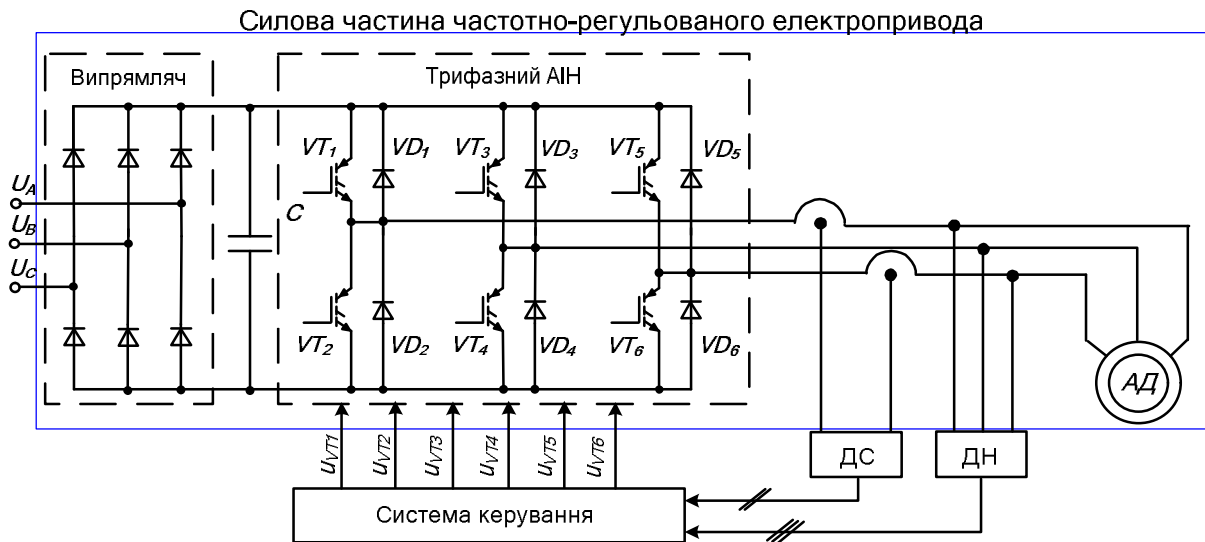


Рисунок 1 – Блок-схема силової частини ЧРЕП

Згідно з [3] компенсація відбувається при формуванні на виходах (АІН) кривих трифазної напруги специфічної форми, які призводять до формування споживаної потужності та електромагнітного моменту без змінних складових, спричинених несиметрією обмоток. Таким чином, у даній системі перет-

ворювач частоти для АД є не тільки джерелом напруги, а й джерелом компенсаційних впливів, тобто зникає необхідність у будь-яких додаткових активних чи пасивних компенсаторах. Блок-схема системи керування (СК) ЧРЕП із компенсацією впливу несиметрії обмоток статора АД показана на рис. 2.

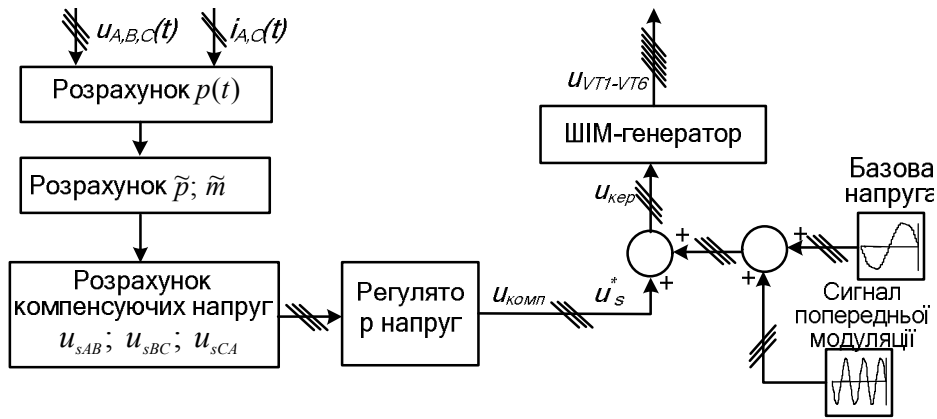


Рисунок 2 – Блок-схема системи керування ЧРЕП із компенсацією впливу несиметрії обмоток статора АД

У даній системі керування (СК) сигнали, що подаються на модуль широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) (рис. 3), є сумою базової трифазної напруги завдання і системи компенсуючих напруг (рис. 4).

