

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.333.2:658.26

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2026.74.101>

### ДЕЯКІ ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ АСИНХРОННИХ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ ДВИГУНІВ У КОНТЕКСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

**С.Т. Толмачов \***, докт. техн. наук, **О.В. Ільченко \*\***, канд. техн. наук

Криворізький національний університет МОН України,

вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027, Україна

e-mail: [stan.tolm@gmail.com](mailto:stan.tolm@gmail.com)

У статті виконано комплексний аналіз сучасного стану та ефективності використання наявного промислового парку асинхронних двигунів, які є головними споживачами електричної енергії в індустріальному секторі України. Висвітлено системні проблеми їхньої експлуатації: критичну питому вагу морально та фізично застарілого обладнання, високий рівень аварійності, хронічне недовантаження машин через закладені під час проектування надлишкові запаси потужності, а також відсутність безперервного моніторингу технічного стану. Обґрунтовано стратегічну актуальність підвищення енергоефективності електромеханічного обладнання в умовах дефіциту енергоресурсів. Доведено доцільність комплексного підходу до модернізації, що передбачає як поетапну цільову заміну зношених агрегатів на сучасні ефективні аналоги високих класів енергозбереження (ІЕ3, ІЕ4 та ІЕ5), так і оптимізацію умов їхньої роботи з урахуванням показників якості електроенергії та надійності систем електропостачання. Особливу увагу приділено систематизації стримуючих чинників. Виявлено інституційні, соціально-психологічні та кадрові бар'єри, зокрема низьку вмотивованість менеджменту підприємств через відсутність прямої відповідальності за енергоефективність. Відзначено гострий дефіцит кваліфікованих фахівців із діагностики та налаштування сучасного регульованого електропривода. Окреслено нормативно-правові обмеження, пов'язані з відсутністю цільової державної програми модернізації наявного в Україні парку двигунів, а також дієвих державних економічних стимулів для бізнесу. На науково-методичному рівні розглянуто проблему інструментального оцінювання фактичного коефіцієнта навантаження та коефіцієнта корисної дії двигунів безпосередньо в умовах виробництва без демонтажу. На конкретному практичному прикладі проілюстровано ризик ухвалення помилкових експлуатаційних рішень у разі використання чинних спрощених методів розрахунку базових робочих параметрів. Бібл. 14, рисунок.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, енергоефективність, класи ІЕ3–ІЕ5, коефіцієнт навантаження, коефіцієнт корисної дії, технічний моніторинг, експлуатаційні бар'єри, модернізація парку АД.

**Вступ.** Асинхронні двигуни (АД) є основою промисловості, транспорту та комунального сектору, через що їхній вплив на енергосистему та економіку країни є комплексним і багатовимірним. Як головні споживачі промислової електроенергії у світі, АД безпосередньо визначають конкурентоспроможність підприємств та енергоемність держав у цілому [1]. За показниками енергоефективності Україна наразі поступається промислово розвиненим країнам у 2.5–3 рази, що частково зумовлено станом вітчизняної електроенергетичної галузі. В умовах постійного зростання тарифів для промислових споживачів в Україні витрати на електроенергію стали вагомим складником собівартості продукції. Відповідно, будь-яке заощадження енергоресурсів прямо конвертується у підвищення прибутку та конкурентоспроможності підприємств. Саме тому США, країни ЄС та інші розвинені економіки спрямовують значні фінансові, технологічні й організаційні ресурси на підвищення енергоефективності АД. На тлі успішної реалізації програм розробки енергоефективних двигунів (ЕЕД) у країнах ЄС вітчизняний парк АД залишається технологічно застарілим, попри вагомий історичний потенціал українського електромашинобудування. Сьогодні електроенергія все активніше проникає в усі сфери виробництва і, за висновками Міжнародного Енергетичного Агентства, є «першим паливом» світової економіки. Це актуалізує питання обґрунтованості зазначених

в Енергетичній стратегії України пріоритетів. У різних її варіантах ключовими орієнтирами визначено оптимізацію генеруючих потужностей, інтеграцію відновлюваної енергетики та розвиток мереж постачання. Натомість поза увагою держави залишається кінцевий споживач – системи електропривода, які споживають до 70% промислової електроенергії. Таке ігнорування свідчить про зміщення акцентів виключно на процеси виробництва та розподілу енергії.

