

АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З КЕРУВАННЯМ ЗА РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ

Р.А. Чепкунов, канд. техн. наук
ТОВ Науково-виробниче підприємство «Електронік, ЛТД»,
 вул. Руставі, 5 - 204, Запоріжжя, 69093, Україна.
 E-mail: elektronick.ltd@gmail.com

Запропоновано метод керування асинхронним електроприводом, заснований на вимірюванні та регулюванні реактивної потужності асинхронного двигуна. Забезпечується незалежність потокозчеплення ротора від зміни параметрів асинхронного двигуна, безперервний діапазон регулювання швидкості, включаючи нуль, і швидкодіюче регулювання. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний електропривод, потокозчеплення ротора, зміна параметрів асинхронного двигуна.

Вступ. Особливість керування асинхронним електроприводом (ЕП) полягає у забезпеченні необхідного потокозчеплення ротора асинхронного двигуна (АД). За коректного вирішення цієї задачі асинхронний ЕП за своїми динамічними властивостями наближається до ЕП постійного струму з незалежним збудженням.

Під час скалярного керування асинхронним ЕП потокозчеплення ротора формується за рахунок функціональної залежності напруги АД від частоти з можливим урахуванням струму. У разі векторного керування – за рахунок прямого та зворотного перетворення системи координат векторів струму і напруги перетворювача частоти (ПЧ) з виділенням активної та реактивної складових струму відносно напруги ПЧ і ЕРС ротора й регулюванням сигналів, пропорційних швидкості ЕП та потокозчепленню ротора [1–3].

Похибка визначення потокозчеплення ротора залежить від похибки уведених для розрахунків внутрішніх індуктивностей і опорів АД, особливо від опорів статора та ротора, які піддаються температурним змінам. Ця похибка може значно погіршити характеристики ЕП, зокрема обмежити знизу діапазон регулювання швидкості через неможливість створення необхідного електромагнітного моменту на низьких частотах обертання АД.

Задля покращення характеристик ЕП використовують спостерігач, який автоматично відслідковує зміну параметрів АД, від яких залежить точність визначення складових струму відносно ЕРС і сигналів, що визначають напругу ПЧ та швидкість ЕП. Існування багатьох типів спостерігачів [2] говорить про проблему урахування зміни параметрів АД. Задля якісної реалізації спостереження потрібні значні обчислювальні можливості мікропроцесорних систем керування ПЧ для ЕП. Для відстеження постійної частоти ротора, яка може змінюватися в процесі роботи ЕП за рахунок температурної зміни активного опору ротора або зміни індуктивності ротора, в роботі [3] визначається реактивна потужність АД, яка споживається. Визначене таким чином поточне значення постійної частоти ротора в подальшому використовується під час вказаного вище прямого та зворотного перетворення координат для керування струмом статора, потокозчепленням ротора і ЕП в цілому.

Враховуючи, що реактивна потужність однозначно пов'язана з потокозчепленням ротора і в усталеному режимі не залежить від опорів статора та ротора, можна спростити задачу керування ЕП, визначаючи потокозчеплення ротора й швидкість ЕП через реактивну потужність [4].

Метою роботи є аналіз особливостей практичного використання метода керування асинхронним електроприводом, який ґрунтується на вимірюванні реактивної потужності, що споживається АД.

Базуючись на виразах, наведених у роботі [3], зв'язок між потокозчепленням ротора та миттєвою реактивною потужністю АД може бути записаний у вигляді

$$\bar{U}_s \times \bar{I}_s = I_s^2 \omega \sigma L_s + \frac{\omega_v \Psi_r^2}{L_r} + \frac{\omega_r}{R_r} \frac{d\Psi_r}{dt} \Psi_r, \quad (1)$$

де кожен член означає наступне: $\bar{U}_s \times \bar{I}_s$ – модуль векторного добутку просторових векторів миттєвих значень напруги \bar{U}_s і струму \bar{I}_s статора, який згідно з крос-векторною теорією потужності [5] визначає миттєву реактивну потужність (зменшену в 3/2 рази); $I_s^2 \omega \sigma L_s$ – реактивна потужність на індуктивнос-

ті розсіювання σL_S фази статора; I_S – модуль вектора \bar{I}_S , що визначається як модуль суми векторів миттєвих активного (паралельного вектору \bar{U}_S – далі активна складова) та реактивного (ортогонального вектору \bar{U}_S – далі реактивна складова) струмів статора; $\omega_\psi \Psi_r^2 / L_r$ – реактивна потужність на індуктивності ротора; Ψ_r – модуль просторового вектора потокозчеплення ротора; $\frac{\omega_r}{R_r} \frac{d\Psi_r}{dt} \Psi_r$ – динамічна складова реактивної потужності.