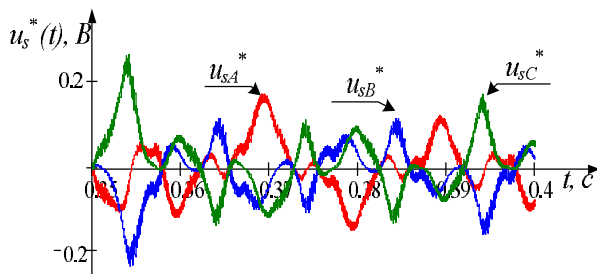


Рисунок 3 – Компенсуючі напруги

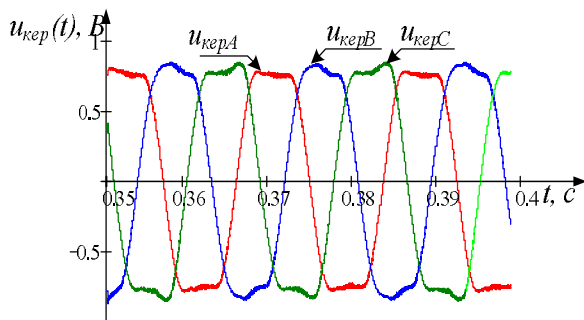


Рисунок 4 – Сигнали напруг керування ПЧ, які є сумою базової трифазної напруги завдання і системи компенсуючих напруг

На основі методу розрахунку компенсаційних струмів згідно із крос-векторною теорією миттєвої потужності розраховуються компенсуючі напруги залежно від того, що є першочерговою задачею. У цьому випадку буде відрізнятися методика розрахунку компенсуючих впливів для оцінки компенсації змінної складової споживаної потужності чи електромагнітного моменту.

Для випадку компенсації змінної складової трифазної споживаної потужності \tilde{p} компенсуючі напруги розраховуються за виразом [3]:

$$\vec{u}_{ps}^* = \frac{\tilde{p}}{i} \frac{\vec{i}_s}{i} + \frac{\vec{q} \times \vec{i}_s}{i \cdot i}, \quad (2)$$

де $i = \sqrt{i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2}$ – модуль вектора струмів статора, $\vec{q} = [q_{sa} \ q_{sb} \ q_{sc}]^T$ – вектор миттєвої реактивної потужності.

Для випадку компенсації змінної складової електромагнітного моменту \tilde{m} за аналогією із трифазною потужністю у електромагнітному моменті виділено «активну» \tilde{m}_p та «реактивну»

$\tilde{m}_q = [m_{sa} \ m_{sb} \ m_{sc}]^T$ складові:

$$\vec{u}_{ms}^* = \frac{\tilde{m}_p}{i} \frac{\vec{i}_s}{i} + \frac{\vec{m}_q \times \vec{i}_s}{i \cdot i}. \quad (3)$$

У виразах (2) і (3) складові \tilde{p}/i і \tilde{m}_p/i та \vec{q}/i й \vec{m}_q/i визначають бажані амплітудні значення гармонік компенсуючої напруги, а складова \vec{i}_s/i – відносно значення струму фази статора, що визначає частоту та фазу компенсуючої напруги відповідної фази АД.

Дослідження втрат у силових ключах у силових ключах ЧРЕП із скалярним керуванням при корекції режиму роботи несиметричного АД. Втрати потужності силового ключа складаються із втрат, що виникають на інтервалах перемикання ключа із вимкненого стану у ввімкнене (динамічні втрати ввімкнення) і навпаки (динамічні втрати вимкнення), а також статичних втрат, викликаних струмом, що протікає через ключ у ввімкненому стані, тобто струмом навантаження [7].

Таким чином, статичні втрати потужності силового ключа АІН можуть бути розраховані за миттєвими значеннями струму, що протікає через даний ключ [8]:

$$\Delta P_{VT} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{VT}^2(t) r_{VT} dt, \quad (4)$$

$$\Delta P_{VD} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{VD}^2(t) r_{VD} dt, \quad (5)$$

де $i_{VT}(t)$, $i_{VD}(t)$ – миттєві значення струму через транзистори та діоди; r_{VT} , r_{VD} – опори транзистора та діода у ввімкненому стані.

Дослідження режимів роботи ЧРЕП зі скалярним керуванням при різних ступенях несиметрії обмоток статора АД було проведено для двигуна 4A112M4Y3 із паспортними даними: $P_n=5,5$ кВт; $n_n=1445$ об/хв; $\cos\varphi=0,85$; $\eta=85,5$ %; $R_s=1,036$ Ом; $R_r=0,787$ Ом; $L_{so}=4,75 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_{ro}=7,94 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_\mu=0,171$ Гн. Автономний інвертор напруги побудований на транзисторах з опором $r_{VT}=0,05$ Ом і діодах з опором $r_{VD}=0,073$ Ом.