Світовий досвід підтверджує, що підвищення енергоефективності АД через упровадження ЕЕД є надзвичайно актуальним для України. Проте цей процес стримується низкою внутрішніх і зовнішніх бар'єрів.

**Метою статті** є комплексний аналіз перешкод на шляху підвищення енергоефективності парку АД у промисловості України, визначення потенційних напрямів його модернізації, а також актуалізація проблеми адекватного визначення основних енергетичних параметрів АД безпосередньо в умовах виробництва.

**1. Характеристика проблеми на рівні підприємств.** Основною рисою технологічної бази більшості промислових підприємств України є системне старіння наявного парку АД, оснащеного моделями 30–40-річної давнини. За оцінками промислових асоціацій, середній рівень амортизації основних фондів у промисловості сягає 70–80%, а значна частина електродвигунів експлуатується понад 20–30 років. За відсутності якісного технічного обслуговування щороку капітальний ремонт проходять близько 20% встановлених електричних машин [2]. Зокрема, у будівництві щорічно виходять із ладу до 55% АД, у гірничовидобувній галузі – до 30%, а в машинобудуванні та промисловості будівельних матеріалів – до 25%.

Суттєвий негативний вплив на надійність обладнання чинить незадовільна якість напруги живлення, для якої характерні коливання в межах 10–30%, несиметрія фаз та погіршення інших параметрів. Як наслідок, двигуни часто працюють в режимах недовантаження (середній коефіцієнт навантаження АД становить 0.3–0.4), а в багатьох галузях електропривод функціонує виключно в нерегульованих режимах [3].

Важливим деструктивним чинником є дефіцит кваліфікованих фахівців із діагностики, налаштування та ремонту електроприводів, зумовлений відсутністю дієвої системи мотивації персоналу енергетичних служб. Досвід роботи зі старим обладнанням часто формує у працівників упереджене ставлення до інновацій через побоювання ускладнення експлуатації та необхідність додаткового навчання без належної фінансової підтримки. Недоліки кадрової підготовки призводять до помилок під час експлуатації, некоректного підбору потужності двигунів, нездатності об'єктивно оцінювати втрати енергії та неефективного використання потенціалу енергоощадних технологій. У процесі експлуатації АД недостатньо враховується зниження якості електроенергії, що є суттєвим викликом для їхньої тривалої роботи. Порушення синусоїдальності напруги спричиняє погіршення температурного режиму внаслідок додаткових вихрових струмів у роторі та статорі. Несиметрія фазних напруг призводить до підвищеної вібрації, шуму, зниження крутного моменту, значного збільшення струму в окремих фазах і прискореної деградації ізоляції. Перелічений комплекс проблем є одним із найбільш досліджуваних як в українських джерелах, так і у світовій науковій літературі.

Окремої уваги заслуговує низька якість ремонтів, як один із найбільших недоліків експлуатації АД в Україні, та відсутність належної післяремонтної паспортизації. Суттєвим бар'єром для оновлення парку АД є також чинна система державних закупівель за критерієм «найнижчої ціни», яка не враховує вимог до класу енергоефективності обладнання. В умовах фінансових обмежень та функціонування в період воєнного стану підприємства змушені мінімізувати капітальні витрати. Через це перевага надається закупівлям застарілих моделей двигунів, аварійним ремонтам та спрощеним технологіям перемотування обмоток статора замість планової модернізації. Фактичним пріоритетом залишається підтримання мінімальної працездатності обладнання, а не його оптимізація, хоча відсутність ґрунтового техніко-економічного аналізу таких рішень у довгостроковій перспективі призводить до значних фінансових збитків.

Підвищення ефективності роботи АД стримується також низьким рівнем управлінської культури та обмеженістю технічної інформації. Лише незначна кількість систем енергоменеджменту на підприємствах сертифікована відповідно до стандарту ISO 50001, тому мо-

дернізація електроприводів не розглядається як стратегічний напрям розвитку галузі. Негативним чинником є й відсутність централізованих аналітичних баз даних щодо ефективності різних типів двигунів, результатів енергоаудитів та рекомендацій із модернізації. Брак доступу до актуальних технічних довідників, каталогів і спеціалізованого програмного забезпечення для оцінювання доцільності заміни двигунів знижує рівень довіри до сучасних технологій, тому інженерні рішення часто приймаються інтуїтивно або на основі застарілих даних. Проте, незважаючи на численні об'єктивні та суб'єктивні труднощі, висока актуальність проблеми вимагає невідкладних і реальних зрушень не лише на рівні окремих підприємств та галузей, а й держави в цілому.

