

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОСТІ СИСТЕМ ПОКРАЩЕНОГО
ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

С.М. Пересада*, докт.техн.наук, Є.О. Ніконенко**, докт. філософії, О.А. Черненко, А.В. Мельник
НТУ України «КП ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: sergei.peresada@gmail.com; evgeniy.nykonenko@gmail.com.

Векторно-керовані асинхронні електроприводи є одним із основних типів сучасних електроприводів змінного струму завдяки відомим перевагам асинхронних двигунів. Останні роки характеризуються відновленням інтересу до подальшого розвитку методів керування асинхронними двигунами (АД) у зв'язку з існуючими обмеженнями використання постійних магнітів на основі рідкісноземельних матеріалів для виробництва синхронних двигунів. Повномасштабне дослідження динамічних і статичних характеристик систем векторного керування асинхронними двигунами, а також їхній порівняльний аналіз з існуючими аналогами є важливим обов'язковим етапом проектування сучасних електроприводів змінного струму. Оскільки системи векторного керування АД є суттєво нелінійними багатовимірними системами з частково вимірюваним вектором стану, то загальних стандартних методів синтезу і аналізу, у тому числі дослідження динамічних і статичних характеристик в умовах дії параметричних збурень, не існує. Конструювання алгоритмів керування здійснюється на основі різних концептуальних підходів. Це ж стосується і методів дослідження робастності замкнених систем. В літературі запропоновано велику кількість як теоретично обґрунтованих, так і практичних рішень, для яких використовуються різний набір тестів і різні критерії оцінки ефективності, що фактично унеможливорює їх порівняльний аналіз. Запропоновано системний підхід до порівняльного тестування і аналізу показників якості керування та робастності систем векторного керування в умовах дії збурення у вигляді варіацій активного опору роторного кола, який може розглядатися як складова загальної платформи тестування векторно-керованих електроприводів. Порівняльне дослідження класу систем з непрямым і прямим полеорієнтуванням, які базуються на концепції покращеного (робастифікованого) векторного керування АД, демонструє значне підвищення властивостей робастності відпрацювання вектора потокозчеплення як за амплітудою, так і за кутовим положенням, що, в свою чергу, забезпечує компенсацію негативного впливу варіацій активного опору ротора на динамічні процеси регулювання і ефективність процесів електромеханічного перетворення енергії. Бібл. 21, рис. 6.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, робастність, порівняльне тестування, спостерігач вектора потокозчеплення повного порядку, енергоефективність, статичні і динамічні характеристики.

Вступ. В останні два десятиліття синхронні двигуни зі збудженням від постійних магнітів витісняють асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором в електроприводах малої та середньої потужності завдяки вищим показникам потужності за об'ємом і масою, а також більшому ККД. В той же час наявність постійних магнітів на основі рідкоземельних елементів є стримуючим фактором розповсюдження синхронних електроприводів, оскільки вони мають обмежене використання і постійно зростаючу ціну. Це стимулювало відновлення інтересу до подальшого розвитку методів керування АД, які є простими високонадійними електричними машинами, мають низьку ціну і тому конкурентоздатні у багатьох промислових застосуваннях [1].

Векторне полеорієнтоване керування, непряме IFOC (Indirect Field Oriented Control) та пряме DFOC (Direct Field Oriented Control) являються основними методами керування АД, забезпечують високі динамічні показники і енергоефективність, які наближаються до тих, що досягаються в синхронних електроприводах. В той же час таке твердження є справедливим тільки за умови точно відомих параметрів моделі електричної частини АД. Це пояснюється тим фактором, що векторне керування АД є модельно орієнтованим, тому невизначеність параметрів моделі, які

© Пересада С.М., Ніконенко Є.О., Черненко О.А., Мельник А.В., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-8948-722X> ; ** <https://orcid.org/0000-0003-2379-5566>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



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

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

використовуються в алгоритмі векторного керування, призводить до деградації як динамічних, так і енергетичних показників електроприводу [2, 3].

Проблема параметричної залежності алгоритмів IFOC і DFOC активно досліджувалася на початковій стадії розвитку систем векторного керування АД [3–7] і є актуальною на теперішній час [8]. Результатами значної кількості досліджень встановлено, що найбільш критичним параметричним збуренням в системах векторного керування є активний опір роторного кола R_2 , який визначає його сталу часу $\tau = L_2/R_2$, де L_2 – індуктивність ротора. Початкове значення R_2 у загальному випадку є невідомим і не доступне для безпосереднього вимірювання. Задля його визначення на етапі ініціалізації системи застосовують алгоритми ідентифікації як складові процедур самоналаштування (self-commissioning). Важливо відмітити, що на точність оцінювання R_2 впливає наскільки точно відомі інші параметри моделі АД (індуктивності і активний опір статора), тому в загальному випадку враховується, що ідентифікований параметр R_2 завжди має деяку невизначеність. Більш критичним є фактор варіацій опору ротора внаслідок його нагріву в процесі роботи двигуна. Загально прийнято ([9] та список посилань), що сукупний діапазон невизначеності може бути в межах $(-50 \div +70)\%$ від номінального значення. Відмітимо, що механізм значної чутливості систем полеорієнтованого векторного керування АД як класичних IFOC та DFOC, які є де-факто промисловим стандартом, так і дослідницьких, що використовують весь спектр сучасних методів керування, визначається самим методом полеорієнтування за невимірюваним вектором потокозчеплення. Як результат, керування потокозчепленням є розімкненим і тому чутливим до варіацій параметрів роторного кола.

