

УДК 621.313.323

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-14>

НОВІ ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ФАЗНИМ РОТОРОМ ЗА СХЕМОЮ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Шрамко Юрій Юрійович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-8141-260X

Ящук Олег Олександрович,

аспірант

Дніпровський державний технічний університет

Лук'яненко Олександр Сергійович,

студент групи 141-24-1м

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Павлишин Сергій Володимирович,

студент групи 141-24-1м

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Асинхронні двигуни з фазним ротором залишаються досить поширеним обладнанням. З метою надання електричним приводам із таким двигуном нових властивостей досліджуються нові перспективи їх використання за схемою машини подвійного живлення (МПЖ), що є одним із найбільш універсальних рішень для систем із регульованим електроприводом. Актуальність дослідження обумовлена потребою у підвищенні енергоефективності, стабільності роботи й адаптивності до змінних умов експлуатації в таких галузях, як вітроенергетика, гірничодобувна промисловість і транспорт.

Проведено аналіз наявних систем, виявлено їх основні недоліки, зокрема чутливість до змін параметрів мережі, складність керування. Використані математичні моделі враховують ефекти в обмотках ротора та статорних струмах. Виконано моделювання для аналізу роботи системи за різних режимів навантаження.

Запропоновано алгоритми керування, які забезпечують стабільну роботу двигуна в умовах змінного навантаження. Результати математичного моделювання підтверджують ефективність розроблених підходів, зокрема підвищення стабільності, порівняно з традиційними методами.

Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження розроблених рішень у вітроенергетиці та промислових системах, де важливі висока ефективність і надійність. Отримані результати сприяють розвитку систем керування МПЖ та розширенню сфер їх застосування.

Ключові слова: асинхронні двигуни, фаза ротора, машини подвійного живлення, вітроенергетика, гірничодобувна промисловість, алгоритми керування, енергоефективність.

Shramko Yuri, Yashchuk Oleh, Lukianenko Oleksandr, Pavlyshyn Serhii. New perspectives on the use of asynchronous motors with a phase rotor based on the double-fed induction machine scheme

The article investigates new perspectives on the use of asynchronous motors with a phase rotor based on the double-fed induction machine (DFIM) scheme, which is one of the most versatile solutions for systems with adjustable electric drives. The relevance of the study is driven by the need to enhance energy efficiency, operational stability, and adaptability to changing operating conditions in industries such as wind energy, mining, and transportation.

The study analyzes existing systems and identifies their main drawbacks, including sensitivity to network parameter changes and control complexity. The applied mathematical models account for effects in rotor windings and stator currents. Simulations were conducted to analyze the system's performance under various load conditions.

Proposed control algorithms ensure stable motor operation under dynamic load changes and minimize energy losses. The results of mathematical modeling confirm the effectiveness of the developed approaches, particularly in improving stability compared to traditional methods.

The practical significance of the work lies in the potential implementation of the proposed solutions in wind energy and industrial systems, where high efficiency and reliability are critical. The findings contribute to the development of DFIM control systems and expand their application areas.

Key words: asynchronous motors, phase rotor, double-fed induction machines, wind energy, mining industry, control algorithms, energy efficiency.

Вступ. У сучасній енергетиці та промисловості зростає попит на електромеханічні системи, які поєднують високу енергоефективність, гнучкість у керуванні й адаптивність до змінних умов навантаження. Асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФР) за схемою машини подвійного живлення (МПЖ) є перспективними рішеннями для цих завдань. Їхнє застосування охоплює відновлювальну енергетику, гірничу та металургійну промисловість, транспорт, а також автоматизовані виробничі системи. Зокрема, двигуни з фазним ротором знаходять застосування завдяки своїм унікальним перевагам:

- 1) вітроенергетика – висока енергоефективність і можливість роботи в режимі генератора з подвійним живленням;
- 2) промислові конвеєри – плавний запуск і контроль швидкості;
- 3) млини та дробарки – великий момент на низьких швидкостях, потрібний у гірничо-металургійній галузі;
- 4) прокатні стани – точне регулювання моменту і швидкості для обробки металу;
- 5) насоси – застосовуються у водопостачанні та гідравлічних системах;
- 6) центрифуги – підтримка високих обертів із захистом від перевантажень;
- 7) крани – плавний підйом і точне керування вантажами;
- 8) вентилятори для вентиляції шахт – підтримка необхідної швидкості обертання за умови змінного навантаження.

Однак наявні системи на базі МПЖ мають низку обмежень, які впливають на їхню ефективність і надійність.

Попри значні переваги, як-от регулювання швидкості та моменту, висока енергоефективність і плавний запуск, класичні системи керування МПЖ стикаються з проблемами. Серед основних недоліків можна виділити такі:

- 1) чутливість до змін параметрів;
- 2) висока складність системи керування та наявність додаткового інвертора роблять систему складнішою у виробництві та експлуатації. Це також збільшує витрати на обслуговування та знижує доступність системи;
- 3) обмеження у швидкості регулювання призводить до низької адаптивності до швидких змін вхідних параметрів, як-от вітер або навантаження. Це зменшує їхню ефективність у режимах із високими динамічними змінами;
- 4) потреба в регулярному технічному обслуговуванні заміни щіток і перевірки стану обмоток ротора підвищує експлуатаційні витрати.

Останні публікації досліджень систем на базі асинхронних двигунів із фазним ротором за схемою машини подвійного живлення продемонстрували суттєвий прогрес у вдосконаленні технологій керування, підвищенні енергоефективності й адаптації до змінних умов навантаження. Однак залишається низка питань, які потребують уваги.

1. Моделювання й оптимізація роботи МПЖ.

У роботах [1; 4] значною мірою фокусувалися на розробці математичних моделей, що описують поведінку МПЖ у різних режимах:

Gasmi H. та ін. дослідили стратегії пропозційного подвійного інтегрального регулювання для покращення характеристик вітрових турбін на базі МПЖ. Автори виявили, що вдосконалені алгоритми керування можуть підвищити стабільність у перехідних процесах, однак залишаються проблеми із чутливістю до мережевих коливань [1].

У сучасних дослідженнях асинхронних двигунів із подвійним живленням значна увага приділяється аналізу недоліків наявних систем, як-от чутливість до змін параметрів мережі та складність керування. Наприклад, у роботі Peresada та ін. [2] розглянуто використання адаптивного керування для регулювання потужності, що дає змогу підвищити стабільність системи в умовах змінного навантаження. У статті Xu [3] запропоновано підхід до керування моментом і реактивною потужністю без датчиків положення ротора, що значно знижує витрати на реалізацію системи.

Застосування інтелектуальних алгоритмів також є перспективним напрямом. Так, у дослідженні Moussaoui та ін. [4] запропоновано вдосконалений метод прямого керування моментом із використанням трифазного інвертора, що дало змогу зменшити енергетичні втрати та покращити динамічні характеристики системи. Подібні підходи підтверджують ефективність використання математичних моделей для аналізу й оптимізації роботи машин із подвійним живленням.

2. Нові підходи побудови алгоритмів керування.

Однією з найважливіших областей дослідження є розробка алгоритмів керування для підвищення ефективності МПЖ:

Derouich A. застосував методи нечіткої логіки для прямого керування моментом в електротранспортних засобах. Це дало можливість значно знизити втрати енергії та покращити адаптацію до змін навантаження. Проте автори зазначили, що такі підходи є ресурсомісткими й потребують оптимізації апаратного забезпечення [5].

