

Здобувач: Воїнова Ольга Миколаївна

Керівник: Барановська М.Л.

Тема: Підвищення енергоефективності електроприводів на базі асинхронних двигунів промислових підприємств Кривого Рогу

РЕФЕРАТ

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У Розділі 1 проаналізовано сучасний стан використання асинхронних електродвигунів у промисловості, узагальнено світовий та вітчизняний досвід їх експлуатації та визначено основні напрями підвищення енергоефективності електроприводів.

У Розділі 2 виконано аналіз паспортних і розрахункових параметрів асинхронного двигуна серії WEG W22, досліджено його робочі та енергетичні характеристики, а також вплив режимів навантаження на ККД і втрати електроенергії.

У Розділі 3 проведено розрахунок та порівняльний аналіз енергоефективності асинхронних двигунів різних класів (IE2, IE3, IE4), виконано оцінку економічної доцільності їх застосування з урахуванням вартості електроенергії та визначено строки окупності енергоефективних рішень. Розглянуто сучасні тенденції розвитку енергоефективних електродвигунів провідних виробників та проаналізовано структуру парку асинхронних двигунів промислових підприємств України.

У результаті встановлено, що впровадження енергоефективних асинхронних двигунів дозволяє знизити втрати електроенергії, підвищити надійність електроприводів та зменшити експлуатаційні витрати промислових підприємств.

**АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ,
ЕЛЕКТРОПРИВОД, КЛАС ІЕ, ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ, ПРМИСЛОВІ
ПІДПРИЄМСТВА**

ВСТУП

Частка асинхронних електродвигунів (АД) у світовому електромашинобудуванні сягає близько 90 % за кількістю та приблизно 50 % за встановленою потужністю. Така широка поширеність, насамперед короткозамкнених АД, пояснюється їх конструктивною простотою, високою надійністю та порівняно невеликою вартістю. Водночас енергетичні характеристики вітчизняних асинхронних двигунів загальнопромислового призначення малої та середньої потужності, зокрема коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності, залишаються недостатньо високими, особливо у порівнянні з аналогами провідних європейських виробників. Крім того, ці показники додатково погіршуються в умовах неповного навантаження, низької якості електроенергії, невідповідності режимів експлуатації нормативним вимогам, а також унаслідок неякісного проведення ремонтів. У зв'язку з цим в Україні існує значний, проте недостатньо реалізований потенціал енергозбереження, пов'язаний із підвищенням енергоефективності наявного парку АД.

Масштабність цієї проблеми можна оцінити на простому прикладі. За умови річного виробництва електроенергії в Україні в останні довоєнні роки на рівні близько 160 млрд кВт·год та орієнтовного споживання асинхронними двигунами приблизно 60 млрд кВт·год, навіть підвищення середнього ККД АД лише на 1 % забезпечило б щорічну економію понад 2 млрд грн при середній вартості електроенергії для промисловості 4 грн за 1 кВт·год. Реальний потенціал економії може бути у 2–3 рази вищим, оскільки енергетичні показники найбільш поширених двигунів потужністю до 5 кВт, які становлять близько 60 % загального парку АД, поступаються аналогічним закордонним моделям на 3–5 %.

Сучасний парк асинхронних двигунів в Україні (30 млн одиниць) представлений переважно двигунами серій АІР, АДТ, АД, 4А-6А, АО, АІМ, АМУ, ВАО та іншими. За потужністю вони розподіляються таким чином: двигуни малої потужності (1–5 кВт) становлять близько 60 %, середньої

потужності (до 20 кВт) - 20 %, потужні (20–100 кВт) - 7 %, а надпотужні (понад 100 кВт) - близько 1 %. Номінальні енергетичні показники АД, наприклад серії АІР, свідчать про те, що зі збільшенням потужності покращуються значення ККД та коефіцієнта потужності. Так, для двигунів малої потужності ККД перебуває в межах 72–85,7 %, а $\cos \varphi$ - 0,69–0,88, тоді як для надпотужних двигунів ці показники досягають відповідно 94–95,4 % та 0,91–0,92.

Отже, найбільш чисельною групою є двигуни потужністю 1–5 кВт, які характеризуються найнижчими енергетичними показниками та водночас споживають до 40 % усієї електроенергії. Слід також зазначити, що близько половини асинхронних двигунів використовуються для приводу вентиляторів і насосів. Саме цей сегмент має один із найвищих потенціалів енергозбереження завдяки впровадженню регульованого електропривода, однак на практиці такий потенціал реалізований лише на 10–12 %.

Для експлуатації АД в Україні характерні такі особливості:

- у різних галузях промисловості щорічного ремонту потребують від 10 % до 50 % двигунів;
- середній фактичний термін служби АД становить лише 6–7 років;
- після проведення ремонту енергетичні характеристики двигунів у середньому знижуються на 3–4 %;
- середній рівень завантаження АД перебуває в межах 30–40 %, тоді як у країнах Європи цей показник перевищує 60 %;
- системи моніторингу, діагностики технічного стану та контролю енергетичних параметрів двигунів застосовуються недостатньо широко;
- післяремонтна паспортизація двигунів часто виконується не в повному обсязі.

Таким чином, підвищення ефективності виробництва, ремонту та експлуатації асинхронних електродвигунів є важливим напрямом зростання енергоефективності в Україні.

Об’єкт дослідження – електромеханічні процеси в асинхронних двигунах, що визначають їх енергоспоживання та рівень енергоефективності.

Предмет дослідження – енергетичні та експлуатаційні характеристики асинхронних двигунів, а також оцінка економічної ефективності їх заміни на двигуни вищих класів енергоефективності з урахуванням строків окупності.

Мета роботи – дослідження доцільності заміни діючих асинхронних двигунів на двигуни класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4, а також аналіз техніко-економічних показників їх застосування в умовах зростання вартості електричної енергії.

Наукова новизна полягає у визначенні факторів, що впливають на підвищення енергоефективності електроприводів за рахунок заміни асинхронних двигунів серії АІР, які широко використовуються на промислових підприємствах України, на сучасні двигуни класів IE2–IE4. Додатково проведено оцінку підвищення ККД та визначено строки окупності впровадження таких рішень з урахуванням реальних режимів навантаження електродвигунів.

1.1 Стан та особливості використання асинхронних двигунів в Україні

При загальному аналізі експлуатації асинхронних двигунів (АД) в Україні слід особливо відзначити суттєвий економічний фактор, пов'язаний із високою та постійно зростаючою вартістю електричної енергії. Протягом останніх 20–30 років саме ціна електроенергії стала визначальним чинником як при розробці, так і при експлуатації електродвигунів у світовій практиці.

Для ілюстрації можна навести такі дані: річні витрати на електроенергію під час експлуатації загальнопромислового двигуна АІР90L2 (3,0 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,83$) при роботі в номінальному режимі протягом 8500 годин становлять близько 122 892 грн (за ціни 4 грн/кВт·год), тоді як вартість самого двигуна знаходиться в межах 2 100–6 584 грн. Для аналогічного двигуна класу енергоефективності IE3 ($\eta_n = 0,871$) річна економія електроенергії досягає приблизно 5 654 грн.

Для більш потужного двигуна AIP355L2 (315 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,954$) за вартості близько 445 920 грн річні витрати на електроенергію становлять орієнтовно 11,2 млн грн. Використання його аналога класу IE3 ($\eta_n = 0,96$) дозволяє отримати економію на рівні 70 000 грн на рік. Таким чином, вартість спожитої за рік електроенергії перевищує вартість самого двигуна у 25–30 разів, причому це співвідношення практично не залежить від його потужності. Водночас для двигунів малої та середньої потужності термін окупності енергоефективних моделей є значно меншим порівняно з потужними агрегатами.

Подібне співвідношення між вартістю електроенергії та обладнанням стало у розвинених країнах ключовим фактором зміни концепції проектування та використання АД. Якщо в Україні переважає підхід, орієнтований на мінімізацію початкових витрат, то в США, країнах ЄС та інших розвинених економіках основна увага приділяється енергоефективності двигунів, підвищенню їх ККД, коефіцієнта потужності та надійності.

Основні дані по АД можна звести в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Дані використання в Україні АД (серії AIP)

Поділ АД за потужністю	Діапазон потужностей, кВт	ККД, %	Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$
Малої потужності	від 1,0 до 5,0	від 72,00 до 85,7	від 0,69 до 0,88
Середньої потужності	до 20	від 90,0 до 92,0	від 0,8 до 0,9
Потужні	від 20 до 100	від 90,0 до 93,9	від 0,9 до 0,91
Надпотужні	більше 100	від 94,0 до 95,4	від 0,91 до 0,92

Порівняльні особливості експлуатації АД в Україні та за кордоном можна звести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльні особливості експлуатації АД (Україна / за кордоном (країни ЄС, США, Японія))

Перелік особливостей експлуатації	Україна	Закордонний досвіт
1) Потребують щорічного ремонту (залежно від галузі): - поточний: - капітальний: - аварійні відмови: - термін експлуатації 15-20 років:	від 30 до 40% від 8 до 12% від 5 до 8% від 50 до 70%	від 15 до 25% від 3 до 7% від 1 до 3% від 20 до 35%
2) Середній строк служби двигунів: - АІР: - ІЕ3–ІЕ4	від 6 до 7 років до 20 років (прогноз)	від 20 до 30 років від 25 до 35 років
3) Післяремонтні показники (енергетичні): - ККД: - зростання втрат: - $\cos \varphi$: - повторні ремонти:	зниження на від 2 до 8% від 5 до 15% від 1 до 5% від 20 до 35%	зниження на від 0,5 до 3% від 1 до 5% до 2% від 5 до 15%
4) Рівень завантаження АД:	від 45 до 65%	від 70 до 85%
5) Робота з перевантаженням	від 10 до 20%	до 5 %
6) Моніторинг та діагностика технічного стану АД:	від 20 до 35 %	від 60 до 80 %
7) Моніторинг та діагностика енергоефективності АД:	від 20 до 35 %	від 60 до 80 %

1) Узагальнюючи питання щорічного ремонту АД в Україні та закордонний досвід необхідно проаналізувати причини в Україні:

- значна зношеність обладнання;
- недостатній рівень автоматизованого моніторингу;
- експлуатація двигунів у перевантажених режимах;
- обмежене оновлення парку АД,

а за кордоном:

- широке використання систем діагностики та Predictive Maintenance;
- вища частка двигунів класів ІЕ3–ІЕ4;

- регулярна модернізація електроприводів;
- автоматизований контроль технічного стану.

