



УДК 62-523.8:621.313.333:681.513 <https://doi.org/10.31713/vt2202615>

Наумчук О.М., (1:ORCID: 0000-0003-2483-4141)

К.Т.Н., доцент

Полховський І. П., ⁽¹⁾

здобувач

¹ Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ЗА НЕПРЯМИМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

У статті розглянуто розробку алгоритму адаптивного керування асинхронним електроприводом на основі ідентифікації навантаження за непрямыми параметрами, доступними в частотних перетворювачах. Запропонований підхід базується на аналізі фактичної швидкості обертання, струму статора та оціненого електромагнітного моменту двигуна для своєчасного виявлення зовнішніх збурень і компенсації їх впливу. Проведено експериментальні дослідження електропривода з частотним перетворювачем Siemens SINAMICS G120 при різних режимах навантаження та швидкості обертання. Отримано статичні характеристики системи та визначено закономірності зміни електричних і механічних параметрів електропривода. Досліджено динамічні властивості системи під час стрибкоподібної зміни навантаження. Встановлено, що система забезпечує стійке регулювання швидкості та забезпечує відповідне перерегулювання. Результати підтверджують ефективність використання непрямих параметрів для реалізації адаптивного керування електроприводами.

Ключові слова: адаптивне керування, асинхронний електропривод, частотний перетворювач, ідентифікація навантаження, електромеханічні параметри.

Сучасні дослідження адаптивного керування електроприводами спрямовані на розроблення алгоритмів, здатних оцінювати параметри двигуна та момент навантаження за непрямыми вимірюваними сигналами. Одним із найбільш відомих підходів є використання адаптивних спостерігачів стану, що базуються на вимірюванні струмів статора. У ньому використовується нелінійний адаптивний алгоритм, який забезпечує одночасне оцінювання швидкості обертання, магнітного потоку, моменту навантаження та опору ротора без використання додаткових датчиків [1].

Такий підхід характеризується високою точністю та стійкістю до параметричної невизначеності, проте потребує значних обчислювальних ресурсів для практичної реалізації.

Перспективним напрямом є застосування методів нечіткої логіки в системах векторного керування асинхронними електроприводами. Адаптивний нечіткий регулятор [2], дозволяє автоматично коригувати параметри керування залежно від режиму роботи двигуна та зовнішніх збурень, що сприяє покращенню динамічних характеристик системи. Разом з тим ефективність такого підходу значною мірою залежить від якості налаштування бази правил та функцій належності, а процес оцінювання навантаження не має чіткої фізичної інтерпретації.

Подальший розвиток інтелектуальних методів керування пов'язаний із використанням нейро-нечітких алгоритмів. Поєднання нейронних мереж і нечіткої логіки дозволяє підвищити точність компенсації змін навантаження та зменшити коливання електромагнітного моменту. Результати досліджень таких алгоритмів [3] демонструють покращення динамічних показників системи векторного керування асинхронним двигуном, однак складність навчання моделі та реалізації алгоритму обмежує їх використання в промислових контролерах загального призначення.

Важливе місце серед сучасних методів адаптивного керування займають алгоритми оцінювання стану на основі розширеного фільтра Калмана [4]. У такій реалізації відбувається одночасне визначення параметрів двигуна та моменту навантаження за непрямыми вимірюваннями з високою точністю навіть за наявності параметричних змін і зовнішніх збурень.

Аналіз наведених досліджень свідчить, що **актуальним науково-технічним завданням** залишається розроблення адаптивних алгоритмів ідентифікації навантаження, які забезпечують необхідну точність оцінювання при відносно простій реалізації та можуть бути впроваджені у промислових системах керування електроприводами.

Частотне регулювання асинхронних електроприводів широко використовується в багатьох сучасних технологічних процесах. Найбільшого застосування здобули ті процеси, які потребують точного керування швидкістю, моментом, позиціонуванням та іншими факторами. Наприклад, у насосних станціях, системах водоочищення, конвеєрних лініях, компресорних системах, вентиляції, змішувачах та дозаторах.