Saihi L. i Berbaoui B. розробили інтегральний нейронний режим ковзного керування для вітрових установок. Їхній підхід покращив стабільність систем за умов змінного навантаження, але залишив відкритим питання впливу зовнішніх перешкод на ефективність роботи [6].

3. Енергетична ефективність і стійкість до перевантажень.

Сучасні дослідження фокусуються на підвищенні енергоефективності та довговічності систем.

Kadi S. досліджував адаптивне керування активною та реактивною потужністю у вітротурбінних установках. Робота підкреслила, що підвищення енергоефективності потребує складних алгоритмів, які враховують коливання вітру та зміни навантаження [7].

Monsef H. запропонував методи вимірювання температури ротора для покращення стійкості до перевантажень. Це дало змогу мінімізувати ризики перегріву, однак потребує дорогого обладнання для реалізації [8].

4. Використання штучного інтелекту та машинного навчання.

Штучний інтелект (ШІ) стає перспективним напрямом у вдосконаленні систем МПЖ.

Bisht D. запропонував інтеграцію IoT і алгоритмів машинного навчання для оптимізації роботи вітротурбін. Дослідження показало потенціал ШІ в прогнозуванні режимів роботи й адаптації до змінних умов, однак підкреслило потребу у великій обчислювальній потужності [9].

Liu Z. та Zou L. протестували моделі для симуляції вітротурбінних установок, що базуються на ШІ. Їхні підходи продемонстрували високу точність, але потребують додаткового тестування в реальних умовах [10].

Наведені дослідження вказують на великий прогрес у сфері МПЖ, зокрема, у напрямках моделювання, керування й оптимізації. Водночас залишається низка відкритих питань, як-от стійкість до змін параметрів, впровадження ШІ та розробка більш адаптивних систем керування. Вирішення цих проблем є ключовим завданням для подальших досліджень.

У роботі буде розглянуто частину з поставлених питань, а саме підвищення адаптивності до змін параметрів напруги живлення.

Для досягнення мети дослідження та вирішення поставлених завдань було виконано такі кроки:

- розглянуті математичні моделі для опису електромагнітних процесів у двигунах із фазним ротором за схемою машини подвійного

живлення. Для вивчення динамічних процесів у системах МПЖ використовувалися методи математичного вирішення диференціальних рівнянь;

- проведено моделювання впливу зміни величини напруги живлення на стабільність на характеристики системи;

- використано чисельні методи оптимізації для підбору параметрів системи керування та конструктивних особливостей двигуна;

- проведено аналіз обробки експериментальних даних для виявлення ключових факторів, що впливають на ефективність роботи МПЖ.

Методи та методики дослідження. Сучасні дослідження асинхронних машин зосереджуються на їхньому аналізі як частин замкнених нелінійних електромеханічних систем, оптимізованих за заданими критеріями. Математична модель виступає ключовим інструментом для визначення оптимальних режимів роботи та параметрів контрольованих впливів, які забезпечують ці режими. Керуючі дії при цьому визначаються як залежності від часу та стану системи, що перетворює модель на базу для синтезу її керуючої частини.

У сучасних системах керованих електроприводів двигуни отримують живлення від напівпровідникових перетворювачів, які генерують напругу несинусоїдальної форми. Реалізуються різні схеми підключення асинхронних машин. Зважаючи на це, математична модель повинна враховувати ефекти, спричинені живленням від лінійно-незалежних систем напруги, що є важливим для точності аналізу й розробки ефективних систем керування.

Модель асинхронної машини в системі координат А, В, С є оптимальним підходом для аналізу як об'єкта керування, так і для оцінки впливу спрощень, прийнятих під час розробки системи керування. Трифазна модель, що враховує всі нелінійності й несиметрії, є математично складною для використання її для синтезу систем керування, тому для її спрощення застосовуються такі загальновідомі допущення:

1. Намагнічувальні сили обмоток двигуна розподілені синусоїдально вздовж окружності повітряного зазору.

2. Втрати в сталі статора й ротора ігноруються.

3. Обмотки статора та ротора є строго симетричними із зрушенням осей обмоток на 120°.

4. Насичення магнітного кола відсутнє.

Система рівняння, що описують динаміку АДФР у системі координат А, В, С:

$$\begin{aligned}
 p\psi_{sa} &= u_{sa} - R_s i_{sa}; \\
 p\psi_{sb} &= u_{sb} - R_s i_{sb}; \\
 p\psi_{sc} &= u_{sc} - R_s i_{sc}; \\
 p\psi_{ra} &= u_{ra} - R_r i_{ra}; \\
 p\psi_{rb} &= u_{rb} - R_r i_{rb}; \\
 p\psi_{rc} &= u_{rc} - R_r i_{rc}; \\
 M_{em} &= -N_p [(i_{sa} i_{ra} + i_{sb} i_{rb} + i_{sc} i_{rc}) \cdot L_m \cdot \sin(\gamma_{el}) + \\
 &+ (i_{sa} i_{rb} + i_{sb} i_{rc} + i_{sc} i_{ra}) \cdot L_m \cdot \sin(\gamma_{el} + 2\pi/3) + \\
 &+ (i_{sa} i_{rc} + i_{sb} i_{ra} + i_{sc} i_{rb}) \cdot L_m \cdot \sin(\gamma_{el} - 2\pi/3)]; \\
 p\omega_r &= \frac{M_{em} - M_{st}}{J}, \\
 p\gamma &= \omega_r,
 \end{aligned} \quad (1)$$

де M_{em} – електромагнітний момент двигуна, M_{st} – статичний момент, N_p – число пар полюсів, ω_r – швидкість обертання ротора, L_m – взаємна індуктивність між обмотками статора й ротора, γ – кут повороту ротора, γ_{el} – кут повороту ротора в електричних градусах, $\gamma_{el} = N_p \cdot \gamma$, $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}$ – миттєві значення фазних напруг статора й ротора; $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ – миттєві значення струмів статора й ротора; $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}, \psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$ – повні потокозчеплення фазних обмоток; R_s, R_r – активні опори обмоток статора й ротора, p – оператор диференціювання.

Для синтезу систем керування змінні статора й ротора асинхронної машини заміняють їхніми проєкціями на взаємно перпендикулярні осі координат X та Y , які обертаються з кутовою швидкістю ω_k .

Особливості перетворення:

Струми, напруги, та потокозчеплення фаз статора і ротора представляються як дві ортогональні компоненти в системі координат X та Y .

Осьова система X, Y обертається з кутовою швидкістю ω_k , що дає змогу синхронізувати модель із рухомим магнітним полем.

Завдяки цьому спрощенню реальна асинхронна машина аналізується як еквівалентна двофазна машина, що знижує математичну складність моделювання та дає змогу застосовувати стандартні методи керування.

Переваги підходу: перехід до двофазної моделі значно зменшує кількість змінних у системі рівнянь; система координат X, Y, ω_k є базовою для реалізації векторного керування, що широко використовується в сучасних електроприводах; метод підходить для аналізу та синтезу керування в різних режимах роботи, включно з перехідними процесами.

