

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З КЕРУВАННЯМ ЗА РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ

Р.А. Чепкунов, канд. техн. наук

ТОВ Науково-виробниче підприємство «Електронік, ЛТД»,

вул. Руставі, 5 - 204, Запоріжжя, 69055, Україна.

E-mail: elektronick.ltd@gmail.com.

В додаток до відомих властивостей асинхронного електропривода з керуванням за реактивною потужністю – забезпечення швидкодії у всьому різнополярному діапазоні регулювання швидкості, включаючи нуль, незалежність механічного моменту від зміни параметрів асинхронного двигуна – розглянуто особливості його роботи на частотах близьких до нуля за навантаженому двигуні і запропоновано адаптацію задля забезпечення відповідності заданій і фактичній швидкості у разі зміни параметрів асинхронного двигуна. Постачальником електроприводу може бути Запорізький електроапаратний завод, в погодженні технічних умов може приймати участь ТОВ «Електронік, ЛТД». Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: асинхронний електропривод, реактивна потужність, система керування.

Вступ. Асинхронний електропривод (АЕП) за якістю регулювання наближається до більш дорогого і менш надійного електропривода постійного струму [1]. Силова схема АЕП набагато простіша і надійніша, ніж силова схема ЕП постійного струму. У порівнянні з досконало дослідженою системою керування ЕП постійного струму [2], який знайшов широке застосування в промисловості, система керування АЕП не поступається їй за якістю регулювання [3] без збільшення, а скоріше зменшення її ціни, особливо у разі керування за реактивною потужністю, де спрощена система керування і підвищена її надійність [4], тому що задля забезпечення необхідного механічного моменту не вимагається надскладна програма адаптації до зміни параметрів асинхронного двигуна, так як ця зміна не впливає на механічний момент і працездатність АЕП, а може впливати тільки на відповідність швидкості заданому значенню. Однак є ще нюанси, які треба розглянути, щоб підвищити доказовість ефективності АЕП. Перше – це особливості роботи АЕП на частотах близьких до нуля за навантаженого двигуна. Тут має значення напрямок швидкості електропривода – за навантаженням чи проти навантаження. Таке чергування є у крановому електроприводі у процесі переміщення вгору-вниз вантажу, під час руху автомобіля на спуску без гальма та в інших електроприводах. Друге – це задля успішного використання АЕП треба мати варіант адаптації щодо зміни швидкості по відношенню до заданого значення під час зміни параметрів асинхронного двигуна (АД). Нижче розглянуто ці питання.

Метою роботи є розробка технічних засобів покращення якості регулювання асинхронного електропривода з керуванням за реактивною потужністю у напрямках врахування особливостей роботи електропривода на частотах близьких до нуля за навантаженого двигуна та адаптації системи керування до зміни параметрів асинхронного двигуна задля підвищення точності регулювання.

Виклад основного матеріалу. За однакової направленості швидкості і навантаження асинхронного електропривода і близькій до нуля частоті ПЧ f , яка в сталому режимі дорівнює алгебраїчній сумі заданої частоти f_3 і частоти ковзання навантаженого АЕП f_s , можливі кидки струму. Це видно з осцилограми рис. 1, де по осі абсцис час в секундах, а по осі ординат в герцах даються величини: частота ПЧ f ; приведена до однієї пари полюсів АД швидкість n ($n = pn_p$, де p – число пар полюсів АД, n_p – швидкість за числа пар полюсів p); задана швидкість n_3 , яка при приведенні до однієї пари полюсів АД і роботі без регулятора швидкості дорівнює заданій частоті f_3 : $n_3 = f_3$; напруга U , яка також дається в герцах з урахуванням того, що номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$ відповідає номінальній частоті $f_{\text{НОМ}}$: $U = f_{\text{НОМ}} U_{\text{ПЧ}} / U_{\text{НОМ}}$, в даному випадку $f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц. Осцилограма на рис. 1 і наступні осцилограми одержано в системі MathCad з використанням математичної моделі, яка враховує повну систему диференціальних рівнянь АД [3], дискретність розрахунків 0,5 мс, що відповідає частоті

© Чепкунов Р.А., 2025

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

модуляції напруги ПЧ 2 кГц. Параметри перетворювача та двигуна такі ж самі, як на осцилограмах в [4]. Навантаження двигуна 30 кВт номінальне, частота ковзання на осцилограмах $f_s \approx 2,0$ Гц.