Результати досліджень указують, що застосування системи компенсації впливу несиметрії обмоток статора АД призводить до суттєвого зменшення середньоквадратичного значення змінної складової трифазної активної потужності та, як наслідок, змінної складової електромагнітного моменту.

Так, при несиметрії у фазі А 10 % і в фазі С 7 % при роботі під номінальним навантаженням середньо-квадратичне значення змінної складової електромагнітного моменту до компенсації складало 9 % від номінального значення моменту.

Після ввімкнення системи компенсації це значення знизилось до 1,2 % (рис. 5). У свою чергу, при зниженні змінної складової електромагнітного моменту знижується і змінна складова кутовою частотою обертання, тобто зменшується вібрація АД.

Крім того, застосування даної СК призводить до перерозподілу струмового завантаження за фазами АД, тобто відбувається симетрування фазних струмів двигуна (рис. 6).

Для дослідження режиму роботи напівпровідникових елементів інвертора при несиметрії АД був проведений розрахунок електричних втрат у силових ключах АІН до і після компенсації для різних випадків одно- і багатofазної несиметрії (рис. 7–9). Режим налаштування СК на компенсацію змінної складової

трифазної споживаної потужності позначений «компенсація р», а режим компенсації змінної складової електромагнітного моменту «компенсація m».

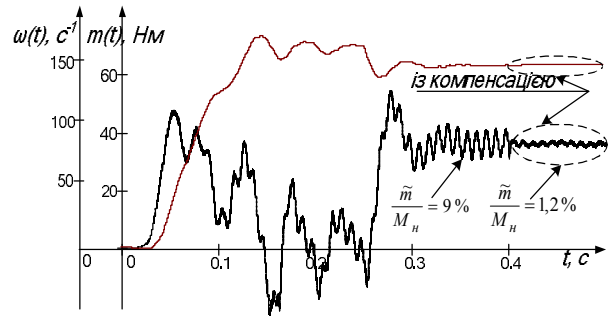


Рисунок 5 – Електромагнітний момент та кутова частота обертання АД при несиметрії у фазі А 10 % і в фазі С 7 % до і після ввімкнення компенсатора

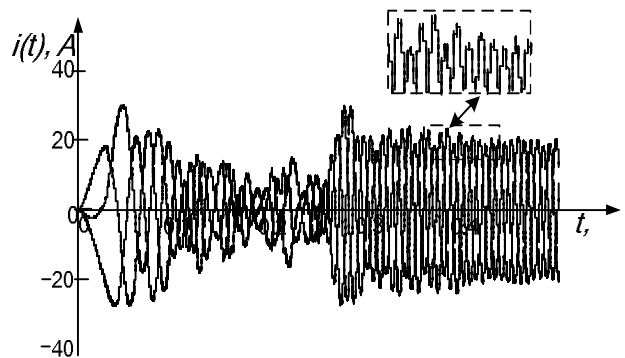


Рисунок 6 – Струми статора АД при несиметрії у фазі А 10 % і в фазі С 7 % до і після ввімкнення компенсатора

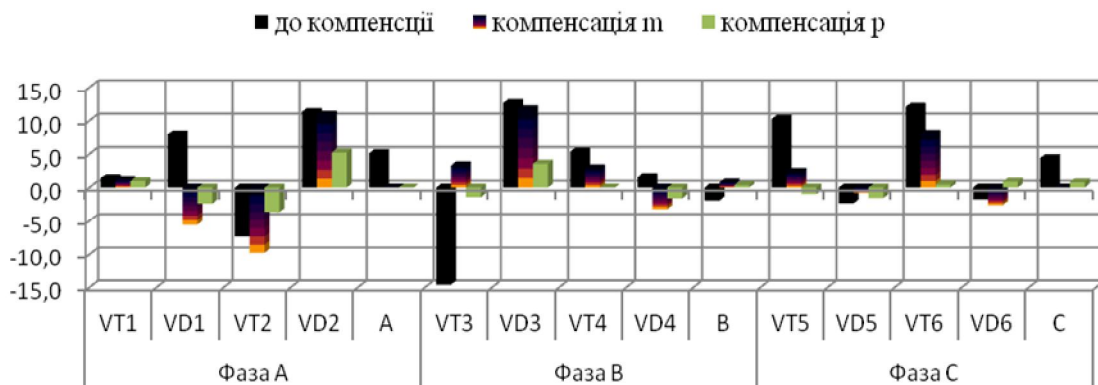


Рисунок 7 – Відхилення втрат потужності від втрат у симетричному режимі в силових транзисторах і діодах АІН при несиметрії в фазі А 5 % до і після компенсації

Як свідчать результати досліджень, несиметрія обмоток статора АД суттєво негативно впливає на режим роботи силових напівпровідникових ключів АІН, оскільки несиметричне струмове завантаження фаз АД призводить до несиметричного розподілу струмів, що протікають через транзистори та зворотні діоди інвертора.