Одними із систем керування асинхронними двигунами, що масово реалізуються в промисловості для систем із високими вимогами до

динамічних показників, є полеорієнтовані системи керування. Рівняння об'єкта керування отримуємо з рівнянь еквівалентної двофазної машини, розв'язуючи їх відносно похідних регульованих координат: швидкості обертання ротора ω_r , та орієнтувального вектора потокозчеплення ψ та складових струму статора або ротора.

Орієнтуючи координатну систему X, Y, ω_k за вектором ψ_r одержуємо математичні моделі АДФР:

– виражені через складові струму статора:

$$\begin{aligned}
 p i_{su} &= \frac{1}{L_s - K_r L_m} u_{su} + \omega_r i_{sv} + \frac{R_r K_r}{\psi_{ru}} i_{su}^2 - \\
 &- \frac{K_r^2 R_r + R_s}{L_s - K_r L_m} i_{su} + \frac{R_r K_r}{L_r (L_s - K_r L_m)} \psi_{ru} + \\
 &+ \frac{i_{sv}}{\psi_{ru}} u_{rv} - \frac{K_r}{L_s - K_r L_m} u_{ru}; \\
 p i_{sv} &= \frac{1}{L_s - K_r L_m} u_{sv} - \omega_r i_{su} - \frac{R_r K_r}{\psi_{ru}} i_{sv} i_{su} - \\
 &- \frac{K_r^2 R_r + R_s}{L_s - K_r L_m} i_{sv} + \frac{K_r \omega_r}{L_s - K_r L_m} \psi_{ru} - \\
 &- \frac{i_{su}}{\psi_{ru}} u_{rv} - \frac{K_r}{L_s - K_r L_m} u_{rv}; \\
 p \psi_{ru} &= u_{ru} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{ru} + R_r K_r i_{su}; \\
 M_{em} &= \frac{3}{2} N_p K_r \psi_{ru} i_{sv}; \\
 p \omega_r &= \frac{M_{em} - M_{st}}{J},
 \end{aligned} \quad (2)$$

– виражені через складові струму ротора:

$$\begin{aligned}
 p i_{ru} &= -\frac{K_s}{L_r - K_s L_m} u_{su} + \omega_r i_{rv} - \frac{R_r}{\psi_{ru}} i_{rv}^2 + \\
 &+ \frac{u_{rv}}{\psi_{ru}} i_{rv} + \frac{R_s}{L_s (L_r - K_s L_m)} \psi_{ru} - \frac{R_r + R_s \frac{L_r}{L_s}}{L_r - K_s L_m} i_{ru} + \\
 &+ \frac{1}{L_r - K_s L_m} u_{ru}; \\
 p i_{rv} &= -\frac{K_s}{L_r - K_s L_m} u_{sv} - \omega_r i_{ru} + \frac{R_r}{\psi_{ru}} i_{ru} i_{rv} - \\
 &- \frac{u_{ru}}{\psi_{ru}} i_{ru} - \frac{\omega_r}{L_r - K_s L_m} \psi_{ru} - \frac{R_r + R_s \frac{L_r}{L_s}}{L_r - K_s L_m} i_{rv} + \\
 &+ \frac{1}{L_r - K_s L_m} u_{rv}; \\
 p \psi_{ru} &= u_{ru} - R_r i_{ru};
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} N_p \psi_{ru} i_{rv};$$

$$p\omega_r = \frac{M_{em} - M_{st}}{J}.$$

За виконання умови орієнтації координатної системи X, Y, ω_k за вектором ψ_s одержуємо математичні моделі АДФР:

– виражені через складові струму статора:

$$\begin{aligned} p i_{su} &= -\frac{K_r}{L_s - K_r L_m} u_{ru} - \omega_r i_{sv} - \frac{R_s}{\psi_{su}} i_{sv}^2 - \\ &\quad - \frac{R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}}{L_s - K_r L_m} i_{su} + \frac{R_r}{L_r (L_s - K_r L_m)} \psi_{su} + \frac{u_{su}}{\psi_{su}} i_{sv} + \\ &\quad + \frac{1}{L_s - K_r L_m} u_{su}; \\ p i_{sv} &= -\frac{K_r}{L_s - K_r L_m} u_{rv} + \omega_r i_{su} + \frac{R_s}{\psi_{su}} i_{su} i_{sv} - \\ &\quad - \frac{R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}}{L_s - K_r L_m} i_{sv} - \frac{\omega_r}{L_s - K_r L_m} \psi_{su} - \frac{u_{sv}}{\psi_{su}} i_{su} + \\ &\quad + \frac{1}{L_s - K_r L_m} u_{sv}; \\ p \psi_{su} &= u_{su} - R_s i_{su}; \\ M_{em} &= \frac{3}{2} N_p \psi_{su} i_{sv}; \\ p \omega_r &= \frac{M_{em} - M_{st}}{J}, \end{aligned} \quad (4)$$

– виражені через складові струму ротора:

$$\begin{aligned} p i_{ru} &= \frac{1}{L_r - K_s L_m} u_{ru} - \omega_r i_{rv} + \frac{K_s R_s}{\psi_{su}} i_{rv}^2 - \\ &\quad - \frac{R_r + K_s^2 R_s}{L_r - K_s L_m} i_{ru} + \frac{R_s K_s}{L_s (L_r - K_s L_m)} \psi_{su} + \frac{u_{sv}}{\psi_{ru}} i_{rv} - \\ &\quad - \frac{K_s}{L_r - K_s L_m} u_{su}; \\ p i_{rv} &= \frac{1}{L_r - K_s L_m} u_{rv} + \omega_r i_{ru} - \frac{K_s R_s}{\psi_{su}} i_{ru} i_{rv} - \\ &\quad - \frac{R_r + K_s^2 R_s}{L_r - K_s L_m} i_{rv} + \frac{K_s \omega_r}{L_r - K_s L_m} \psi_{su} - \frac{u_{sv}}{\psi_{ru}} i_{ru} - \\ &\quad - \frac{K_s}{L_r - K_s L_m} u_{sv}; \\ p \psi_{su} &= u_{su} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{su} + K_s R_s i_{ru}; \\ M_{em} &= \frac{3}{2} N_p K_s \psi_{su} i_{rv}; \\ p \omega_r &= \frac{M_{em} - M_{st}}{J}. \end{aligned} \quad (5)$$

Математичні моделі асинхронної машини з фазним ротором демонструють, що вона є нелінійним багатозв'язаним об'єктом керування.

Для прикладу складності та взаємозв'язаності каналів керування такої моделі на рис. 1–2 показані структурні схеми АДФР диференціальних рівнянь (2), (5).