На осцилограмі частота f_3 (або n_3) поступово зменшується з 5 Гц до нуля. Тому що, починаючи з 5 Гц напрямок навантаження і швидкості співпадають, знаки заданої частоти f_3 і частоти ковзання f_s протилежні, а реверс настане у означеному проміжку часу, коли алгебраїчна сума вказаних частот $f_3 + f_s$ буде дорівнювати нулю. За $f_3 = 2$ Гц, $t = 40$ с починаються кидки струму і продовжуються майже до реверсу за $f_3 \approx 1,6$ Гц, $t \approx 67$ с.

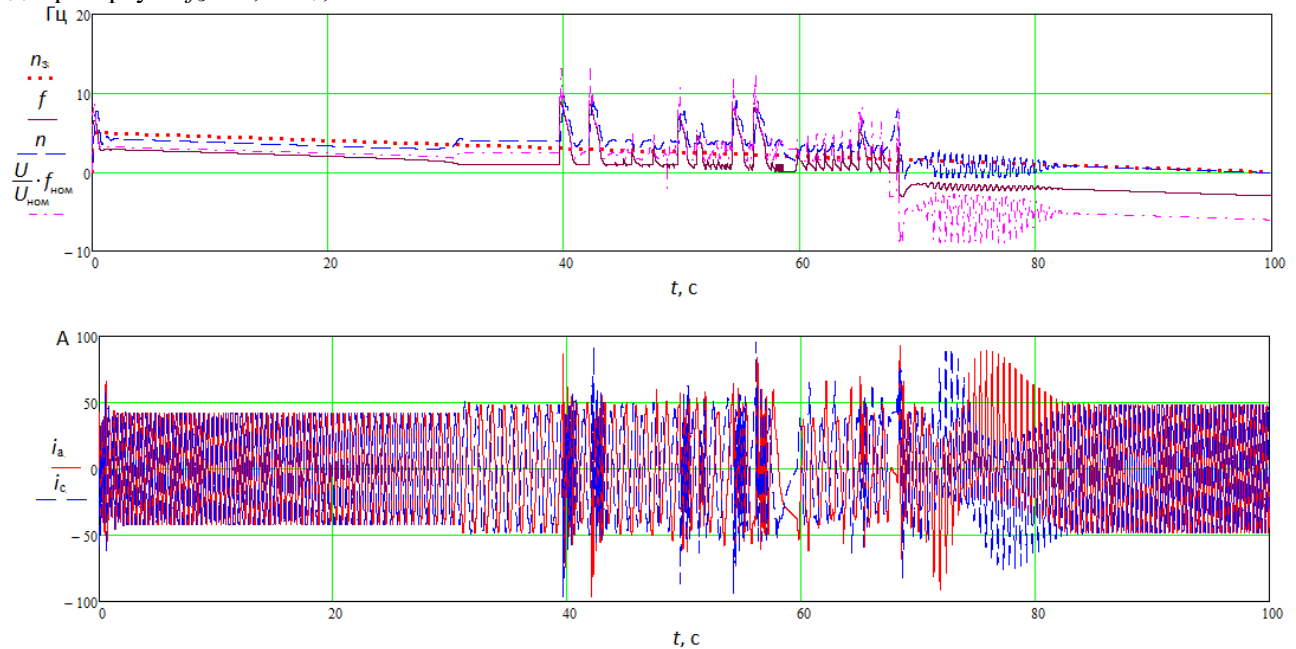


Рис. 1

За тривалої роботи в такому проміжку швидкостей (наприклад, опускання вантажу в крановому електроприводі), в даному випадку з 1,6 до 2 Гц, періодичні кидки струму і додаткове нагрівання двигуна і ПЧ можуть знижувати навантажувальну здатність АЕП. Щоб уникнути цього в структурну схему АЕП вводиться зона нечутливості $-f_m < f < f_m$ (рис. 2), яка може змінювати частоту ПЧ f у порівнянні з розрахунковим значенням f^* , коли знаки f_3 і f_s протилежні: $f_s/f_3 < 0$.

