

УДК 621.313.333

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

**А. П. Калінов, В. П. Ляшенко, А. П. Оксаніч, В. О. Огарь, В. В. Лотоус**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

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

Проведено аналіз різних систем для випробування асинхронних двигунів під навантаженням з використанням перетворювача частоти, який дозволяє вибрати найбільш раціональний варіант з урахуванням конкретних умов виробництва. Досліджено специфіку використання машини подвійного живлення в генераторному режимі для випробувань під навантаженням асинхронних двигунів з різною кількістю полюсів. Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують можливість створення режиму навантаження для асинхронних двигунів з різною кількістю полюсів з використанням машини подвійного живлення при рекуперації як активної, так і реактивної потужності в мережу живлення.

**Ключові слова:** машина подвійного живлення, система навантаження, асинхронний двигун, перетворювач частоти, рекуперація енергії.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

**А. П. Калинов, В. П. Ляшенко, А. П. Оксанич, В. А. Огарь, В. В. Лотоус**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

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

Проведенный анализ различных систем для испытания асинхронных двигателей под нагрузкой с использованием преобразователя частоты позволяет выбрать наиболее рациональный вариант с учетом конкретных условий производства. Исследована специфика использования машины двойного питания в генераторном режиме для испытаний под нагрузкой асинхронных двигателей с различным количеством полюсов. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность создания режима нагружения для асинхронных двигателей с различным количеством полюсов с использованием машины двойного питания при рекуперации как активной, так и реактивной мощности в питающую сеть.

**Ключевые слова:** машина двойного питания, система нагружения, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, рекуперация энергии.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Визначення технічного стану асинхронних двигунів (АД) є можливим при використанні різноманітних методів діагностики [1, 2] та методів випробувань [3, 4].

Для АД одним з видів випробувань є випробування під навантаженням [3, 4]. На відміну від непрямих методів визначення енергетичних характеристик [5] і навантажувальної здатності, випробування під навантаженням максимально наближені до реальних умов експлуатації АД [3]. У деяких технологічних механізмах за технічними умовами заміна електродвигунів є дуже трудомісткою. Тому дуже важливо, щоб АД перед установкою пройшов перевірку на відповідність номінальним показникам і вимогам надійності, які будуть гарантувати певний проміжок безвідмовної роботи.

В сучасних електрогенеруючих установках машини подвійного живлення (МПЖ) на базі АД з фазним ротором і перетворювача частоти (ПЧ) в колі ротора займають певне місце в вітрогенераторних системах. При змінній частоті обертання валу використання МПЖ дозволяє досягти високих енергетичних показників. Використання ПЧ для задач випробувань АД суттєво розширює можливості створення різних тестових впливів і випробувальних систем. В умовах невеликих підприємств розробка спеціального і унікального обладнання не завжди доцільна. При цьому використання в випробувальних системах ПЧ загальнопромислового призначення істотно скорочує час і спрощує впровадження сучасних випробувальних стендів. Тому

актуальною є задача дослідження особливостей використання МПЖ в генераторному режимі для випробувань під навантаженням АД з різним числом пар полюсів.

Метою роботи є експериментальне обґрунтування можливості використання машини подвійного живлення в генераторному режимі для дослідження під навантаженням асинхронних двигунів з різною кількістю пар полюсів.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для реалізації випробувань під навантаженням з використанням навантажувальної машини є декілька методів які регламентуються стандартом ІЕС 60034-2-1:200 [3]. В якості навантажувальної машини можна використовувати машину змінного струму або постійного струму. При випробуваннях під навантаженням можливо використовувати схеми з рекуперацією енергії в мережу, або без неї. Випробування під навантаженням без віддачі енергії в мережу для машин середньої та великої потужності характеризуються простотою реалізації, але непродуктивними витратами електроенергії.

Відомі схеми з рекуперацією енергії в мережу живлення будуються на основі навантажувального генератора постійного струму. Рекуперація здійснюється або з використанням додаткового електромашинного каскаду, який включає двигун постійного струму і синхронний генератор, або з використанням тиристорного інвертора напруги.

Схема навантаження АД з рекуперацією із використанням електромеханічного каскаду характери-

зується низьким ККД всієї випробувальної установи, великими габаритами і капітальними витратами на реалізацію. При використанні тиристорного інвертора напруги можливі суттєві викривлення напруги мережі живлення підприємства при випробуваннях.