Відносячи до статора опір і індуктивність всього кола між ПЧ і АД, модуль векторного добутку векторів напруги і струму статора можна навести як модуль векторного добутку векторів напруги та струму ПЧ $\bar{U} \times \bar{I}$. Наводячи вектори напруги та струму ПЧ в обертаючій ортогональній системі координат, орієнтованій за напругою, модуль векторного добутку векторів напруги та струму можна визначити як добуток напруги ПЧ U і реактивної складової струму ПЧ I_{XU} відносно цієї напруги: $\bar{U} \times \bar{I} = UI_{XU}$, де $I_{XU} = I \sin \phi$, ϕ – кут між векторами напруги і струму. Значення струму I_{XU} за кута θ_U , який відраховується від моменту переходу напруги фази A ПЧ з мінусу в плюс (він же кут повороту обертової системи координат), можна знайти за формулою перетворення координат

$$I_{XU} = -\sqrt{3}/2 i_a \sin \theta_U - (2)^{-1/2} (i_a + 2i_c) \cos \theta_U, \quad (2)$$

де i_a, i_c – значення струмів фаз A і C в момент виміру струмів за кута θ_U .

Знаходячи активну складову струму відносно напруги $I_{RU} = I \cos \phi$ за формулою

$$I_{RU} = \sqrt{3}/2 i_a \cos \theta_U - (2)^{-1/2} (i_a + 2i_c) \sin \theta_U, \quad (3)$$

можна визначити квадрат повного струму

$$I^2 = I_{RU}^2 + I_{XU}^2.$$

В усталеному режимі динамічна складова реактивної потужності дорівнює нулю, а частота обертання вектора потокозчеплення ротора ω_ψ дорівнює вихідній частоті напруги ПЧ ω . В цьому режимі вираз (1) з урахуванням зазначених вище перепозначень набуває вигляду

$$UI_{XU} = I^2 \omega L_C + \omega \Psi_r^2 / L_r, \quad (4)$$

де L_C – індуктивність кола статора, включаючи індуктивність розсіювання фази статора σL_S .

Порушення цієї умови викликає перехідний процес. Якщо впливати при цьому на напругу ПЧ, змінюючи реактивну потужність UI_{XU} , можна знову досягти усталеного режиму, за якого потокозчеплення ротора буде відповідати величині $\Psi_{r,3}$, яка задається.

Цей вплив може здійснюватися за допомогою пропорційно-інтегрального регулятора напруги ПЧ за формулою

$$U = k_{p,U} (I^2 \omega L_C + \omega \Psi_{r,3} / L_r - UI_{XU}) + k_{int,U} \int (I^2 \omega L_C + \omega \Psi_{r,3} / L_r - UI_{XU}) dt, \quad (5)$$

де $k_{p,U}, k_{int,U}$ – відповідно пропорційний та інтегральний коефіцієнти посилення регулятора напруги.

Задане значення потокозчеплення ротора $\Psi_{r,3}$ визначається залежністю $U(f)$ напруги від частоти ПЧ $f = \omega/2\pi$. За вимог до регулювання на низьких частотах можна використовувати характеристику [6]

$$U(f) = I_{\mu,3} \sqrt{R_C^2 + [2\pi f (L_C + L_0)]^2},$$

де R_C – опір кола статора; L_0 – взаємна індуктивність статора та ротора; $I_{\mu,3}$ – задане значення струму намагнічування, яке можна визначити через номінальні значення частоти $f_{ном}$ і напруги $U_{ном}$ за формулою $I_{\mu,3} \approx U_{ном} / 2\pi f_{ном} (L_S + L_0)$. (Тут напруга і струм наводяться в діючих значеннях).