Під час побудови системи керування асинхронною машиною з фазним ротором, що має перетворювач в одному з кіл (статора або

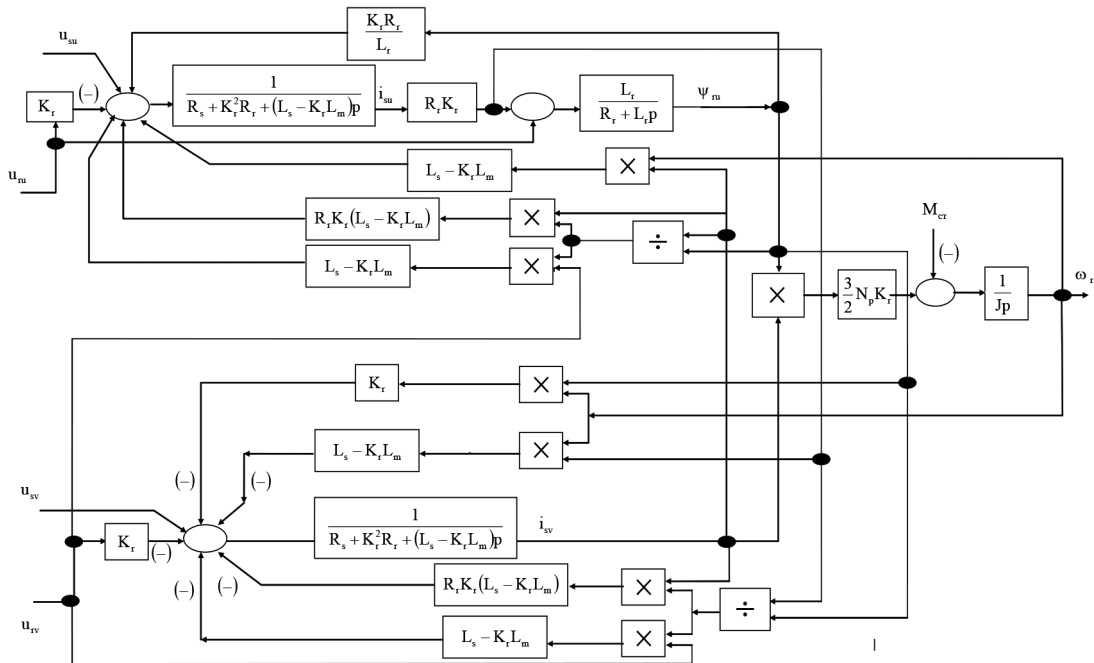


Рис. 1. Структурна схема АДФР згідно із системою (2)

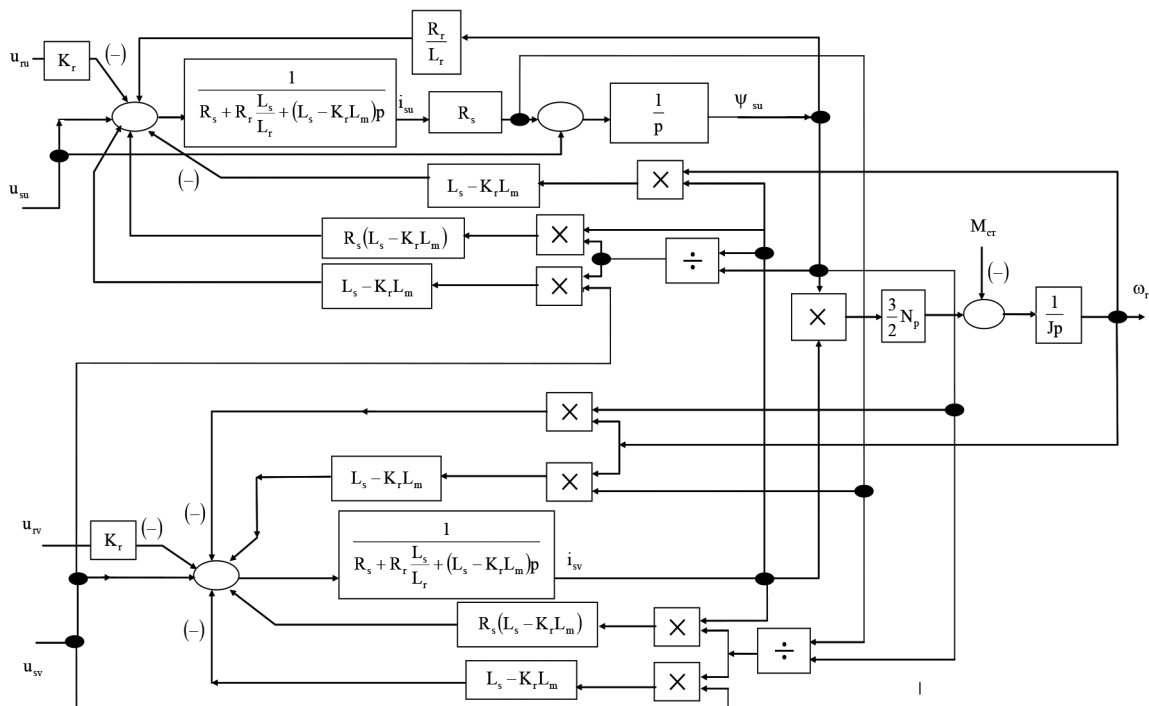


Рис. 2. Структурна схема АДФР згідно із системою (4)

ротора), важливо враховувати опорний вектор потокотчеплення:

- у системі з перетворювачем в одному з кіл (наприклад, у роторі) опорним вектором слід вибирати вектор потокозчеплення саме цього кола;
- використання вектора потокозчеплення для кола, підключеного до мережі (наприклад, статора в разі роботи перетворювача в роторі), є недоцільним, оскільки це ускладнює керування і знижує ефективність.

Якщо перетворювачі встановлені як у колі статора, так і у колі ротора, то в цьому випадку обидва варіанти є рівноцінними для реалізації системи керування.

Для побудови системи оптимального керування електроприводом із схемою МПЖ, яка залишається стійкою за необмеженого збільшення коефіцієнта підсилення, застосовується модифікований принцип симетрії [11].

Запропоновані в цій статті алгоритми керування базуються на модифікованому принципі симетрії, що дає змогу забезпечити стабільність системи навіть за умов змінних параметрів мережі. На відміну від методів, запропонованих у [1; 2; 3], наш підхід дає можливість знизити чутливість до змін напруги живлення та підвищити адаптивність до динамічних змін навантаження.

Порівняно з інтелектуальними алгоритмами, описаними в [4; 5; 6], наші методи є менш ресурсомісткими та більш придатними для впровадження в промислових умовах. Однак

інтеграція ШІ, як у [9; 10], може стати перспективним напрямом для подальшого вдосконалення запропонованих алгоритмів.

Метод симетрії базується на теоретичних положеннях динаміки та стійкості, забезпечуючи:

- високу точність перехідних процесів;
- стійкість системи незалежно від режимів роботи;
- оптимізацію роботи електропривода за критеріями якості.

Переваги підходу:

- ефективність і точність системи керування;
- синтез на основі модифікованого принципу симетрії гарантує стабільність системи навіть у критичних режимах роботи.

Цей підхід є особливо актуальним для сучасних промислових систем, де потрібна висока надійність і оптимізація роботи електроприводів в умовах змінного навантаження та нестабільного живлення.

Модифікований принцип симетрії базується на таких концепціях:

1. Зворотні задачі динаміки – підхід, що дає змогу визначати необхідні властивості системи керування шляхом формулювання умов, які забезпечують задані характеристики перехідного процесу.
2. Принципи обуреного-незбуреного руху – використання теоретичних положень А. М. Ляпунова щодо стійкості системи з урахуванням впливу збурень.

3. Однозначний зв'язок функції Ляпунова з параметрами системи: на відміну від класичних методів, зокрема методу Лєтова – Калмана, модифікований принцип симетрії дає змогу чітко встановити взаємозв'язок між коефіцієнтами функції Ляпунова й параметрами об'єкта керування.