Використання стандартного устаткування, зокрема перетворювачів частоти, дозволяє зменшити час розробки, підвищити надійність випробувальної станції. Додатково, крім випробувань під навантаженням використання перетворювача частоти дозволяє вирішити задачі ідентифікації електромагнітних параметрів, діагностики, визначення втрат в сталі з поділом їх за складовими і механічними втрат потужності, та інше. Таким чином, дослідження існуючих систем навантажувальних випробувань АД і технічних можливостей сучасних перетворювачів частоти показало актуальність дослідження систем навантаження з їх використанням.

За результатами аналізу систем випробувань під навантаженням, було обґрунтовано використання двох основних структур побудови систем навантажувальних випробувань з використанням перетворювачів частоти: система навантаження з рекуперацією енергії у коло постійного струму ПЧ (рис. 1) і система з рекуперацією енергії в мережу змінного струму (рис. 2).

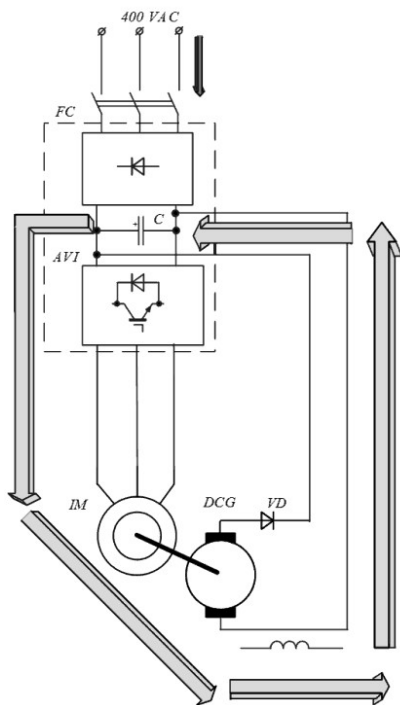


Рисунок 1 – Система навантаження АД з генератором постійного струму з рекуперацією енергії в коло постійного струму

При використанні наведеної схеми (рис. 1) з мережі живлення під час випробувань під навантаженням споживається тільки енергія втрат у АД, генератора постійного струму (ГПТ) і автономного інвертора напруги (АІН). Управління системою випробувань під навантаженням здійснюється шляхом впливу на струм обмотки збудження (ОЗ) ГПТ з використанням транзисторного або тиристорного перетво-

рювача (ТП). Зміна струму збудження призводить до зміни ЕРС і, відповідно, струму ГПТ і моменту навантаження АД. Енергія, яка генерується ГПТ рекуперується в ланку постійного струму ПЧ, і, знову споживається АД.

Перевагою наведеної системи навантажень є простота побудови та керування режимами навантаження.

Недоліком наведеної системи є необхідність використання ГПС у якості навантажувальної машини, що збільшує капітальні витрати, та узгодження її параметрів із параметрами ПЧ.

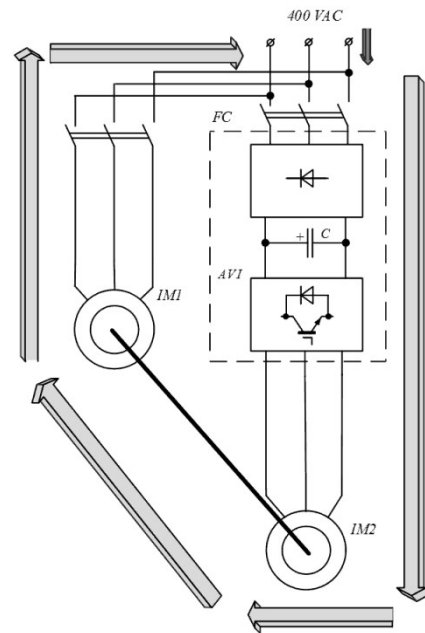


Рисунок 2 – Схема навантаження АД з рекуперацією енергії в мережу змінного струму

Розвитком системи навантаження АД з рекуперацією енергії у коло постійного струму ПЧ є система (рис. 2), де використовується АД у якості навантажувальної машини. При побудові такої системи ПЧ1 працює в режимі скалярного частотного управління, а ПЧ2 працює в режимі векторного керування зі стабілізацією електромагнітного моменту. Двигун АД1 працює в двигунному режимі, а АД2 – в генераторному з постійним моментом на валу, створюючи необхідне навантаження для двигуна АД1. Об'єднання ПЧ1 та ПЧ2 по шині постійного струму дозволяє передавати енергію, що рекуперується двигуном АД2, через інвертор ПЧ1 на двигун АД1. Таким чином, основний потік енергії циркулює по каналу ПЧ1-АД1-АД2-ПЧ2-ПЧ1. При цьому з мережі живлення споживається тільки потужність втрат в перетворювачах частоти та асинхронних машинах.