Величина напруги U визначається мікропроцесорною системою керування як функція від усіх змінних на даному інтервалі дискретності, а за величину U у правій частині формули приймається її значення на попередньому інтервалі дискретності. Дискретність вираховувань визначається частотою модуляції, яка в сучасних ПЧ вимірюється кілогерцами. Внаслідок перетворення системи координат в обертову за постійних змінних у виразі (5) напруга U на всіх періодах дискретності є постійною. Однак слід враховувати можливу похибку вимірювання миттєвих значень струмів i_a, i_c у виразах (2), (3), особливо для пропорційної частини регулятора напруги.

Вичислена таким чином напруга ПЧ не залежить від опорів АД, які підлягають температурним змінам, і забезпечує відповідність потокозчеплення ротора заданому значенню.

За частот, близьких до нуля, можна використовувати значення реактивної потужності для деякої близької до нуля частоти, на якій похибка вираховувань не перевищує допустиму, наприклад, 1%

від номінальної. Таким чином можна забезпечити номінальний момент АД у всьому діапазоні зміни швидкості, включаючи нуль.

В ЕП без датчика швидкості задля забезпечення відповідності швидкості заданому значенню необхідно враховувати ковзання АД, частота якого f_s пропорційна струму ротора I_r . Якщо обертаючу ортогональну систему координат орієнтувати не по напрузі ПЧ, а за пов'язаною з потокозчепленням ЕРС ротора I_{RE} , то активна складова струму відносно ЕРС буде означати струм ротора I_r : $I_{RE} = I_r$. Тоді частоту ковзання можна знайти як

$$f_s = (2\pi\Psi_r)^{-1} R_r I_{RE}, \quad (6)$$

а регулювання швидкості ЕП здійснювати за формулою

$$f = f_3 + f_s,$$

де f – частота вихідної напруги інвертора ($f=2\pi\omega$); f_3 – задана частота.

Постійність потокозчеплення ротора Ψ_r , забезпечувана регулятором напруги, дає змогу використовувати цю формулу в усьому діапазоні регулювання.

Активна складова струму відносно ЕРС I_{RE} може визначитися з виразу для перетворення координат, в якому, на відміну від виразу (3), замість незалежного від параметрів АД кута θ_U використовується кут θ_E , який відраховується від переходу ЕРС фази A через нуль. При цьому кут θ_E , який знаходиться через параметри АД, залежить від їхньої зміни.

Можливий спосіб знаходження струму I_{RE} [6] як різниця між струмом I_{RU} і активною складовою струму намагнічування $I_{\mu R}$: $I_{RE} \approx I_{RU} - I_{\mu R}$. В цьому випадку також залишається залежність I_{RE} від змін параметрів АД, оскільки від цих змін залежить струм $I_{\mu R}$.

Струм I_{RE} не буде залежати від змін параметрів АД, якщо його знаходити виходячи з реактивної потужності з урахуванням формули (4)

$$I_{RE} = \sqrt{I^2 - (UI_{XU} - I^2 \omega L_C)(\omega L_r)^{-1}}, \quad (7)$$

де вираз під коренем є різниця квадратів повного струму та реактивної складової струму I_{XE} відносно ЕРС. Як видно, в цьому виразі не присутні залежні від температури активні опори.

Завдяки регулятору потокозчеплення ротора Ψ_r не залежить від зміни параметрів АД. Однак згідно (6) частота ковзання f_s , а отже і швидкість АД, за постійного струму I_{RE} і певного момента залежать від температурної зміни опору ротора. Тому за високих вимог до точності регулювання швидкості слід використовувати адаптацію системи регулювання до змін опору ротора або застосовувати регулятор швидкості.

Якщо повну компенсацію ковзання, коли $f = f_3 + f_s$, забезпечити за деякої середньої температури ротора, то за низької температури буде перекомпенсація, а за високої – недокомпенсація. У разі перекомпенсації ковзання слід враховувати можливу нестійкість системи регулювання. Так, за перекомпенсації з коефіцієнтом $k = (f - f_s - f_3)(f_s)^{-1}$ для інтегрального регулятора частоти умова стійкості має вигляд [7]

$$k < T_{int} [T_M (1 + T_C / T_{int})]^{-1}, \quad (8)$$

де T_M – електромеханічна постійна часу ЕП; T_C – постійна часу кола статора; T_{int} – постійна часу інтегрування контуру регулювання частоти.

