

УДК 621.316.13

ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

СИНЕЦЬКИЙ А.В. аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>, e-mail: xibi-tur@ukr.net;

Мета роботи. Проведення комплексного дослідження та аналізу регулювальних властивостей і закономірностей зміни енергетичних показників електромеханічних систем з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора на базі високовольтних асинхронних двигунів із фазним ротором з вентиляторним характером навантаження для розробки науково обґрунтованих методів підвищення їхньої загальної енергоефективності та мінімізації втрат потужності в усталених і перехідних режимах роботи.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних кіл, теорії електричних машин та автоматизованого електроприводу, та рівняннях математичної фізики для опису процесів електромеханічного перетворення енергії у високовольтних асинхронних двигунах із фазним ротором, застосуванням методів комп'ютерного моделювання, чисельних методів, інтерполяції, апроксимації функцій.

Отримані результати. Досліджено електромагнітні та енергетичні процеси електромеханічної з вентиляторним характером навантаження з урахуванням змінних аеродинамічних параметрів шахтної вентиляційної магістралі. Запропонована електромеханічна система з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора виявляє яскраво виражені адаптивні властивості. Вона демонструє високу робастність і здатність до прецизійного нівелювання будь-яких стохастичних збурень аеродинамічного навантаження, зберігаючи при цьому стійкість і надійність регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна, тим самим підтримуючи стабільність провітрювання шахтних виробок навіть за умов критично заниженої частоти комутації вентилів перетворювача. Встановлено, що при регулюванні швидкості в діапазоні ковзань $s = 0,5 \div s_{\text{ном}}$ досягається підвищення коефіцієнта потужності системи до 0,80–0,93 та ККД до 92,5–94,5 %, що перевищує показники нерегульованого електроприводу на 0,25 та 40 % відповідно.

Наукова новизна. Набув подальшого розвитку принципи побудови енергоефективних систем керування вентиляторних установок. Доведено, що застосування імпульсного регулювання електромеханічних систем з вентиляторних навантаженнях зі змінною аеродинамікою мережі дозволяє не лише стабілізувати робочі процеси, але й суттєво підвищити загальний коефіцієнт потужності (до 0,80–0,93) та ККД системи на знижених швидкостях обертання ротора асинхронного двигуна.

Практична цінність. Практична цінність роботи полягає у доведенні економічної та технічної доцільності впровадження систем імпульсного керування високовольтними асинхронними двигунами, які входять до структури електромеханічних систем для промислових вентиляторних установок. Використання таких електромеханічних систем на діючих промислових об'єктах дає змогу не лише забезпечити точне реагування вентиляційної установки на зміну аеродинамічного опору мережі, але й кардинально покращити енергетичні показники підприємства, а також подовжити міжремонтний інтервал дороговартісних високовольтних двигунів.

Ключові слова: висока напруга, керування, електромеханічна система, моделювання, енергетичні показники, втрати, вентиляторне навантаження, електроспоживання, шахтне електрообладнання

I. ВСТУП

Провітрювання вугільних та рудних шахт за допомогою установок вентиляторів головного провітрювання (ВГП) належить до найбільш енергоємних стаціонарних технологічних процесів гірничодобувних підприємств. Ураховуючи, що номінальна потужність приводних електродвигунів ВГП у середньому

становить 630–1600 кВт, а для надпотужних агрегатів сягає до 4МВт, частка їхнього електроспоживання може становити до 30 % від загального енергобалансу шахти.

Сучасний стан парку ВГП у гірничодобувних регіонах характеризується критичним рівнем фізичного та морального зношення. За статистичними даними, понад 60 % агрегатів вичерпали свій ресурс, причому

© Синецький А.В., 2026

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-2-4>

370 з них відпрацювали понад два нормативні терміни експлуатації [1]. Ситуація ускладнюється тим, що на переважній більшості гірничих підприємств вентиляторні установки досі оснащені традиційними нерегульованими системами керування виконавчих органів – високовольтних асинхронних двигунів.

Головною специфічною особливістю експлуатації ВГП є глибока мінливість аеродинамічного опору шахтної вентиляційної мережі під час роботи підприємства. Ці зміни мають як детермінований, так і стохастичний характер та зумовлені динамікою розвитку гірничих робіт: зміною конфігурації вентиляційної схеми, збільшенням протяжності та перерізу виробок, станом вентиляційних споруд, а також зміною природної тяги, яка циклічно коливається залежно від пори року [2]. Необхідна витрата повітря також є несталою величиною і залежить від інтенсивності газовиділення, кількості діючих очисних і підготовчих вибоїв та обсягів витоків повітря.

Амплітуда відхилень аеродинамічного опору від перспективних значень є колосальною. Фактичний опір мережі досягає свого розрахункового значення в середньому лише через декілька років після введення горизонту в експлуатацію та може змінюватися у 4–10 разів.

На сучасному етапі макроекономічного розвитку гірничої галузі спостерігається стійка тенденція до зниження продуктивності підприємств та скорочення кількості діючих робочих зон. Відповідно, об'єктивна потреба шахт у свіжому повітрі суттєво зменшилася. Проте, через відсутність гнучких систем керування, ВГП продовжують генерувати надлишковий напір. Це неминує зміщує робочу точку агрегату в зону низької ефективності, що призводить до катастрофічного падіння загального коефіцієнта корисної дії (ККД) вентиляторної установки та колосальних невиправданих витрат електроенергії.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Упродовж останнього десятиліття спостерігається значне зростання наукового інтересу до вдосконалення електромеханічних систем на основі асинхронних двигунів із фазним ротором та каскадних схем регулювання. Аналіз сучасної світової літератури дозволяє виділити кілька ключових напрямів досліджень у цій галузі.