Перевагою наведеної системи навантажень є простота побудови та керування режимами навантаження.

Недоліком наведеної системи є відносно високі капітальні витрати за рахунок використання двох перетворювачів частоти та необхідність фільтрації напруги на випробувальному двигуні.

Навантаження АД методом модуляції частоти полягає у створенні змінного режиму роботи АД без

з'єднання його з навантажувальною машиною (рис. 3). У такому режимі АД циклічно переходить із двигунного режиму у гальмівний за рахунок модуляції частоти напруги живлення. Максимальне миттєве значення моменту при модуляції має бути нижче максимального моменту двигуна для того, щоб двигун працював на стійкій частині навантажувальної характеристики. Цей метод найбільш придатний для двигунів з високою інерцією, оскільки чим вище інерція, тим менша потрібна амплітуда модуляції і частоти (зазвичай 1–2 Гц). Для двигунів з малою інерцією може виникнути необхідність підвищити інерцію за допомогою додаткової махової маси на валу. При використанні цього методу навантаження, енергія, що рекуперується у коло постійного струму ПЧ накопичується у конденсаторі, а потім знову споживається при переході АД у двигунний режим. Аналіз режимів роботи при використанні методу модуляції частоти зручно проводити в частотній області за допомогою дискретної згортки [6].

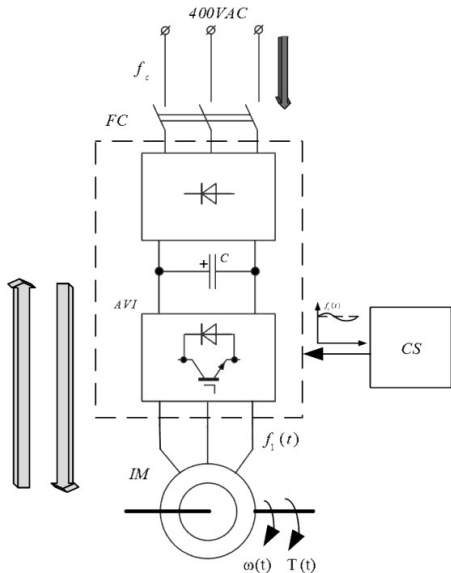


Рисунок 3 – Схема навантаження АД з використанням методу частотної модуляції

Відсутність навантажувальної машини є перевагою системи навантаження з використанням методу частотної модуляції, а створення його непрямым способом є її недоліком.

При використанні схеми (рис. 4) з мережі живлення під час випробувань під навантаженням споживається повна енергія АД2, яка рекуперується в мережу змінного струму за допомогою АД1. При цьому, за допомогою ПЧ частота АД2 підвищується на величину  $50(1+s_i)$ , де  $s_i$  – номінальне ковзання АД. При цьому АД1 працює в режимі рекуперативного гальмування паралельно з мережею живлення [4].

Перевагою наведеної системи навантажень є простота, відносно невеликі капітальні затрати, рекуперация енергії в мережу без додаткових перетворювачів, що обумовлює її високу якість.

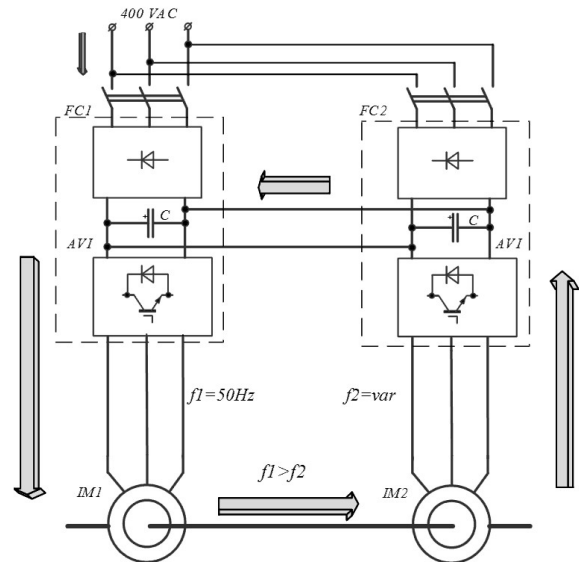


Рисунок 4 – Схема навантаження з рекуперцією енергії у коло постійного струму із використанням навантажувального АД

Недоліком наведеної системи є реалізація випробувань не з номінальною частотою живлення АД. Також генераторний режим АД не регламентований державними стандартами.