Найбільш розповсюджені напрямки компенсації негативного впливу змін опору ротора базуються на теорії адаптивних [10–12] і робастних систем керування [13–16]. Адаптивні системи векторного керування забезпечують глобальне асимптотичне оцінювання активного опору ротора, після завершення якого система має властивості такі ж, як у випадку відомих параметрів. Проте адаптивні алгоритми є чутливими до зміни параметрів, які не передбачають адаптацію, кількість параметрів одночасного оцінювання обмежена умовами персистентності збудження. З технічної точки зору цей тип систем вимагає використання високоточного інвертора і системи вимірювання, а складність самого адаптивного алгоритму – значної розрахункової потужності цифрового контролера, що обумовлює обмеженість застосування цього типу керування на практиці. Робастні системи, прикладом яких є результати [9, 13–16], забезпечують часткову компенсацію збурень, але є простішими. В [9] автори запропонували технологію покращеного непрямого векторного керування (англ. I-IFOC – Improved IFOC), яка забезпечує не тільки високі динамічні показники якості відпрацювання швидкості та потокозчеплення, а й сильні властивості робастності до зміни активного опору ротора. У [17] надано теоретичне порівняння алгоритмів стандартного непрямого векторного керування (IFOC) та I-IFOC, підтверджене результатами повномасштабного експериментального тестування. Показано, що синтезована за допомогою другого метода Ляпунова підсистема потокозчеплення набуває властивості замкнених від’ємним зворотним зв’язком за невимірюваним потокозчепленням, що і визначає робастифікацію I-IFOC. Системи прямого векторного керування використовують спостерігач потокозчеплення, який надає інформацію про вектор потокозчеплення та повністю визначає властивості робастності алгоритмів векторного керування [15, 18–20]. Запропоновано велику кількість можливих структур спостерігачів з певними ступенями свободи для проектування коригуючих зв’язків [18]. У [19] представлено алгоритм покращеного прямого векторного керування АД на основі спостерігача зниженого порядку (I-DFOC – Improved DFOC), який використовує технологію робастифікації [9]. Загальнотеоретичний розв’язок задачі векторного керування АД зі спостерігачем вектора потокозчеплення повного порядку (англ. FO-DFOC – Full-Order DFOC) представлено у [15]. Структура зворотних зв’язків спостерігача і побудованого на його основі алгоритму керування надає можливість досягти не тільки глобальної експоненційної стійкості і специфікації показників якості керування, але й робастифікувати алгоритм FO-DFOC.

Складність проблеми побудови робастних систем векторного керування АД полягає в тому, що конструктивних методів підвищення робастності в нелінійних системах такої складності не існує, тому рекомендації щодо застосування тих чи інших структур алгоритмів керування, а також налаштування їх зворотних зв’язків можна розробити лише на основі повномасштабного дослідження характеристик систем керування у типових режимах роботи. З іншого боку конструювання робастних алгоритмів здійснюється на основі різних концептуальних підходів. Це ж стосується і методів дослідження робастності замкнених систем, для яких використовуються різний набір тестів і критеріїв оцінки ефективності, що ускладнює або взагалі унеможливорює їхній порівняльний аналіз.

Особливо це важливо для великої кількості нових пропозицій, для яких відсутнє експериментальне підтвердження або промислове впровадження.

Метою роботи є розробка системного підходу до порівняльного тестування й аналізу показників якості керування та робастності систем векторного керування в умовах дії збурення у вигляді варіацій активного опору роторного кола. Як репрезентативний приклад виконано порівняльне дослідження класу систем з непрямим і прямим полеорієнтуванням, які базуються на концепції покращеного векторного керування АД.

Методичні аспекти синтезу і дослідження властивостей робастності систем векторного керування АД. Системи векторного керування АД є суттєво нелінійними багатовимірними системами з частково вимірюваним вектором стану, оскільки вектор потокозчеплення (ротора, статора) не є вимірюваним. Для цього класу систем автоматичного керування критично важливим є синтез алгоритму керування, який забезпечує замкненій системі властивість глобальної експоненційної асимптотичної стійкості, що в свою чергу гарантує деякий рівень робастності відносно обмежених параметричних і координатних збурень [20]. В умовах дії збурень системи втрачають асимптотичність, а стійкість у загальному випадку має розглядатися як локальна, що впливає на діапазон зміни збурень задля забезпечення стійкості досліджуваної системи. Оскільки загальних аналітичних методів дослідження робастності нелінійних систем такого рівня складності не існує, то це обумовлює необхідність дослідження їхніх властивостей робастності як окремого класу систем керування на основі визначених режимів тестування. Методологія дослідження, яка пропонується, передбачає, що збурений рух є стійким.

Задля порівняння алгоритмів векторного керування прийнято використовувати стандартний IFOC [1, 9], динамічні властивості і робастність якого є загально відомими. Виходячи з розгляду «найгіршого» випадку, діапазон змін активного опору ротора приймають в межах $-50\% \div +70\%$ відносно його номінального значення. Діапазон змін моменту і кутової швидкості двигуна приймають в межах їхніх номінальних значень (включаючи нульову швидкість) в рушійному та генераторному режимах. Якщо передбачено режим ослаблення поля, то враховуються показники в зоні швидкостей вищих за номінальну із статичним обмеженням у вигляді постійних потужності і ковзання.