Частота ремонтів асинхронних двигунів в Україні суттєво вища, ніж у країнах ЄС та США, що свідчить про необхідність модернізації електроприводів і впровадження сучасних систем моніторингу технічного стану.

2) Основні причини меншого строку служби АД в Україні:

- високий рівень зношеності обладнання;
- перевантаження електроприводів;
- нестабільна якість електроживлення;
- недостатній рівень моніторингу та діагностики;
- несвоєчасне технічне обслуговування,

а закордонний досвід показує, що у країнах ЄС та США широко застосовуються:

- системи Predictive Maintenance;
- частотне регулювання;
- двигуни класів IE3–IE4;
- онлайн-моніторинг температури та вібрації.

Це дозволяє збільшити строк служби двигунів до 25–30 років і більше. Середній строк служби асинхронних двигунів в Україні на 20–30 % менший, ніж у провідних промислових країнах, що підтверджує необхідність модернізації електроприводів та впровадження сучасних систем контролю технічного стану.

3) Серед основних причин погіршення показників АД, що ремонтуються в Україні можна назвати:

- використання застарілих технологій перемотування;
- погіршення магнітних властивостей осердя;
- застосування неякісних ізоляційних матеріалів;
- порушення теплового режиму двигуна;
- відсутність контролю енергоефективності після ремонту,

а закордонний досвід показує, що у країнах ЄС та США застосовуються:

- стандартизовані технології ремонту EASA та IEC;
- контроль втрат у магнітопроводі;
- лазерне центрування та балансування;
- обов'язкові післяремонтні енергетичні випробування.

Це дозволяє мінімізувати зниження ККД та зберігати енергоефективність двигунів після ремонту. Післяремонтне зниження енергетичних показників асинхронних двигунів в Україні є суттєво більшим, ніж у країнах ЄС та США, що призводить до додаткових втрат електроенергії та скорочення ресурсу електроприводів.

4, 5) Особливості експлуатації АД в Україні полягають у наступному:

- значна кількість двигунів вибиралась із запасом потужності;
- робота обладнання у змінних режимах;
- низький рівень автоматичного регулювання;
- використання застарілих електроприводів,

а закордонний досвід у країнах ЄС та США показує:

- широко застосовується частотне регулювання;
- двигуни підбираються ближче до реального навантаження;
- використовуються системи енергоменеджменту та моніторингу.

Це забезпечує роботу АД у зоні максимального ККД. В Україні значна частина асинхронних двигунів працює в режимі недовантаження, що призводить до зниження ККД та перевитрат електроенергії. У країнах ЄС та США рівень завантаження двигунів ближчий до оптимального, що забезпечує вищу енергоефективність електроприводів.

6, 7) Узагальнюючи питання рівня впровадження систем моніторингу та діагностики АД в Україні:

- переважає планово-попереджувальний ремонт;
- значна частина АД працює без онлайн-діагностики;
- системи моніторингу впроваджуються переважно на великих підприємствах,

а в країнах ЄС та країнах світу:

- широке використання Predictive Maintenance;
- застосування IoT, SCADA та Smart Monitoring;
- постійний контроль температури, вібрації та енергоспоживання

двигунів.

Рівень цифрового моніторингу асинхронних двигунів в Україні суттєво нижчий, ніж у країнах ЄС, що свідчить про значний потенціал модернізації систем електропривода та підвищення енергоефективності промислових підприємств.

Питання теорії та практики асинхронних двигунів активно досліджувалися як в Україні, так і за кордоном. Вітчизняна наукова база включає значну кількість монографій і публікацій, що свідчить про складність і багатогранність проблематики. Детально опрацьовано методи ідентифікації параметрів АД та побудови математичних моделей. Водночас значно менше уваги приділено отриманню достовірної інформації про фактичні навантаження двигунів у реальних умовах експлуатації. Окремі дослідження присвячені безконтактному визначенню моменту та потужності на валу працюючих двигунів. Значний обсяг робіт стосується діагностики та оцінювання надійності АД, а також аналізу їх енергоефективності та втрат енергії.

Попри значний науковий інтерес, суттєвого прогресу у вирішенні ключових проблем підвищення енергоефективності АД в Україні за останні десятиліття досягнуто не було. Низка важливих практичних питань залишається недостатньо дослідженою, зокрема: відсутність єдиного критерію оцінки енергоефективності АД, невідповідність існуючих підходів сучасним умовам зростання вартості електроенергії, недостатня розробленість техніко-економічного обґрунтування життєвого циклу двигунів та функціонування вторинного ринку. Також актуальними залишаються проблеми впровадження енергоефективних приводів, модернізації існуючих двигунів, оновлення нормативної бази та створення недорогих і точних датчиків моменту.

Реалізація потенціалу енергозбереження у системах з АД ускладнюється впливом багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів. До зовнішніх належать економічні обмеження, недосконалість нормативно-правової бази, низький рівень проєктування та експлуатаційної культури, нестабільність якості електроенергії та невідповідність параметрів двигунів навантаженню. Основним внутрішнім чинником є енергетична ефективність самого двигуна, що визначається його ККД.

Окрему проблему становить відсутність ефективної політики формування вторинного ринку АД. Значна частина парку двигунів в Україні експлуатується понад 10–20 років і неодноразово проходила ремонти, які часто супроводжувалися погіршенням їх енергетичних та надійнісних характеристик. Частка відремонтованих двигунів становить близько 6–8 % і залежить від якості ремонтів та підходів до організації вторинного ринку. У результаті основні витрати спрямовуються на підтримання працездатності, тоді як питання енергоефективності часто залишаються другорядними.

У світовій практиці сформовано різні підходи до визначення термінів експлуатації АД: від повної заміни після виходу з ладу до обов'язкового ремонту без жорстких гарантій якості, що характерно для України. Натомість у США впроваджується більш збалансована модель, яка передбачає сертифікований ремонт із гарантованим підвищенням енергоефективності та модернізацією двигунів протягом усього життєвого циклу.

Проблема формування ефективного вторинного ринку безпосередньо пов'язана з тривалістю життєвого циклу АД та розвитком систем діагностики. Хоча напрям моніторингу та діагностики активно розвивається, його масове впровадження є обмеженим через економічні та технічні фактори. Крім того, існує певне протиріччя між прагненням зменшити ризики відмов та економічною доцільністю подальшої експлуатації обладнання з урахуванням вартості електроенергії.

Частковим вирішенням проблеми є модернізація електродвигунів, яка може включати оптимізацію режимів роботи, підвищення ККД при часткових

навантаження та узгодження характеристик двигуна і навантаження. Додатковий ефект досягається конструктивними змінами, зокрема модифікацією обмоток статора та використанням мідних короткозамкнених роторів замість алюмінієвих, що дозволяє підвищити ККД, потужність і надійність двигунів без зміни габаритів.

1.2 Стан і перспективи розвитку асинхронних електродвигунів у закордонній практиці

Проведемо аналіз сучасного ринку асинхронних електродвигунів. За прогнозами аналітичних компаній, обсяг світового ринку асинхронних двигунів у 2024 році становитиме близько 20,83 млрд доларів США, а до 2029 року може зрости до 28,04 млрд доларів США. Середньорічний темп приросту ринку за цей період оцінюється на рівні 6,12 %. Основними чинниками зростання попиту є висока надійність, простота конструкції та мінімальні вимоги до технічного обслуговування. Відсутність контактних кілець, щіток і складних комутаційних вузлів забезпечує тривалий ресурс роботи та знижує експлуатаційні витрати.

Асинхронні електродвигуни широко використовуються у промисловості, транспорті, енергетиці та комунальному господарстві. Їх експлуатація можлива в різних кліматичних умовах та при значних навантаженнях. Зростання світового споживання електроенергії та розвиток енергетичного сектору сприяють активному впровадженню асинхронних двигунів у виробничих процесах і технологічному обладнанні.

Важливим напрямом сучасного розвитку є підвищення енергоефективності електроприводів. Оптимізація систем електропривода дозволяє суттєво скоротити споживання електроенергії та зменшити експлуатаційні витрати як у промисловості, так і в житлово-комунальному секторі. За даними Міністерства енергетики США, близько половини всієї споживаної електроенергії припадає саме на електродвигуни, причому приблизно 90 % із них становлять асинхронні двигуни змінного струму.

Підвищення їхнього коефіцієнта корисної дії лише на 5 % дає можливість економити обсяги електроенергії, співставні з виробництвом електростанції потужністю у кілька сотень мегават.

Разом із цим розвиток ринку стримується активними дослідженнями альтернативних типів електродвигунів. Зокрема, компанія Tesla у моделі Tesla Model 3 застосувала синхронний реактивний двигун, що дозволило підвищити енергоефективність та збільшити запас ходу автомобіля. Аналогічні технічні рішення впроваджуються і в інших сучасних електромобілях.

Сучасні тенденції свідчать про активне розширення використання асинхронних двигунів у промисловості. Вони широко застосовуються у гірничодобувній, цементній, металургійній, нафтогазовій, автомобільній та переробній галузях. Основними перевагами таких двигунів є економічність, висока надійність, простота експлуатації та здатність працювати в складних виробничих умовах. Асинхронні електродвигуни використовуються у насосних установках, компресорах, конвеєрах, підйомних механізмах, дробарках, вентиляторах, бурових установках та іншому промисловому обладнанні.

Важливим фактором зростання попиту на асинхронні двигуни є процес урбанізації. Збільшення чисельності міського населення спричиняє активний розвиток будівельної та промислової інфраструктури, що потребує значної кількості електромеханічного обладнання. У результаті цього підвищується потреба у сучасних електроприводах із високими показниками енергоефективності.

Обробна промисловість залишається одним із головних споживачів асинхронних електродвигунів. Вони використовуються у печах, насосах, конвеєрних системах, вентиляційних установках, намотувальних машинах та іншому технологічному обладнанні. Зростання обсягів промислового виробництва після пандемії сприяє подальшому збільшенню попиту на електродвигуни. За даними міжнародних промислових організацій, світове виробництво у сфері обробної промисловості демонструє стабільну позитивну

динаміку, що створює передумови для подальшого розвитку ринку асинхронних двигунів.