Сучасні підходи до автоматизації таких процесів найефективніше виконувати саме за допомогою частотного регулювання. Такий підхід є найбільш ефективним, адже він дозволяє плавно регулювати параметри у цих процесах (швидкість, момент, пуск та зупинка). У багатьох реальних технологічних процесах виникають ситуації коли регульований параметр змінюється не за встановленим алгоритмом, а системи регулювання цих процесів не мають зворотного зв'язку. Такі ситуації впливають на



ефективність регулювання та потребують постійної корекції обертів та моменту на валу двигуна.

У даній роботі розглядається процес регулювання параметрів асинхронного двигуна, який приводиться в дію через частотний перетворювач, при нерівномірному впливі збурюючих факторів, у вигляді різкої зміни параметрів руху (момент, швидкість обертання). При цьому, пропонується використовувати адаптивне керування, яке не просто підтримує задані оберти, а виявляє, зміну зовнішнього впливу, оцінює ступінь цього впливу і встановлює керуючий сигнал так, щоб зберегти потрібний режим роботи.

У досліджуваній нами системі адаптивного керування визначалися: задана швидкість, фактична швидкість і ознаки збурюючого навантаження. Задані оберти асинхронного двигуна оператор або верхній рівень системи керування, яка реалізована на основі програмованого-логічного контролера (ПЛК), передає на частотний перетворювач. Далі відбувається зчитування фактичної швидкості двигуна, а також контроль струму, оцінений момент, та, якщо потрібно темп зміни цих параметрів. Якщо встановлено, що при незмінному завданні швидкість починає зменшуватися, а струм і момент зростають, це вказує на появу зовнішнього збурення — наприклад, раптове збільшення маси матеріалу на стрічці транспортера, різкий перепад тиску у вхідному трубопроводі насоса, чи будь які інші зовнішні збурюючі фактори. То у такому випадку система регулювання (ПЛК) не повинна чекати значного зниження швидкості, а, натомість, завчасно здійснити керуючий вплив. Саме такий алгоритм регулювання був покладений в основу нашого дослідження. При цьому, були проведені експериментальні випробування, які повністю відтворюють описаний вище алгоритм, де при раптовому зростанні навантаження змінюються струм, напруга, момент і, відповідно, швидкість обертання асинхронного двигуна.

Для реалізації адаптивного керування використовується оцінка навантаження за непрямыми параметрами електропривода, доступними в частотному перетворювачі: фактичною швидкістю обертання $n_{\text{факт}}$, струмом статора $I_{\text{факт}}$ та оціненим електромагнітним моментом $M_{\text{факт}}$. На першому етапі визначається відхилення швидкості від заданого значення

$$\Delta n = n_{\text{зад}} - n_{\text{факт}},$$

де, $n_{\text{зад}}$ – задана швидкість обертання, об/хв; $n_{\text{факт}}$ – фактична швидкість обертання двигуна, об/хв. Якщо відхилення швидкості перевищує встановлене порогове значення, система виконує додатковий аналіз електричних параметрів привода.

Для підтвердження наявності зовнішнього навантаження визначаються прирости струму та моменту відносно базового режиму роботи:

$$\Delta I = I_{\text{факт}} - I_0,$$
$$\Delta M = M_{\text{факт}} - M_0,$$

де, I_0 та M_0 – значення струму та моменту у режимі холостого ходу при відповідній швидкості обертання. Одночасне збільшення ΔI та ΔM при зменшенні швидкості свідчить про виникнення додаткового навантаження на валу двигуна.

У разі виявлення навантаження система активує адаптивну корекцію та формує нове значення частоти керування

$$f_{\text{кор}} = f_{\text{зад}} + \Delta f,$$

де, $f_{\text{зад}}$ – поточне значення частоти, Гц; Δf – коригуюча складова, величина якої визначається ступенем відхилення швидкості та зміною електромеханічних параметрів привода. Після зменшення навантаження та відновлення номінального режиму роботи система автоматично повертається до базових параметрів регулювання. Такий підхід дозволяє забезпечити своєчасну компенсацію зовнішніх збурень і підтримання заданої швидкості без використання додаткових датчиків навантаження.