За умови дії варіацій активного опору ротора ΔR_2 ($R_2 = R_{2N} + \Delta R_2 > 0$, де R_{2N} – номінальне значення) для оцінки властивостей робастності, використовуються похибки відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора (або статора) $|\tilde{\Psi}| = \sqrt{\tilde{\Psi}_d^2 + \tilde{\Psi}_q^2}$ та моменту $\tilde{M} = M - M^*$, де $\tilde{\Psi}_d = \Psi_d - \Psi^*$, $\tilde{\Psi}_q = \Psi_q - \Psi_q^*$ – похибки регулювання компонент вектора потокозчеплення Ψ_d , Ψ_q , який представлено в синхронній системі координат ($d-q$); $\Psi^* > 0$ – задана траєкторія модуля вектора потокозчеплення; M^* – задана траєкторія моменту. Похибки $\tilde{\Psi}_d$, $\tilde{\Psi}_q$, $\tilde{M}$ розглядаються в статичних і динамічних режимах керування моментом і вектором потокозчеплення. Задля дослідження статичних характеристик формують задані траєкторії Ψ^* та M^* , які набувають постійних значень. Значення похибок відпрацювання потокозчеплення і моменту в загальному випадку залежать від знаку і значень збурення ΔR_2 , моменту двигуна M і кутової швидкості ω .

Необхідно відмітити, що похибки $|\tilde{\Psi}|$, $\tilde{M}$ можливо розрахувати лише в умовах моделювання, оскільки в реальних системах ці змінні не вимірюються. Значення збурення ΔR_2 (R_2) при цьому задається в моделі АД, в той час як в алгоритмі векторного керування встановлюється його номінальне значення R_{2N} . В експериментах навпаки варіації опору ротора встановлюються в алгоритмі керування, в той час як параметри моделі реального двигуна вважаються незмінними протягом кожної окремої серії швидких тестів, коли температура ротора може вважатися сталою.

Аналіз впливу варіацій опору ротора на динаміку процесів електромеханічного перетворення здійснюється в замкненій системі в режимі регулювання кутової швидкості в умовах відпрацювання типових заданих траєкторій кутової швидкості і стрибкоподібного моменту навантаження. Збурений рух порівнюється з еталонним для номінального опору R_{2N} . Статичні енергетичні характеристики за значеннями споживаної активної потужності для заданої механічної потужності визначають рівень енергоефективності (ККД) процесу електромеханічного перетворення енергії.

Сімейство спостерігачів вектора потокозчеплення ротора АД повного порядку. Базову теорію спостерігачів вектора потокозчеплення АД повного порядку наведено у [18]. В [15] запропоновано конструювати спостерігач у синхронній системі координат ($d-q$), оскільки змінні спостерігача відповідають тим, що використовуються в алгоритмі векторного керування. Його загальна структура має вигляд

$$\begin{aligned}\dot{\hat{i}}_{1d} &= -\gamma \hat{i}_{1d} + \omega_0 \hat{i}_{1q} + \alpha \beta |\hat{\psi}| + \sigma^{-1} u_{1d} + v_{1d}, & \dot{\hat{\psi}} &= -\alpha |\hat{\psi}| + \alpha L_m \dot{i}_{1d} + v_{2d}, \\ \dot{\hat{i}}_{1q} &= -\gamma \hat{i}_{1q} - \omega_0 \hat{i}_{1d} - \beta \omega |\hat{\psi}| + \sigma^{-1} u_{1q} + v_{1q}, & \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + (\alpha L_m \dot{i}_{1q} + v_{2q}) |\hat{\psi}|^{-1}, |\hat{\psi}| > 0,\end{aligned}$$

де $\hat{i}_{1d}$, $\hat{i}_{1q}$, $|\hat{\psi}|$ – оцінені значення струмів статора і модуля вектора потокозчеплення ротора; u_{1d} , u_{1q} – напруги статора; ω_0 , ε_0 – кутові швидкість і положення синхронної системи координат (d - q) відносно стаціонарної системи координат статора (a - b); (v_{1d} , v_{1q} , v_{2d} , v_{2q}) – вектор коригуючих зворотних зв'язків спостерігача. Параметри α , β , γ , σ визначаються як: $\alpha = \tau^{-1} = R_2/L_2$ ($\alpha_N = R_{2N}/L_2$), $\beta = L_m/(L_2\sigma)$, $\gamma = R_1/\sigma + \alpha L_m\beta$, $\sigma = L_1 - L_m^2/L_2$, де R_1 – активний опір статора; L_1 , L_m – індуктивності статора і контура намагнічування. Без втрати загальності прийнято одну пару полюсів.

Конструювання вектора (v_{1d} , v_{1q} , v_{2d} , v_{2q}) з використанням другого методу Ляпунова дає змогу синтезувати сімейство спостерігачів потокозчеплення, з яких можливо визначити структури, що володіють як задовільними динамічними показниками, так і підвищеними властивостями робастності [15].

Один із запропонованих у [15] варіантів синтезу має вигляд: $v_{1d} = k_i e_d + \alpha \beta \tilde{\psi}$, $v_{1q} = k_i e_q - \beta \omega \tilde{\psi}$, $v_{2d} = \alpha e_d - \omega e_q + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_{1d}$, $v_{2q} = \alpha e_q + \omega e_d - \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_{1d}$, де $e_d = i_{1d} - \hat{i}_{1d}$, $e_q = i_{1q} - \hat{i}_{1q}$, $\tilde{\psi} = |\hat{\psi}| - \psi^*$ – похибки оцінювання струмів і похибка відпрацювання оціненого модуля вектора потокозчеплення відповідно; γ_1 , k_i – коефіцієнти коригуючих зворотних зв'язків спостерігача.

Дослідження робастності систем векторного керування. Значення похибок регулювання для стандартних IFOC і DFOC збігаються і є незалежними від кутової швидкості.