На рисунках наведено осцилограми поступової зміни швидкості АД від нуля до 2 Гц і навпаки – за періодичного накида та скидання навантаження за класичного векторного ке-

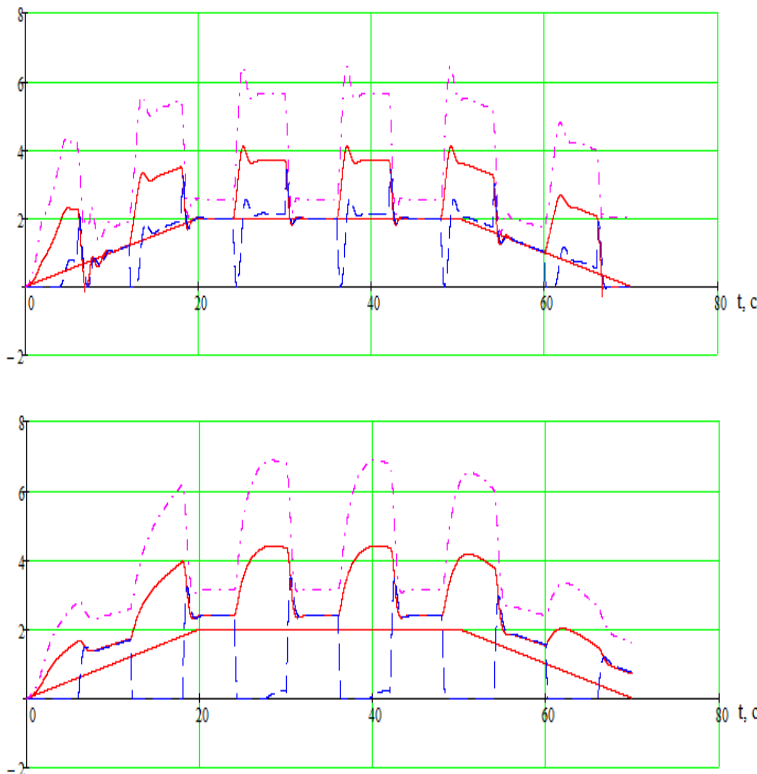


Рис. 1

рування без адаптації до змін параметрів АД (рис. 1) і за нового керування з регулятором потокозчеплення за реактивною потужністю (рис. 2). На рисунках позначено: безперервними лініями – задана швидкість ЕП f_3 і вихідна частота ПЧ f ; пунктирною лінією – приведена до однієї пари полюсів АД швидкість ЕП $v = f - f_s$; штрихпунктирною – напруга ПЧ U . Осцилограми одержано за допомогою математичної моделі, яка враховує повну систему диференціальних рівнянь АД [7] при ненагрітому двигуні (верхні осцилограми на рисунках) і нагрітому з температурним збільшенням опору обмоток двигуна в 1,5 рази, що відповідає зміні температури обмотки приблизно на 100°C (нижні осцилограми на рисунках). З осцилограм видно, що за класичного векторного керування у разі підвищення температури підкидання напруги ПЧ зі збільшенням навантаження недостатнє, потокозчеплення слабшає і двигун зупиняється. Навпаки, у разі регулювання за реактивною потужністю потокозчеплення автоматично підтримується на заданому рівні незалежно від температурної зміни опорів обмоток, що дає змогу підтримувати момент і стабільну роботу двигуна.