Значна кількість публікацій присвячена заміні класичних систем підпорядкованого регулювання на новітні математичні алгоритми. Так, у дослідженні [3] запропоновано систему модельного передбачуваного керування (МРС) для каскадних електроприводів, що дозволило суттєво підвищити швидкодію системи. Проте автори не врахували вплив нагрівання машини на зміну активного опору ротора, що в реальних умовах призводить до помилок керування. Автори в роботі [4] реалізували алгоритм прямого керування моментом (DTC) для потужних двигунів. Їхнє рішення

мінімізує пульсації моменту, однак дослідження обмежене режимами зі статичним навантаженням і не розглядає вентиляторний момент опору. У [5] проаналізовано еволюцію нелінійних стратегій керування і зазначено, що головною перепоною для їх масового впровадження є надмірне розрахункове навантаження на мікропроцесори. Робота [6] присвячена розробці бездатчикового керування на основі спостерігача стану змінного структури. Вирішивши проблему відмови датчиків швидкості, автори залишили поза увагою питання оптимізації загального ККД ЕМС. У статті [7] розроблено предиктивний контролер безпосередньо для промислових вентиляторів, але не розглядається проблема вибору оптимальної частоти комутації ключів інвертора для мінімізації динамічних втрат. У [8] автори провели дослідження, яке є одним із небагатьох, що розглядає шахтні вентиляційні системи: автори запропонували адаптивне керування для компенсації збурень, але повністю проігнорували вплив вищих гармонік струму на тепловий стан високовольтного двигуна при глибоких робочих ковзаннях.

Інший пласт досліджень спрямований на вдосконалення апаратної частини перетворювачів у колі ротора. Авторами в [2] обґрунтовано використання активного випрямляча для оптимізації ефективності. Робота успішно вирішує проблему забезпечення максимального коефіцієнта потужності на стороні мережі, проте ігнорує додаткові втрати від несинусоїдальності струмів у самому роторі. Автори в [9] запропонували покращення якості енергії класичного вентиляторного каскаду за рахунок паралельних активних фільтрів, що є ефективним, але економічно недоцільним для високовольтних систем. У статті [10] досліджено метод просторової векторної модуляції для подавлення вищих гармонік, проте аналіз проведено лише для фіксованих номінальних режимів без урахування динаміки навантаження. В [11] авторами пропонує інноваційне застосування матричних перетворювачів для вентиляторів, алгоритм керування якими виявився занадто складним для надійного функціонування в умовах шахтних підстанцій. У роботі [12] доведено переваги багаторівневих інверторів для високовольтних ЕМС, але не сформульовано критеріїв оптимізації режимів роботи при змінному аеродинамічному опорі магістралі. Публікація [13] вирішує вузькоспеціалізовану проблему синхронізації перетворювача з мережею, розглядаючи привод виключно як електричний об'єкт. У праці [14] виконано оцінювання енергозбереження каскадних приводів для вентиляторів, але не деталізовано баланс між статичними втратами у двигуні та динамічними втратами у напівпровідникових елементах перетворювача. Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є комплексне дослідження регульованих характеристик та критеріїв енергоефективності асинхронних високовольтних ЕМС з імпульсним керуванням в колі ротора, працюючого із вентиляторним характером навантаження з обов'язковим урахуванням жорстких вимог щодо їх-

ньої електромагнітної сумісності з живильною мережею.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є проведення комплексного дослідження та аналізу регулювальних властивостей і закономірностей зміни енергетичних показників електромеханічних систем з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора на базі високовольтних асинхронних двигунів із фазним ротором з вентиляторним характером навантаження для розробки науково обґрунтованих методів підвищення їхньої загальної енергоефективності та мінімізації втрат потужності в усталених і перехідних режимах роботи.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Функціональна схема дослідної ЕМС з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора високовольтного АД зображена на рис. 1. Алгоритм роботи даної ЕМС передбачає рекуперацию потужності ковзання ротора в мережу в моменти закритого стану силового ключа. Використання інвертора з постійним кутом інвертування мінімізує споживання реактивної складової струму з мережі, тим самим оптимізуючи загальний коефіцієнт потужності системи в повному діапазоні робочих швидкостей.

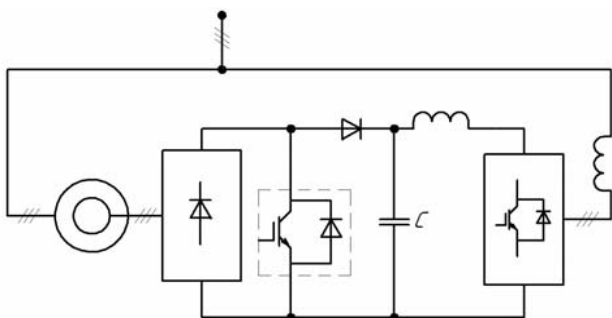


Рисунок 1. Дослідна ЕМС з імпульсним керуванням

Дослідження регулювальних властивостей та енергетичних показників ЕМС з імпульсним регулюванням швидкості обертання ротора високовольтного АД реалізовано шляхом коло-польового моделювання згідно [15]-[16]. Для врахування вентиляторного навантаження та аеродинамічних параметрів до математичної моделі за [15]-[16] необхідно додати наступну систему рівнянь, яка має вигляд [17]:

$$M_c = M_{xx} + k \cdot \omega_m^2, \quad (1)$$

$$k \cong (M_n - M_{xx}) / \omega_n^2, \quad (2)$$

$$M_n = \frac{H \cdot Q}{\eta \cdot \omega_r}, \quad (3)$$

де M_{xx} - момент неробочого ходу ЕМС з врахуванням

повного моменту інерції системи; ω_n - номінальне значення частоти обертання ротора АД; η - ККД електромеханічної системи з вентиляторним навантаженням; H - значення тиску повітря в магістралі; Q - об'ємна подача повітря в магістралі.

Значення тиску повітря в магістралі має нелінійну квадратичну залежність від об'ємної подачі повітря в магістралі [17]:

$$H = R \cdot Q^2, \quad (4)$$

де R - опір повітряної магістралі.

Функціональна архітектура керування струмовими режимами в ЕМС базується на застосуванні спеціалізованого модуля регулювання. Основним інструментом реалізації керуючих впливів виступає алгоритм широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), ключовою перевагою якого є можливість детермінованого та незалежного керування двома критичними параметрами: часовим інтервалом провідності γ та частотою комутації f_k [15].