## **2. АД високої ефективності як стратегічний напрям модернізації промисловості.**

У світовій практиці підставою для переходу на високоефективні рішення стало усвідомлення структури вартості життєвого циклу АД, де витрати на електроенергію в десятки разів перевищують початкову ціну обладнання разом із витратами на його ремонти та обслуговування. Перші системні кроки було зроблено у США. Ще в 1997 році був ухвалений Акт енергетичної політики щодо енергоефективних двигунів, а вже через кілька років з'явилися двигуни класу NEMA Premium, які відповідали сучасному рівню ІЕ3, а їхні окремі моделі навіть перевершували його. Водночас у США енергоефективність пов'язали не лише із закупівлею нових двигунів, а й із жорстким контролем якості їхнього ремонту. Починаючи з 2014 року, здійснювалася сертифікація ремонтних центрів із гарантією збереження ККД після перемотування обмоток. Цей досвід є особливо актуальним для України, де перемотування залишається найпоширенішою ремонтною операцією та нерідко призводить до погіршення енергетичних характеристик двигуна.

Суть європейської політики полягає в послідовному та жорсткому адміністративному витісненні низькоефективного обладнання з ринку шляхом поетапної заборони введення в обіг двигунів, які не відповідали дедалі вищим стандартам мінімальних енергетичних характеристик (MEPS). Важливим етапом цієї стратегії стало обмеження вільного продажу машин класу ІЕ2, за винятком лише їхнього використання в комплексі з частотно-регульованими перетворювачами. Це заклало нормативну основу для безальтернативного переходу промисловості на класи ІЕ3 – з 2015 року для двигунів потужністю 7.5–375 кВт, а з 2017 року – для всього діапазону потужностей від 0.75 до 375 кВт. Подальший розвиток нормативної бази пов'язаний із прийняттям Регламенту ЄС 2019/1781 щодо екодизайну електродвигунів і частотних перетворювачів [4] (цей документ імплементований також в Україні [5, 6]). На відміну від попередніх документів, він поширив вимоги не лише на двигуни, а й на системи регульованого електропривода. Із липня 2021 року набули чинності нові вимоги до двигунів потужністю до 1000 кВт та обов'язковий клас ІЕ2 для більшості частотних перетворювачів. Наступним етапом стало введення з липня 2023 року вимог класу ІЕ4 для трифазних двигунів потужністю 75–200 кВт та розширення сфери регулювання на окремі спеціалізовані виконання АД. Європейський союз став першим місцем у світі, де використання АД класу ІЕ4 стало обов'язковим для окремих категорій електродвигунів.

Хоча клас ІЕ5 поки не є обов'язковим у країнах ЄС, саме він визначає сучасний напрям розвитку галузі. Провідні виробники вже серійно випускають двигуни цього рівня, використовуючи вдосконалені електротехнічні сталі, синхронно-реактивні конструкції, мідні ротори та постійні магніти. Залежно від режиму роботи такі двигуни забезпечують зниження втрат енергії на 15–30% порівняно з класом ІЕ3. В останні роки вже з'явилися перші зразки електродвигунів класу енергоефективності ІЕ6. Як видно, боротьба за надвисокі значення ККД продовжується. Таким чином, сучасна стратегія ЄС передбачає не лише широке впровадження двигунів ІЕ3, а й послідовний перехід до рівнів ІЕ4 та ІЕ5. Водночас об'єктом підвищення енергоефективності розглядається не окремий двигун, а вся система електропривода.

На жаль, в Україні відсутня масштабна цільова програма модернізації парку АД. У відкритому доступі немає й офіційної державної статистики відносно впровадження ЕЕД. За експертними оцінками міжнародних організацій (зокрема UNIDO) та профільних досліджень, частка впроваджених ЕЕД класів ІЕ3 і вище у промисловому секторі України на сьо-