Метою даного дослідження є розробка ефективного алгоритму керування частотним електроприводом з використанням методики адаптивного керування. Для реалізації даної мети нами проведено експериментальне дослідження системи керування асинхронним двигуном та визначено її параметри при різних значеннях навантаження на валу асинхронного двигуна. Також, виконано, експериментальне відтворення ситуації коли система керування зазнає значного збурюючого впливу.

Для перевірки працездатності алгоритму адаптивного керування та оцінювання можливості ідентифікації навантаження за непрямыми параметрами були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стенді з асинхронним електроприводом, керованим частотним перетворювачем. Основною метою експерименту було встановлення залежностей між електричними параметрами двигуна та величиною механічного навантаження при різних значеннях швидкості обертання ротора.

На першому етапі досліджень виконувалося визначення базових параметрів електропривода в режимі холостого ходу. Двигун послідовно виводився на фіксовані швидкості обертання 500, 750 та 1000 об/хв, після чого реєструвалися значення струму статора, напруги живлення та електромагнітного моменту, що формувався частотним перетворювачем для підтримання заданої швидкості. Наприклад, при швидкості 500 об/хв у режимі холостого ходу двигун споживав струм 0,62 А за напруги 89,5 В, а розрахунковий момент на валу становив близько 0,27 Н·м. Отримані значення були використані як опорні дані для подальшого аналізу впливу навантаження на параметри електропривода.

На другому етапі проводилося поетапне навантаження валу двигуна. Для кожного встановленого значення швидкості обертання навантаження змінювали в діапазоні від 0 до 8 кг з кроком 2 кг. Після стабілізації режиму

роботи реєструвалися значення струму статора I , напруги живлення U та електромагнітного моменту M , які формувалися системою керування для компенсації прикладеного навантаження та підтримання заданої швидкості обертання. Отримані експериментальні дані наведено в табл. 1.

Табл. 1.

Результати експериментального дослідження параметрів електропривода при різних режимах навантаження

Швидкість обертання n , об/хв	Навантаження N , кг	Струм статора I , А	Напруга U , В	Електромагнітний момент M , Н·м
500	0	0,62	87	0,20
	2	0,61	90	0,35
	4	0,60	92	0,47
	6	0,61	93	0,50
	8	0,61	95	0,65
750	0	0,56	117	0,22
	2	0,56	120	0,30
	4	0,57	122	0,43
	6	0,59	125	0,52
	8	0,59	127	0,58
1000	0	0,54	149	0,25
	2	0,55	151	0,30
	4	0,56	154	0,42
	6	0,57	156	0,54
	8	0,59	158	0,60

Проведені дослідження дозволяють оцінити чутливість електричних параметрів двигуна до зміни механічного навантаження та встановити закономірності їх взаємозв'язку. Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням навантаження відбувається зростання моменту, який розвиває електропривод, а також спостерігається зміна параметрів живлення, що автоматично коригуються частотним перетворювачем для забезпечення стабільності швидкісного режиму. Отримані залежності можуть бути використані як основа для побудови алгоритму адаптивної ідентифікації навантаження за непрямыми параметрами без застосування додаткових датчиків моменту або сили на валу двигуна.

На основі експериментально отриманих даних було виконано аналіз впливу механічного навантаження на електричні та механічні параметри електропривода. Для виявлення характеру взаємозв'язку між вимірюваними величинами та навантаженням побудовано статичні

характеристики системи у вигляді функціональних залежностей (рис. 1) між струмом статора (рис. 1, а), напругою живлення (рис. 1, б), електромагнітним моментом (рис. 1, в) та прикладеним навантаженням.

Побудовані характеристики дозволяють оцінити чутливість контрольованих параметрів до зміни навантаження, визначити найбільш інформативні параметри для подальшої ідентифікації навантаження та обґрунтувати можливість використання непрямих вимірювань у структурі адаптивного алгоритму керування. Крім того, аналіз отриманих залежностей дає змогу встановити закономірності зміни параметрів електропривода в різних режимах роботи та оцінити їх придатність для формування діагностичних і керуючих ознак.