Для забезпечення адекватності функціонування контролера в реальному часі, до вхідного інтерфейсу підсистеми інтегрується багатокритеріальний масив даних, що поєднує задані установки та фактичні показники стану об'єкта: номінальний рівень депресії у вентиляційній магістралі вугільної копальні, що визначає цільовий режим роботи установки, та дані, генеровані динамічною підсистемою моделі ЕМС, які включають миттєві значення статичного тиску та об'ємної витрати повітряного потоку.

Процес підтримки заданих параметрів магістралі реалізується через закритий контур автоматичного регулювання. Сутність саморегуляції системи полягає у динамічній корекції кутової швидкості ротора АД. Це досягається шляхом прецизійної варіації відносної тривалості імпульсу в межах кожного кроку дискретизації часового інтервалу:

$$\begin{cases} \gamma_i = \gamma_{i-1} + k_i(T_i) & \text{якщо } H \leq H_{ном} \\ \gamma_i = \gamma_{i-1} - k_i(T_i) & \text{якщо } H > H_{ном} \end{cases}, \quad (5)$$

де k_i - крок дискретизації часового інтервалу.

Фізично цей процес можна описати як зміну еквівалентного опору в колі ротора або регулювання потужності ковзання ротора АД, що повертається в мережу енергопостачання. При відхиленні діючого тиску від номінального (внаслідок зміни аеродинамічного опору повітряної магістралі), регулятор автоматично перераховує необхідну тривалість імпульсу ШІМ. Це призводить до відповідної зміни моменту двигуна та його частоти обертання до моменту досягнення нового стану рівноваги, за якого фактичний тиск відповідає заданому.

На рис. 2 – рис. 3 наведені результати коло-польового моделювання ЕМС у вигляді часових діаграм зміни електромеханічних та аеродинамічних параметрів при реалізації пуску та зростанні частоти обертання ротора дослідного АД типу 4АЗМ-400 (при $t=0 \div 3,5$ с.) та подальшим виходом в квазіусталений режим роботи (при $t=3,5 \div 7$ с.) при постійному значенні частоти комутації силового транзистора $f_k = 0,6$ кГц та опору повітряної магістралі $R = 0,083 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ (рис. 3). Реалізація пуску та розгону ЕМС відбувається за рахунок зміни значення відносної тривалості імпульсу γ від 3% до 70%, що забезпечує лінійне зростання швидкості ротора n до досягнення квазістального режиму роботи (рис. 2). Початкове значення моменту навантаження в момент пуску ЕМС дорівнює $M_c = 1912 \text{ Н}\cdot\text{м}$, так як відповідно до (1), враховується повний момент інерції всієї електромеханічної системи з навантаженням вентиляторного агрегату. Саме із-за великого значення моменту інерції системи після досягнення квазістального режиму роботи ЕМС при $R = \text{const}$. відбувається підтримання частоти обертання ротора з наявною пульсацією за рахунок постійної корекції значення відносної тривалості імпульсу $\Delta\gamma$ в межах $\pm 2,2\%$, на заданому рівні депресії у магістралі $H = H_{\text{зад}}$.

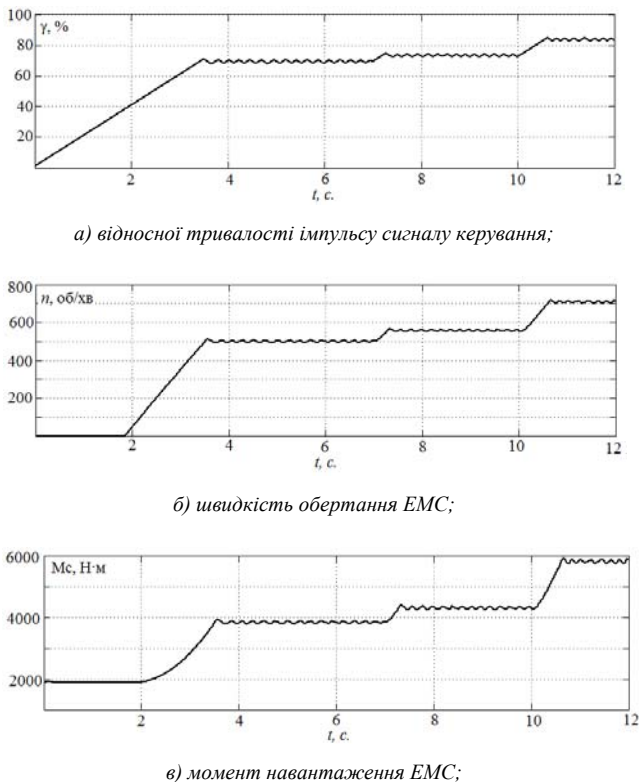


Рисунок 2. Результати коло-польового моделювання у вигляді часових залежностей електромеханічних параметрів ЕМС