Збільшені прямі струми протягом тривалого часу

призводять до значного перевищення втрат в окремих ключах АІН, причому найбільш перевантаженими виявляються зворотні діоди тієї гілки мостової схеми, яка підключається до пошкодженої фази АД. Так, при несиметрії однієї з фаз у 5 %, іншої – у 3 % втрати потужності в окремих зворотних діодах перевищують номінальні на 30 %, а втрати потужності на транзисторах – майже на 20 %.

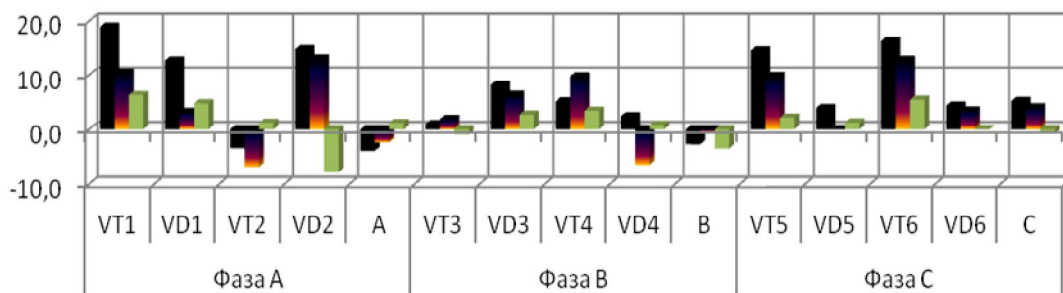


Рисунок 8 – Відхилення втрат потужності від втрат у симетричному режимі в силових транзисторах і діодах АІН при несиметрії в фазі А 5 % і в фазі С 3 % до і після компенсації

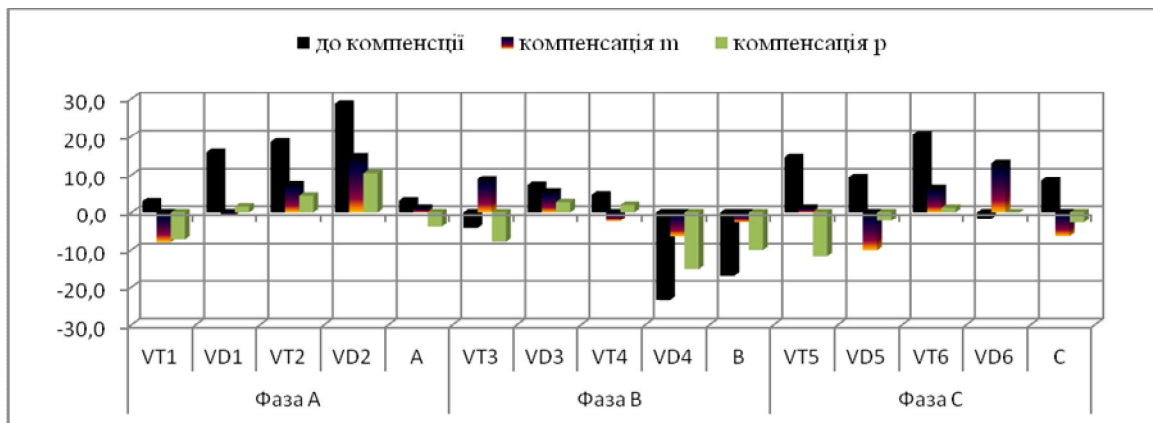


Рисунок 9 – Відхилення втрат потужності від втрат у симетричному режимі в силових транзисторах і діодах АІН при несиметрії в фазі А 10 % і в фазі С 7 % до і після компенсації

Аналіз розрахованих втрат з і без компенсації впливу несиметрії обмоток статора АД показує, що за рахунок компенсації суттєво знижується значення втрат в найбільш перевантажених ключах інвертора, і несуттєво підвищується у недовантажених, наближуючись за значенням до рівня втрат при симетричному АД, тобто відбувається перерозподіл струмів, і, як наслідок, втрат у вентилях АІН. Причому варто відмітити, що, з точки зору зменшення теплового перевантаження окремих фаз кращі результати показує робота ЕП із налаштуванням системи керування на компенсацію змінних складових споживаної потужності, але при цьому знижується рівень компенсації змінної складової електромагнітного моменту.