Після аналізу статичних характеристик було проведено дослідження динамічних властивостей електропривода в умовах різкої зміни навантаження. Метою експерименту була оцінка реакції системи керування на зовнішнє збурення та визначення її здатності забезпечувати стабільну роботу при зміні механічного навантаження. Для цього на вал двигуна миттєво прикладалося додаткове навантаження масою 19 кг, що імітувало стрибкоподібну зміну моменту. У процесі експерименту реєструвалися часові залежності основних параметрів електропривода. Встановлено, що в момент прикладання навантаження відбулося збільшення струму статора до 1,02 А та зростання електромагнітного моменту двигуна до 0,96 Н·м, що свідчить про формування системою керування необхідної компенсуючої дії для підтримання заданого режиму роботи.

Перехідна характеристика процесу, отримана під час експерименту, наведено на рис. 2. Її аналіз дозволив оцінити основні показники якості регулювання, зокрема час перехідного процесу $t_{nn}=9,5$ с, величину перерегулювання, яка становить 3,6 % та характер затухання коливальних коливань – коливальний затухаючий, асимптотично стійкий. Отримані результати підтверджують стійкість системи керування та її здатність забезпечувати відновлення усталеного режиму після виникнення зовнішнього збурення.

Дослідження динамічних характеристик показало, що електропривод зберігає працездатність та стійкість при зміні навантаження, а реакція системи на зовнішні збурення має прогнозований характер. Це свідчить про можливість використання параметрів перехідного процесу як додаткових інформативних ознак для реалізації алгоритмів адаптивної ідентифікації навантаження та корекції параметрів керування в реальному часі.

Під час аналізу експериментальних результатів необхідно враховувати, що значення електромагнітного моменту, наведені в роботі, визначалися за даними вбудованої математичної моделі частотного перетворювача Siemens SINAMICS G120. Алгоритм розрахунку моменту виробником не розкривається, оскільки належить до внутрішніх програмних засобів системи керування. У зв'язку з цим отримані значення

моменту слід розглядати як оцінені величини, сформовані на основі непрямих параметрів електроприводу, зокрема струму, напруги та параметрів математичної моделі двигуна.