Результати порівняння стандартних і покращених систем векторного керування. Дослідження виконано для АД №1 (OEMER 7-80/С) потужністю 0.6 кВт з наступними номінальними даними: кутова швидкість ротора $\omega_N = 100$ рад/с; потокозчеплення ротора 0.94 Вб; активні опори і індуктивності: $R_1 = 6.6$ Ом; $R_{2N} = 5.3$ Ом; $L_1 = 0.475$ Гн; $L_2 = 0.47$ Гн; $L_m = 0.45$ Гн.

На рис. 1 показано залежності похибок $|\hat{\psi}|$, $\dot{M}$ від кутової швидкості з $\Delta R_2 = -0.5R_{2N}$ та $\Delta R_2 = R_{2N}$ у разі відпрацювання номінального моменту $M^* = 6$ Нм для коефіцієнтів робастифікації: а) $\gamma_1 = 0.05$; б) $\gamma_1 = 0.3$. На графіках прийнято позначення: 1 – IFOC [1] (DFOC [1]); 2 – I-IFOC [9] та 3 – I-DFOC [19]. Графіки на рис. 1 демонструють підвищення робастності алгоритмів покращеного векторного керування для діапазону ненульових кутових швидкостей. Зазначимо, що під час зміни знаку ΔR_2 змінюється знак похибки відпрацювання моменту, водночас максимуми (мінімуми) дзвоноподібних характеристик зміщені в область генераторного режиму. У разі зміни знаку заданого моменту знак похибки відпрацювання моменту також зміниться. Ширина дзвоноподібних характеристик зменшується зі збільшенням γ_1 , а криві I-IFOC і I-DFOC наближаються одна до одної.

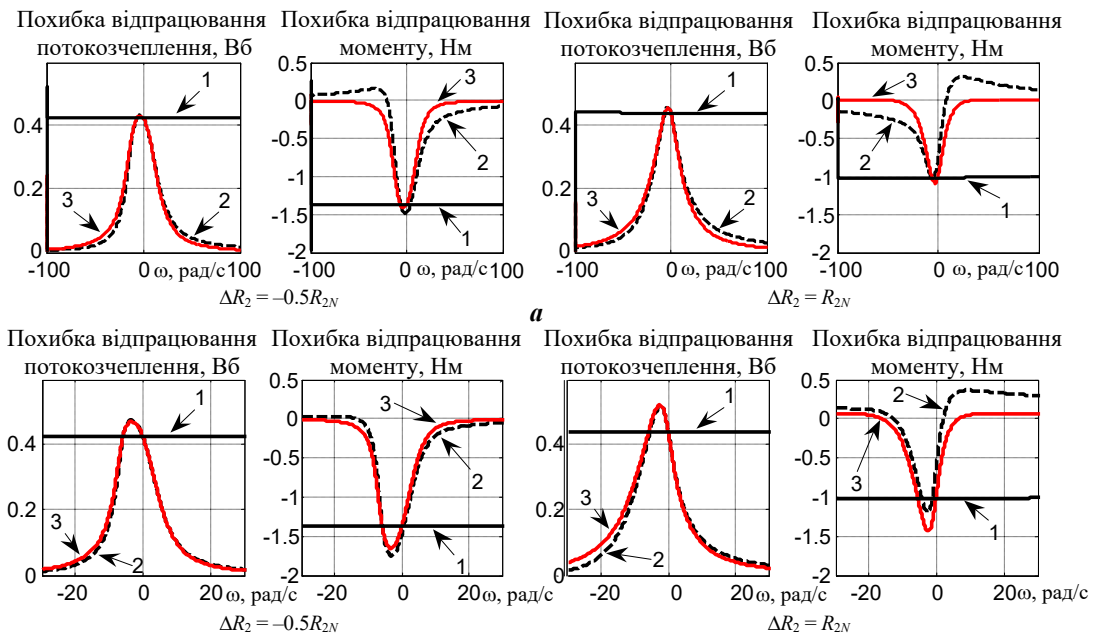


Рис. 1

Порівняння систем прямого векторного керування зі спостерігачами зниженого і повного порядку. На рис. 2 наведено графіки похибок відпрацювання в системах IFOC, I-DFOC та FO-DFOC [15] в умовах попереднього тесту. Характеристики пронумеровано: 1 – IFOC; 2 – I-DFOC; 3 – FO-DFOC.

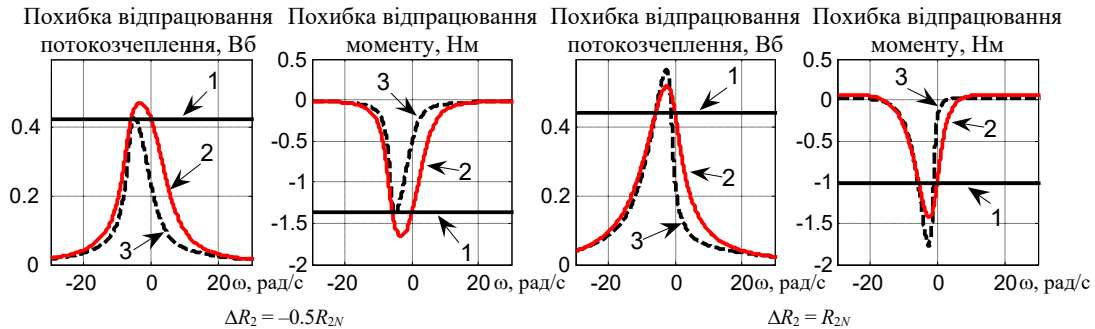


Рис. 2

З рис. 2 слідує, що для всіх розглянутих режимів в системі FO-DFOC точність регулювання збільшилася завдяки доданим коригуючим зв'язкам у складі спостерігача повного порядку. Площа під кривою похибок, яка може служити кількісною оцінкою, зменшилася приблизно на 25-50% порівняно з I-DFOC.