З метою задоволення потреб промисловості провідні виробники електродвигунів постійно вдосконалюють конструкції машин, підвищують їхню енергоефективність та впроваджують сучасні системи керування. Очікується, що подальший розвиток автоматизації, електротранспорту та енергоощадних технологій сприятиме стабільному зростанню світового ринку асинхронних електродвигунів у найближчі роки.

1.3 Закордонний досвід розробки й експлуатації електроприводів на базі АД

Упродовж останніх десятиліть у провідних країнах світу значна увага приділяється підвищенню енергоефективності електродвигунів та електроприводів. Одним із ключових напрямів розвитку сучасної промисловості стало впровадження енергоощадних технологій та вдосконалення систем електропривода на базі асинхронних двигунів. У США ще у 1997 році був прийнятий закон щодо використання енергоефективних електродвигунів, який започаткував активне впровадження двигунів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

У країнах Європейського Союзу важливим етапом розвитку стало введення стандарту IEC 60034-30, який визначив класи енергоефективності електродвигунів: IE1, IE2 та IE3. Надалі класифікація була розширена стандартом IEC 60034-30:2009, де додатково введено клас IE4 – «супер-преміум». Сучасні тенденції розвитку електромашинобудування спрямовані на досягнення ще вищих показників енергоефективності. Наприклад, асинхронний двигун потужністю 375 кВт класу IE2 має ККД близько 95 %, тоді як двигун класу IE3 – приблизно 96 %.

Подальший розвиток енергоефективних технологій привів до появи електродвигунів класу IE5. Компанія Grundfos представила високоефективні синхронні електродвигуни серії MGE, використання яких дозволяє знизити

енергоспоживання приблизно на 15 %. Такі рішення свідчать про глобальну тенденцію до підвищення ефективності електроприводів та скорочення витрат електроенергії.

Одним із найбільших ринків низьковольтних асинхронних двигунів залишається Північна Америка. Основними сферами використання таких двигунів є металургійна та гірничодобувна промисловість, нафтогазовий сектор, енергетика, хімічна та харчова промисловість, а також системи водопостачання і водовідведення. У попередньому році обсяг ринку низьковольтних асинхронних двигунів у регіоні оцінювався приблизно у 3,87 млрд доларів США, а до 2029 року прогнозується його зростання до 4,58 млрд доларів США.

Важливим фактором розвитку сучасних електроприводів є впровадження концепції Індустрії 4.0, яка передбачає широке використання автоматизованих систем керування, цифрових технологій, промислового Інтернету речей (IoT), робототехніки та систем аналізу даних. Поширення автоматизації сприяє підвищенню продуктивності виробництва та збільшенню попиту на сучасні асинхронні електродвигуни.

За даними компанії ABB, електродвигуни споживають близько 70 % усієї електроенергії, що використовується промисловістю. На сьогодні у світі експлуатується понад 300 мільйонів промислових систем, оснащених електродвигунами. Тому підвищення їх енергоефективності є одним із найважливіших шляхів скорочення енергоспоживання та зниження викидів CO₂.

Асинхронні двигуни широко застосовуються в харчовій, нафтогазовій, гірничодобувній та енергетичній галузях. Особливо активно вони використовуються для приводу насосів, компресорів, вентиляторів, мішалок, конвеєрів та бурового обладнання. У нафтогазовій промисловості такі двигуни забезпечують роботу систем видобутку, транспортування та переробки нафти й природного газу.

Значний вплив на розвиток ринку мають економічні та геополітичні

фактори. Зростання цін на мідь, алюміній та інші метали призводить до підвищення вартості виробництва електродвигунів. Крім того, міжнародні торговельні обмеження та нестабільність на світових ринках сировини також впливають на темпи розвитку галузі.

Підвищений попит на енергоефективні електроприводи спостерігається і в енергетичному секторі. Наприклад, у Мексиці реалізуються програми розвитку гідроенергетики, що сприяє зростанню потреби в сучасних електроприводах для насосного та генерувального обладнання. Водночас у США активно розвивається нафтогазова промисловість, де асинхронні двигуни є основою роботи бурових установок, компресорних станцій і насосних агрегатів.

Сполучені Штати Америки залишаються одним із найбільших виробників нафти та природного газу у світі. Зростання обсягів видобутку та розвиток промислової інфраструктури формують стабільний попит на сучасні електроприводи. Важливу роль у цьому процесі відіграє активне впровадження технологій Індустрії 4.0, зокрема систем штучного інтелекту, хмарних сервісів, аналітики великих даних та автоматизованих виробничих комплексів.

Серед провідних світових виробників низьковольтних асинхронних двигунів можна виділити компанії ABB, Siemens, Nidec, Toshiba та Shanghai Electric. Дані компанії активно інвестують у розвиток виробництва, автоматизацію та створення нових енергоефективних систем електропривода.

Низьковольтні асинхронні двигуни зазвичай мають потужність від 0,06 до 1250 кВт і працюють у діапазоні напруг 200–690 В. Вони випускаються з різними швидкостями обертання та можуть комплектуватися редукторами для регулювання швидкості. Основними перевагами таких двигунів є простота конструкції, висока надійність, невисока вартість і можливість роботи у важких умовах експлуатації.

Таким чином, світова практика свідчить про постійне зростання ролі асинхронних електродвигунів у промисловості. Подальший розвиток

електроприводів пов'язаний із підвищенням енергоефективності, впровадженням цифрових технологій, автоматизації виробництва та екологічних стандартів, що забезпечуватиме стабільне зростання попиту на сучасні асинхронні двигуни у найближчі роки.

2.1 Політика ЄС щодо енергоефективних асинхронних двигунів

20 вересня 2023 року було оприлюднено оновлену редакцію Директиви ЄС з енергоефективності, яка закріплює принцип пріоритетності енергозбереження - Energy Efficiency First. Цей документ є важливим етапом на шляху зміцнення енергетичної безпеки та досягнення енергетичної незалежності країн Європейського Союзу. Енергоефективність визначено одним із ключових елементів Національних енергетичних і кліматичних планів (НЕКП), що передбачає системний аналіз і впровадження відповідних політик у державах-членах ЄС, зокрема в Польщі, Литві та Данії.

Динамічному розвитку енергозбереження значною мірою сприяє жорстка політика ЄС щодо впровадження енергоефективних асинхронних двигунів. Зокрема, з червня 2011 року на ринку ЄС заборонено реалізацію електродвигунів, які не відповідають класу енергоефективності IE2 відповідно до стандарту IEC 60034-30. Надалі, з 2017 року, обмеження було посилено: двигуни потужністю 0,75–375 кВт, що не відповідають класу IE3 або IE2 (за умови використання з перетворювачами частоти), також були виключені з обігу на ринку ЄС.

На перший погляд зазначені вимоги не містять прямого економічного критерію, однак саме поєднання високої енергоефективності та надійності електродвигунів забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення загальної ефективності систем і, що особливо важливо в умовах ринку, їхню конкурентоспроможність. Врахування цього підходу є принципово важливим для формування та реалізації ефективної політики енергозбереження в електромашинобудівній галузі України.

Комісія ЄС робить усе, щоб економіка в Європі стала кліматично нейтральною. Вдалося зекономити приблизно 57 ТВт·год електроенергії за рік при дії Регламенту 640/2009, який мав чинність до 30 червня 2021 року.

На теперішню дату (травень 2026 р.) впроваджено усі два етапи Регламенту. Ми приділемо увагу тим, що стосуються двигунів (рис. 2.1).

Наразі діє міжнародний стандарт енергоефективності ІЕС 60034-30, який передбачає класифікацію електродвигунів за чотирма рівнями енергоефективності [4, 5, рис. 2.2]:

IE1 – стандартний рівень (Standart), ККД: 72,1-94 %;

IE2 – високий рівень (High), ККД: 79,6-95,1 %;

IE3 – підвищений рівень (Premium), ККД: 82,5-96 %;

IE4 – надвисокий рівень (Super Premium), ККД: 85,7-96,7 %;

IE5 - Ultra Premium Efficiency (ультрависока ефективність),
ККД=94-98 %.

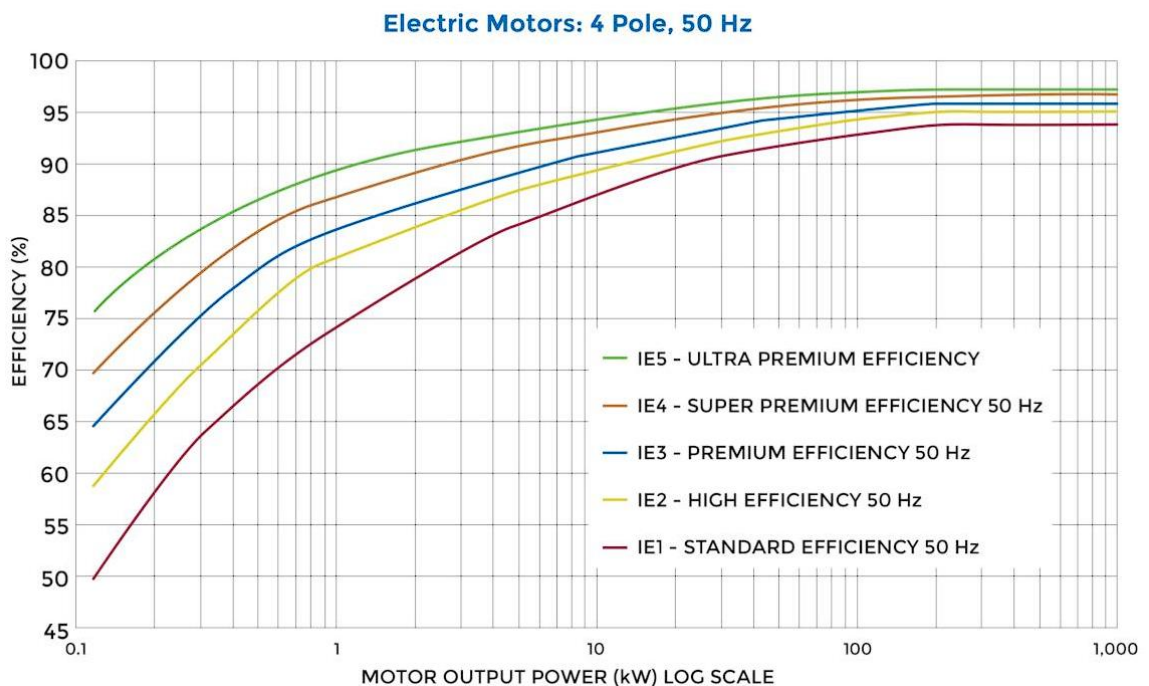


Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта корисної дії асинхронних двигунів від їх потужності та класу енергоефективності

2.2 Порівняльний аналіз робочих характеристик вітчизняних асинхронних двигунів та їх зарубіжних аналогів з позицій енергоефективності

Для вітчизняної електроенергетики введена постанова Кабінету Міністрів України від 27.02.2019 №157 (що набрала чинності 15.09.2019) «Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів». Відповідно до його положень, через два роки після набрання чинності всі електродвигуни номінальною потужністю від 0,75 до 375 кВт, за окремими винятками, повинні мати ККД не нижче рівня IE3 або відповідати рівню IE2 за умови оснащення регулятором швидкості. Також передбачено, що оцінювання відповідності вимогам екодизайну здійснюється із застосуванням методик, визначених національними стандартами.