На рис. 1 позначено: КП – координатний перетворювач; ДШ і РШ – датчик і регулятор швидкості; n, n_3 – швидкість і задане значення швидкості; U_d – вхідна напруга інвертора; i_a, i_c – струми фаз А і С перетворювача частоти ПЧ; k_f, T_{int} – коефіцієнт і постійна часу регулятора частоти; I_{RU} і I_{XU} – активна та реактивна складові струму статора; I_{RE} – активна складова струму ротора; $\sim k_i$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за змінною складовою реактивної складової струму задля забезпечення стійкості системи автоматичного регулювання на низьких частотах. В структурній схемі також позначено реактивну складову струму ротора I_{XE} . Параметр f_m виводиться на пульт керування і може змінюватися у процесі налаштування аж до нуля. Вузол $Fl(\Psi_r, I, f)$ обчислює задане значення реактивної потужності Q_3 . Вузол R_r визначає опір ротора і змінює коефіцієнт k_f для правильного визначення частоти ковзання f_s .

Дію зони нечутливості видно з осцилограми на рис. 3. Під час досягнення межі зони нечутливості ($t \approx 33$ с) швидкість і частота перестають змінюватися. Якщо це опускання вантажу на крановому електроприводі, то він продовжує опускатися зі швидкістю, яка відповідає частоті на межі зони нечутливості. В момент досягнення швидкості, яка відповідає частоті нижньої межі зони нечутливості, частота стрибком зменшується до значення нижньої межі зони нечутливості і виникає реверс ($t \approx 73$ с). Після реверсу напрямки навантаження двигуна і руху стають протилежними. В цьому режимі кидки струму відсутні.

Таким чином, кидки струму за направленості навантаження за рухом біля нульового значення значно знижені. Незручність полягає в недоцільності деяких швидкостей біля нуля. Але в цілому забезпечується повний безперервний діапазон регулювання швидкості асинхронного електропривода,

ISSN 1607-7970. Техн. электродинамика. 2025. № 3



Рис. 3



Задля адаптації АЕП до зміни параметрів асинхронного двигуна визначається фактичний опір ротора [5, 6]. Для цього пропонується метод адаптації на підставі аналізу реакції привода на короткочасне зменшення напруги U на незначну величину ΔU протягом часу Δt . Причому зменшення проводиться рівномірно з однаковою швидкістю. Підйом до першочергового значення також проводиться рівномірно з однаковою швидкістю. У разі рівномірного зменшення та збільшення напруги зменшуються кидки струму. Час зменшення і час збільшення однакові й дорівнюють Δt . Після збільшення протягом часу Δt також проводиться аналіз реакції привода. Це показано на рис. 4 за $\Delta t = 0,15$ мс, початковому і кінцевому реактивному струмі 20 А.

В основу аналізу покладено рівняння для струму і потокозчеплення ротора [5, 6]

$$L_m I_{XE} = \Psi_r + T_r \frac{d\Psi_r}{dt}.$$

Змінюючи диференціювання приростом на горизонтальних ділянках напруги 1–2 і 3–4 тривалістю Δt (рис. 4), можна отримати

$$\begin{aligned} L_m (I_{XE2} - I_{XE1}) &= T_r \frac{\Delta \Psi_r}{\Delta t} = T_r \frac{1}{2\pi f} \frac{\Delta U}{\Delta t}, & L_m (I_{XE2} - I_{XE3}) &= T_r \frac{\Delta \Psi_r}{\Delta t} = T_r \frac{1}{2\pi f} \frac{\Delta U}{\Delta t}; \\ T_{r12} &= \frac{2\pi f L_m (I_{XE2} - I_{XE1})}{\Delta U} \Delta t, & T_{r34} &= \frac{2\pi f L_m (I_{XE4} - I_{XE3})}{\Delta U} \Delta t; \\ R_{r12} &= \frac{L_r}{T_{r12}} = \frac{L_r}{L_m} \frac{\Delta U}{2\pi f \Delta t (I_{XE2} - I_{XE1})}, & R_{r34} &= \frac{L_r}{T_{r34}} = \frac{L_r}{L_m} \frac{\Delta U}{2\pi f \Delta t (I_{XE4} - I_{XE3})}, \end{aligned}$$