Схема (рис. 5) реалізується шляхом підключення статора МПЖ напряму до мережі, ротору – через ПЧ до мережі живлення, і валу – до випробуваного АД1. Система дозволяє навантажувати випробуваний двигун АД1 і рекуперувати енергію безпосередньо в мережу з кола статора АД2 без перетворювачів. Регулювання частоти струму ротора реалізується із використанням ПЧ, що дозволяє регулювати навантаження АД1 [8].

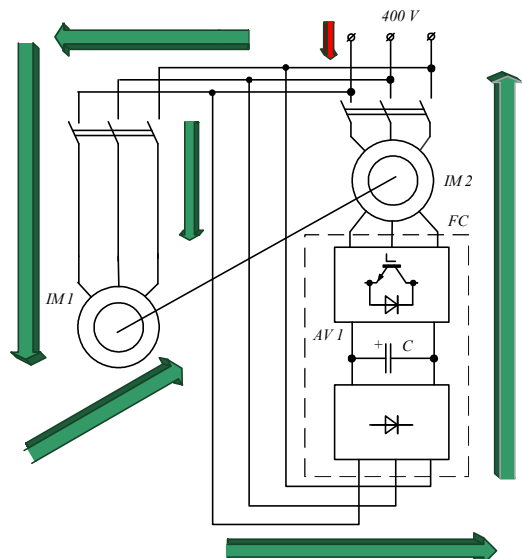


Рисунок 5 – Схема навантаження АД із використанням машини подвійного живлення

Перевагами наведеної системи навантажень є рекуперация енергії в мережу без додаткових перетворювачів, що обумовлює її високу якість, а також можливість використання для випробування АД із різною кількістю пар полюсів [7, 8].

Недоліками наведеної системи є використання АД з фазним ротором у якості навантажувальної машини, використання ПЧ із можливістю регулювання фази вихідної напруги, вибір ПЧ за струмом ротора АД, який зазвичай більший за струм статора, та можливість виникнення резонансних режимів.

Таким чином, найбільш перспективними системами випробувань АД під навантаженням можна вважати систему навантаження АД із використанням машини подвійного живлення та систему навантаження з рекуперацією енергії у коло постійного струму ПЧ із використанням навантажувального АД. Остання система випробувань при цьому має певні переваги, а саме: можливість використання загальнопромислових перетворювачів частоти, що значно зменшує терміни розробки та впровадження системи навантаження. Також у системі навантаження з рекуперацією енергії у коло постійного струму із використанням навантажувального АД можливо використовувати режим опосередкованого навантаження при використанні методу модуляції частоти.

Працездатність та ефективність вказаних систем навантаження потребує експериментального підтвердження у лабораторних умовах.

Випробування АД з використанням МПЖ дозволяє навантажувати випробуваний двигун і рекуперувати енергію безпосередньо в мережу живлення з кола статора АД з фазним ротором без проміжних перетворювачів. Регулювання рівня навантаження випробуваного АД здійснюється зміною частоти і амплітуди напруги живлення кола ротора. До переваг системи навантаження з МПЖ можна віднести використання в колі ротора односпрямованого ПЧ загальнопромислового призначення, що спрощує і зменшує вартість системи, а також високу якість енергії, яка рекуперується в мережу живлення.

Особливістю випробувань АД під навантаженням є те, що на випробувальній ділянці з використанням одного навантажувального АД з фазним ротором можуть проходити випробування АД різної потужності і з різним числом пар полюсів. Робота МПЖ в гальмівному режимі з рекуперацією енергії в мережу живлення в разі розбіжності кількості пар полюсів навантажувальної і випробуваної машини можлива завдяки регулюванню частоти живлення кола ротора АД з фазним ротором. Рівень навантаження випробуваного АД при цьому визначається його ковзанням:

$$s(f_{rIM2}) = 1 - \frac{p_{IM1}}{p_{IM2}} \frac{f_{sIM2} + f_{rIM2}}{f_{sIM1}}, \quad (1)$$

де  $s$  – ковзання випробуваного двигуна ІМ1;  $p_{IM1}, p_{IM2}$  – відповідно кількість пар полюсів випробуваного двигуна (ІМ1) і навантажувальної машини (ІМ2);  $f_{sIM1}, f_{sIM2}$  – відповідно частоти напруги живлення статорів ІМ1 і ІМ2;  $f_{rIM2}$  – частота напруги живлення ротора ІМ2.