Для наочного відображення технологічного розриву між вітчизняними виробниками та сучасними вимогами Регламенту в табл. 1 наведено значення ККД поширених двигунів серії AIP у порівнянні з аналогами класів IE2 та IE3 для режиму роботи S1.

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнта корисної дії асинхронних двигунів різних класів енергоефективності

P_n , кВт	AIP/IE2/IE3/IE4		
	n , об/хв		
	3000	1500	1000
0,75	72,1/77,4/80,7/82,2	72,1/79,6/83,5/85,7	70,0/75,9/78,9/79,2
5,5	85,7/87,0/89,2/89,7	85,7/87,7/89,6/89,8	84,0/86,1/88,0/88,3
22	90,8/91,3/92,7/93,4	90,5/91,6/93,2/93,4	89,7/90,9/92,2/92,7
75	93,6/93,8/94,7/95,4	93,6/94,4/95,0/96,0	93,5/93,7/94,6/95,6
250	94,7/95,5/95,8/96,6	94,8/95,7/96,0/96,8	94,5/95,0/95,8/96,4

Попри запізнення на 10–15 років, впровадження Регламенту має стати позитивним стимулом для формування нової енергетичної політики України у сфері виробництва та впровадження енергоефективних асинхронних двигунів.

Водночас навіть у довоєнний період виконання його вимог у встановлені терміни було проблематичним. Умови воєнного стану ще більше ускладнили реалізацію цих завдань, проте очевидно, що прискорення переходу до підвищеної енергоефективності АД є одним із пріоритетних напрямів розвитку енергетики України. Позитивним прикладом у цьому напрямку є впровадження двигунів класу IE3 підприємством ТОВ «Еквівес» в Україні .

Технічні параметри електродвигунів різних класів енергоефективності наведено в табл. 2.2.

Для подальшого дослідження виконано аналіз вартості електродвигунів серії АІР та класів енергоефективності IE2, IE3 і IE4. Використано таблицю з вартістю на кінець 2024 року, враховуючи загальну тенденцію подорожчання на ринку електродвигунів ціни на квітень-травень 2026 року за рахунок:

- зростання вартості міді та електротехнічної сталі;
 - посилення вимог до енергоефективності (IE3/IE4 як базовий стандарт у ЄС);
 - перехід виробників на більш дорогі технологічні рішення (IE4, IE5);
- логістичні та енергетичні витрати.

Таблиця 2.2 - Характеристики електродвигунів різних класів енергоефективності

Характеристики двигунів	IE1 стандартна	IE2 висока	IE3 підвищена	IE4 надвисока	IE5 ультрависока
Номінальна потужність, кВт	0,75-375	0,75-375	0,75-375	2,2-230	0,12-375
Кількість полюсів	2, 4, 6, 8, 10,12	2, 4, 6	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8
Швидкість, об/хв	500-3600	1000-3600	750-3600	750-3600	710-3000
ККД, %	72,1-94	79,6-95,1	82,5-96	85,7-96,7	89-98
Клас захисту	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65, IP66	IP55, IP56, IP65	IP55, IP56, IP65, IP66
Режим роботи	S1	S1, S2, S3	S1	S1	S1

У середньому:

- IE2 майже не зник із ринку, але подорожчав незначно;
- IE3 став масовим стандартом і виріс у ціні;
- IE4 подорожчав найбільше через матеріали та технологічність;
- AIP (IE1/умовний базовий рівень) або знятий з пріоритетного виробництва, або продається як дешевий сегмент/складські залишки з підвищеною ціною через дефіцит.

Орієнтовна зміна вартості (середній діапазон) порівняно з кінцем 2024 року становить:

- AIP (IE1/стандартні базові двигуни) → +5...15 % (через дефіцит, ремонтний фонд, зниження виробництва);
- IE2 → +8...18 % (залишається перехідним класом, але поступово витісняється);
- IE3 → +10...25 % (став основним сегментом, зросла собівартість і попит);
- IE4 → +15...35 % (найбільше зростання через матеріали, технології та регуляторний тиск).

Щодо пояснення зміни вартості електродвигунів:

1. Ефект зсуву ринку вгору IE2 і IE3 перестали бути просто альтернативами - IE3 фактично став мінімальним стандартом у багатьох країнах ЄС.
2. Подорожчання матеріалів (особливо міді); доля матеріалів у вартості двигуна залишається до 45–55%, тому будь-які коливання одразу впливають на IE3–IE4 сегмент.
3. Регуляторний фактор ЄС Поступовий перехід до IE4/IE5 створює структурний тиск на ринок і “витягує” ціни вгору навіть у країнах поза ЄС.

У період 2024–2026 років ринок асинхронних електродвигунів характеризується поступовим підвищенням вартості обладнання всіх класів енергоефективності з одночасним зміщенням попиту у бік високоефективних

IE3 та IE4 двигунів. Найбільше зростання вартості спостерігається у преміальному сегменті IE4, що пояснюється підвищеними вимогами до матеріалів і технологій виробництва. Загальна динаміка ринку відображає перехід до моделі «життєвих витрат», у якій ключовим критерієм стає не початкова ціна, а сумарна енергоефективність протягом життєвого циклу обладнання.

Тому, у період 2024–2026 років спостерігається загальне підвищення вартості асинхронних електродвигунів усіх класів енергоефективності, при цьому найбільш виражене зростання характерне для сегментів IE3 та IE4, що пов'язано з підвищенням вимог до енергоефективності, подорожчанням матеріалів і структурною перебудовою ринку на користь високоефективних електроприводів.

У 2025–початку 2026 років на світовому ринку електродвигунів зберігалася тенденція поступового зростання вартості обладнання всіх класів енергоефективності, що зумовлено подорожчанням міді, електротехнічної сталі, логістики та посиленням вимог до енергоефективності (перехід до IE3–IE4 як базового стандарту) (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Орієнтовні цінові характеристики асинхронних двигунів різних класів енергоефективності на квітень-травень 2026 року

P_n , кВт	AIP/IE2/IE3/IE4		
	Вартість АД, грн		
	3000	1500	1000
0,75	2 835/ 3 240 / 3 850 / 13 510	3 300/3 842/ 7 371/ 17 940	4 255/ 5 310 / 10 380 / 22 680
5,5	6 510/ 16 480 / 23 650/ 47 260	8 745/ 14 800 / 25 040 / 58 500	13 040 / 24 330 / 34 750/ 81 000
22	25 200/ 51 620 / 68 420 / 134 500	30 250/ 59 660 / 87 050/ 154 200	35 650/ 80 240 / 10 400/ 182 200
75	60 900/89 640/ 241 400/ 361 800	69 300 / 10 550 / 259 700/ 405 000	98 670/144 800/ 350 600/ 477 900

250	117 600/ 287 300 / 649 000/ 1 139 000	180 400/ 378 500 / 713 700 / 1 268 000	322 000 / 472 000 / 937 500/ 1 485 000
-----	--	---	---

1. Структурний зсув стандарту ефективності

IE3 у 2026 році фактично закріпився як мінімально допустимий промисловий стандарт у багатьох країнах, тоді як IE4 активно розширює частку ринку у високонавантажених системах.

2. Зростання собівартості виробництва

Основними драйверами подорожчання є: мідь та електротехнічна сталь; удосконалені магнітні матеріали; вимоги до втрат і ККД (IE3–IE4); впровадження VFD-сумісних конструкцій.

3. Двигуни IE3–IE4 мають вищу стартову вартість, але зменшують експлуатаційні витрати, забезпечують швидшу окупність, витісняють IE1/IE2 із нових проєктів.

VFD-сумісні конструкції електродвигунів - це електродвигуни, спеціально спроектовані або адаптовані для роботи з частотними перетворювачами (VFD, Variable Frequency Drive) з метою енергоефективного та керованого електроприводу.

VFD-двигун може стабільно працювати в умовах: змінної частоти (наприклад, 5–60 Гц і більше), змінної напруги, частих пусків і зупинок.

Особливості VFD-сумісних конструкцій: посилена ізоляція обмоток (через імпульсні перенапруги); покращене охолодження (особливо на низьких обертах); зменшені втрати в сталі та міді; підвищена стійкість до нагрівання; підшипники, стійкі до електричних струмів; оптимізована електромагнітна конструкція.

Використання VFD-сумісних двигунів дозволяє: регулювати швидкість без механічних редукторів; знижувати енергоспоживання (до 20–50% у насосах і вентиляторах); зменшувати пускові струми; підвищувати ресурс обладнання; точно адаптувати режим роботи під навантаження.

2.3 Сучасні енергоефективні рішення у сфері асинхронних двигунів провідних компаній світу

Кабінетом Міністрів України затверджено постанову «Технічний регламент щодо вимог до екодизайну для електродвигунів», відповідно до якої всі електродвигуни номінальною потужністю від 0,75 до 375 кВт (за окремими винятками) повинні забезпечувати рівень енергоефективності не нижче IE3 або відповідати класу IE2 за умови оснащення регулятором швидкості.

Офіційним представником корпорації Ledermann в Україні є EKVIVES, яке забезпечує виробництво та постачання електродвигунів класів енергоефективності IE3 та IE4 (рис. 2.2).