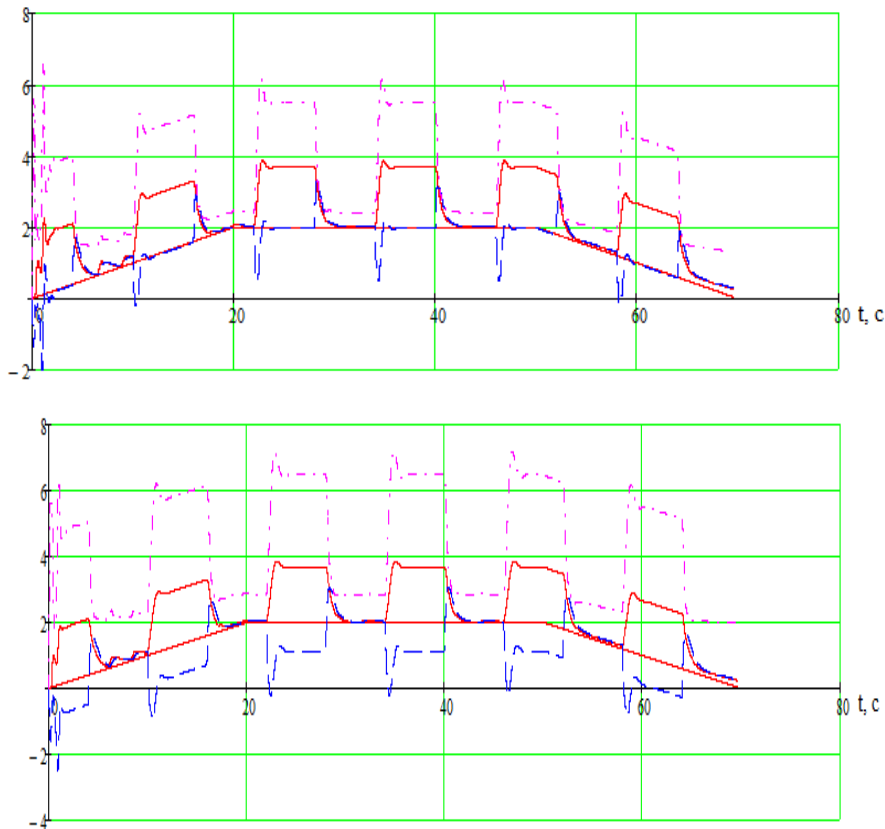


Рис. 2

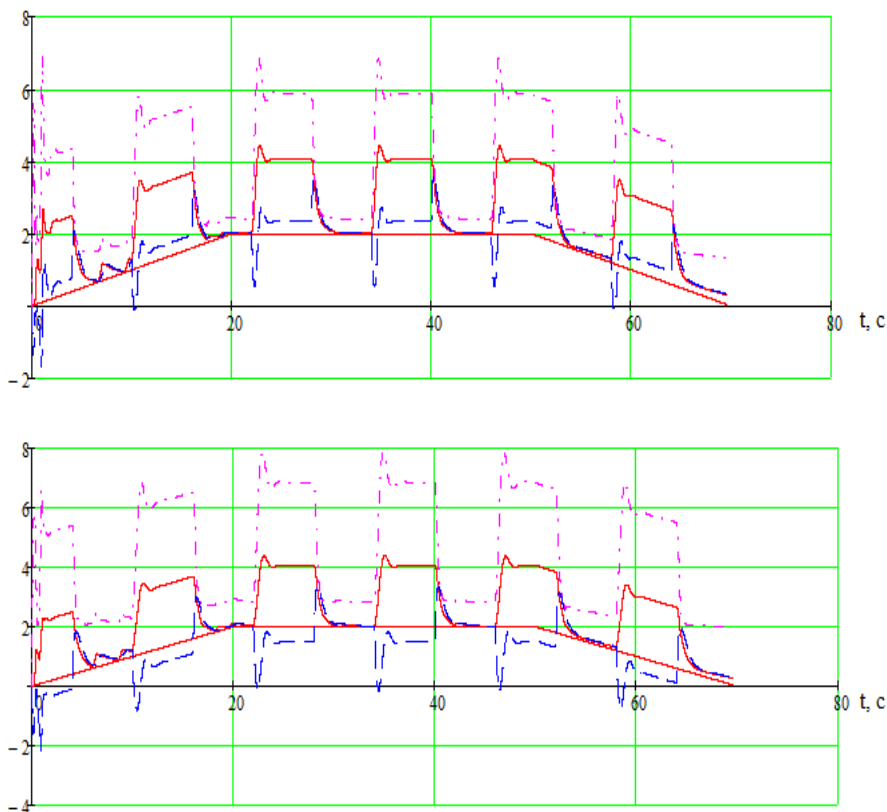


Рис. 3

Осцилограми на рис. 2 одержано під час повної компенсації статизму на ненагрітому двигуні. За таких умов у разі підвищення опору ротора в 1,5 рази має місце недокомпенсація статизму. Однак це не впливає на працездатність електропривода, оскільки забезпечується необхідне потокозчеплення ротора АД. Якщо настроювати компенсацію швидкості за деякої середньої температури, то за низької температури буде перекомпенсація, а

за високої – недокомпенсація швидкості (рис. 3).