годні не перевищує 5–7%, до того ж переважно це нове обладнання, що постачалося у складі імпортих технологічних ліній. Понад 90% парку складають морально застарілі та фізично зношені машини. Проблема модернізації наявних АД фактично перебуває у стані стагнації. Це є прямим свідченням недостатньої уваги профільних міністерств та відомств до електро-механічного сектора як головного споживача електричної енергії. Державна політика наразі обмежується лише пасивним контролем ринку нових двигунів. В Україні ж на практиці підприємства продовжують закуповувати двигуни нижніх класів, оскільки законодавчі акти не забороняють їхнього використання в нових інсталяціях. Але навіть на основі наявного обладнання можна досягти підвищення ефективності роботи АД через низку організаційних та технічних заходів. Із прагматичних міркувань та елементарної доцільності проблеми не завжди вимагають використання ЕЕД замість встановлених. Частина АД може бути модернізована, потенційний успіх гарантується завдяки радикальній зміні відношення до якості ремонтів, широкого впровадження сучасних систем діагностики і моніторингу та ін. Підвищення ефективності може бути досягнуто також оптимізацією системи електропривода в цілому та можливою зміною технології. Обов'язок держави – забезпечити суспільний інтерес і мотивацію до реальних зрушень у вирішенні цієї проблеми. На промислових підприємствах необхідно створити атмосферу боротьби за оптимізацію споживання електроенергії кожним двигуном. Корисно стимулювати створення і мотиваційну підтримку невеликих ініціативних груп із підвищення енергоефективності працюючих систем електропривода. Реальну допомогу в цьому можуть відіграти регіональні Демонстраційні зони високої енергоефективності з орієнтацією на інформаційну та консультативну допомогу підприємствам. Ці структури могли б взаємодіяти з центрами трансферу технологій або входити до них організаційно.

Повномасштабна війна змінила пріоритети у сфері енергетики. За цих умов масштабна модернізація асинхронних двигунів стала не лише економічним завданням, а й елементом енергетичної стійкості та безпеки держави.

**3. Акцент на ККД як головному показнику енергоефективності.** Основним показником енергоефективності електродвигуна як перетворювача електричної енергії  $A_{\text{ел}}$  в механічну  $A_{\text{мех}}$  є його коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} = \frac{\int_0^T M_{\text{н}}(t) \omega_{\text{н}}(t) dt}{\int_0^T p dt},$$

де  $M_{\text{н}}$  і  $\omega_{\text{н}}$  – момент і кутова частота обертання ротора, а  $p$  – миттєва потужність. Використовуючи середнє за час роботи  $T$  значення енергії, ККД  $\eta$  можна визначати через потужності:

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \Delta P)/P_1 = 1 - \Delta P/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P) = 1/(1 + \Delta P/P_2).$$

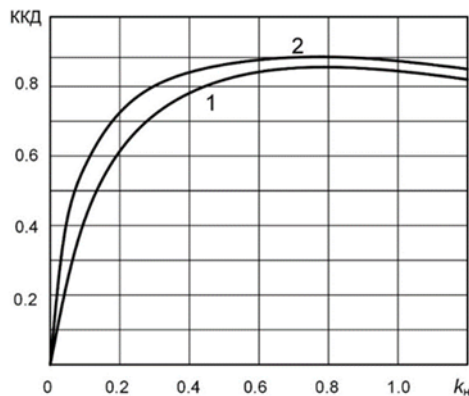
Номинальний ККД  $\eta_{\text{н}} = P_{2\text{н}}/P_{1\text{н}}$  для нових двигунів визначається за стандартом ІЕС 60034-2-1 [7] і, як і номінальна потужність  $P_{2\text{н}}$ , є паспортною величиною. Але за наявності багатьох факторів впливу (якість енергії, наслідки ремонтів, рівень навантаження та ін.) визначення фактичного «номінального» ККД двигуна є складною науково-технічною проблемою електромеханіки, яка на сьогодні не має завершеного рішення. Це пояснюється тим, що при розрахунку ККД через відношення потужностей на виході та вході двигуна головна проблема полягає в надійному визначенні потужності  $P_2$ , яка пов'язана з механічною енергією і яку на практиці часто виражають як добуток механічних параметрів  $M$  і  $\omega$ .  $P_2 = M\omega$ . Саме через пряме вимірювання крутного моменту за допомогою широко доступних на ринку тензорезисторних датчиків можна виміряти момент (потужність  $P_2$ ) із високою точністю і в широкому діапазоні зміни моменту. Наприклад, великий спектр датчиків крутного моменту серії DR (більше 20 типів) пропонує фірма Lorenz Messtechnik GmbH (ФРН) із широкою лінійною вимірювальних діапазонів моменту – від 0.1 Нм до 20000 Нм – і класами точності датчиків від 0.1 до 0.5. Тому використання цих датчиків на сьогодні є практично безальтернативним при високоточному вимірюванні моменту (потужності  $P_2$ ) в унікальних електромеханічних системах, наукових лабораторіях, сертифікованих центрах ремонту двигунів тощо. Але їхня висока вартість, необхідність «розрізування валу» та обмежений об'єм при встановленні практично закрили для них можливість широкого використання під час роботи двигуна в ре-