У зв'язку з воєнним станом в Україні процес обов'язкового переходу від електродвигунів, виготовлених за стандартами ГОСТ, до сучасних енергоефективних асинхронних двигунів класу IE3 був тимчасово відтермінований. Водночас електродвигуни компанії Ledermann виготовляються відповідно до міжнародних вимог та стандартів енергоефективності. У країнах Європи близько 80 % промислових підприємств уже використовують електродвигуни такого типу. Підвищення енергоефективності електроприводів забезпечує скорочення споживання електроенергії та зменшення обсягів викидів парникових газів, що є важливим напрямом реалізації екологічної політики та раціонального використання енергетичних ресурсів.

Енергоефективні електродвигуни класу IE3 виробництва Ledermann мають низку переваг, серед яких:

- зниження витрат електроенергії на промислових підприємствах;
- підвищення енергоефективності виробничих процесів;
- окупність додаткових інвестицій у середньому протягом 2–4 років;
- підвищення конкурентоспроможності українських підприємств на міжнародному ринку;
- сприяння енергетичній незалежності держави;

- значний потенціал економії фінансових ресурсів у масштабах країни.



Рисунок 2.2 – Двигуни з енергоефективністю IE3, IE4 ТОВ «EKVIVES»

Офіційним представником компанії Ledermann в Україні є EKVIVES, яке забезпечує постачання продукції, технічний супровід та підтримку під час впровадження енергоефективних електродвигунів.

Перспективним напрямом розвитку також є використання електродвигунів класу IE4 виробництва Lammers. Офіційним дилером даної компанії в Україні є Елтех Україна. Незважаючи на вищу вартість таких двигунів, термін окупності їх використання залежно від умов експлуатації становить приблизно 2–6 років.

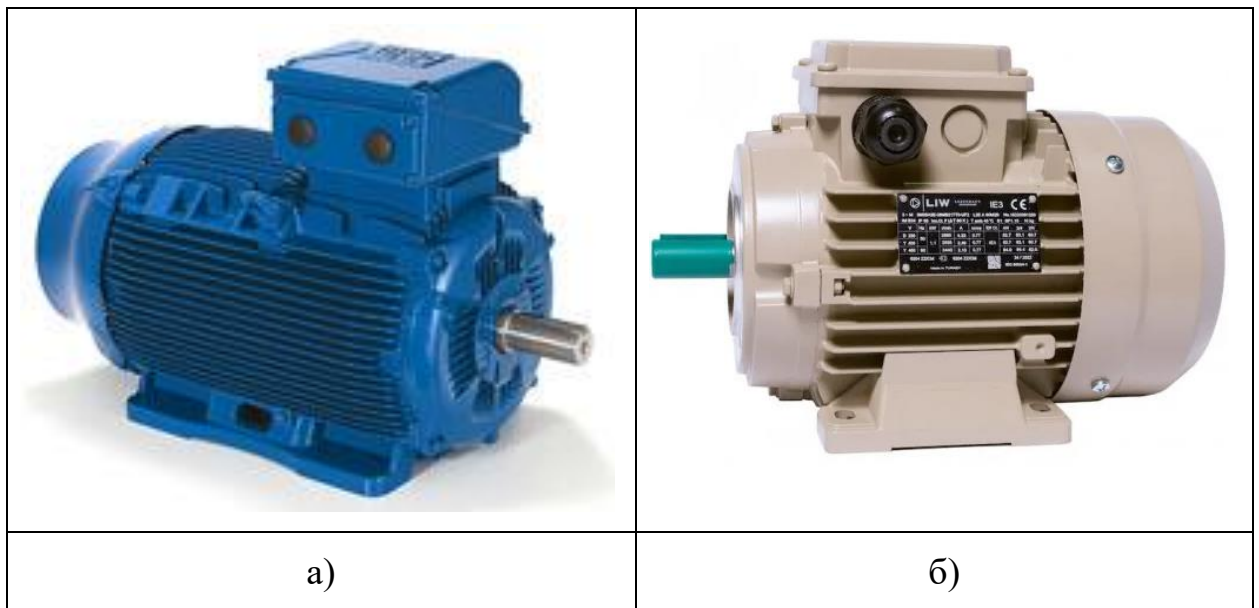
Для проведення подальшого порівняльного аналізу електродвигунів різних класів енергоефективності розглядаються такі виробники:

- електродвигуни серії W22 класів IE2, IE3 та IE4 компанії WEG;
- електродвигуни класу IE3 компанії Ledermann;
- електродвигуни класу IE4 компанії Lammers;
- електродвигуни класу IE5 виробництва WEG, ABB, Siemens та NORD.

Двигуни класу енергоефективності IE5 належать до категорії Ultra Premium Efficiency та характеризуються надвисоким коефіцієнтом корисної дії, який у сучасних конструкціях може досягати 96–97 %. Основними перевагами IE5 двигунів є зниження втрат електроенергії, зменшення нагріву, підвищення строку служби та зниження експлуатаційних витрат. IE5 електродвигуни широко застосовуються у сучасних енергоефективних електроприводах насосів, вентиляторів, компресорів і технологічного обладнання промислових підприємств.

Асинхронні двигуни різних серій та класів енергоефективності показані на рис. 2.3.

Паспортні технічні дані цих же двигунів показані у табл. 2.4, 2.5



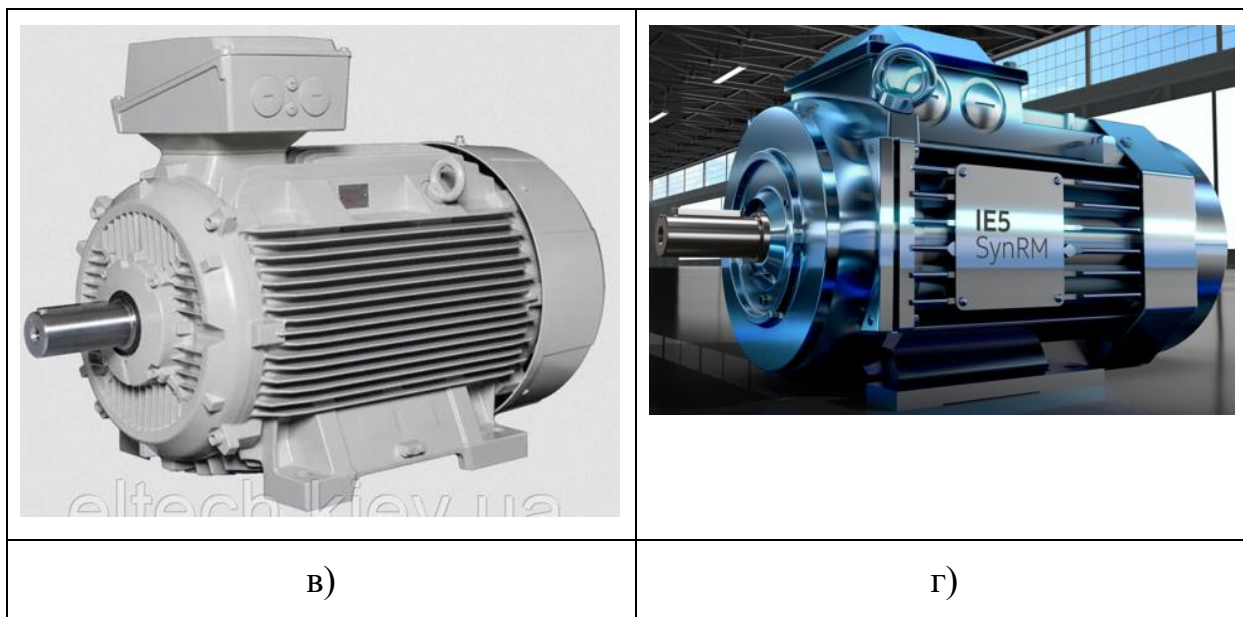


Рисунок 2.3 – Сучасні енергоефективні АД різних серій: а) двигун W22 (IE2);
б) двигун LEDERMANN L3E A 80MB4 (IE3); в) двигун Lammers
17AA/17M-2-B3 (IE4); г) двигун ABB SynRM (IE5)

Таблиця 2.4 – Технічні параметри електродвигуна LEDERMANN L3E A 80MB4 з класом енергоефективності IE 3

Технічні параметри	Од. виміру	Величина
Клас енергоефективності	IE3	
Потужність	кВт	0,75
Частота обертання	об/хв	1500
Напруга	В	400
Монтажне виконання	B3	
Коефіцієнт потужності	-	0,7
ККД	%	82,2
Клас захисту	IP55	
Кратність пускового струму	-	6
Кратність пускового моменту	-	3,2

Таблиця 2.5 – Технічні параметри електродвигуна серії Lammers 17AA/17M-2-B3 з класом енергоефективності IE 4

Технічні параметри	Од. виміру	Величина
Клас енергоефективності	IE4	
Потужність	кВт	0,75
Частота обертання	об/хв	3000
Напруга	В	380/220
Серія 17AA	алюмінієвий корпус	
Монтажне виконання	B3	
Частота	Гц	50, 60
Клас захисту (закрите виконання)	IP55	

Технічні рішення великих гравців на ринку енергоефективних двигунів можна навести у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 - Технічні рішення великих корпорацій щодо підвищення енергетичних показників двигунів

Корпорації	Сучасні технічні рішення
WEG	1) Удосконалено конструкцію основних елементів корпусу, виготовленого з високоякісного чавуну. 2) Модернізовано систему охолодження шляхом зміни форми кожуха. 3) Покращено аеродинамічні характеристики та збільшено інтенсивність повітряного потоку вздовж корпусу за рахунок використання нового вентилятора охолодження; 4) Змінено конструкцію підшипникового щита для ефективнішого відведення тепла від підшипників; 5) Підвищено рівень надійності та довговічності двигунів. 6) Передбачена можливість підключення систем теплового захисту електродвигуна.

Корпорації	Сучасні технічні рішення
	7) Двигуни комплектуються засобами контролю температури: термостатами; термісторами; автоматичними пристроями теплового захисту; резистивними датчиками температури PT-100. 8) Датчики PT-100 забезпечують: безперервний контроль температури двигуна; відображення параметрів на дисплеї контролера; високу точність і стабільність вимірювань. 9) Завдяки високій надійності датчики PT-100 широко застосовуються у промисловості для контролю нагріву електродвигунів.
LEDERMANN Industrie Werke	1) Розроблення та впровадження енергоефективних асинхронних електродвигунів габаритів 80–355 потужністю до 400 кВт. 2) Застосування двигунів класу енергоефективності IE3 зі зниженими втратами електроенергії. 3) Оптимізація конструкції магнітопроводу та обмоток статора для зменшення електромагнітних втрат. 4) Використання високоякісних електротехнічних матеріалів і покращених систем охолодження. 5) Підвищення коефіцієнта корисної дії та зниження нагріву двигунів у процесі експлуатації. 6) Модернізація електроприводів промислових підприємств шляхом заміни застарілих двигунів на сучасні енергоефективні аналоги. 7) Впровадження бізнес-моделі для українських підприємств, спрямованої на скорочення споживання електроенергії та експлуатаційних витрат.
Lammers	1) Виробництво та модернізація електродвигунів класів енергоефективності IE3 та IE4.