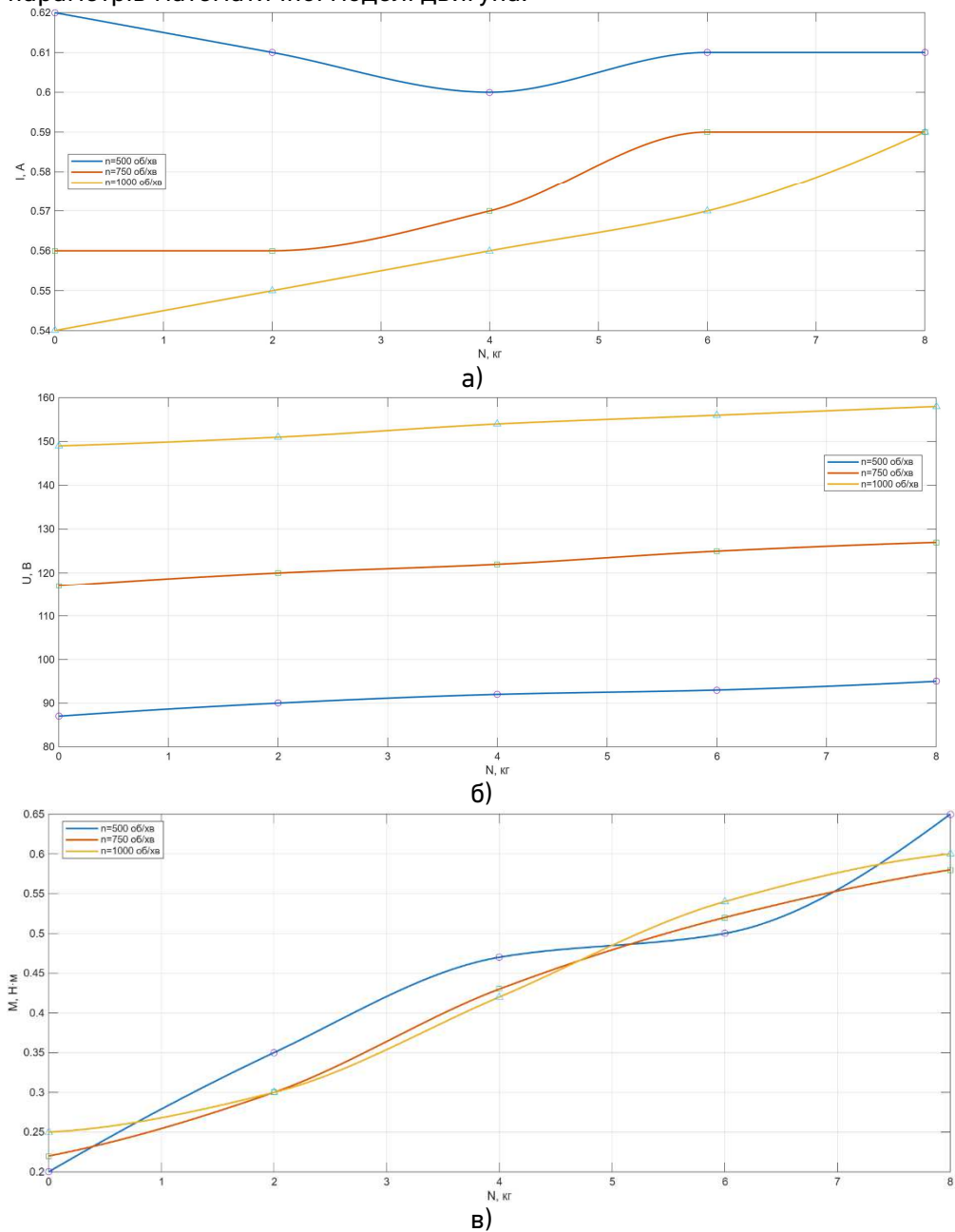


Рис. 1. Статичні характеристики системи керування асинхронним двигуном з частотним електроприводом

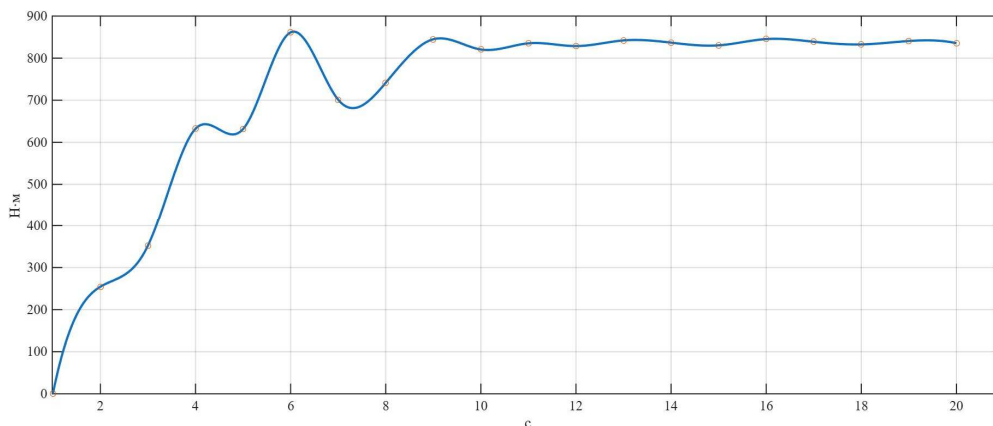


Рис. 2. Перехідна характеристика САР асинхронним двигуном з частотним електроприводом

Додатковий аналіз показав, що система керування забезпечує достатньо високу точність підтримання заданої швидкості обертання. У режимі холостого ходу відхилення фактичної швидкості від заданої не перевищувало 3–5 об/хв у діапазоні 100–1500 об/хв. При прикладанні навантаження до 6 кг спостерігалось зменшення швидкості обертання, яке становило до 10 об/хв для режиму 500 об/хв, до 15 об/хв для режиму 750 об/хв та до 17 об/хв для режиму 1000 об/хв.