Як вказано вище, за високих вимог до точності регулювання швидкості для визначення фактичного опору ротора можна застосувати адаптивну систему керування або застосувати регулятор швидкості. Але в будь-якому разі необхідне потокозчеплення ротора підтримується автоматично, забезпечуючи широкий діапазон регулювання швидкості, включаючи швидкість, яка дорівнює нулю.

Функціональну схему асинхронного ЕП з викладеним принципом керування наведено на рис. 4, де позначено: КП – координатний перетворювач; ДШ і РШ – датчик і регулятор швидкості; U_M – напруга мережі; K_f – коефіцієнт регулятора частоти.

Функціональні блоки виконують операції: F_1 визначає значення заданої реактивної потужності $Q_3 = I^2 \omega L_c + \frac{\omega \Psi_r^2}{L_r} \omega \Psi_r^2 / L_r$; F_2 – напругу U відповідно до формули (5); F_3 – виконує операції відповідно до формули (7).

Застосування додатного зворотного зв'язку за струмом для компенсації ковзання (з визначеним з урахуванням формули (8) коефіцієнтом K_f) доцільно і в ЕП з датчиком швидкості (на рис. 4 зв'язки виділені пунктиром). При цьому зменшується величина відхилення швидкості ЕП від заданого значення в перехідних процесах і підвищується швидкодія системи регулювання [7].

Таким чином, управління ПЧ створюється по розділних каналах, які впливають на напругу і частоту, як у разі скалярного керування. Однак в основі керування лежить уточнене, незалежне від поточних вимірювань параметрів АД, вимірювання потокозчеплення ротора з визначенням активної та реактивної складових струму АД.