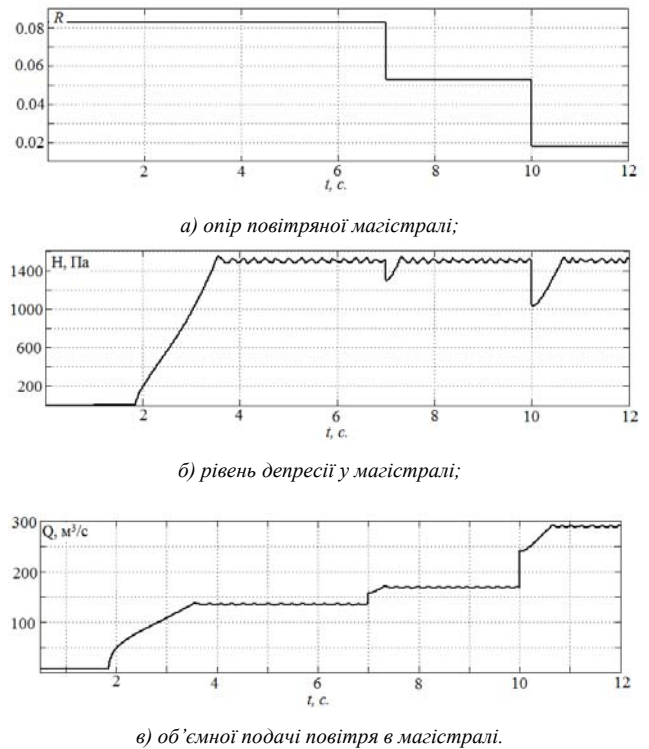


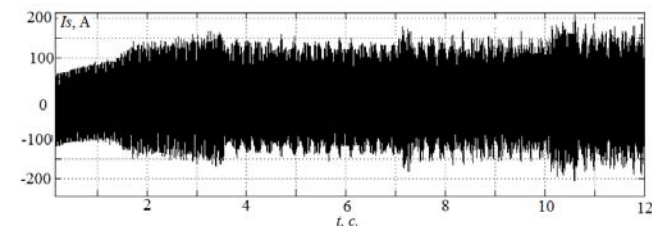
Рисунок 3. Результати коло-польового моделювання у вигляді часових залежностей аеродинамічних параметрів ЕМС

При коло-польовому моделюванні в моменти часу $t=7$ с та $t=10$ с реалізовано ступінчасту деградацію аеродинамічного опору магістралі, що супроводжується різким зниженням значення опору у першому випадку від $R = 0,083 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ до $R = 0,053 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ та відповідно від $R = 0,053 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ до $R = 0,018 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ (рис. 2 та рис. 3).

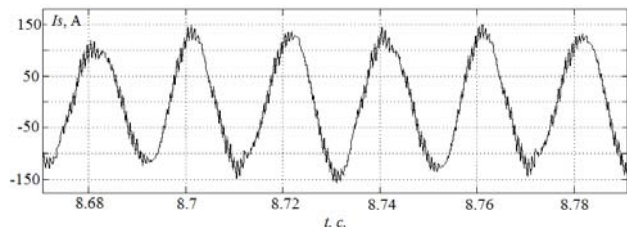
Різне зниження показника R свідчить про суттєву зміну депресії природної тяги шахти або зміну топології вентиляційної мережі, тобто відкриття вентиляційних дверей або обвалення породи. Згідно з законами аеродинаміки, це призводить до миттєвого зменшення гідравлічного опору, через що робоча точка вентилятора зміщується в зону підвищених витрат повітря при одночасному падінні статичного тиску. Однак, завдяки запропонованого алгоритму саморегуляції в підсистемі ЕМС за (3.48), такий спад є короткочасним. Система керування ідентифікує відхилення діючого тиску H від його номінального значення $H_{\text{ном}}$ та ініціює компенсаторний вплив. Відповідно у моменти часу $t=7$ с та $t=10$ с система керування починає збільшувати відносну тривалість керуючого імпульсу. Це спричиняє зростання електромагнітного моменту АД та відповідне підвищення кутової швидкості ротора. Нарощування обертів дозволяє вентилятору сформувати додатковий напір, що компенсує падіння тиску та стабілізує аеродинамічний режим роботи магістралі на новому рівні. Значення відносної тривалості керуючого імпульсу збільшується до тих пір,

поки діюче значення тиску H не буде дорівнювати заданому $H_{\text{ном}}$ (рис. 2, рис. 3).

На рис. 4 – рис. 6 наведені результати коло-польового моделювання ЕМС у вигляді часових діаграм зміни струмів статора, ротора та електромагнітного моменту АД типу 4АЗМ-400, який входить до структури ЕМС, при відповідних умовах моделювання описаних вище (рис. 2, рис. 3). Процес пуску, розгону з подальшим виходом в квазіусталений режим роботи ЕМС при першочерговому значенні опору

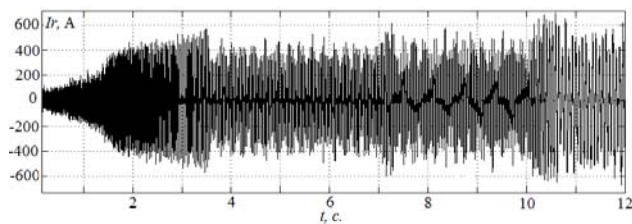


а) вектор струму статора дослідного АД (фаза А) за весь період моделювання ($t=0-12\text{c}$);

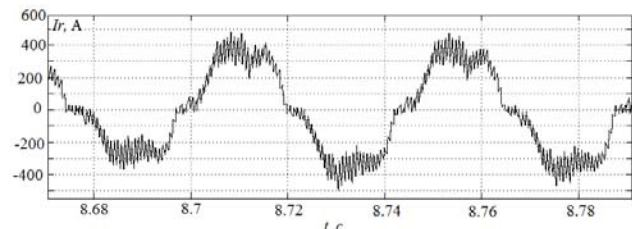


б) вектор струму статора дослідного АД (фаза А) за період моделювання ($t=8,67-8,79\text{c}$);

Рисунок 4. Результати моделювання у вигляді часових діаграм вектору струму статора АД типу 4АЗМ-400, що входить до структурної моделі ЕМС



а) вектор струму ротора дослідного АД (фаза А) за весь період моделювання ($t=0-12\text{c}$);



б) вектор струму ротора дослідного АД (фаза А) за період моделювання ($t=8,67-8,79\text{c}$);

Рисунок 5. Результати моделювання у вигляді часових діаграм вектору струму ротора АД типу 4АЗМ-400, що входить до структурної моделі ЕМС