Корпорації	Сучасні технічні рішення
(стандарти PN-EN 60034-1, IEC 34-1/9, PN-IEC 72-1, IEC 85, DIN 57530/VDE 0530)	2) Застосування високоякісної електротехнічної сталі зі знизженими магнітними втратами. 3) Удосконалення конструкції ротора і статора для підвищення коефіцієнта корисної дії. 4) Використання обмоток із покращеними електричними характеристиками та зменшеним активним опором. 5) Оптимізація систем охолодження для зниження теплових втрат і підвищення ресурсу двигуна. 6) Зменшення механічних втрат за рахунок використання сучасних підшипникових вузлів та балансування ротора. 7) Впровадження частотно-регульованого електропривода для роботи двигунів у енергоощадних режимах. 8) Проведення модернізації та сервісного обслуговування електродвигунів із метою зниження енергоспоживання промислових установок; 9) Застосування систем моніторингу температури та технічного стану двигунів для підвищення надійності й ефективності експлуатації.
ABB	1) Розроблення синхронно-реактивних двигунів серії ABB SynRM класу енергоефективності IE5. 2) Зниження енергетичних втрат до 40 % порівняно з двигунами класу IE3. 3) Підвищення коефіцієнта корисної дії за рахунок синхронно-реактивної конструкції ротора без використання постійних магнітів. 4) Скорочення експлуатаційних витрат та споживання електроенергії на промислових підприємствах. 5) Зменшення викидів CO₂ та підвищення екологічної ефективності електроприводів.

Корпорації	Сучасні технічні рішення
	6) Забезпечення швидкої окупності впровадження енергоефективних двигунів. 7) Інтеграція двигунів до екологічного портфеля ABB EcoSolutions. 8) Використання екологічних декларацій EPD відповідно до стандарту ISO 14025 Type III для оцінювання впливу продукції на довкілля. 9) Впровадження технологій класу IE6 «Hyper-Efficiency» із додатковим зниженням втрат енергії до 20 % порівняно з IE5. 10) Орієнтація на створення високоефективних електроприводів нового покоління для сталого розвитку промисловості.

2.4 Структурно-експлуатаційні характеристики парку асинхронних двигунів України

Розглянемо стан парку асинхронних двигунів в Україні у довоєнний період. Внаслідок повномасштабної агресії росії енергетична галузь України зазнала значних руйнувань і втрат, що також негативно вплинуло на електромашинобудівний комплекс.

2.4.1 Структура парку АД

Основу загальнопромислового парку асинхронних двигунів становлять серії АІР, АДТ, АД, 4А-6А, АО, АІМ, АМУ, ВАО та інші й кількість цих двигунів у довоєнний період оцінювалась $\approx$ у 30 млн одиниць [1].

2.4.2 Розподіл за потужністю

Структура парку за потужністю має наступний вигляд:

- двигуни малої потужності (1–5 кВт) – близько 60 %;
- середньої потужності (до 20 кВт) – близько 20 %;
- потужні (20–100 кВт) – близько 7 %;

- надпотужні (понад 100 кВт) – близько 1 %.

2.4.3 Енергетичні характеристики (на прикладі серії AIP)

Номінальні показники енергоефективності змінюються залежно від потужності двигуна:

- мала потужність: ККД = 72–85,7 %, $\cos \varphi = 0,69–0,88$;
- середня потужність: ККД = 90–92 %, $\cos \varphi = 0,8–0,9$;
- потужні двигуни: ККД = 90–93,9 %, $\cos \varphi = 0,9–0,91$;
- надпотужні двигуни: ККД = 94–95,4 %, $\cos \varphi = 0,91–0,92$ [1].

2.4.4 Особливості експлуатації та енергоспоживання

Як видно з наведених даних (табл. 2.6), найбільшу частку становлять двигуни малої потужності до 5 кВт, які характеризуються найнижчими значеннями ККД. Саме ця група споживає близько 40 % загального обсягу електроенергії, що приблизно у три рази перевищує енергоспоживання на освітлення.

Таблиця 2.6 – Розподіл асинхронних двигунів за потужністю та рівнем споживання електроенергії в Україні

Потужність, кВт	% від загальної кількості	% від загальної споживаної електроенергії
До 1,0	13	5
1,0 – 5,0	60	40
5,0 – 20,0	20	30
20,0 – 100,0	7	20
Більше 100,0	1	5

Важливо відзначити, що близько 48 % асинхронних двигунів працюють у приводах вентиляторів (32 %) та насосів (16 %). При цьому саме цей сегмент має найбільший потенціал для енергозбереження за рахунок впровадження

регульованого електропривода, однак на практиці він реалізований лише на рівні 10–12 %.

Рівень експлуатаційних показників асинхронних двигунів в Україні залишається незадовільним і характеризується низкою проблемних аспектів:

- фактичний середній строк експлуатації електродвигунів, як правило, становить не більше 6–7 років;
- щорічно потребують ремонтного обслуговування, тобто мають відносно низький міжремонтний інтервал (від 10 % до 50 % двигунів);
- після проведення ремонтів енергетичні характеристики в середньому погіршуються на 3–4 %;
- середній рівень завантаження двигунів становить лише 30–40 % (у країнах Європи цей показник не нижче 60 %);
- післяремонтна паспортизація часто виконується неповною мірою;
- контролю та діагностики технічного стану й енергетичних характеристик асинхронних двигунів використовуються недостатньо широко.

Наведені факти свідчать про необхідність комплексного вирішення проблем у сфері виробництва, ремонту та експлуатації асинхронних двигунів, що є важливим чинником підвищення загальної енергоефективності промислового виробництва.

Окремо слід розглянути вторинний ринок асинхронних електродвигунів. Значна частина таких машин перебуває в експлуатації 10–25 років і більше. Очевидно, що вони неодноразово проходили ремонт, що, як правило, призводить до погіршення їх паспортних характеристик. Під час швидкого ремонту основна увага часто приділяється лише відновленню працездатності, тоді як визначення реальних енергетичних показників залишається поза увагою.

У контексті строків служби електродвигунів та доцільності їх своєчасної заміни після вичерпання ресурсу можливі два підходи:

- заміна двигуна після відмови на новий із вищими енергоефективними характеристиками;

- виконання ремонту з мінімальними витратами, що часто пов'язано із залученням непрофільних або несертифікованих організацій.

Після проведення ремонтів АД особливо важливо здійснювати повну діагностику основних параметрів двигуна та перевірку його працездатності для забезпечення надійної та ефективної експлуатації.

3.1 Паспортні та розрахункові параметри двигуна WEG W22

Розглянемо двигун від компанії WEG лінії W22.

3.1.1 Паспортні параметри двигуна WEG W22

Паспортні параметри якого показані в табл. 3.1, а загальний вид – на рис. 3.1.

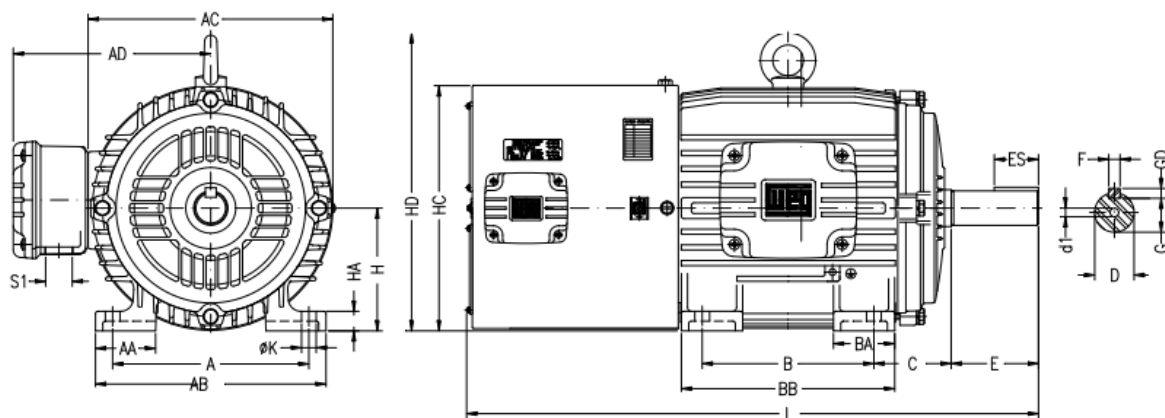
Таблиця 3.1 – Паспортні параметри двигуна WEG W22

Паспортні параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Типорозмір	160M	
Потужність	кВт	11,0
Число полюсів	—	4
Частота мережі	Гц	50,0
Частота обертання	об/хв	1455
Ковзання	%	3,00
Номінальна напруга	В	220/380
Номінальний струм	А	40,2/23,3
Пусковий струм	А	241/140
Відношення струмів $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	—	6,0
Струм без навантаження	А	20,9/12,1
Номінальний момент	Нм	72,2
Відношення моментів $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$	—	2,3
Відношення моментів $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}}$	—	2,6
Клас ізоляції	—	F
Температура	К	80
Час блокування ротора	с	12
Режим роботи	—	S1
Температура навколишнього середовища	°C	-20...+40

Паспортні параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Ступінь захисту двигуна	—	IP55
Інерційний момент	кг/м ²	0,07528
Рівень звукового тиску	dB (A)	67
Коефіцієнт потужності при навантаженні: — 100 % — 75 % — 50 %		0,81 0,74 0,62
ККД при навантаженні: — 100 % — 75 % — 50 %	%	88,5 88,5 86,5



a)



б)

Рисунок 3.1 – Двигун компанії WEG лінії W22 типорозміру 160M потужністю 11 кВт: а) загальний вид; б) габаритні розміри