4. Забезпечує досягнення заданих показників якості перехідних процесів.

5. Використовує параметри керованого об'єкта, що підвищує точність синтезу регулятора.

6. Система залишається стійкою навіть за значного підвищення коефіцієнтів підсилення, що робить її менш чутливою до зовнішніх збурень і неточностей моделі.

Класичний метод аналітичного конструювання регуляторів Лєтова – Калмана орієнтований на загальні задачі синтезу, проте він не забезпечує прямого зв'язку між параметрами функції Ляпунова й параметрами системи керування. Натомість модифікований принцип симетрії дає змогу враховувати конкретні характеристики об'єкта керування, що спрощує синтез систем оптимального керування для складних електромеханічних систем.

Цей метод відкриває можливість для створення більш ефективних систем керування в умовах підвищених вимог до надійності та стабільності роботи електроприводів із подвійним живленням.

Синтезовані алгоритми оптимального керування для об'єкта керування в системі координат, орієнтованої за вектором потокозчеплення статора, з перетворювачем у колі статора можуть бути реалізовані з гнучкими та жорсткими зворотними зв'язками.

У просторі основної регульованої координати і її похідних із винесенням за знак sign постійних коефіцієнтів алгоритми керування мають вигляд:

– з інтегральними складовими

$$U_1 = \text{sign} \left[\left(1 + \alpha_{01} \frac{1}{p} \right) (\psi_s^* - \psi_s) - \alpha_{12} p \psi_s - \alpha_{13} p^2 \psi_s \right];$$

$$U_2 = \text{sign} \left[\left(1 + \alpha_{021} \frac{1}{p} + \alpha_{022} \frac{1}{p^2} \right) (i_{su}^* - i_{su}) - \alpha_{23} p i_{su} \right];$$

$$U_3 = \text{sign} \left[\left(1 + \alpha_{03} \frac{1}{p} \right) (\omega_r^* - \omega_r) - \alpha_{34} p \omega_r \right];$$

$$U_4 = \text{sign} \left[\left(1 + \alpha_{041} \frac{1}{p} + \alpha_{042} \frac{1}{p^2} \right) (i_{sv}^* - i_{sv}) \right],$$

– без інтегральних складових

$$\tilde{U}_1 = \text{sign} [\psi_s^* - \psi_s - \tilde{\alpha}_{12} p \psi_s - \tilde{\alpha}_{13} p^2 \psi_s];$$

$$\tilde{U}_2 = \text{sign} [i_{su}^* - i_{su} - \tilde{\alpha}_{23} p i_{su}];$$

$$\tilde{U}_3 = \text{sign} [\omega_r^* - \omega_r - \tilde{\alpha}_{34} p \omega_r];$$

$$\tilde{U}_4 = \text{sign} [i_{sv}^* - i_{sv}],$$

де $\alpha_{01} = -\frac{R_s L_s R_r}{L_m^2 R_s + R_r L_s^2};$

$$\alpha_{12} = \frac{(L_r L_s - L_m^2)(L_r R_s + 2R_r L_s)}{R_r (L_m^2 R_s + R_r L_s^2)};$$

$$\alpha_{13} = \frac{(L_r L_s - L_m^2)^2}{R_r (L_m^2 R_s + R_r L_s^2)};$$

$$\tilde{\alpha}_{12} = \frac{(L_s L_r - L_m^2)(L_r R_s + 2R_r L_s)}{R_r L_s (L_r R_s + L_s R_r)};$$

$$\tilde{\alpha}_{13} = \frac{(L_r L_s - L_m^2)^2}{R_r L_s (L_r R_s + L_s R_r)};$$

$$\alpha_{021} = \frac{R_r (2L_r L_s R_s + L_m^2 R_s + R_r L_s^2)}{(L_r L_s - L_m^2)(L_r R_s + 2L_s R_r)};$$

$$\alpha_{022} = -\frac{R_r (L_r^2 L_s R_s^2 + L_r^2 R_s^2 - L_m^2 L_r R_s + 3L_r R_r L_s R_s + 2R_r^2 L_s^2)}{(L_r L_s - L_m^2)^2 (L_r R_s + 2L_s R_r)};$$

$$\alpha_{23} = \frac{(L_r L_s - L_m^2)^2 (L_r R_s + 2L_s R_r)}{R_s R_r (L_r^2 L_s R_s^2 + L_r^2 R_s^2 - L_m^2 L_r R_s + 3L_r R_r L_s R_s + 2R_r^2 L_s^2)};$$

$$\tilde{\alpha}_{23} = \frac{L_r L_s - L_m^2}{R_r L_s};$$

$$\alpha_{03} = \frac{3N_p \psi_{su}^2}{2J \left(R_s + R_r \frac{L_s}{L_r} \right)}; \alpha_{34} = -\frac{L_m K_r - L_s}{R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}};$$

$$\tilde{\alpha}_{34} = \alpha_{34}; \alpha_{041} = \frac{R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}}{L_s - L_m K_r};$$

$$\alpha_{042} = \frac{3N_p \psi_{su}^2}{2J (L_s - L_m K_r)}.$$

У просторі основних і допоміжних координат алгоритми керування мають вигляд:

– з інтегральними складовими

$$U_1 = \text{sign} \left[\beta_{01} \frac{1}{p} (\psi_s^* - \psi_s) + (\psi_s^* - \beta_{11} \psi_s) - \beta_{12} i_{su} \right];$$

$$U_2 = \text{sign} \left[\left(\beta_{021} \frac{1}{p} + \beta_{022} \frac{1}{p^2} \right) (i_{su}^* - i_{su}) + (i_{su}^* - \beta_{22} i_{su}) - \beta_{21} \psi_s \right];$$

$$U_3 = \text{sign} \left[\left(1 + \beta_{03} \frac{1}{p} \right) (\omega_r^* - \omega_r) - \beta_{34} i_{sv} \right];$$

$$U_4 = \text{sign} \left[\left(1 + \beta_{041} \frac{1}{p} + \beta_{042} \frac{1}{p^2} \right) (i_{sv}^* - i_{sv}) \right],$$

– без інтегральних складових

$$\tilde{U}_1 = \text{sign}[\psi_s^* - \tilde{\beta}_{11}\psi_s - \tilde{\beta}_{12}i_{su}];$$

$$\tilde{U}_2 = \text{sign}[i_{su}^* - \tilde{\beta}_{21}\psi_s - \tilde{\beta}_{22}i_{su}];$$

$$\tilde{U}_3 = \text{sign}[\omega_r^* - \omega_r - \tilde{\beta}_{34}i_{sv}];$$

$$\tilde{U}_4 = \text{sign}[i_{sv}^* - i_{sv}];$$

$$\text{де } \beta_{01} = \alpha_{01}; \beta_{11} = -\frac{(L_r L_s - 2L_m^2)R_s - R_r L_s^2}{L_m^2 R_s + R_r L_s^2};$$

$$\beta_{12} = -\frac{(L_r L_s - L_m^2)R_r}{L_m^2 R_s + R_r L_s^2};$$

$$\tilde{\beta}_{11} = \frac{L_m^2 R_s + R_r L_s^2}{L_s (L_r R_s + L_s R_r)}; \tilde{\beta}_{12} = -\frac{(L_r L_s - L_m^2)R_s}{L_r R_s + L_s R_r};$$

$$\beta_{021} = \alpha_{021}; \beta_{022} = \alpha_{022};$$

$$\beta_{21} = \frac{(L_r L_s - L_m^2)(L_r R_s + 2R_r L_s)}{R_s (L_r L_s R_s + L_r^2 R_s^2 - L_m^2 L_r R_s^2 + 3L_r R_r L_s R_s + 2R_r^2 L_s^2)};$$

$$\beta_{34} = \frac{3}{2J} N_p \psi_{su} \frac{L_s - L_m K_r}{R_s + R_r} \frac{L_s}{L_r}; \tilde{\beta}_{34} = \beta_{34}; \beta_{041} = \alpha_{041};$$