Так, відповідно до (1), при можливості регулювання частоти ІМ1 і кількості пар полюсів  $p_{IM1} = 2, p_{IM2} = 3$  залежність ковзання ІМ1 від частоти ( $f_{rIM2}$ ) напруги живлення ротора ІМ2 представлена на рис. 6. При відсутності можливості регулювання частоти ІМ1 ( $f_{sIM1} = f_{sIM2} = 50 \text{ Hz}$ ) частота напруги живлення ротора ІМ2 повинна знаходитися в діапазоні:  $0 < f_{rIM2} < 25 \text{ Hz}$ .

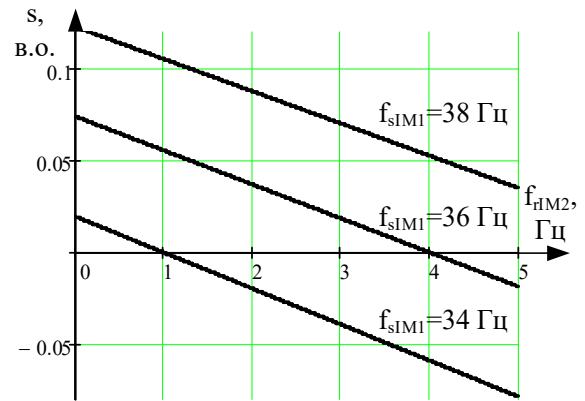


Рисунок 6 – Залежність ковзання ІМ1 від частоти напруги живлення ротора ІМ2 ( $f_{sIM2} = 50 \text{ Hz}$ )

З метою дослідження особливостей використання МПЖ в генераторному режимі при випробуваннях під навантаженням АД з різним числом пар полюсів були проведені експериментальні дослідження по схемі, наведеній на рис. 7.

Випробуваний двигун ІМ1 отримує живлення від ПЧ UZ1, а коло ротора навантажувальної машини ІМ2 – від ПЧ UZ2. Для фільтрації напруги на виході ПЧ UZ2 використовується LC-фільтр (L1, C1-C3). З використанням понижуючого трансформатора TV1 знижується рівень напруги кола ротора ІМ2. Струми і напруги в колах ІМ1 і ІМ2 контролюються відповідно датчиками струму SC1-SC3 і датчиками напруги SV1-SV4. Сигнали з датчиків струму і напруги надходять на аналого-цифровий перетворювач ADC для оцифровки і передачі даних в комп'ютер.

Відповідно до (1) і (рис. 6) необхідно встановити певний початкове значення  $f_{rIM2}$ , яке забезпечить роботу ІМ1 з мінімальним навантаженням. Подальшим зменшенням частоти  $f_{rIM2}$  струму ротора ІМ2 необхідно домогтися відповідного рівня навантаження ІМ1. Тому при проведенні випробувань особливу увагу слід приділяти синхронізації напруг при підключенні статора ІМ2 в мережу живлення.