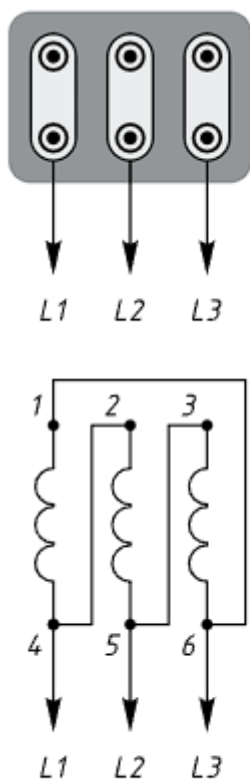


Схема підключення "трикутник"

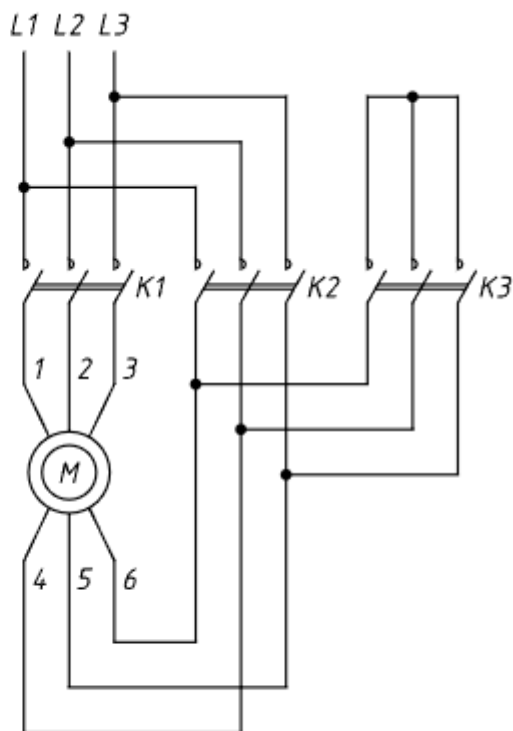


Схема підключення "комбінована"

Рисунок 3.2 – Схеми підключення трифазного електродвигуна компанії WEG лінії W22 типорозміру 160M потужністю 11 кВт до мережі 220/380 В (Δ/Y)

Для підключення живильного кабелю та обмоток електродвигун оснащений клемною коробкою.

3.1.2 Розрахункові параметри та характеристики двигуна WEG W22

Розрахуємо параметри асинхронного двигуна типу WEG W22 [3].

Кількість числа пар полюсів:

$$p = \frac{60 f_H}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2,0, \quad (3.1)$$

Синхронна частота (частота обертання магнітного поля статора) двигуна WEG W22:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157,1 \text{ рад/с.} \quad (3.2)$$

Номінальна частота обертання ротора:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1455}{30} = 152,4 \text{ рад/с.} \quad (3.3)$$

Номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{157,1 - 152,4}{157,1} = 0,02992. \quad (3.4)$$

Критичне ковзання:

$$S_K = S_H \cdot \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0,02992 \cdot \left(2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1} \right) = 0,1496, \quad (3.5)$$

де $\lambda_M = 2,5$ – величина перевантаження двигуна WEG W22.

Номінальний струм:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} U_{1H} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,885 \cdot 0,81} = 23,31 \text{ А.} \quad (3.6)$$

Номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11000}{152,4} = 72,18 \text{ Нм.} \quad (3.7)$$

Пусковий момент:

$$M_{II} = \lambda_{II} \cdot M_H = 2,3 \cdot 72,18 = 166,0 \text{ Нм.} \quad (3.8)$$

Критичний момент:

$$M_K = \lambda_M \cdot M_H = 2,6 \cdot 72,18 = 187,7 \text{ Нм.} \quad (3.9)$$

Повний опір двигуна WEG W22 при загальмованому роторі:

$$Z_{K3} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot k_i} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 23,31 \cdot 6} = 1,569 \text{ Ом.} \quad (3.10)$$

Приведений активний опір ротора:

$$r'_2 = \frac{M_{II} \cdot Z_{K3}^2}{\frac{m_c \cdot U_{1H}^2}{3 \cdot \omega_0}} = \frac{166,0 \cdot 1,569^2}{\frac{3 \cdot 380^2}{3 \cdot 157,1}} = 0,4446 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

Пусковий коефіцієнт потужності [5]:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{II} &= \cos \varphi_H \cdot \left[\lambda_{II} \cdot \frac{\eta_H}{(1 - S_H) \cdot k_i} + 0,33 \cdot [(1 - \eta_H) \cdot k_i] \right] = \\ &= 0,81 \cdot \left[2,3 \cdot \frac{0,885}{(1 - 0,02992) \cdot 6} + 0,33 \cdot [(1 - 0,885) \cdot 6] \right] = 0,4677 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Активний опір фазної обмотки статора [5]:

$$r_1 = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_{II} - r'_2 = 1,569 \cdot 0,4677 - 0,4446 = 0,2892 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Індуктивний опір АД при загальмованому роторі (повний індуктивний опір):

$$X_{K3} = Z_{K3} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = 1,569 \cdot \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,9201 \text{ Ом.} \quad (3.14)$$

Повний активний опір:

$$R_{K3} = \sqrt{Z_{K3}^2 - X_{K3}^2} = \sqrt{1,569^2 - 0,9201^2} = 1,271 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

Приведений індуктивний опір ротора двигуна:

$$X'_2 = \frac{X_{K3}}{\left(1 + \frac{r'_1}{r'_2}\right)} = \frac{0,9201}{\left(1 + \frac{0,2892}{0,4446}\right)} = 0,5575 \text{ Ом} \quad (3.16)$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$X_1 = X_{K3} - X'_2 = 0,9201 - 0,5575 = 0,3626 \text{ Ом.} \quad (3.17)$$

Ом.

Струм холостого ходу статора:

$$I_{XX} = I_H \cdot \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \cos \varphi_H \cdot \frac{X'_2}{r_1 + \frac{r_2}{S_H}} \right) =$$

$$= 23,31 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,81^2} - 0,81 \cdot \frac{0,5575}{0,2892 + \frac{0,4446}{0,02992}} \right) = 12,97 \text{ A.} \quad (3.18)$$

Конструкційний коефіцієнт [5]:

$$C_1 = \frac{I_{XX}}{2 \cdot I_H \cdot k_1} + 1 = \frac{12,97}{2 \cdot 23,31 \cdot 6} + 1 = 1,046 \text{ с.} \quad (3.19)$$

Індуктивність статора і ротора:

$$L_1 = \frac{\frac{U_{1H}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot p \cdot f_H \cdot I_H \cdot \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \frac{\cos \varphi_H \cdot S_H}{S_K} \right)} =$$

$$= \frac{\frac{380,0}{\sqrt{3}}}{2 \cdot 2,0 \cdot 50 \cdot 23,31 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,81^2} - \frac{0,81 \cdot 0,02992}{0,1496} \right)} = 0,1109 \text{ Гн.} \quad (3.20)$$

$$L_1 = L_2.$$

Електрорушійні сили (ЕРС) двигуна WEG W22:

$$e_{11} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_H - r_1 \cdot I_H = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,81 - 0,2892 \cdot 23,31 = 171,0 \text{ В.} \quad (3.21)$$

$$e_{12} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_H - X_1 \cdot I_H = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,81 - 0,3626 \cdot 23,31 = 169,3 \text{ В.} \quad (3.22)$$

$$X_m = \frac{\sqrt{e_{11}^2 + e_{12}^2}}{I_{xx}} = \frac{\sqrt{171,0^2 + 169,3^2}}{12,97} = 18,55 \text{ Ом} \quad (3.23)$$

Взаємодія двигуна:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi \cdot 50} = \frac{18,55}{2\pi \cdot 50} = 0,05905 \text{ Гн.} \quad (3.24)$$

Індуктивність розсіювання:

$$L_{cs} = \frac{X_1}{2\pi \cdot 50} = \frac{0,3626}{2\pi \cdot 50} = 0,001154 \text{ Гн.} \quad (3.25)$$

$$L_{cr} = \frac{X_2}{2\pi \cdot 50} = \frac{0,5575}{2\pi \cdot 50} = 0,001775 \text{ Гн.} \quad (3.26)$$

Вираз для природної характеристики АД [2, 5]:

$$M(\omega, f, U) = \frac{m \cdot p \cdot K_g^2 \cdot U^2 \cdot R_2}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot f \cdot S(\omega, f) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{c_1 \cdot R_2}{S(\omega, f)} \right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{cl} + c_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{c2})^2 \right]} \quad (3.27)$$

Природна механічна характеристика АД типу WEG W22 показана на рис. 3.3.

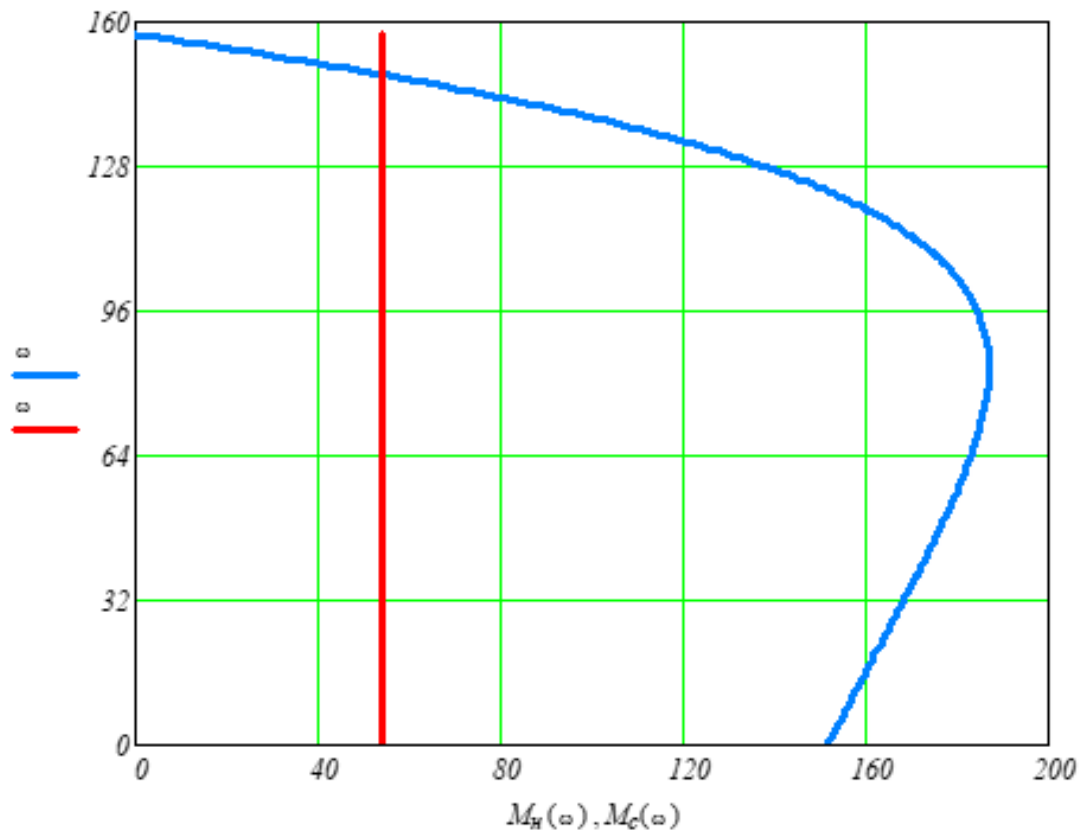


Рисунок 3.3 – Природна механічна характеристика двигуна типу WEG W22

Виконаємо моделювання процесу пуску двигуна типу WEG W22 у режимі холостого ходу з подальшим прикладанням навантаження. Отримані результати наведені на рис. 3.4.