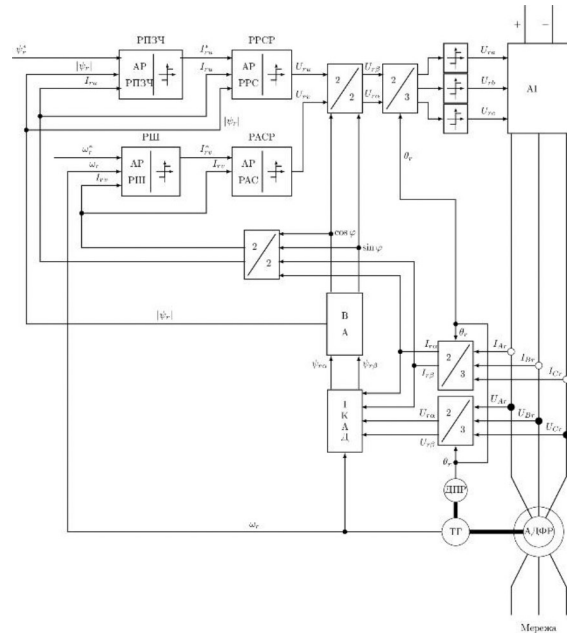
$$\beta_{042} = \alpha_{042}.$$

Коефіцієнти алгоритмів кепкування розраховуються за параметрами об'єкта керування.

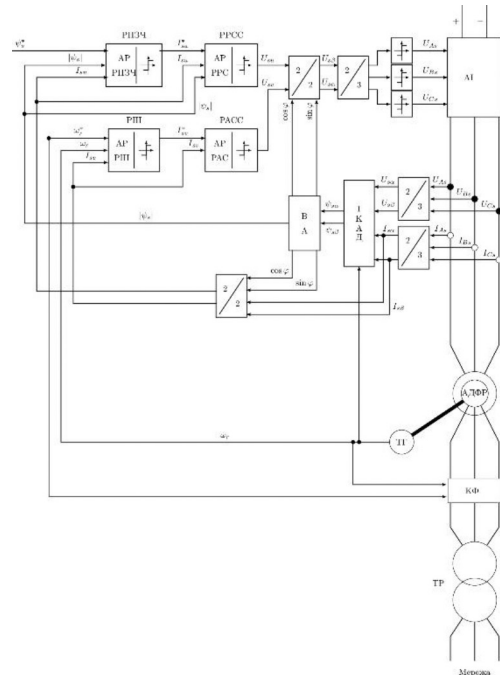
Реалізація структур систем керування АДФР за запропонованою схемою для нереверсивних електроприводів насосів, вентиляторів, конвеєрів з одним перетворювачем, для реверсивних електроприводів з одним перетворювачем і комутатором фаз у другому колі, або з перетворювачами в обох колах АДФР відповідні структурні схеми наведені на рис. 3, 4.

Рис. 3, 4 містять такі позначення: РПС – регулятор поточкозчеплення статора, АРРПЗЧ – аргумент (підсигнатурна функція) алгоритму регулятора поточкозчеплення статора; РРСС – регулятор реактивної складової струму статора, АРРРСС – аргумент (підсигнатурна функція) алгоритму регулятора реактивної складової струму статора; РШ – регулятор швидкості обертання ротора, АРРШ – аргумент (підсигнатурна функція) алгоритму регулятора швидкості обертання ротора; РАСС – регулятор активної складової струму статора, АРРАСС – аргумент (підсигнатурна функція) алгоритму регулятора активної складової струму статора; 2/2, 2/3, 3/2 – перетворювачі координат; АІ – автономний інвертор; ТГ – тахогенератор; ВА – векторний аналізатор; U_{As} , U_{Bs} , U_{Cs} – керуючі сигнали; I_{As} , I_{Bs} , I_{Cs} – виміряні значення фазних струмів; ψ_{sa} , ψ_{sb} – виміряні значення поточкозчеплення статора.

Побудова силової частини електроприводів з АДФР за схемою МПЖ з одним перетворювачем з підключенням іншого до мережі – це



а



б

Рис. 3. Функціональна схема системи з одним перетворювачем:
а – нереверсивна, б – реверсивна

аналог каскадних схем, тільки з розширеними можливостями щодо регулювання динамічних та енергетичних показників. Схеми з перетворювачами в обох колах АДФР відповідають класичному визначенню машини подвійного живлення, усі напруги, що підводяться, регульовані.

Результати моделювання демонструють, що якість керування системами залишається однаковою незалежно від складності регуляторної

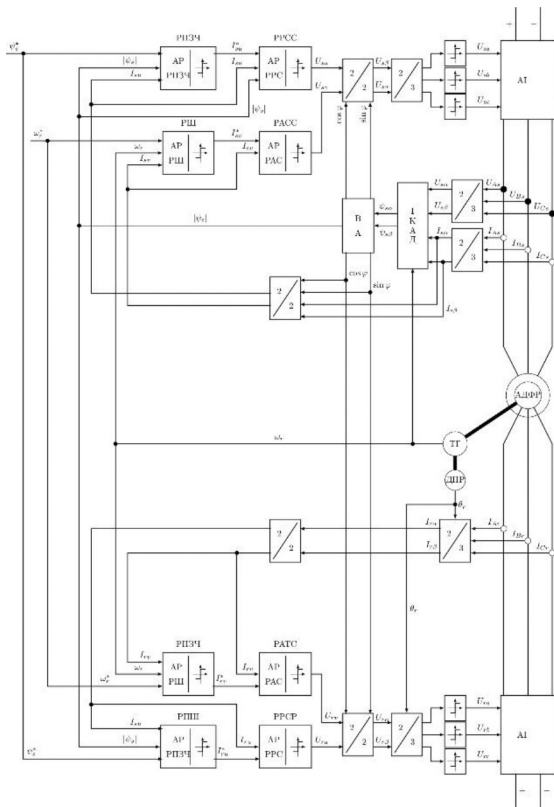


Рис. 4. Структурна схема реверсивної системи перетворювачами в колі статора і ротора

частини контуру ротора. Це свідчить про високу ефективність запропонованих схем і їхню здатність забезпечувати оптимальні параметри роботи двигуна навіть за мінімізації апаратної складності.