Подальше збільшення навантаження до 6–8 кг призводило до зростання статичної похибки регулювання швидкості. Максимальне відхилення швидкості від заданого значення становило близько 15 об/хв для режиму 500 об/хв, 17–18 об/хв для режиму 750 об/хв та до 20 об/хв для режиму 1000 об/хв. Враховуючи абсолютні значення швидкості обертання, отримані відхилення не перевищують 2–4 % від номінального значення та свідчать про ефективну роботу контуру регулювання швидкості навіть в умовах зміни механічного навантаження.

Отримані результати підтверджують можливість використання параметрів, доступних у частотному перетворювачі, для реалізації алгоритмів адаптивної ідентифікації навантаження. Незважаючи на відсутність інформації про внутрішній алгоритм оцінювання моменту, стабільність роботи привода та незначні відхилення швидкості дозволяють розглядати дані частотного перетворювача як достатньо інформативні для подальшого синтезу адаптивних алгоритмів керування.

Для реалізації алгоритмів адаптивного керування розроблена програма керування частотним перетворювачем на мові LD у середовищі Tia Portal. Алгоритм функціонування частотного перетворювача містить елементи, які дозволяють йому виконувати свої функції по регулюванню швидкості, діагностичні функції, алгоритми місцевого та автоматичного управління. Початковий фрагмент програми показаний на рис. 3.

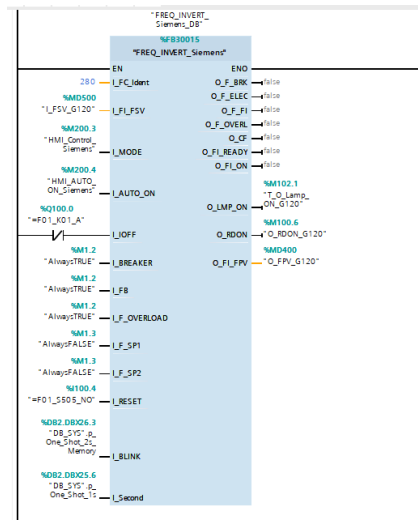


Рис. 3. Фрагменти програми керування частотного перетворювача SINAMICS G120 на мові LD

До класичного контуру регулювання зі зворотним зв'язком за швидкістю додається блок адаптації. Реальна швидкість обертання визначаються на основі даних з енкодера, з'єднаного з валом асинхронного двигуна. Вхідними сигналами блоку є задана та фактична швидкості. На основі аналізу фактичних обертів відбувається коригування заданого значення частоти за ПІД-законом регулювання. Збуренням виступає момент опору навантаження, а регульованою величиною — швидкість обертання.

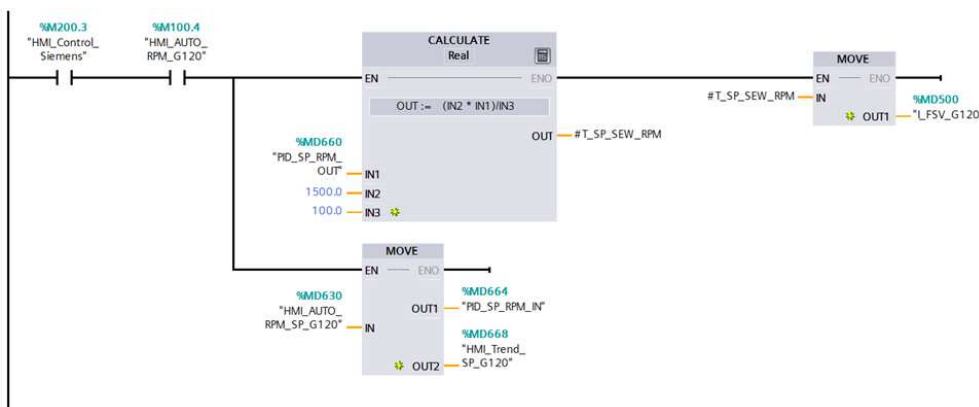


Рис. 4. Реалізація алгоритму адаптивного керування швидкістю

На практиці розроблений алгоритм працює наступним чином. У нормальному режимі ЧП працює на підтримання заданої швидкості. Коли навантаження зростає, система фіксує відхилення швидкості $\Delta\omega = \omega_{\text{зад}} -$