де L_m , L_r – індуктивність намагнічування та індуктивність ротора; T_r – постійна часу ротора; R_r – опір ротора; Ψ_r – потокозчеплення ротора. Індексом позначено точки: 1 – кінець зменшення напруги і початок горизонтальної ділянки; 2 – початок збільшення напруги; 3 – кінець збільшення напруги; 4 – точка вимірювання струму через час Δt після точки 3.

Для розрахунку за цими формулами вимірюється: реактивний струм I_{XE1} в кінці 1-го періоду, в якому поле рівномірно спадає; реактивний струм I_{XE2} в кінці 2-го періоду, де напруга не змінюється; реактивний струм в кінці 3-го періоду I_{XE3} після підйому напруги до першочергового значення; струм I_{XE4} через час Δt після закінчення перехідного процесу. За різницею струмів I_{XE1} і I_{XE2} визначається постійна часу кола ротора T_{r12} , а потім опір кола ротора R_{r12} . За різницею струмів I_{XE3} і I_{XE4} визначається постійна часу кола ротора T_{r34} і опір кола ротора R_{r34} . За відсутності перехідних процесів в електроприводі під час тестування, яка перевіряється приблизною рівністю струмів на початку тестового збурення I_{XE0} і в кінці I_{XE4} , і за коректних замірах струмів обчислені двома способами опори кола ротора повинні бути приблизно рівними: $R_{r12} \approx R_{r34}$. В такому разі задля зменшення похибки обчислюється середнє значення опору ротора $R_r = (R_{r12} + R_{r34}) / 2$.

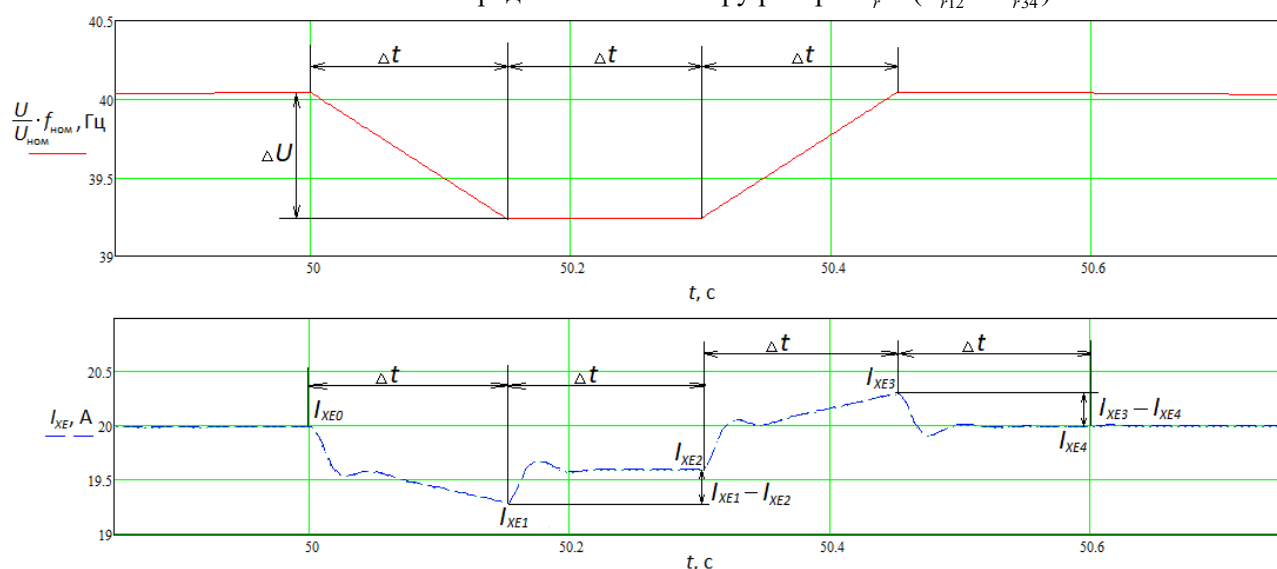
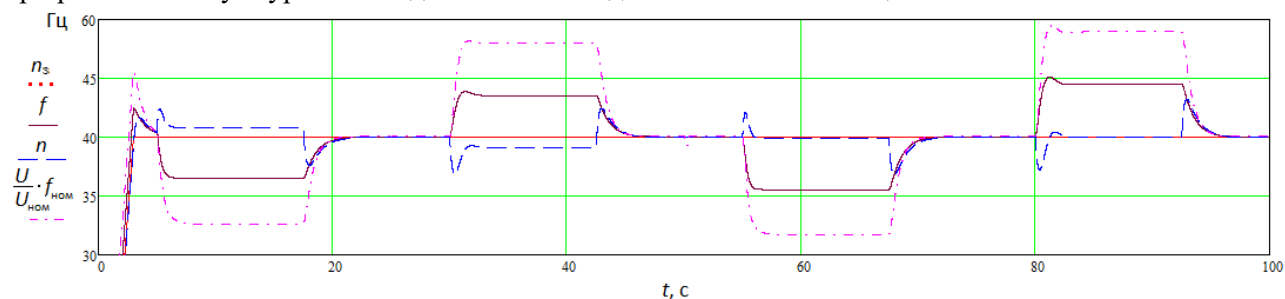