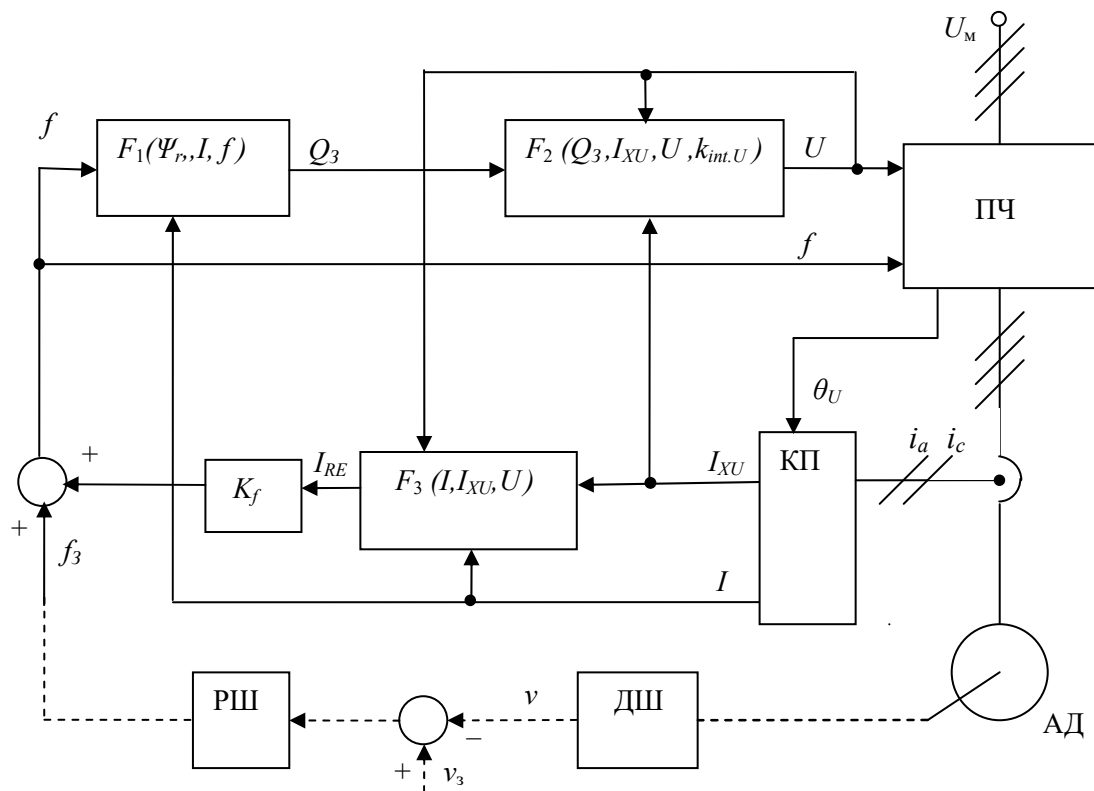


Рис. 4.

Випробування ЕП з розглянутою системою керування підтвердили безперервність діапазону регулювання швидкості з номінальним моментом АД, включаючи нульову швидкість. Так під час випробування асинхронного кранового електропривода на Запорізькому електроапаратному заводі забезпечувалося нерухоме положення вантажу, або ледве помітне його переміщення вгору або вниз. Завдяки додатному зворотному зв'язку за активною складовою струму підвищено швидкодію ЕП.

Висновки. Запропонований метод керування асинхронним електроприводом, заснований на вимірюванні та регулюванні реактивної потужності, забезпечує незалежність потокозчеплення ротора від зміни параметрів асинхронного двигуна. При цьому забезпечується безперервний діапазон регулювання швидкості, включаючи нуль, номінальний момент на всьому діапазоні регулювання, швид-

кодiю системи регулювання. За високих вимог до точности регулювання швидкостi можна застосовувати адаптивну систему керування задля визначення фактичного опору ротора або застосовувати регулятор швидкостi.

1. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating-field machines. *Siemens Review*. 1972. Vol. 34. No 3. Pp. 217-220.
2. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным электроприводом. Запорiжжя: ЗНТУ, 2009. 352 с.
3. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом. *Электротехника*. 2003. № 7. С. 7–17.
4. Чепкунов Р.А. Спосiб керування асинхронним електроприводом. Патент України № 116279, 2018.
5. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности. *Электротехника и электромеханика*. 2007. № 6. С. 63-65.
6. Чепкунов А.И. Эффективное управление асинхронным электроприводом. *Технича електродинамика*, 2006. № 2. С. 52–57.
7. Чепкунов Р. Регулирование электроприводов с косвенным измерением скорости. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 204 с.

ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH REACTIVE POWER CONTROL

R.A. Chepkunov

**Science-industrial enterprise “Elektronik, LTD”
st. Rustavy, 5 - 204, Zaporszhzhia, 69093, Ukraine.
E-mail: elektronick.ltd@gmail.com**

The method of control of asynchronous electric drive, which based on measuring and control of reactive power of induction motor, is presented. It provides independence of magnetic flow of rotor from changes of induction motor parameters, uninterrupted diapason of regulation of speed including zero and fast regulation. References 7, figures 4.

Key words: asynchronous electric drive, magnetic flow of rotor, changes of induction motor parameters.

1. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating-field machines. *Siemens Review*. 1972. Vol. 34. No 3. Pp. 217-220.
2. Potapenko E.M., Potapenko E.E. Robust algorithms of the vector control of electric drive. Zaporizhe: ZNTU. 2009. 352 p. (Rus)
3. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.M., Sibircev A.N. Adaptation system of vector controlling of asynchronous electric drive. *Elektrotekhnik*. 2003. No. 7. Pp. 7-17. (Rus)
4. Chepkunov R.A. Method of control of asynchronous electric drive. Patent UA No 116279, 2018. (Ukr)
5. Zhemerov G.G., Ilina O.V. Fryze power theory and contemporary power theory. *Elektrotekhnik i Elektromekhanika*. 2007. No 6. Pp. 63-65. (Rus)
6. Chepkunov A.I. Effective controlling of asynchronous electric drive. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2006. No 2. Pp. 52 -57. (Rus)
7. Chepkunov R. Regulation of electric drives with indirect measuring of speed. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 204 p. (Rus)

Надiйшла 09.03.2021
Остаточний варiант 03.06.2021