факт. Якщо це відхилення мале, реалізується звичайний контур регулювання. Якщо відхилення перевищує заданий поріг або одночасно спостерігається ріст струму та моменту, активується адаптивна корекція: змінюються параметри регулятора або вводиться додаткова компенсація по навантаженню. Наприклад, система може тимчасово підвищити частоту, скоригувати розгінну характеристику, збільшити допустимий момент у межах безпеки або перемкнутись на інший набір коефіцієнтів регулятора. Коли навантаження повертається до нормального рівня, система плавно повертається до базових налаштувань.

Таким чином, адаптивне керування в системі електропривода полягає в автоматичній зміні параметрів регулятора та/або корекції керуючого сигналу частотного перетворювача на основі поточної оцінки навантаження, з метою компенсації збурюючих впливів і підтримання заданої швидкості електропривода.

1. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. An adaptive tracking control from current measurements for induction motors with uncertain load torque and rotor resistance. – Automatica. Volume 44. Issue 10. 2008. – P. 2593-2599. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2008.02.023>. 2. Ullah E.Z. Adaptive Fuzzy Logic Controller for Indirect Field Oriented Controlled Induction Motor. International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies – iCoMET 2019. doi:10.1109/ICOMET.2019.8673498. 3. Prasad, R.R., Durgasukumar, G. Enhanced performance of indirect vector controlled induction motor drive with a modified type 2 neuro-fuzzy torque controller in interfacing with dSPACE DS-2812. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 54, No. 2. 2021. pp. 219-228. <https://doi.org/10.18280/jesa.540203>. 4. Zerdali E. A Comparative Study on Adaptive EKF Observers for State and Parameter Estimation of Induction Motor. IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 35, No. 3. 2020. P. 1443–1452.

REFERENCES:

1. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. An adaptive tracking control from current measurements for induction motors with uncertain load torque and rotor resistance. – Automatica. Volume 44. Issue 10. 2008. – P. 2593-2599. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2008.02.023>. 2. Ullah E.Z. Adaptive Fuzzy Logic Controller for Indirect Field Oriented Controlled Induction Motor. International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies – iCoMET 2019. doi:10.1109/ICOMET.2019.8673498. 3. Prasad, R.R., Durgasukumar, G. Enhanced performance of indirect vector controlled induction motor drive with a modified type 2 neuro-fuzzy torque controller in interfacing with dSPACE DS-2812. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 54, No. 2. 2021. pp. 219-228.

<https://doi.org/10.18280/jesa.540203>. 4. Zerdali E. A Comparative Study on Adaptive EKF Observers for State and Parameter Estimation of Induction Motor. IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 35, No. 3. 2020. P. 1443–1452.

Naumchuk O. M., (1:ORCID: 0000-0003-2483-4141)

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Ph.D)

Polkhovsky I. P., ⁽¹⁾

student

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

ADAPTIVE CONTROL OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE BASED ON LOAD IDENTIFICATION THROUGH INDIRECT ELECTROMECHANICAL PARAMETERS

This paper presents the development of an adaptive control algorithm for an induction motor drive based on load identification using indirect parameters available in frequency converters. The proposed approach relies on the analysis of the actual rotational speed, stator current, and estimated electromagnetic torque of the motor for the timely detection of external disturbances and compensation of their effects. Experimental studies were carried out on an induction motor drive controlled by a Siemens SINAMICS G120 frequency converter under various load and speed operating conditions. Static characteristics of the system were obtained, and the relationships governing variations in the electrical and mechanical parameters of the drive were determined. The dynamic performance of the system under step changes in load was also investigated. The results demonstrate that the proposed system ensures stable speed control with acceptable overshoot characteristics. The findings confirm the effectiveness of using indirect parameters for the implementation of adaptive control strategies in electric drive systems.

Keywords: adaptive control, induction motor drive, frequency converter, load identification, electromechanical parameters.

Отримано: 27 березня 2026 року

Прорецензовано: 29 квітня 2026 року

Прийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Naumchuk O. M., Polkhovsky I. P.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).