Замітимо, що важливим є дослідження поведінки розглянутих алгоритмів за умов нульової кутової швидкості ротора, коли дія коригуючих зв'язків, які залежать від неї, відсутня.

На рис. 3 показано залежності похибок відпрацювання для діапазону змін опору $R_2 = (0.5 \div 2)R_{2N}$ (зміна $\Delta R_2 = (-0.5 \div 1)R_{2N}$) за умов $\gamma_1 = 0.05$, $\omega = 0$. Результати, наведені на рис. 3, свідчать про те, що структура спостерігача вектора потокозчеплення повного порядку має робастифікуючі властивості навіть за умов нульової кутової швидкості ротора. Інтегральні квадратичні похибки при цьому зменшилися більш, ніж у 3 рази порівняно з I-DFOC.

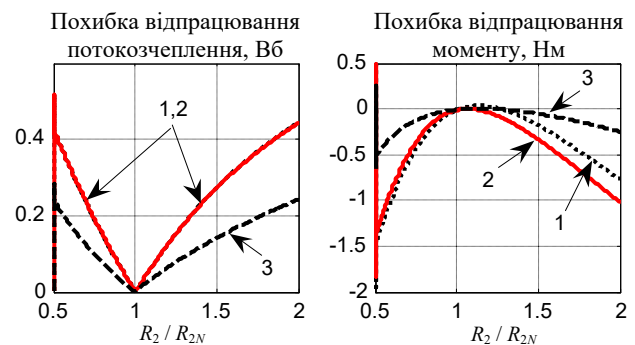


Рис. 3

Енергетичні характеристики алгоритмів

стандартного і покращеного векторного керування. Експериментальні дослідження проводилися з використанням станції швидкого прототипного тестування, функціональну схему якої показано на рис. 4 [21] з АД №1 потужністю 0.6 кВт та АД №2 потужністю 0.75 кВт. Станція включає досліджуваний двигун з живленням від перетворювача частоти, трифазний ШІМ-керований інвертор якого працює з частотою перемикання 10 кГц; навантажувальну машину із власною системою керування моментом; персональний комп'ютер для збирання, обробки і візуалізації процесів, а також для програмування керуючого контролера DSP TMS320F28335, який реалізує алгоритми керування з програмованим відстеженням вибраних змінних. Швидкість двигунів вимірювалася оптичним енкадером з розподільчою здатністю 1024 імпульсів/об. Такт квантування встановлено на рівні 200 мкс.

Номинальні дані АД №2: кутова швидкість $\omega_N = 300$ рад/с; потокозчеплення 0.95 Вб; активні опори та індуктивності: $R_1 = 11$ Ом; $R_{2N} = 5.6$ Ом; $L_1 = 0.95$ Гн; $L_2 = 0.95$ Гн; $L_m = 0.91$ Гн.

Тестування виконувалося в режимі регулювання кутової швидкості з різними постійними значеннями моменту навантаження. У тестуваннях польова компонента струму статора підтримувалася на номінальному рівні з метою отримання номінального потоку за відсутності варіації опору, тобто коли оцінений і реальний параметри є однаковими $\hat{\alpha} = \alpha_N$ ($\Delta R_2 = 0$). В умовах тесту усталені значення похибок відпрацювання кутової швидкості і струмів статора є нехтувано малими завдяки дії алгоритму керування.

Задля порівняння енергетичної ефективності IFOC та I-IFOC в усталеному режимі на рис. 5, а показано залежність моментного струму i_{1q} для різних значень моменту навантаження за $\omega = 50$ рад/с в умовах варіації $\hat{\alpha} \in (0.5 \div 1.7)\alpha_N$ (зміна $\Delta R_2 \in (-0.5 \div 0.85)R_{2N}$) для АД № 1, а на рис. 5, б –