ВИСНОВКИ. Доведено, що несиметрія обмоток статора АД негативно впливає на режим роботи силових напівпровідникових ключів автономного інвертора напруги, оскільки несиметричне струмове завантаження фаз двигуна призводить до несиметричного розподілу струмів, що протікають через транзистори та зворотні діоди інвертора.

Дослідження роботи системи компенсації впливу несиметрії АД довели, що застосування даної системи дозволяє покращити умови роботи напівпровідникового перетворювача за рахунок перерозподілу втрат на силових ключах автономного інвертора напруги після компенсації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Прус В.В., Кирьянов О.Ф., Гераскин А.С. Оценка эксплуатационных параметров отремонтированных асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 1/2002 (12). – С. 174–179.
3. Zagirnyak M., Kalinov A., Chumachova A. Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor // IEEE Conference publications. EUROCON 2013, 1–4 July 2013, Croatia. – PP. 1033–1037.
4. Мельников В.О., Калінов А. П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 85–86.
5. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 416 с.
6. Мельников В. В., Калінов А.П., Мамчур Д.Г., Огарь В.О. Експериментальна оцінка достовірності математичної моделі асинхронного двигуна з несиметрією обмоток статора // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 2(18). – С. 31–35.
7. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом Додэка–XXI, 2005. – 384 с.
8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

RESEARCH OF AN ENERGY LOSS IN POWER KEYS OF FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE WITH SCALAR CONTROL UNDER THE COMPENSATION OF AN INDUCTION MOTOR UNSYMMETRY**A. Kostenko, A. Kalinov, V. Kolosiuk, A. Gurzhii**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: annakostenko.knu@gmail.com

It is grounded the necessity of an assessment of the impact of induction motor asymmetrical stator on the thermal state of power semiconductor keys in the autonomous voltage inverter of the variable frequency electric drive with scalar control. It is proved that asymmetry of motor stator windings leads to asymmetric distribution of currents flowing through the transistors and reverse diodes of the inverter. As a result, it significantly exceeds the losses in some keys, and the most overloaded reverse diodes are those, which are in that branch that is connected to the damaged phase of induction motor. It is shown that application of the compensation of induction motor asymmetry improves working conditions of the semiconductor converter through the redistribution of power losses in autonomous voltage inverter keys after compensation of the impact of induction motor asymmetrical stator windings.

Key words: frequency converter, power key, IGBT, transistor, reverse diode, autonomous voltage inverter, induction motor.

REFERENCES

1. Usoltsev, A.A. (2006), *Chastotnoe upravlenie asinhronnyimi dvigatelyami: Uchebnoe posobie*, [Frequency control of asynchronous motors: a tutorial], SPbGU ITMO, St. Petersburg, Russia.
2. Prus, V.V., Kiryanov, O.F. and Heraskyn, A.S. (2002), "Evaluation of work parameters of repaired induction motors". *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 1 (12), pp. 174–179
3. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Chumachova, A. (2013), "Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor", *IEEE Conference publications. EUROCON 2013*, 1–4 July 2013, Croatia, pp. 1033–1037.
4. Melnikov, V.O. and Kalinov, A.P. (2012), "Improving the energy characteristics of electric drives with vector control through compensation of the parametric asymmetry of induction motors", *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 3, pp. 85–86.
5. Semenev, B.Yu. (2011), *Silovaya elektronika: professionalnyie resheniya* [Power Electronics: professional solutions], SOLON-PRESS, Moscow, Russia.
6. Melnikov, V.O. Kalinov, A.P., Mamchur, D., Ogar, V.O. (2012), "Experimental evaluation of the reliability of mathematical model of induction motor stator windings asymmetry", *Electromechanical and energy saving systems*, no. 2(8), pp. 31–35.
7. Voronin, P.A. (2005), *Silovie poluprovodnikovie kluchi: semeystva, harakteristiki, primenenie* [Power semiconductor switches: family, features, application], Izdatelskiy dom Dodeka–XXI, Moscow, Russia.
8. Meleshin, V.I. (2006), *Tranzistornaia preobrazovatelnaia tehnik*a [Transistor converter equipment], Tehnosfera, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 30.06.2015.