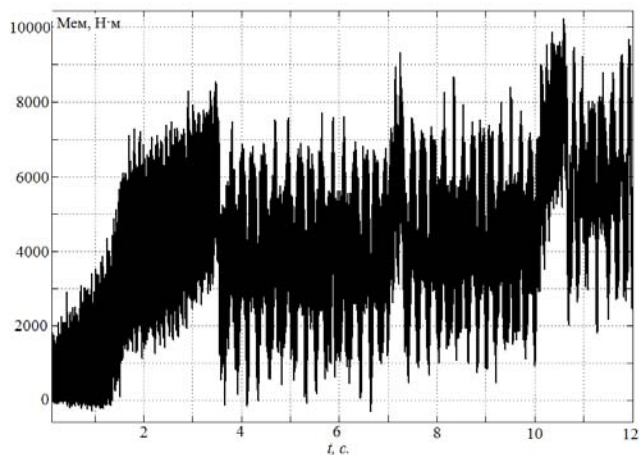


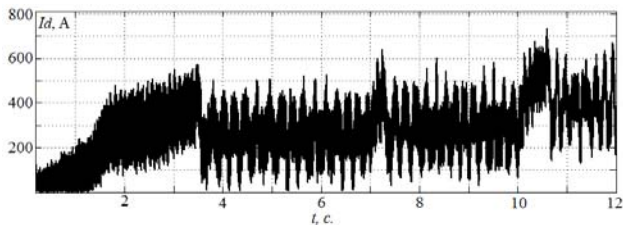
Рисунок 6. Результати моделювання у вигляді часових діаграм електромагнітного моменту АД типу 4АЗМ-400, що входить до структурної моделі ЕМС

повітряної магістралі $R = 0,083 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ відбувається з вилученням аперіодичних складових струмів статора та ротора, а також електромагнітного моменту АД, завдяки плавного зростання значення відносної тривалості імпульсу γ . Таким чином забезпечується плавність пуску з подальшим виходом до квазісталого режиму роботи.

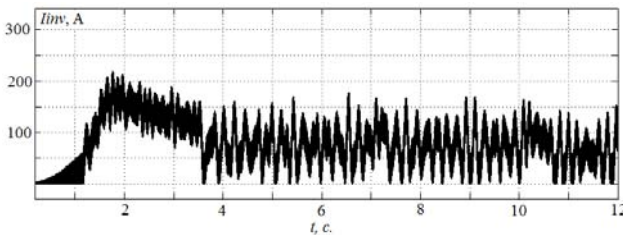
Відповідно до рис. 2 та рис. 3 при зміні значення опору від $R = 0,083 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ до $R = 0,053 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ та відповідно від $R = 0,053 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ до $R = 0,018 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ в моменти часу відповідно $t=7\text{c}$ та $t=10\text{c}$, спостерігається перехідний процес, обумовлений сплесками струмів статора та ротора, а також моменту на валу АД, які спричинені стабілізацією депресії у магістралі на рівні номінального значення. Проте, за рахунок струмообмеження в колі випрямленого струму ротора АД, ці піки залишаються в межах допустимих експлуатаційних норм, забезпечуючи надійність силового обладнання навіть за умови критичних збурень у вентиляційній мережі.

За результатами коло-польового моделювання на рис. 7 наведені часові діаграми випрямленого струму I_d , струму інвертора I_{inv} , струму заряду та розряду конденсатора I_c та напруги конденсатора в колі ротора U_c при частоті комутації $f_k = 0,6 \text{ кГц}$. Для ініціації найбільш несприятливого режиму та подальшої оцінки адаптивності ЕМС з імпульсним регулюванням в колі ротора АД, було реалізовано сценарій із навмисною деградацією частоти перемикавання силового транзистора K до рівня $f_k = 0,6 \text{ кГц}$. Отримані результати чисельного моделювання свідчать про виняткову демпфувальну здатність ЕМС попри мінімальну частоту f_k . При цьому амплітуда пульсаційної складової напруги на конденсаторі демонструє стійку стабілізацію на рівні, що не перевищує 3%. При чому, відповідно до рис. 2, б, та рис. 6, рівень пульсація

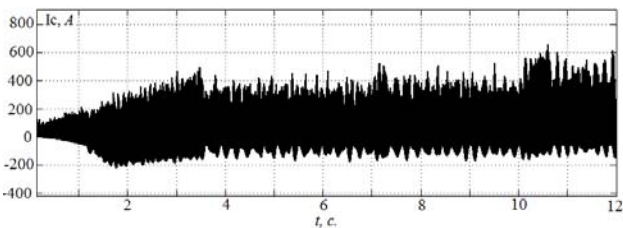
електромагнітного моменту при $f_k = 0,6$ кГц практично не відображається на рівні пульсації частоти обертання ротора АД за рахунок великої інерції всієї ЕМС з вентиляторним навантаженням.



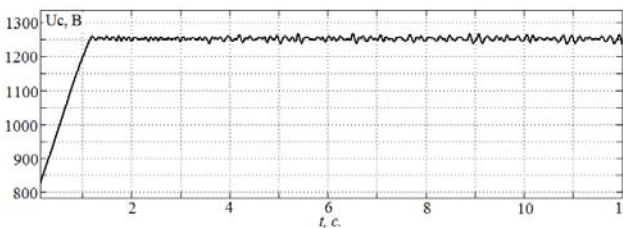
а) випрямлений струм в колі ротора;



б) струм через інвертор відомий мережею;



в) струм заряду та розряду конденсатора в колі ротора;



г) напруга конденсатора в колі ротора

Рисунок 7. Часові діаграми струмів та напруги на конденсаторі в колі випрямленого струму ЕМС з АД типу 4АЗМ-400 потужністю 630кВт при $f_k = 0,6$ кГц

Зменшення пульсації струмів та електромагнітного моменту можна забезпечити за рахунок підвищення частоти комутації f_k . Але в даному випадку можуть значно зрости комутаційні втрати, які можуть призвести до зменшення ККД всієї ЕМС. Для цього, для таких складних високовольтних ЕМС проведені додаткові дослідження щодо визначення оптимального значення f_k при якому забезпечується найменший рівень ККД в залежності від робочого ковзання АД [18].

Таким чином, запропонована ЕМС з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора виявляє яскраво виражені адаптивні властивості. Вона демонструє високу робастність і здатність до прецизійного нівелювання будь-яких стохастичних збурень аеродинамічного навантаження, зберігаючи при цьому стійкість і надійність регулювання швидкості обертання АД, тим самим підтримуючи стабільність провітрювання шахтних виробок навіть за умов критично заниженої частоти комутації силового ключа.