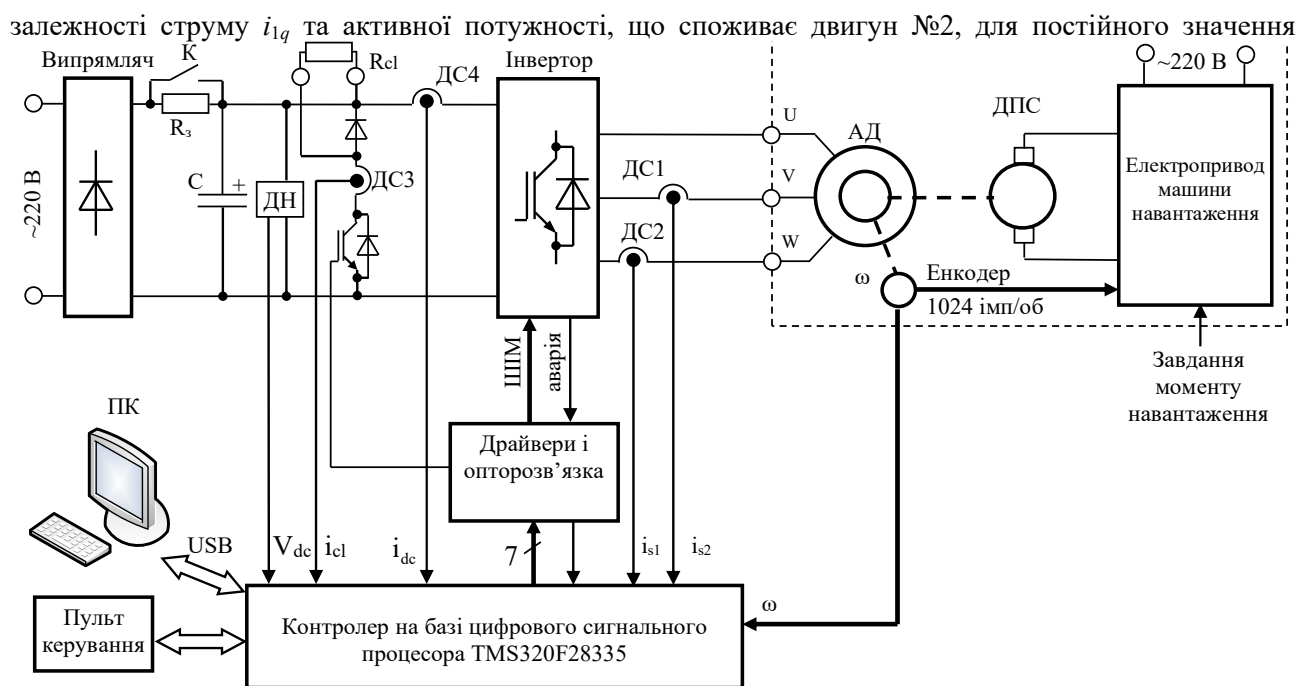


Рис. 4

моменту навантаження (120 % від номінального) за $\omega = 100$ рад/с. З аналізу рис. 5 слідує, що алгоритм I-IFOC забезпечує практично постійне значення струму i_{lq} задля створення постійного моменту навіть за значних відхилень параметра $\hat{\alpha}$ від його номінального значення α_N , що свідчить про стабілізацію вектора потокозчеплення як за амплітудою, так і за кутовим положенням. При цьому в усіх режимах роботи, що досліджувалися, АД потребує меншого значення моментного струму, забезпечуючи в такий спосіб менші втрати активної потужності за умови $\hat{\alpha} \neq \alpha_N$. Зокрема, за умови $\hat{\alpha} = 1.7\alpha_N$ втрати активної потужності збільшуються приблизно у 1.5 раз порівняно з випадком $\hat{\alpha} = \alpha_N$ для IFOC з АД №2. У той же час I-IFOC гарантує стабілізацію енергетичної ефективності в околі номінального рівня.

Динамічні показники алгоритмів стандартного і покращеного векторного керування. Як приклад підвищення динамічних показників якості керування проведено тест розгону АД №2 до кутової швидкості 50 рад/с з номінальним динамічним моментом 2.5 Нм і прикладанням моменту навантаження для стандартного IFOC і покращеного I-IFOC. Графіки перехідних процесів на рис. 6, а демонструють динамічні властивості I-IFOC за номінальних параметрів в режимі відпрацювання кутової швидкості без навантаження, починаючи з $t = 0.6$ с, та в режимі прикладання-скидання моменту навантаження (120 % номінального) у $t = 1$ с і $t = 1.5$ с відповідно. На рис. 6, б та 6, в показано перехідні процеси в умовах цього ж тесту (без скидання навантаження) у разі використання в регуляторі значення $\hat{\alpha} = 1.7\alpha_N$. З рис. 6, б видно, що динаміка стандартного IFOC деградує настільки, що не може вважатися прийнятною для більшості використань. В той же час динамічна поведінка I-IFOC майже не змінюється, як показано на рис. 6, в.