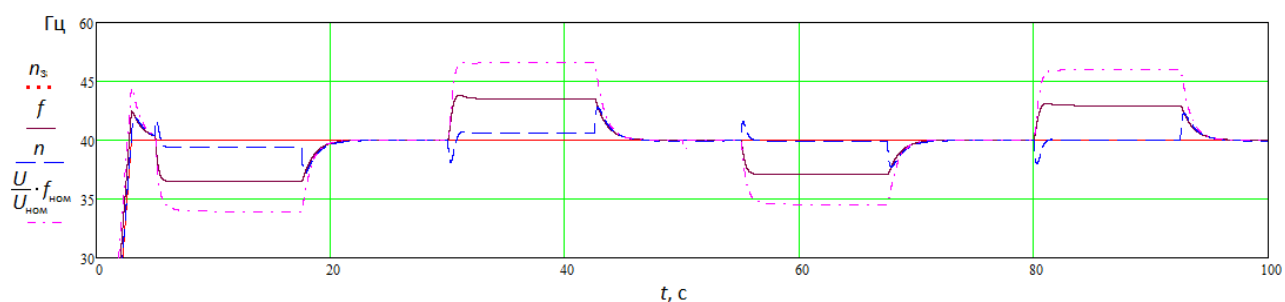
Рис. 4

У разі зміни R_r пропорційно змінюється коефіцієнт k_f , забезпечуючи відповідність заданої і фактичної швидкості АЕП.

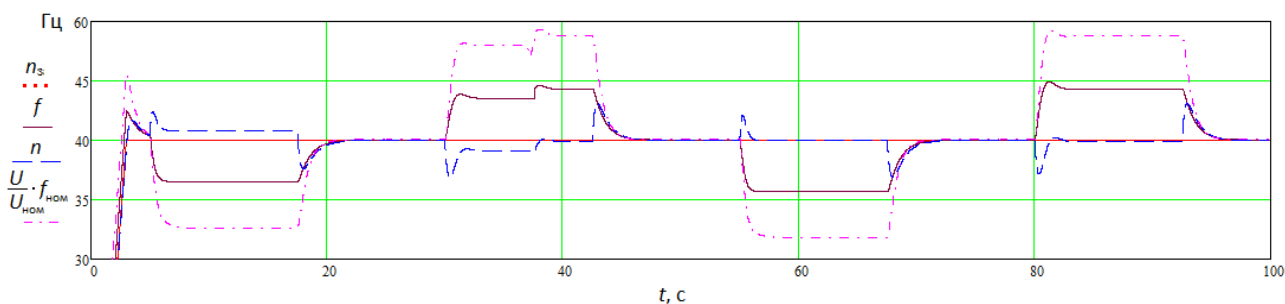
На рис. 5 а, б, в, г за почергової зміни напрямлення періодичних збурень показана адаптація у разі зміні опору ротора під час недокомпенсації, коли за гальмуючого збурення швидкість менше заданого значення 40 Гц, а при розганяючому збуренні швидкість більше заданого значення 40 Гц, і при перекомпенсації, коли при гальмуючому збуренні швидкість більше заданого значення 40 Гц, а при розганяючому збуренні швидкість менше заданого значення 40 Гц.