За результатами коло-польового моделювання ЕМС, на рис. 8 побудовані залежності $\cos(\varphi) = f(s)$ в квазіусталеному режимі роботи АД серії 4АЗМ потужністю $P_n = 630$ кВт (крива 1), $P_n = 800$ кВт (крива 2) та $P_n = 1000$ кВт (крива 3), а також залежності результуючого коефіцієнта потужності для $k_M = f(s)$ при відповідних потужностях АД (криві 4, 5, 6) з врахуванням компенсації реактивної потужності інвертором відомий мережею, працюючого з кутом інвертування $\beta = 10^\circ$.

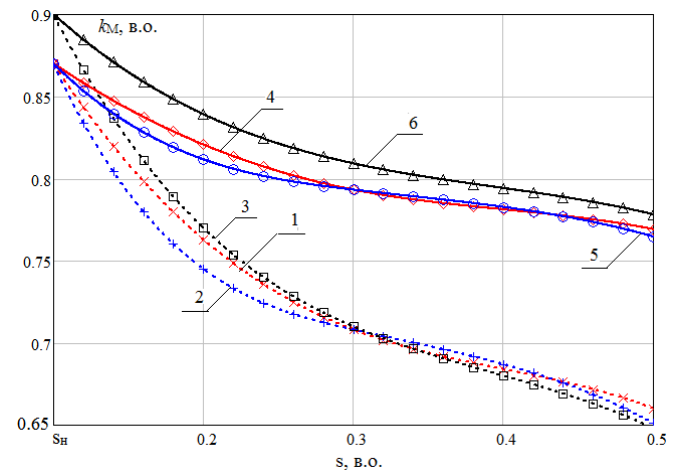


Рисунок 8. Залежності коефіцієнтів k_M АД серії 4АЗМ та результуючого k_M ЕМС від ковзання ротора

Як показує аналіз отриманих результатів, завдяки рекуперації енергії ковзання ротора АД до мережі електропостачання інвертор відомий мережею буде споживати реактивну потужність, при цьому віддавати активну потужність. В цьому випадку має місце значне зростання коефіцієнта потужності ЕМС, який при $s=0,5$ зростає від $k_M = 0,64$ до $k_M = 0,79$. При збільшенні частоти обертання ротора, кількість енергії ковзання ротора зменшується за рахунок зменшення ЕРС ротора. При цьому, при досягненні ковзання ротора до свого номінального значення, коефіцієнт потужності ЕМС буде збільшуватись від $k_M = 0,78$ до $k_M = 0,9$. Це призводить до зменшення різниці між $\cos(\varphi)$ АД та коефіцієнтом потужності k_M ЕМС. При збільшенні ковзання ротора АД, зменшення $\cos(\varphi)$

АД, отже k_M викликано збільшенням споживання реактивної потужності АД з мережі, а також зростанням THD струму статора та ротора АД. Таким чином, використання імпульсного регулювання в колі випрямленого струму ротора АД забезпечує підвищення коефіцієнтом потужності k_M на всьому діапазоні зміни ковзання ротора в вказуєму режимі роботи АД, що є дуже важливим при застосуванні високовольтних ЕМС з вентиляторним характером навантаження.

На рис. 9 та рис. 10 наведені результати чисельних розрахунків у вигляді сімейства окремих залежностей ККД АД від ковзання його ротора серії 4А3М потужністю $P_H=630$ кВт, (крива 1) $P_H=800$ кВт (крива 2), $P_H=1000$ кВт (крива 3) працюючих в квазіусталеному режимі роботи з вентиляторним характером навантаження (рис. 9), а також сімейства залежностей

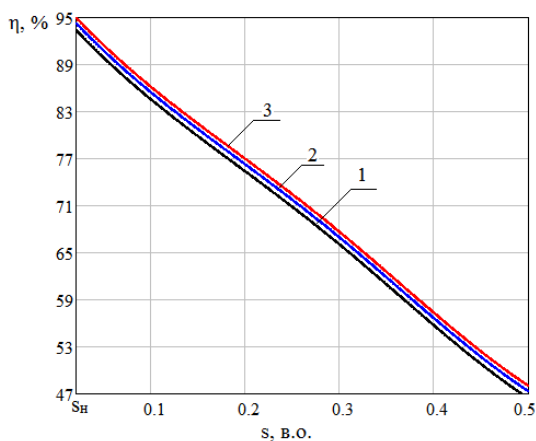


Рисунок 9. Результати чисельних розрахунків залежності окремого значення ККД АД серії 4А3М від величини ковзання його ротора в квазіусталеному режимі роботи

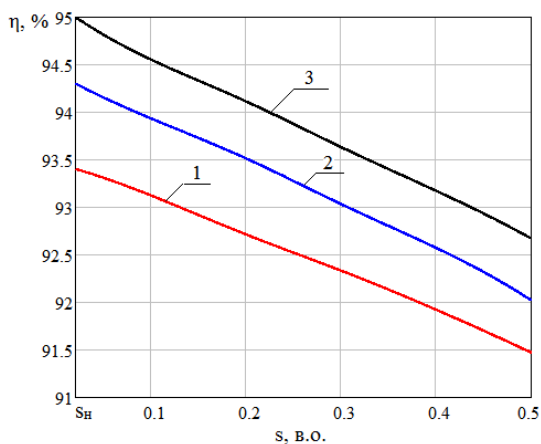


Рисунок 10. Результати чисельних розрахунків залежності результуючого значення ККД ЕМС від ковзання ротора серії 4А3М в квазіусталеному режимі роботи

сумарного ККД всієї ЕМС від ковзання при відповідних потужностях виконавчого АД.