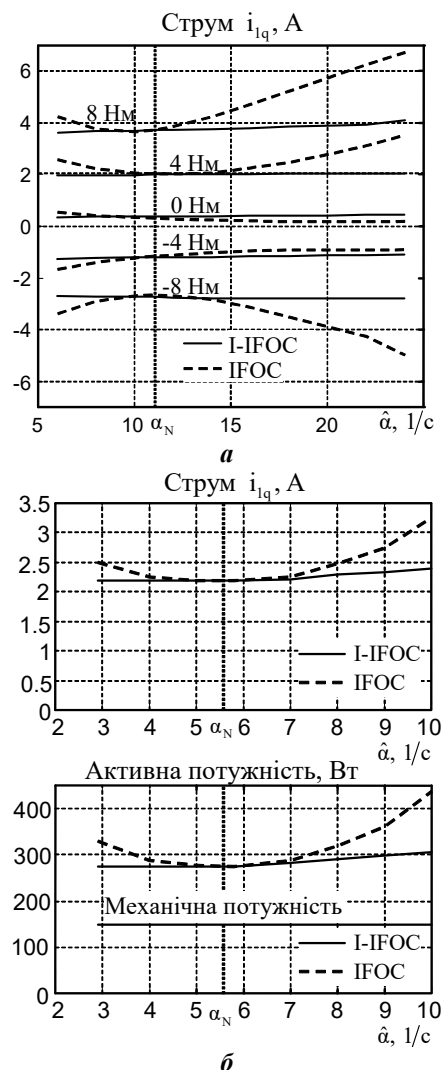


Рис. 5

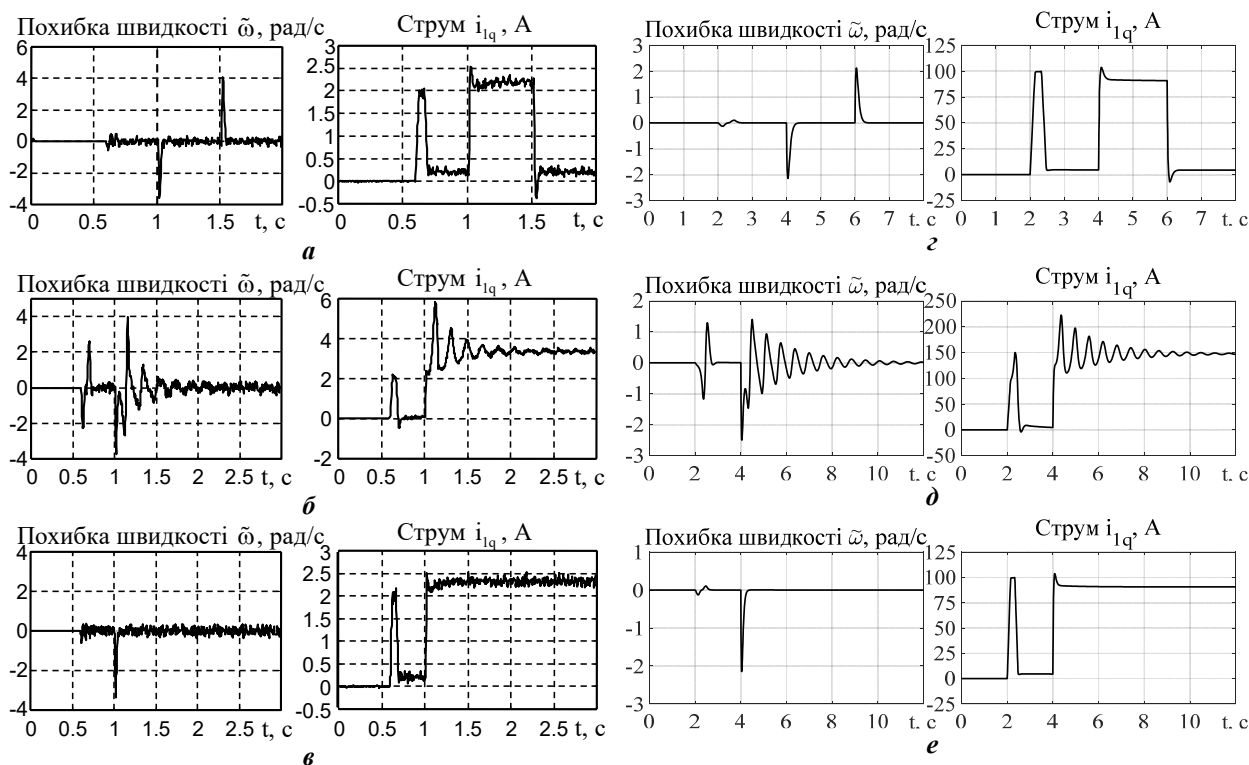


Рис. 6

Оскільки математична модель АД різної потужності є однаковою і відрізняється тільки параметрами, то динамічні властивості систем векторного керування мають подібний характер, що демонструється графіками перехідних процесів на рис. 6, г – рис. 6, е аналогічного тестування, яке було проведено в режимі моделювання для АД №3 потужністю 30 кВт з параметрами: $R_1 = 0.116 \text{ Ом}$; $R_{2N} = 0.068 \text{ Ом}$; $L_1 = L_2 = 0.049 \text{ Гн}$; $L_m = 0.048 \text{ Гн}$.

Висновки. Запропонований системний підхід до порівняльного тестування і аналізу показників якості керування та властивостей робастності систем векторного керування в умовах дії збурення у вигляді варіацій активного опору роторного кола може розглядатися як складова загальної платформи тестування цього класу систем векторного керування АД. Як репрезентативний приклад виконано порівняльне дослідження класу систем з непрямым і прямим полеорієнтуванням, які базуються на концепції покращеного (робастифікованого) векторного керування АД. Продемонстровано, що алгоритми I-IFOC та I-DFOC забезпечують сильніші властивості робастності до варіацій активного опору ротора порівняно зі стандартними алгоритмами IFOC та DFOC. Похибки відпрацювання вектора потокозчеплення і моменту мають менші значення для всього діапазону зміни кутової швидкості за винятком інтервалів поблизу нульової кутової швидкості, оскільки робастифікація досягається за рахунок залежних від кутової швидкості зворотних зв'язків. В системах FO-DFOC зі спостерігачами повного порядку, які є набагато складнішими за I-IFOC та I-DFOC, додатково можливо підвищити точність відпрацювання моменту і потокозчеплення, включаючи діапазон малих кутових швидкостей, у тому числі точку нульової кутової швидкості ротора. Експериментально продемонстровано взаємозв'язок між робастністю регулювання компонент вектора потокозчеплення і моменту та динамічними процесами регулювання кутової швидкості, а також енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії, з якого випливає, що робастифіковані алгоритми I-IFOC, I-DFOC та FO-DFOC забезпечують ефективну компенсацію негативного впливу обмежених варіацій активного опору ротора і мають значний потенціал для подальшого вдосконалення. З практичної точки зору запропонований системний підхід до порівняльного тестування систем векторного керування дає можливість оцінити ефективність нових запропонованих рішень з позицій їхньої цінності для промислового впровадження.

ROBUSTNESS INVESTIGATION OF IMPROVED FIELD-ORIENTED CONTROL SYSTEMS FOR INDUCTION MOTORS

S.M. Peresada, Ye.O. Nikonenko, O.A. Chernenko, A.V. Melnyk
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.
E-mail: sergei.peresada@gmail.com; evgeniy.nykonenko@gmail.com.