альних умовах виробництва. Суттєве послаблення цих обмежень пов'язане з реалізацією в ряді країн (Німеччина, Великобританія) накладних датчиків без модифікації валу, які можна ефективно використовувати «у польових умовах» (синонім поширеного терміну «на місці» – in-situ) [8]). Але й ці датчики мають обмеження за діаметром валу (потужності), його достатньою довжиною, частотою обертання та ін. Тому на сьогодні для моніторингу найбільш поширених АД малої (до 5 кВт) потужності актуальним завданням є розробка недорогих датчиків із можливістю простого й багаторазового використання в умовах обмеженого доступу. Важливо додатково зазначити, що навіть за можливості точного вимірювання потужності  $P_2$ , реальний «номінал» ККД двигуна після деградації або модернізації його активних частин повинен відповідати тепловим обмеженням для конкретних умов експлуатації.

Альтернативними залишаються непрямі методи дослідження реальних енергетичних параметрів АД. Для практичного вирішення задачі на підприємствах використовують методи, закріплені в головних стандартах (ІЕС, IEEE, NEMA). Ненормативні умови експлуатації враховуються переважно шляхом штучного обмеження потужності двигуна (введенням derating-коефіцієнтів). Так, стандарт ДСТУ ІЕС 60034-23:2019 робить акцент на температурі випалювання обмотки і визначає знижку ККД від 0.5–1 до 3–5 % за один цикл залежно від дотримання умов технології. Дисбаланс напруги, який створює гальмівний момент, різко збільшує втрати в роторі та викликає порушення температурного режиму. Згідно зі стандартом ІЕС 60034-26:2014, якщо коефіцієнт несиметрії напруги  $VUF > 2\%$ , необхідно зменшувати номінальну потужність АД. Стандарт NEMA MG-1 користується лінійним коефіцієнтом несиметрії напруги (LVUR), і за умови LVUR=5 % двигун можна навантажувати лише на 75 %. Стандарт IEEE Std 1459-2010 описує математичний апарат для розрахунку реальних втрат потужності за умов несиметрії та гармонік. На підприємствах використовують також закріплені в стандартах (зокрема в ІЕС 60034-1) метод еквівалентного струму (метод втрат) та інфрачервону термографію. У численних наукових публікаціях на основі математичних та емпіричних методів додатково розглядаються окремі питання щодо коригування ККД. Зокрема, в [9] запропоновано коригуючий коефіцієнт при роботі АД в насиченій області, вплив несиметрії на енергетичні показники АД проаналізовано в [10, 11].

Аналіз непрямих методів коригування ККД дає змогу зробити загальний висновок, що відсутність універсальної теплової моделі з урахуванням комплексного дисбалансу фаз та реального стану сталі статора може призводити до суттєвих похибок і ухвалення хибних експлуатаційних висновків. Сучасним напрямом визначення допустимої потужності деградованих АД є інтеграція електричних і теплових моделей із застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання [12–14]. Такий підхід забезпечує комплексне оцінювання технічного стану двигуна, прогнозування його залишкового ресурсу та адаптивне визначення допустимих режимів навантаження з урахуванням поточних експлуатаційних умов.

Іншим проблемним питанням є визначення реального завантаження двигуна в умовах виробництва, що є важливим кроком на шляху підвищення його енергоефективності. За стандартом коефіцієнт навантаження визначається співвідношенням  $k_n = P_2/P_{2н}$ . Наведені на рисунку залежності ККД( $k_n$ ) для найбільш поширеного двигуна серії АІР потужністю 5.5 кВт, 3000 об/хв (крива 1) і еквівалентного двигуна з класом енергоефективності ІЕ3 (крива 2) свідчать про значне відхилення ККД (5–10 %) в характерному для України діапазоні  $k_n=0.3–0.5$  навіть за ідеальних умов експлуатації. Але і без того недостатньо високі енергетичні показники вітчизняних АД можуть на 10% і більше відрізнятися від номінальних або декларованих. На сьогодні можливості для надійного визначення реального значення  $k_n$  обмежені, і ця проблема навіть більш складна, ніж визначення фактичного ККД працюючого двигуна. Дійсно, до розглянутих вище складнощів із коригуванням потужності  $P_{2н}$  додається не менш складне питання розрахунку/вимірювання потужності  $P_2$ , яка в реальних умовах може суттєво змінюва-