Як показує аналіз дослідження, за рахунок рекуперації вивільненої енергії ковзання ротора АД, відносне значення ККД ЕМС по відношенню до окремого значення ККД АД збільшується від 47% до 95%. Причому прирощення ККД зі збільшенням ковзання ротора АД буде мати лінійний характер, тобто лінійно зростати пропорційно збільшенню вивільненої енергії ковзання ротора АД. При роботі АД на істотній характеристиці, тобто коли виводи обмотки ротора АД замкнено накоротко, ковзання ротора буде дорівнювати своєму номінальному значенню, а енергія ковзання ротора буде дорівнювати нулю. В цьому випадку значення ККД АД та результуюче значення ККД ЕМС буде дорівнювати один одному. Залежність при якій, зі збільшенням ковзання ротора має місце зменшення ККД АД а також результуючого значення ККД ЕМС викликано збільшення коефіцієнтів THD струму статора та ротора, що причинить зростання електричних втрат в обмотках та додаткових втрат в осердях статора та ротора.

Таким чином проведений аналіз енергетичних процесів в ЕМС з імпульсним регулюванням швидкості ротора АД підтверджує високу енергоефективність запропонованого способу регулювання швидкістю обертання ротора високовольтних АД, які застосовуються переважно для потужних вентиляційних установок.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V. ВИСНОВКИ

Досліджено електромагнітні та енергетичні процеси електромеханічної з вентиляторним характером навантаження з урахуванням змінних аеродинамічних параметрів шахтної вентиляційної магістралі.

Запропонована електромеханічна система з імпульсним регулюванням в колі випрямленого струму ротора виявляє яскраво виражені адаптивні властивості. Вона демонструє високу робастність і здатність до прецизійного нівелювання будь-яких стохастичних збурень аеродинамічного навантаження, зберігаючи при цьому стійкість і надійність регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна, тим самим підтримуючи стабільність провітрювання шахтних виробок навіть за умов критично заниженої частоти комутації вентилів перетворювача.

Проведений аналіз енергетичних процесів в ЕМС з імпульсним регулюванням швидкості ротора АД підтверджує високу енергоефективність запропонованого способу регулювання швидкістю обертання ротора високовольтних АД, які застосовуються переважно для потужних вентиляційних установок. Встановлено, що при регулюванні швидкості в діапазоні ковзань $s = 0,5 \div s_{ном}$ досягається підвищення коефіцієнта потужності системи до 0,80–0,93 та ККД до 92,5–94,5

%, що перевершує показники нерегульованого електропривода на 0,25 та 40 % відповідно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Новий підхід до регулювання вентиляції у вугільних шахтах / Н.І. Антошченко та ін. *Вугіль України*. 2014. №3. С. 29–32.
- [2] Zhang Y., Wang J., Li Z. Efficiency optimization of wound rotor induction motor with active front end converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 35. No.2. P. 812–821. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2954315>
- [3] Kumar A., Chatterjee K. Model predictive control of slip power recovery drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. Vol. 65. No. 5. P. 3245–3254. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2798620>
- [4] Marques G. D., Ierapetritou M. Direct torque control of doubly fed induction motor for high-power applications. *IET Electric Power Applications*. 2016. Vol. 10. No.8. P. 750–758. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0123>
- [5] Abad G., Lopez J. Advanced control strategies for slip-ring induction motors. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2014. Vol.8. No. 4. P. 24–35. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2323567>
- [6] Nguyen T. H., Lee D. C. Sensorless control of wound rotor induction motor drives using sliding mode observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol.53, No.4. P. 3678–3687. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2681024>
- [7] Ali M., Kazmi S. M. Predictive torque control for high-power industrial fans with wound rotor induction motors. *IEEE Access*. 2020. Vol.8. P. 112450–112462. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003461>
- [8] Gao S., Zhang H. Adaptive sliding mode control for wound rotor induction motors in mining ventilation systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2023. Vol.53, No.6. P. 3521–3531. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3224719>
- [9] Singh B., Jain S. Power quality improvement in Scherbius drive using active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, No.11. P. 6043–6052. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2393310>
- [10] Li H., Chen Z., Wu X. Harmonics mitigation in subsynchronous cascade drives using space vector modulation. *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol.172. P. 105–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.011>
- [11] Wang F., Chen X., Kennel R. Matrix converter based slip power recovery system for fan applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17, No.3. P. 1823–1832. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2985123>
- [12] Perez A., Rodriguez P. Slip power recovery utilizing multilevel converters for high-voltage applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2015. – Vol. 51, No. 5. – P. 4021–4030. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2416124>
- [13] Datta R., Ranganathan V. T. Grid synchronization techniques for doubly fed induction motor drives. *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12, No. 7. P. 1745–1753. –DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5204>
- [14] Rossi C., Casadei D. Energy saving evaluation of subsynchronous cascade drives in variable-torque pump and fan applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 55. P. 825–836. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.125>
- [15] Kotsur M., Danylchenko D., Synetskyi A. Development of a Mathematical Circuit-Field Model for Complex Electromechanical Systems with Pulse Regulation. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2026. (не опубліковано)
- [16] Коцур М., Данильченко Д., Синецький А. Вдосконалення підходів щодо лінеаризації магнітних властивостей осердя електромеханічних перетворювачів для чисельних розрахунків. *Електротехніка та електроенергетика*. 2026. №1. С. 7–15. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-1>
- [17] Чермалих В. М., Чермалих А. В., Данілін А. В., Майданський І. Я. Моделювання режимів роботи електромеханічних систем з врахуванням виду навантаження. *Вісник КДПУ імені Михайла Осроградського*. 2009. №4 (57). С. 107–111.
- [18] Синецький А. В., Коцур І. М. Особливості мінімізації сумарних електричних втрат високовольтних електромеханічних систем для стаціонарних установок промислових вентиляторів. *Електротехніка та електроенергетика*. 2025. №1. С. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-2>

Надійшла (Received) 09.03.2026;

Прийнята (Accepted) 01.05.2026;

Опублікована (Published) 29.05.2026;

FEATURES OF THE CONTROL CHARACTERISTICS AND ENERGY PERFORMANCE OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM BASED ON HIGH-VOLTAGE WOUND-ROTOR INDUCTION MOTORS

SYNETSKYI A.V. postgraduate student of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>; e-mail: xibi-tur@ukr.net;

Purpose. Conducting a comprehensive research and analysis of the control characteristics and energy performance variations in electromechanical systems based on high-voltage wound-rotor induction motors with a fan-type load and pulse control in the rectified rotor current circuit, aimed at developing scientifically substantiated methods to improve their overall energy efficiency and minimize power losses in steady-state and transient operating modes.