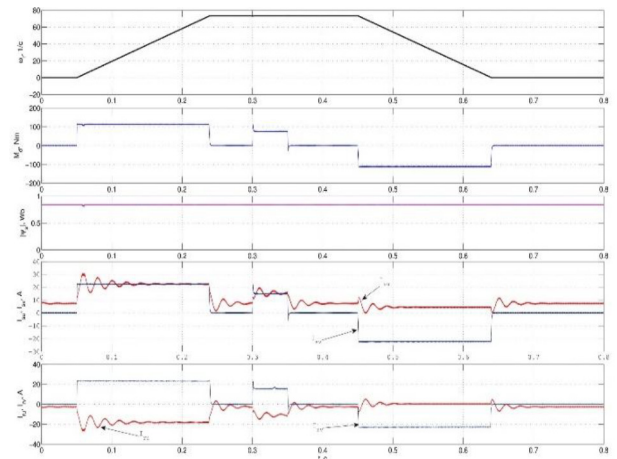
Проблема провалів напруги, які часто виникають під час роботи промислового обладнання, особливо в аварійних ситуаціях, потребує детального аналізу впливу на електромеханічні системи. У цьому контексті важливо дослідити вплив знижених напруги живлення на електроприводи з машиною подвійного живлення порівняно з електроприводами на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

На рис. 6 наведено графіки перехідних процесів за умови зниження напруги живлення на 25% від номінальної.

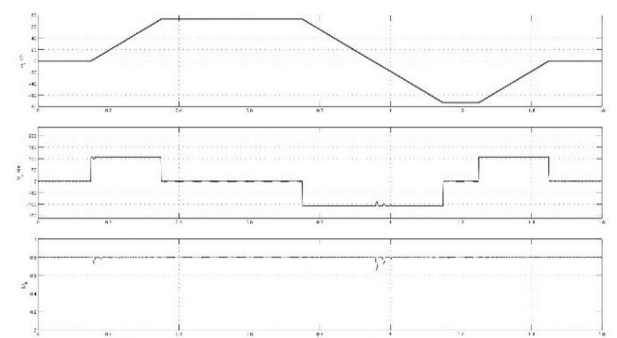
Також зниження напруги впливає на динамічне падіння швидкості, що зображено на рис. 7, де представлені перехідні процеси, що демонструють динаміку падіння швидкості обертання ротора для двофазного асинхронного короткозамкненого двигуна та системи за схемою машини подвійного живлення.

Висновки з аналізу графіків:

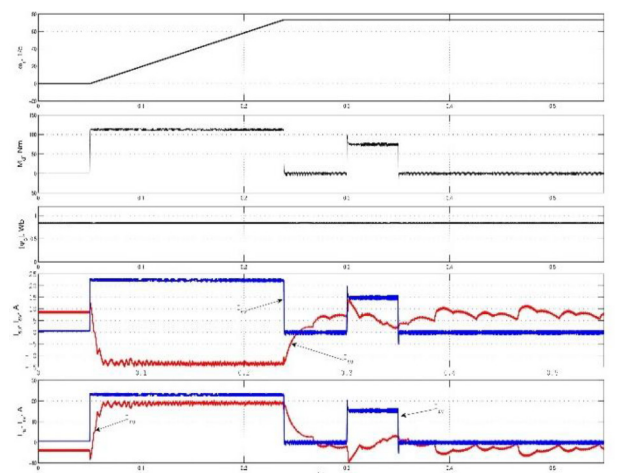
МПЖ з двома перетворювачами показує значно кращу динамічну стійкість навіть за



а



б

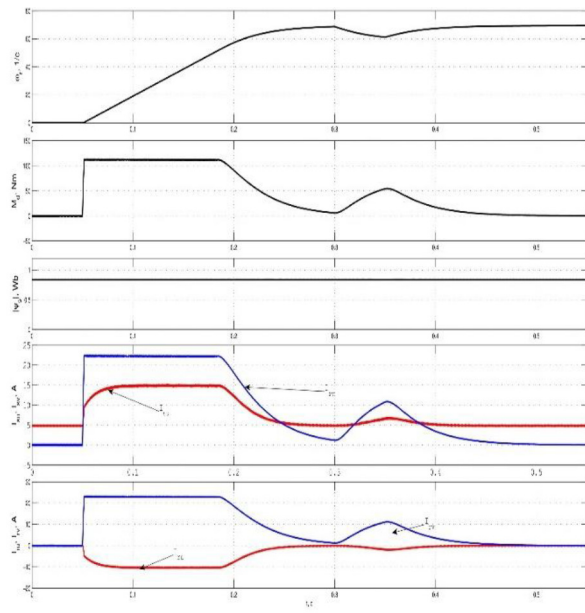


в

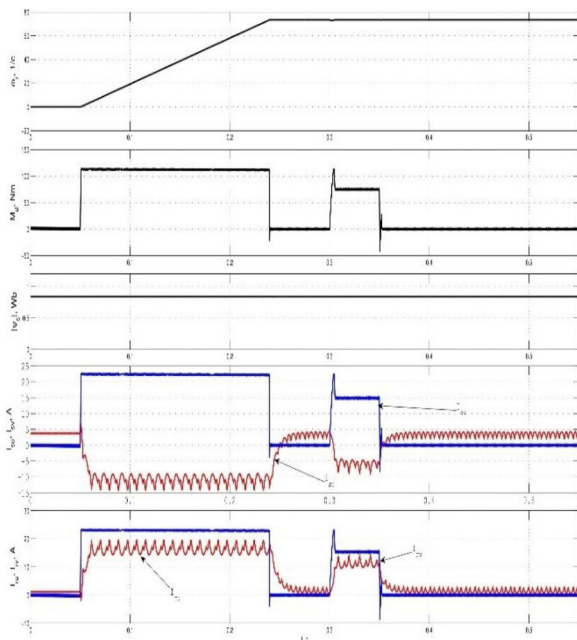
Рис. 5. Перехідні процеси в системах, зображених на рис. 3, 4

умов зниження напруги живлення. Це пов'язано зі здатністю системи адаптуватися до зміни напруги завдяки незалежному регулюванню струмів у статора і ротора.

АДПР, навпаки, демонструє значне падіння швидкості та довший час стабілізації після зміни напруги, що знижує ефективність і надійність роботи в умовах нестабільного живлення.



а



б

Рис. 6. Перехідні процеси за зниження напруги живлення на 25 %

Висновки. Під час дослідження розроблено та проаналізовано математичні моделі, які враховують нелінійні ефекти в обмотках ротора і статора асинхронних двигунів із фазним ротором. Ці моделі забезпечують точний опис електромагнітних процесів і дають змогу прогнозувати поведінку системи за змінних умов експлуатації.