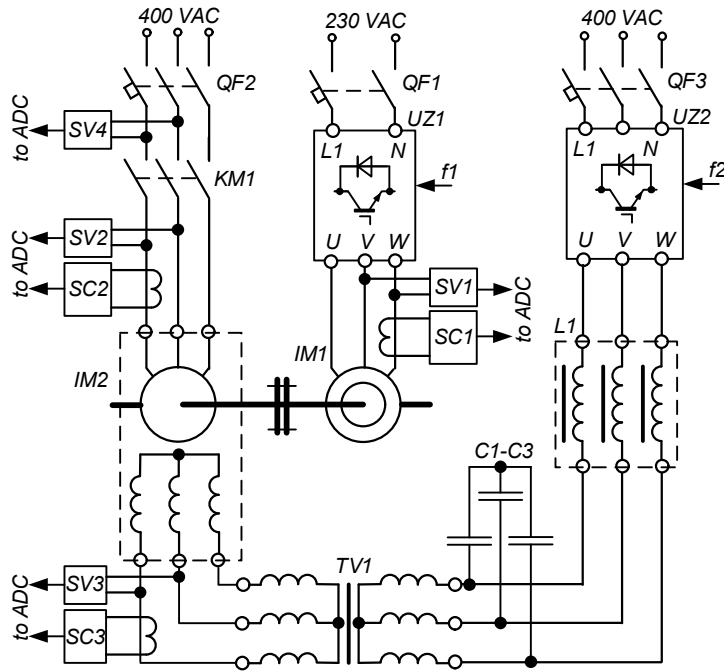


Рисунок 7 – Схема експериментальної установки для дослідження випробувань під навантаженням АД з використанням МПЖ

Отримані експериментально фазний струм  $i_{sc1}(t)$  і міжфазна напруга  $u_{sv1}(t)$  випробуваного двигуна IM1 (рис. 8) і фазний струм  $i_{sc2}(t)$  і міжфазна напруга  $u_{sv2}(t)$  статора навантажувальної машини IM2 (рис. 9) підтверджують можливість створення навантажувального режиму з рекуперацією як активної, так і реактивної потужності в мережу живлення (рис. 10).

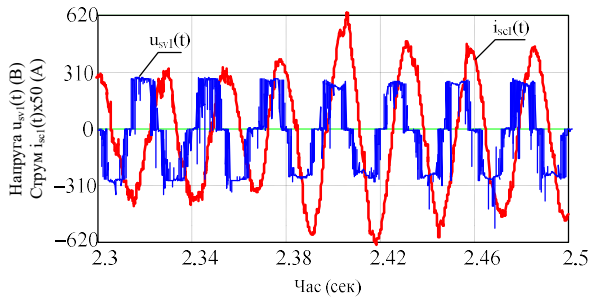


Рисунок 8 – Фазний струм  $i_{sc1}(t)$  і міжфазна напруга  $u_{sv1}(t)$  випробуваного двигуна IM1

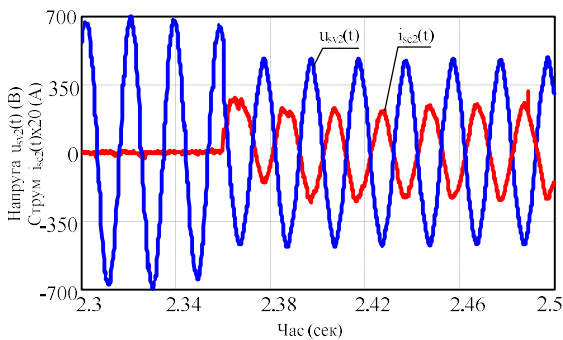


Рисунок 9 – Фазний струм  $i_{sc2}(t)$  і міжфазна напруга  $u_{sv2}(t)$  статора навантажувальної машини IM2

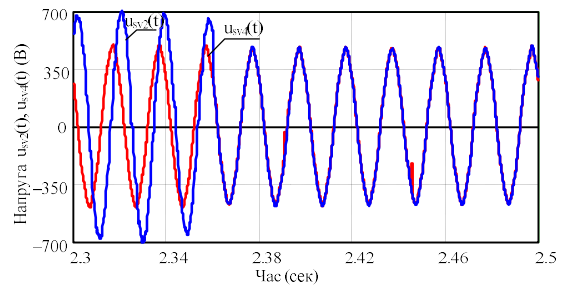


Рисунок 10 – Напруга статора МПЖ  $u_{sv2}(t)$  та напруга мережі  $u_{sv4}(t)$

**ВИСНОВКИ.** Досліджено особливості використання машини подвійного живлення в генераторному режимі для випробувань під навантаженням асинхронних двигунів з різною кількістю пар полюсів. Проведені експериментальні дослідження підтверджують можливість створення навантажувального режиму з використанням машини подвійного живлення для асинхронних двигунів з різною кількістю пар полюсів з рекуперацією як активної, так і реактивної потужності в мережу живлення.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. M. Zagirnyak, D. Mamchur, A. Kalinov (2010). Elimination of the Influence of Supply Mains Low-Quality Parameters on the Results of Induction Motor Diagnostics, XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Rome. IEEE Catalog Number: CFP1090B-CDR. ISBN: 978-1-4244-4175-4. Library of Congress: 2009901651. RF-009474, 6 p.
2. M. Zagirnyak, A. Kalinov, O. Bratash (2014). Estimation of the efficiency of vibration power application for induction motor diagnostics, Przegląd

Elektrotechniczny (Electrical Review), R. 90 Nr. 12. pp. 176–179.