Methodology. The theoretical studies are based on the fundamental principles of electrical circuit theory, the theory of electrical machines and automated electric drives, as well as the equations of mathematical physics to describe electromechanical energy conversion processes in high-voltage wound-rotor induction motors, utilizing computer simulation, numerical methods, interpolation, and function approximation.

Findings. The electromagnetic and energy processes of an electromechanical system with a fan-type load have been investigated, taking into account the variable aerodynamic parameters of the mine ventilation network. The proposed electromechanical system, featuring pulse control in the rectified rotor current circuit, exhibits pronounced adaptive properties. It demonstrates high robustness and the ability to precisely mitigate any stochastic disturbances in the aerodynamic load. Concurrently, it maintains the stability and reliability of the induction motor's speed control, thereby sustaining stable ventilation of the mine workings even under conditions of a critically reduced switching frequency of the converter switches. It has been established that during speed regulation within the slip range of $s = 0.5 \div s_{nom}$, the system's power factor increases to 0.80–0.93 and its efficiency reaches 92.5–94.5%, which exceeds the performance of an unregulated electric drive by 0.25 and 40%, respectively.

Originality. The principles of designing energy-efficient control systems for fan installations have been further developed. It has been proven that the application of pulse control in electromechanical systems with fan loads and variable network aerodynamics not only stabilizes operational processes but also significantly increases the overall power factor (up to 0.80–0.93) and system efficiency at reduced rotor speeds of the induction motor.

Practical value. The practical value of the study lies in demonstrating the economic and technical feasibility of implementing pulse control systems for high-voltage induction motors integrated into electromechanical systems for industrial fan installations. The application of such electromechanical systems at operating industrial facilities allows not only to ensure a precise response of the fan unit to changes in the aerodynamic resistance of the network, but also to improve significantly the energy performance of the enterprise, as well as to extend the maintenance interval of expensive high-voltage motors.

Keywords: high voltage, control, electromechanical system, modeling, energy performance, energy losses, fan load, power consumption, mining equipment

REFERENCES

- [1] Antoshchenko N.I., Kalyuzhny V.V., Koptikov V.P., al. (2014). A new approach to the regulation of ventilation in coal mines. *Ugol Ukrainyi*, (3), 29–32.
- [2] Zhang Y., Wang J., Li Z. (2020). Efficiency optimization of wound rotor induction motor with active front end converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35, (2), 812–821. – DOI: [10.1109/TEC.2019.2954315](https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2954315)
- [3] Kumar A., Chatterjee K. (2018). Model predictive control of slip power recovery drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, (5), 3245–3254. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2798620>
- [4] Marques G. D., Ierapetritou M. (2016). Direct torque control of doubly fed induction motor for high-power applications. *IET Electric Power Applications*, 10, (8), 750–758 DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0123>
- [5] Abad G., Lopez J. (2014). Advanced control strategies for slip-ring induction motors. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8, (4), 24–35. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2323567>
- [6] Nguyen T. H., Lee D. C. (2017). Sensorless control of wound rotor induction motor drives using sliding mode observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, (4), 3678–3687. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2681024>
- [7] Ali M., Kazmi S. M. (2020). Predictive torque control for high-power industrial fans with wound rotor induction motors. *IEEE Access*, (8), 112450–112462. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003461>
- [8] Gao S., Zhang H. (2023). Adaptive sliding mode control for wound rotor induction motors in mining ventilation systems. *IEEE Transactions on Systems*,

- Man, and Cybernetics: Systems, 53, (6), 3521–3531.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3224719>
- [9] Singh B., Jain S. (2015). Power quality improvement in Scherbius drive using active power filter. IEEE Transactions on Power Electronics, 30, (11), 6043–6052. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2393310>
- [10] Li H., Chen Z., Wu X. (2019). Harmonics mitigation in subsynchronous cascade drives using space vector modulation. Electric Power Systems Research, 172, 105–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.011>
- [11] Wang F., Chen X., Kennel R. (2021). Matrix converter based slip power recovery system for fan applications. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17, (3), 1823–1832. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2985123>
- [12] Perez A., Rodriguez P. (2015). Slip power recovery utilizing multilevel converters for high-voltage applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 51, (5), 4021–4030. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2416124>
- [13] Datta R., Ranganathan V. T. (2019). Grid synchronization techniques for doubly fed induction motor drives. IET Power Electronics, 2019, 12, (7), 1745–1753. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5204>
- [14] Rossi C., Casadei D. (2016). Energy saving evaluation of subsynchronous cascade drives in variable-torque pump and fan applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 825–836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.125>
- [15] Kotsur M., Danylchenko D., Synetskyi A. (2026). Development of a Mathematical Circuit-Field Model for Complex Electromechanical Systems with Pulse Regulation. Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems.
- [16] Kotsur, M., Danylchenko, D., & Synetskyi, A. (2026). Improving approaches to the linearization of magnetic properties of electromechanical converter cores for numerical calculations. Electrical Engineering and Power Engineering, (1), 7–15. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-1>
- [17] Chermalykh V. M., Chermalykh A. V., Danilin A. V., Maidansky I. Ya. (2009). Modeling of operating modes of electromechanical systems taking into account the type of load. Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky Kyiv Polytechnic University, 2009, (4), 107-111.
- [18] Synetskyi, A., & Kotsur, I. (2025). Features of minimizing total electrical losses in high-voltage electromechanical systems for stationary industrial fan installations. Electrical Engineering and Power Engineering, (1), 17–24. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-1-2>