тися. Тому формальне визначення  $k_n$  як відношення двох показників із недостатньо обґрунтованою достовірністю кожного може нівелювати відомі рекомендації Міністерства палива і енергетики України щодо умов відповідності потужностей двигуна і навантаження. Часто відремонтований двигун встановлюється на попереднє місце роботи (чим фіксується невідоме, але практично незмінне значення  $P_2$ ). Оскільки  $P_{2н}$  також має фіксоване (паспортне) значення, то ситуація взагалі консервується, тобто коефіцієнт навантаження не залежить від кількості та якості ремонтів, ступеня зношеності тощо. Врахування фактичного зменшення номінального ККД за характерних для роботи АД ненормативних режимів взагалі приводить до «позитивного» висновку щодо збільшення коефіцієнта навантаження двигуна. Якщо ж, наприклад, за стандартною методикою  $k_n=0.45$ , а уточнені значення  $P_2'=(0.85\dots1.15)P_2$  і  $P_{2н}'=(1\dots0.85)P_{2н}$ , то  $k_n'=(0.85\dots1.35)k_n=0.38\dots0.6$ , що відповідає рекомендаціям різного змісту. Важливо також додати, що недовантаження АД суттєво збільшує споживання реактивної енергії. Цей факт є додатковим аргументом на користь актуальності максимально достовірного обґрунтування реального навантаження АД.

Повертаючись до визначення фактичної потужності  $P_2$ , зазначимо, що на сьогодні оцінювання корисної потужності на валу або обертового моменту безпосередньо в умовах експлуатації без використання дорогих і складних у монтажі динамометричних датчиків – одна з найскладніших задач сучасної електромеханіки. Тому використання непрямих методів вимірювання/обчислення потужності  $P_2$  «на місці» є практично безальтернативним. Оскільки цим методам присвячена велика кількість публікацій (частково вони відображені у згаданих вище стандартах та публікаціях [9–14]), обмежимося лише загальною характеристикою основних традиційних та перспективних методів і моделей. На сьогодні вектор розвитку in-situ методів полягає в переході від жорстких параметричних моделей схем заміщення АД до адаптивних систем ідентифікації та концепції штучного інтелекту й віртуального сенсорингу. Найбільш поширеними є методи з ідентифікацією параметрів схеми заміщення, в яких розрахунок  $P_2$  виконується через приведений еквівалентний опір ротора  $R_2/s$ . Використання генетичних алгоритмів або евристичної оптимізації дає змогу обмежити вхідну інформацію паспортними даними та поточними вимірами напруги, струму і ковзання в робочому режимі. Подальший розвиток цих методів пов'язаний з онлайн-корекцією активного опору ротора з урахуванням температури. Перспективним є також використання концепції «цифрових двійників». Модель через зворотний зв'язок за струмом дозволяє в реальному часі «спостерігати» за зміною  $P_2$  та прогнозувати залишковий ресурс двигуна. Активне використання в непрямих методах інформації щодо зміни частоти обертання (ковзання) обумовило розробку бездатчикових методів, у яких ковзання та момент визначаються через спектральний аналіз струму статора. Отже, сучасні методи дослідження енергетичних параметрів короткозамкнених АД характеризуються поєднанням математичних методів непрямого визначення ККД і потужності  $P_2$  та гібридних алгоритмів, які інтегрують детерміновані фізичні моделі й сучасні пошукові процедури оптимізації параметрів.

**Висновки.** 1. В Україні на законодавчому рівні не існує дієвої системи модернізації парку АД. Це є свідченням недостатньої уваги до промислової електромеханіки. І хоча питання енергоефективності промислових приводів фрагментарно внесено до загальних стратегічних документів, держава розглядає проблему енергозбереження через призму «виробництва та розподілу енергії», не приділяючи необхідної уваги кінцевому споживачу – промислового електроприводу, який споживає до 70% промислової електрики.