3. IEC 60034-2-1:2007 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).

4. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112™-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996). 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.

5. M. Zagirnyak, V. Ogar, V. Chenchevoi (2014). Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties, *Acta Technica*. – Iss. 59/2014 (1). – PP. 25–47. – ISSN 0001–7043.

6. M. Zagirnyak, A. Kalinov, M. Maliakova (2011). An algorithm for electric circuits calculation based on

instantaneous power component balance, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 87, Nr. 12b, pp. 212–215.

7. Cardenas, R., Pena, R., Alepuz, S., Asher, G. (2013). Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications, *IEEE Trans. on Industrial Electron.*, Vol. 60, no. 7, pp. 2776–2798.

8. Seidel, K. Macrophytes and water purification, in: *Biological Control of Water Pollution*. T. Tourbier, and R.W. Pierson, eds., Pennsylvania University Press. Philadelphia. – 1996. – pp. 109-122.

9. Peresada, S., Tilli, A., Tonielli, A. (2003). Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of the Doubly-Fed Induction Machine, *IEEE Trans. on Control Systems Technol.*, Vol. 11, no. 6, pp. 875–888.

## RESEARCH ON INDUCTION MOTOR LOADING SYSTEM USING DOUBLE-SUPPLIED MACHINE

A. Kalinov, V. Lyashenko, A. Oksanich, V. Ogar, V. Lotous

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: andrii.kalinov@gmail.com

**Purpose.** To provide an experimental grounding of the possibility to use a double-supplied machine in the generator mode for the loading of induction motors with different number of pole pairs study. **Methodology.** The analysis of different systems for induction motors testing under load with the usage of the frequency converter makes it possible to choose the most rational option, taking into account the specific production conditions. **Results.** The features of the use a double-supplied machine in the generator mode for testing the induction motors with different number of pole pairs under the load have been investigated. **Originality.** According to the results of the load testing systems analysis, the usage of two basic structures for the construction with load testing systems using frequency converters has been grounded: a system of loading with energy recovery in the frequency converter DC circuit and an energy recovery system in the AC network using a double-supplied machine. **Practical value.** The performed experimental studies confirm the possibility of creating induction motors with different number of pole pairs loading regime using a double-supplied machine with the recovery of both active and reactive power to the power supply. References 9, figures 10.

**Key words:** double-supplied machine, loading system, induction motor, frequency converter, energy recovery.

## REFERENCES

1. Zagirnyak, M., Mamchur, D., Kalinov, A. (2010), Elimination of the Influence of Supply Mains Low-Quality Parameters on the Results of Induction Motor Diagnostics, *XIX International Conference on Electrical Machines*, ICEM 2010, Rome. IEEE Catalog Number: CFP1090B-CDR. ISBN: 978-1-4244-4175-4. Library of Congress: 2009901651. RF-009474, 6 p.

2. Zagirnyak, M., Kalinov, A., Bratash, O. (2014), Estimation of the efficiency of vibration power application for induction motor diagnostics, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 90 Nr. 12. pp. 176–179.

3. IEC 60034-2-1:2007 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).

4. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112™-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996). 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.

5. Zagirnyak, M., Ogar, V., Chenchevoi, V. (2014), Analysis of induction motors features taking into account change of iron properties, *Acta Technica*, Iss. 59/2014 (1), p. 25–47.

6. Zagirnyak, M., Kalinov, A., Maliakova, M. (2011), An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 87, Nr. 12b, pp. 212–215.

7. Cardenas, R., Pena, R., Alepuz, S., Asher, G. (2013), “Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications”, *IEEE Trans. on Industrial Electron.*, Vol. 60, no. 7, pp. 2776–2798.

8. Seidel, K. (1996), *Macrophytes and water purification*, in: *Biological Control of Water Pollution*, T. Tourbier, and R.W. Pierson, eds., Pennsylvania University Press. Philadelphia, pp. 109-122.

9. Peresada, S., Tilli, A., Tonielli, A. (2003), “Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of the Doubly-Fed Induction Machine”, *IEEE Trans. on Control Systems Technol.*, Vol. 11, no. 6, pp. 875–888.

Стаття надійшла 01.12.2017.