Проведено детальний аналіз наявних систем на базі машин подвійного живлення. Виявлено основні обмеження, включно з чутливістю до

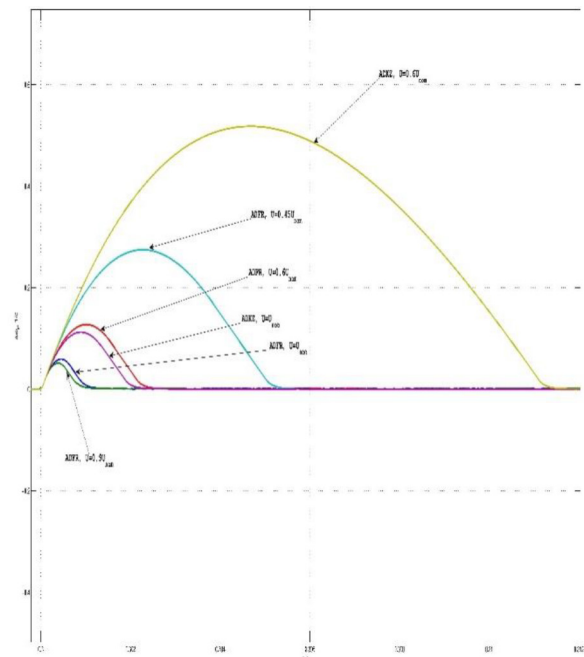


Рис. 7. Динамічне падіння швидкості за різних величин напруги живлення

змін параметрів мережі, складністю керування та недостатньою стійкістю до перевантажень, що обґрунтовує потребу в удосконаленні алгоритмів керування.

Запропоновано нові алгоритми керування, які забезпечують стабільну роботу двигунів у широкому діапазоні режимів. Результати моделювання підтвердили, що запропоновані алгоритми дають можливість знизити чутливість для зміни величини напруги живлення, що, зі свого боку, підвищує стабільність роботи системи.

Виконано моделювання роботи систем у різних режимах навантаження, результати якого підтверджують ефективність запропонованих підходів. Проведені експерименти також демонструють покращення динамічних характеристик.

Розроблені методики можуть бути впроваджені в сучасні промислові й енергетичні системи, зокрема у транспорті та гірничій промисловості. Використання запропонованих алгоритмів керування дає змогу підвищити енергоефективність і надійність обладнання в умовах змінного навантаження.

Отримані результати відкривають нові перспективи для розвитку методів керування асинхронними двигунами за схемою МПЖ. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту та розширення можливостей системи для роботи в умовах нестабільних мереж.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Gasmi H., Benbouhenni H., Colak I., Tafticht T., Bizon N. Using the proportional dual integral strategy to improve the characteristics of the indirect field-oriented control of DFIG-based wind turbine systems. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2024. Vol. 9. P. 100749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100749>
2. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power control of a doubly fed induction machine via output feedback. *Control Engineering Practice*. 2004. Vol. 12. Issue 1. P. 41–57. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00285-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00285-X)
3. Xu L., Cheng W. Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. Vol. 31. No. 3. P. 636–642. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.382126>
4. Moussaoui A., Ben Attous D., Benbouhenni H., Bekakra Y., Nedjadi B., Elbarbary Z.M.S. Enhanced direct torque control based on intelligent approach for doubly-fed induction machine fed by three-level inverter. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Issue 21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39738>
5. Chantoufi A., Derouich A., El Ouanjli N., Mahfoud S., El Idrissi A. Improved direct torque control of doubly fed induction motor in electric vehicles using fuzzy logic controllers. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. P. 100882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100882>
6. Saihi L., Berbaoui B., Ferroudji F., Roummani K., Koussa K. Implementing an advanced neural in the integral sliding mode first order controller for wind turbine chains with DFIG. *2024 4th International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*. BECHAR, Algeria, 2024. P. 325–329. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDiS63605.2024.10783214>
7. Kadi S., Benbouhenni H., Hamdan I., Abdelkarim E. An advanced backstepping control scheme via active and reactive powers for DFIM-based on variable-speed turbine energy. *Sohag Engineering Journal*. 2024. ISSN 2735-5888. EISSN 2735-5896. DOI: <https://doi.org/10.21608/sej.2024.338390.1071>
8. Reigosa D.D., Guerrero J.M., Diez A.B., Briz F. Rotor temperature estimation in doubly-fed induction machines using rotating high-frequency signal injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. No. 4. P. 3652–3662. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2684742>
9. Madeswaran A., Bisht D., Yuvaraj S., Reedy M.U., Al-Attabi K., Dhablia A. AI-controlled wind turbine systems: Integrating IoT and machine learning for smart grids. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 540. P. 03008. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454003008>
10. Liu Z., Zou L., Liu X. D., Pang S. Construction and testing of detailed simulation examples for wind turbine generator units. *2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Harbin, China, 2024. P. 915–920. DOI: <https://doi.org/10.1109/CIEEC60922.2024.10583822>
11. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохина Ю.В. Системи керування асинхронними вентилями каскадами : монографія / Дніпр. держ. техн. ун-т (ДДТУ). Кам'янське: ДДТУ, 2018. 293 с.

REFERENCES:

1. Gasmi, H., Benbouhenni, H., Colak, I., Tafticht, T., & Bizon, N. (2024). Using the proportional dual integral strategy to improve the characteristics of the indirect field-oriented control of DFIG-based wind turbine systems. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 9, 100749. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100749>
2. Peresada, S., Tilli, A., & Tonielli, A. (2004). Power control of a doubly fed induction machine via output feedback. *Control Engineering Practice*, 12(1), 41–57. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00285-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00285-X)
3. Xu, L., & Cheng, W. (1995). Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(3), 636–642. <https://doi.org/10.1109/28.382126>
4. Moussaoui, A., Ben Attous, D., Benbouhenni, H., Bekakra, Y., Nedjadi, B., & Elbarbary, Z.M.S. (2024). Enhanced direct torque control based on intelligent approach for doubly-fed induction machine fed by three-level inverter. *Heliyon*, 10(21). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39738>
5. Chantoufi, A., Derouich, A., El Ouanjli, N., Mahfoud, S., & El Idrissi, A. (2025). Improved direct torque control of doubly fed induction motor in electric vehicles using fuzzy logic controllers. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100882. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100882>
6. Saihi, L., Berbaoui, B., Ferroudji, F., Roummani, K., & Koussa, K. (2024). Implementing an advanced neural in the integral sliding mode first order controller for wind turbine chains with DFIG. *2024 4th International Conference on Embedded & Distributed Systems (EDiS)*, BECHAR, Algeria, 325–329. <https://doi.org/10.1109/EDiS63605.2024.10783214>

7. Kadi, S., Benbouhenn, H., Hamdan, I., & Abdelkarim, E. (2024). An advanced backstepping control scheme via active and reactive powers for DFIM-based on variable-speed turbine energy. *Sohag Engineering Journal*. Sohag University, Faculty of Engineering. <https://doi.org/10.21608/sej.2024.338390.1071>
8. Reigosa, D. D., Guerrero, J. M., Diez, A. B., & Briz, F. (2017). Rotor temperature estimation in doubly-fed induction machines using rotating high-frequency signal injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3652–3662. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2684742>
9. Madeswaran, A., Bisht, D., Yuvaraj, S., Reedy, M.U., Al-Attabi, K., & Dhablia, A. (2024). AI-controlled wind turbine systems: Integrating IoT and machine learning for smart grids. *E3S Web of Conferences*, 540, 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454003008>
10. Liu, Z., Zou, L., Liu, X.D., & Pang, S. (2024). Construction and testing of detailed simulation examples for wind turbine generator units. *2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Harbin, China, 915–920. <https://doi.org/10.1109/CIEEC60922.2024.10583822>
11. Kliuiev O.V., Sadovyi O.V., Sokhina Yu.V. (2018). Systemy keruvannia asynkhronnymy ventylnymy kaskadamy: monohrafiia [Control systems for asynchronous rectifier cascades: monograph]. Kamianske: DDTU [in Ukrainian].