2. Одним з першочергових завдань у напрямку підвищення ефективності використання асинхронних двигунів є суттєве покращення інформаційного забезпечення енергетичних служб промислових підприємств в частині створення централізованих аналітичних баз даних, забезпечення доступу до актуальних технічних довідників та впровадження спеціалізованого програмного забезпечення для оцінювання можливості та доцільності модернізації.

3. Наявні методи і практики оцінювання коефіцієнта корисної дії АД та коефіцієнта його навантаження недостатньо обґрунтовані і можуть призводити до хибних висновків у процесі експлуатації. Це питання потребує активізації наукових досліджень та підвищення адекватності практичних рекомендацій.

1. Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І., Перепелиця О., Кришньов О., Тітов Є. Підвищення ефективності асинхронних двигунів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2024. № 1 (11). С. 41–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.08>
2. Закладний О.О. Визначення аварійних режимів електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 1. С. 96–104. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259240>
3. Толмачов С.Т., Ільченко О.В. Підвищення енергоефективності асинхронних двигунів в Україні: стан, можливості та перспективи. *Вісник КНУ: Збірник наукових праць*. 2023. Вип. 56. Кривий Ріг. С. 133–139. DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-133-139>
4. Commission Regulation (EU) 2019/1781 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, amending Regulation (EC) No 641/2009 and repealing Regulation (EC) No 640/2009 (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*. 2019. L 272. Pp. 74–94. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1781&utm\\_source=chatgpt.com](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1781&utm_source=chatgpt.com) (дата звернення: 05.06.2026)
5. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну електродвигунів : Постанова Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2019 р. № 157. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 05.06.2026)
6. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів та приводів із змінною швидкістю : Постанова Кабінету Міністрів України від 23 липня 2024 р. № 844. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/844-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 05.06.2026)
7. ДСТУ ІЕС 60034-2-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 2-1. Стандартні методи визначення втрат та коефіцієнта корисної дії під час випробувань (за винятком машин для тягових транспортних засобів) (ІЕС 60034-2-1:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=83537](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83537) (дата звернення: 05.06.2026)
8. Temporary Torque & Shaft Power Measurement Kit / Datum Electronics. URL: <https://datum-electronics.com/product/shaft-power-measurement-kits/> (дата звернення: 05.06.2026)
9. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення визначення моменту асинхронного двигуна за режимів магнітопроводу у насиченій області. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 26–32.
10. Faiz J., Ebrahimpour H., Pillay P. Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three-phase squirrel-cage induction motor and economic analysis. *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47, No. 3. Pp. 289–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.009>
11. Quispe E. C., López I. D., Ferreira F. J. T. E., Sousa V. Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2018. Vol. 8, No. 3. Pp. 1412–1422. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1412-1422>
12. Göztaş M., Çunkaş M. In-situ efficiency estimation of induction motors under unbalanced voltages using heuristic optimization algorithms. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2026. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44444-026-00106-1>
13. Laadjal K., Amaral A. M. R., Sahraoui M., Cardoso A. J. M. Machine learning based method for impedance estimation and unbalance supply voltage detection in induction motors. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23187989>
14. Anindhito M. D., Suhartjito. Prediction of remaining useful life and downtime of induction motors with supervised machine learning. *Applied Computer Science*. 2025. Vol. 21. DOI: [https://doi.org/10.35784/acs\\_7299](https://doi.org/10.35784/acs_7299)

## SOME THEORETICAL AND PRACTICAL ISSUES OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS IN THE CONTEXT OF ENERGY EFFICIENCY

**S.T. Tolmachov, O.V. Ilchenko**

Kryvyi Rih National University of Ukraine,  
Vitaliy Matusevich Str., 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine  
e-mail: [stan.tolm@gmail.com](mailto:stan.tolm@gmail.com)