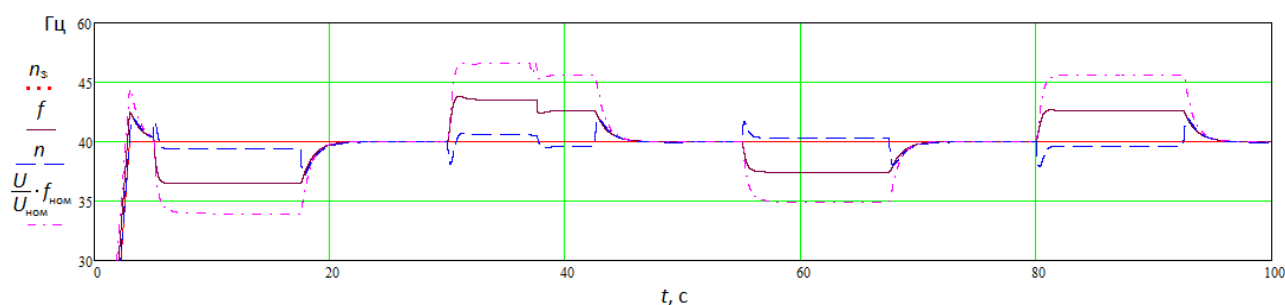
а



б



в



г

Рис. 5

Під час подачі тестового сигналу за ненавантаженого ЕП (за $t=50$ с) коректується опір ротора, який задається програмою, і швидкість за навантаженні в ту або іншу сторони дорівнює заданій (рис.

5, а – у разі недокомпенсації, рис. 5, б – у разі перекомпенсації). Струм за тестового сигналу показаний на рис. 4.

У разі подачі тестового сигналу за гальмуючого збурення (за $t=37$ с) у випадку недокомпенсації після коригування опору ротора за навантаження швидкість також дорівнює заданій (рис. 5, в). Але під час подачі тестового сигналу у випадку перекомпенсації (рис. 5, г за $t=21$ с) після коригування опору ротора при навантаженні замість перекомпенсації має місце невелика недокомпенсація, а замість недокомпенсації – невелика перекомпенсація. Однак після наступного тестового сигналу за рахунок зміни перенавантаження і недовантаження настає повна компенсація. Таким чином, за періодичної подачі тестових сигналів забезпечується відповідність заданій і фактичній швидкості АЕД. Величина тестових сигналів на рис. 5 дорівнює 5 В, тривалість – 0,15 с. Така тривалість може бути на частотах від 20 Гц. За більш низьких частотах тривалість тестових сигналів треба підвищувати – до 0,5 с на частоті від 10 Гц. Такі сигнали не можуть призвести до значної зміни швидкості, тому вони не впливають на технологічний процес, який виконує АЕП. Величина і тривалість тестового сигналу також виводяться на пульт керування задля можливості їхнього налаштування.

За розганяючого збурення, коли знак f_s протилежний знаку f_z , у разі подачі тестового сигналу має місце велика похибка визначення опору кола ротора. Тому в цьому режимі та на низьких частотах тестові сигнали не подаються.