Vector-controlled induction electrical drives are one of the main types of modern AC electrical drives due to the well-known advantages of induction motors. Recent years have been marked by a renewed interest in the further development of IM control methods due to the existing limitations on the use of rare-earth materials in the manufacturing of permanent magnets synchronous motors. A full-scale study of the dynamic and static characteristics of induction motors field-oriented control systems, as well as their comparative analysis with existing analogues, is an important and mandatory stage in the modern AC electrical drives design. Since IM field-oriented control systems are essentially nonlinear multi-dimensional systems with a partially measured state-space vector, there are no general standard methods for design and analysis, including the dynamic and static characteristics investigation under parametric disturbances. Control algorithms are designed based on various conceptual approaches, and the same applies to the research methods of the closed-loop systems robustness properties. The literature offers a large number of both theoretically proven and practical solutions, which use different sets of tests and different criteria for evaluating effectiveness, making their comparative analysis virtually impossible. A systematic approach to comparative testing and analysis of control quality and robustness indicators of field-oriented control systems under disturbance conditions in the form of active rotor resistance variations is proposed. It can be considered as a component of a general testing platform for vector-controlled electrical drives. A comparative study of a class of systems with indirect and direct field orientation, based on the concept of improved (robustified) vector control of IM drives, demonstrates a significant increase in the robustness properties of the flux vector regulation, both in terms of amplitude and angular position. In turn, it compensates for the negative impact of active rotor resistance variations on dynamic control processes and the efficiency of electromechanical energy conversion processes. References 21, figures 6.

Keywords: induction motor, field-oriented control, robustness, comparative investigation, full-order flux vector observer, energy efficiency, static and dynamic performance.

1. Bose B. Power electronics and motor drives: Advances and trends. Academic Press, 2020. 1088 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02032-8>.
2. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. High performance control of AC drives with MatLab/Simulink. IEEE Press: John Wiley and Sons, 2021. 482 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119969242>.
3. Chiasson J. Modelling and high performance control of electric machines. John Wiley & Sons, 2005. 709 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471722359>.
4. Krishnan R., Doran F.C. Study of parameter sensitivity in high-performance inverter-fed induction motor drive systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1987. Vol. IA-23. No 4. Pp. 623–635. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1987.4504960>.
5. Krishnan R., Bharadwaj A.S. A review of parameter sensitivity and adaptation in indirect vector controlled induction motor drive systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1991. Vol. 6. No 4. Pp. 695–703. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.97770>.
6. Jansen P.L., Lorenz R.D. A physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for field oriented induction machine drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1994. Vol. 30. No 1. Pp. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.273627>.
7. Kovbasa S.N. Robustness investigation of magnetic flux observers for induction motor. *Nauchnye trudy Kremenchugskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2001. No 1. Pp. 87–92. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38976>. (accessed at 01.08.2025) (Rus)
8. Han Y., Kim H., Kim H., Lee K. Dual MRAS for robust rotor time constant compensation in IFOC IM drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2024. Vol. 39. No 3. Pp. 1983–1993. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2024.3361453>.
9. Peresada S., Tonielli A., Morici R. High performance indirect field-oriented output feedback control of induction motors. *Automatica*. 1999. Vol. 35. Issue 6. Pp. 1033–1047. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00003-5).
10. Verrelli C.M., Savoia A., Mengoni M., Marino R., Tomei P., Zarri L. On-line identification of winding resistances and load torque in induction machines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014. Vol. 22. No 4. Pp. 1629–1637. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2285604>.
11. Marino R., Peresada S., Tomei P. Global adaptive output feedback control of induction motors with

- uncertain rotor resistance. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1999. Vol. 44. No 5. Pp. 967–983. DOI: <https://doi.org/10.1109/9.763212>.
12. Jadot F., Malrait F., Moreno-Valenzuela J., Sepulchre R. Adaptive regulation of vector-controlled induction motors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009. Vol. 17. No 3. Pp. 646–657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.2003434>.
13. Sabzalian M.H., Mohammadzadeh A. A new robust control for induction motors. *IETE Journal of Research*. 2019. Vol. 68. No 2. Pp. 1168–1176. DOI: <https://doi.org/10.1080/03772063.2019.1643265>.
14. Khalil H.K., Strangas E.G. Robust speed control of induction motors using position and current measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1996. Vol. 41. No 8. Pp. 1216–1220. DOI: <https://doi.org/10.1109/9.533690>.
15. Peresada S.M., Kovbasa S.M., Statsenko O.V., Serhiienko O.V. Direct speed-flux vector control of induction motors: controller design and experimental robustness evaluation. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol. 5. No 3. Pp. 217–227. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.15>.
16. Accetta A., Alonge F., Cirrincione M., D'Ippolito F., Pucci M., Rabbeni R., Sferlazza A. Robust control for high performance induction motor drives based on partial state-feedback linearization. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. Vol. 55. No 1. Pp. 490–503. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2869112>.
17. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2003. Vol. 18. No 1. Pp. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.807123>.
18. Verghese G.C., Sanders S.R. Observers for flux estimation in induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1988. Vol. 35. No 1. Pp. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.3067>.
19. Peresada S.M., Kovbasa S.N. Generalized algorithm of a direct vector control of an asynchronous motor. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2002. No 4. Pp. 17–22. (Rus)
20. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. Springer, 2010. 351 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-284-1>.
21. Peresada S.M., Kovbasa S.M., Krasnoshapka N.D. Indirect vector control of induction motors with robustness and adaptation properties to active rotor resistance variations: monograph. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 174 p. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/44255>. (Ukr) (accessed at 01.08.2025)

Надійшла 11.08.2025

Прийнята 10.09.2025