*The article provides a comprehensive analysis of the current state and efficiency of the existing industrial fleet of induction motors, which are the main consumers of electricity in Ukraine's industrial sector. The systemic problems of their operation are highlighted: a critical share of morally and physically obsolete equipment, high accident rates, chronic underloading of machines due to excessive power margins integrated during design, and the lack of continuous monitoring of their technical condition. The strategic relevance of improving the energy efficiency of electromechanical equipment under the conditions of energy resource scarcity is substantiated. The expediency of an integrated approach to modernization is proven, which envisages both the phased targeted replacement of worn-out units with modern efficient analogues of high energy-saving classes (IE3, IE4, and IE5) and the optimization of their operating conditions, taking into account power quality indicators and the reliability of power supply systems. Particular attention is paid to the systematization of constraining factors. Institutional, socio-psychological, and personnel barriers have been identified, including the low motivation of enterprise management due to the lack of direct responsibility for energy effi-*

ciency. An acute shortage of qualified specialists in the diagnostics and adjustment of modern variable speed drives is noted. Regulatory and legal restrictions related to the absence of a targeted state program for modernizing the existing motor fleet in Ukraine, as well as the lack of effective state economic incentives for business, are outlined. At the scientific and methodological level, the problem of instrumental estimation of the actual load factor and efficiency of motors directly under production conditions without dismantling is considered. A specific practical example illustrates the risk of making erroneous operational decisions when using current simplified methods for calculating baseline operating parameters. Ref. 14, figure.

**Keywords:** induction motor, energy efficiency, IE3–IE5 classes, load factor, efficiency, technical monitoring, operational barriers, industrial modernization.

1. Kovalenko M., Tkachuk I., Kovalenko I., Perepelytsia O., Kryshnov O., and Titov Ye. Improving the efficiency of induction motors. *Kharkiv Polytechnic Institute (KPI) Gazette. Series: Problems of Improving Electrical Machines and Apparatus. Theory and Practice*. 2024. No. 1 (11). Pp. 41–45. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.08>
2. Zakladnyi O.O. Determination of emergency modes of electric motors by means of modern systems for diagnosing their condition. *Energy: Economics, Technologies, Ecology*. 2022. No 1. Pp. 96–104. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259240>
3. Tolmachov S.T., Ilchenko O.V. Improving the energy efficiency of induction motors in Ukraine: State, opportunities and prospects. *Bulletin of Kryvyi Rih National University: Collection of Scientific Papers*. 2023. Vol. 56. Pp. 133–139. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-133-139>
4. Commission Regulation (EU) 2019/1781 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, amending Regulation (EC) No 641/2009 and repealing Regulation (EC) No 640/2009 (Text with EEA relevance), Official Journal of the European Union, L 272. 2019. Pp. 74–94. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1781&utm\\_source=chatgpt.com](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1781&utm_source=chatgpt.com).
5. On approval of the Technical Regulation regarding ecodesign requirements for electric motors. Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution No. 157, Feb. 27. 2019. (Ukr) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-%D0%BF#Text>
6. On approval of the Technical Regulation regarding ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives. Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution No 844, July 23. 2024. (Ukr) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/844-2024-%D0%BF#Text>
7. *Rotating Electrical Machines - Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles) (IEC 60034-2-1:2014, IDT)*, DSTU IEC 60034-2-1:2019. Kyiv: Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems (DSTU "UkrNDNC"). 2019. (Ukr) URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=83537](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=83537)
8. Datum Electronics. Temporary torque & shaft power measurement kit. (Online). Available: datum-electronics.com. URL: <https://datum-electronics.com/product/shaft-power-measurement-kits/>
9. Popovych O.M., Holovan I.V. Refining the determination of the induction motor torque under magnetic circuit modes in the saturated region. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 6. Pp. 26–32. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.026>
10. Faiz J., Ebrahimpour H., Pillay P. Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three-phase squirrel-cage induction motor and economic analysis. *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47. No 3. Pp. 289–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.04.009>
11. Quispe E. C., López I. D., Ferreira F. J. T. E., Sousa V. Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2018. Vol. 8. No 3. Pp. 1412–1422. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1412-1422>
12. Göztaş M., Çunkaş M. In-situ efficiency estimation of induction motors under unbalanced voltages using heuristic optimization algorithms. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44444-026-00106-1>
13. Laadjal K., Amaral A. M. R., Sahraoui M., Cardoso A. J. M. Machine learning based method for impedance estimation and unbalance supply voltage detection in induction motors. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23187989>
14. Anindhito M. D., Suharjito. Prediction of remaining useful life and downtime of induction motors with supervised machine learning. *Applied Computer Science*. 2025. Vol. 21. No 3. Pp. 72–86. DOI: [https://doi.org/10.35784/acs\\_7299](https://doi.org/10.35784/acs_7299)

Надійшла: 18.06.2026

Прийнята: 14.07.2026

Submitted: 18.06.2026

Accepted: 14.07.2026