Таким чином, з урахуванням диференціювання тестових сигналів в залежності від розганяючого або гальмуючого збурень, перекомпенсації або недокомпенсації та вихідної частоти перетворювача забезпечується відповідність швидкості електропривода її заданому значенню під час роботи електропривода без спеціальних відключень для тестування. Такий асинхронний електропривод може поставлятися Запорізьким електроапаратним заводом. В погодженні технічних умов може приймати участь ТОВ «Електронік, ЛТД». До розглянутих властивостей електропривода можна додати, що можливо забезпечувати безударне включення на обертаючий електродвигун.

Висновки. За однакової направленості швидкості і навантаження асинхронного електропривода за деяких значень швидкості біля нуля виникають кидки струму. Щоб позбавитися їх, вводиться зона нечутливості, яка забороняє роботу приводу на цих швидкостях. Запропонована адаптація до зміни параметрів асинхронного двигуна враховує перекомпенсацію і недокомпенсацію швидкості, тестові сигнали не подаються за однакової направленості швидкості і навантаження асинхронного електропривода. Порівнянням двох сусідніх обчислень опорів ротора ведеться контроль за похибкою тестування, яка пов'язана з похибкою вимірювання і наявністю перехідних процесів під час тестування. Це дає більш точнішу відповідність швидкості заданому значенню. Враховуючи ці додаткові можливості, асинхронний електропривод з керуванням за реактивною потужністю забезпечує більш якісне швидкодіюче регулювання в усьому діапазоні регулювання швидкості, включаючи нульову швидкість за практично безінерційному реверсі.

1. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Крижановский В.П., Бовкунович В.С. Система управления моментом асинхронного двигателя для тяговых электроприводов. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2007. № 1. С. 66-70.

2. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.

3. Чепкунов Р. Регулирование электроприводов с косвенным измерением скорости. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 204 с.

4. Чепкунов Р.А. Реверсивный асинхронный электропривод з керуванням за реактивною потужністю. *Технічна електродинаміка*. 2024. №1. С. 46-52. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.046>.

5. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Красношапка Н.Д. Непряме векторне керування асинхронними двигунами з властивостями робастності та адаптації до змін активного опору ротора. Київ: НТУ України КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 174 с.

6. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным электроприводом. Запорожье: ЗНТУ, 2009. 352 с.

IMPROVING THE QUALITY OF REGULATION OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH REACTIVE POWER CONTROL

R.A. Chepkunov

Science-industrial enterprise "Elektronik, LTD",
st. Rustavy, 5 - 204, Zaporozhje, 69055, Ukraine.

E-mail: elektronick.ltd@gmail.com.

In addition to the known properties of an asynchronous electric drive with reactive power control - ensuring high speed in the entire multipolar speed control range, including zero, independence of mechanical torque from changes in the parameters of the asynchronous motor - the peculiarity of its operation at frequencies close to zero with a loaded motor is considered and an adaptation is proposed to ensure compliance with the set and actual speeds when changing the parameters of the asynchronous motor. The supplier of the electric drive can be Zaporozhye Electrical Equipment Plant, LLC "Electronics, LTD" can participate in the coordination of technical conditions. References 6, Figures 5.

Keywords: asynchronous electric drive, reactive power, control system.

1. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Kryzhanovskiy V.P., Bovkunovich V.S. Control system for moment of induction motor of pull electric driver. *Promyslova elektroenergetyka ta elektrotehnika*. 2007. No 1. Pp. 66-70. (Rus)
2. Perelmutter V.M., Sidorenko V.A. Control systems of thyristor electric drives of direct current. Moskva: Elektroatomizdat, 1988. 304 p. (Rus)
3. Chepkunov R. Regulation of electric drives with indirect measuring of speed. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 204 p. (Rus)
4. Chepkunov R.A. Reversible asynchronous electric drive with reactive power control. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No 1. Pp. 46-52. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.046>. (Ukr)
5. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Krasnoshapka N.D. Indirect vector control of asynchronous motor with robust and adaptation for changing of active rotor resistance. Kyiv: NTU of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 174 p. (Ukr)
6. Potapenko E.M., Potapenko E.E. Robust algorithms of the vector control of electric drive. Zaporozhje: ZNTU, 2009. 352 p. (Rus)

Надійшла 24.10.2024
Остаточний варіант 13.01.2025