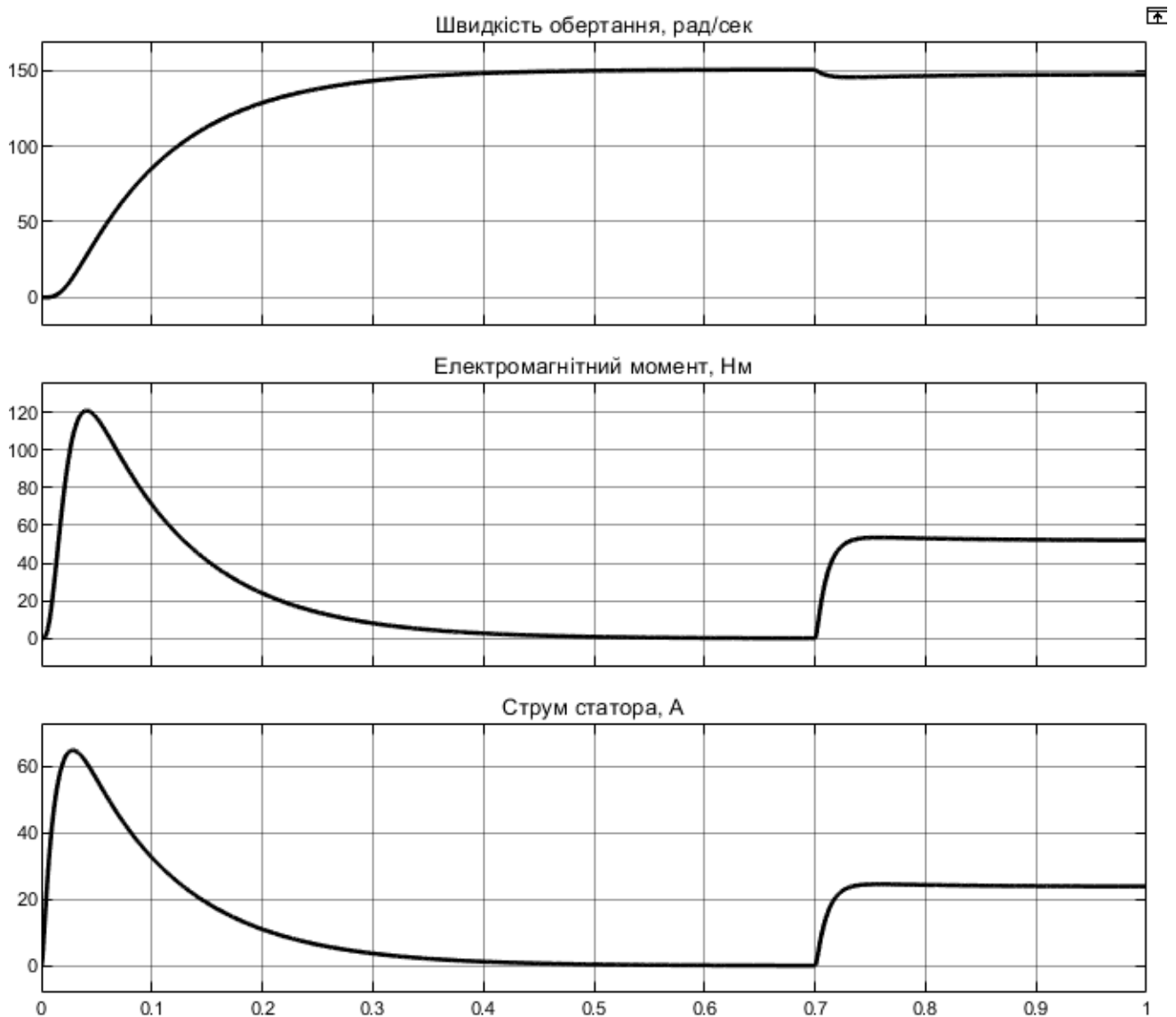


Рисунок 3.4 – Пуск двигуна WEG W22 у режимі холостого ходу з подальшим прикладанням навантаження

3.2 Стан та динаміка вартості електроенергії в промисловому секторі України та ЄС

Станом на квітень–травень 2026 року в Україні та країнах Європи вартість електроенергії для промислових підприємств формується на рівні

ринкових біржових цін і залежить від сегмента ринку (day-ahead, intraday, балансуючий), режиму навантаження та контрактних умов.

Узагальнені орієнтири (2026 р.) для промислових споживачів у Європі:

- середні оптові ціни коливаються приблизно в межах 0,06–0,10 €/кВт·год (60–100 €/МВт·год) у базових режимах
- у пікові періоди можуть зростати до 0,12–0,16 €/кВт·год і вище залежно від країни та навантаження системи
- для енергоємних підприємств у ЄС ціни залишаються істотно вищими за США та Китай, що зберігає конкурентний тиск на промисловість Україна (ринковий сегмент, 2026)

3 травня 2026 року відбулося оновлення граничних цін на ринку, що вплинуло на верхні межі вартості електроенергії. Таким чином, у квітні–травні 2026 року вартість електроенергії для промислових підприємств у країнах Європи та Україні перебуває в діапазоні приблизно 0,06–0,16 €/кВт·год, при цьому український ринок тяжіє до верхньої межі європейського діапазону через особливості енергосистеми, дефіцит генерації та ринкові обмеження.

Для оцінки техніко-економічних показників станом на кінець травня 2026 року прийнято середню вартість електричної енергії для промислових підприємств України на рівні 10 грн/кВт·год без ПДВ (12 грн/кВт·год з ПДВ). Значення є усередненим та враховує ринкову вартість електроенергії, тарифи на передачу і розподіл електричної енергії.

3.3 Розрахунок та порівняння енергоефективності двигунів з оцінкою строків окупності

3.3.1 Розрахунок та порівняння енергоефективності двигунів AIP та класів IE2, IE3, IE4 потужністю 5,5 кВт

Умови досліджень:

- АД з короткозамкненим ротором (серія AIP) з паспортними даними:
 $P_n = 5,5 \text{ кВт}$; $n_0 = 1500 \text{ об/хв}$; ККД $\eta_n = 85,7 \%$; вартість двигуна $C = 8745 \text{ грн}$.

- двигун (відповідна P_n та n_0) із рівнями енергоефективності ІЕ2, ІЕ3, ІЕ4;
- час роботи двигуна $T_1 = 8\,500$ год.;
- ціни двигунів наводяться в табл. 2.3: $C_{AIP}=8745$ грн.; $C_{IE2}=14800$ грн.; $C_{IE3}=25040$ грн.; $C_{IE4}=58500$ грн.;
- ціну електроенергії на квітень-травень 2026 року взяти на рівні 12,0 грн/кВт·год згідно з п. 3.1.

Задача дослідження.

Встановити період окупності додаткових витрат на двигуни класів енергоефективності ІЕ2, ІЕ3 та ІЕ4 за рахунок економії електроенергії в порівнянні з електродвигуном АІР.

Результати розрахунків.

Розрахунки виконано в Mathcad та окремі фрагменти обчислень подано на рис. 3.5–3.7. У пояснювальній записці повністю наведено розрахунок одного з порівнюваних варіантів.

$$P_n := 5.5 \quad n := 1500 \quad \eta_{AIP} := 0.857 \quad C_{AIP} := 8745 \quad cel := 12$$

$$\eta_{IE2} := 0.877 \quad C_{IE2} := 14800$$

$$T_1 := 8500 \quad T_2 := 4000$$

$$\Delta C := C_{IE2} - C_{AIP} \quad \Delta C = 6.055 \times 10^3$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE2} := \frac{P_n}{\eta_{IE2}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE2} \quad \Delta P = 0.146$$

$$X_1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T_1} = 0.406$$

$$X_2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T_2} = 0.862$$

Рисунок 3.5 - Фрагмент №1 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE2
($P_n = 5,5$ кВт)

$$\eta_{IE3} := 0.896 \quad C_{IE3} := 25040 \quad \Delta C := C_{IE3} - C_{AIP}$$

$$\Delta C = 1.63 \times 10^4$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE3} := \frac{P_n}{\eta_{IE3}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE3} \quad \Delta P = 0.279$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 0.572$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 1.215$$

Рисунок 3.6 - Фрагмент №2 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE3
($P_n = 5,5$ кВт)

$$\eta_{IE4} := 0.898 \quad C_{IE4} := 58500 \quad \Delta C := C_{IE4} - C_{AIP}$$

$$\Delta C = 4.976 \times 10^4$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE4} := \frac{P_n}{\eta_{IE4}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE4}$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 1.665$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 3.538$$

Рисунок 3.7 - Фрагмент №3 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE4 ($P_H = 5,5$ кВт)

На наведених фрагментах №1-№3 розрахунків у Mathcad величина X_2 – термін окупності при роботі $T_2 = 4\,000$ годин за рік.

Оформимо результати розрахунків.

Витрати, пов'язані з придбанням енергоефективного двигуна:

$$C = C_{IE2} - C_{AIP} = 14800 - 8745 = 6055 \text{ грн.} \quad (3.28)$$

Значення споживаної потужності двигунів AIP, IE2, IE3 та IE4:

$$P_{AIP} = P_H / \eta_{AIP} = 5,5 / 0,857 = 6,418 \text{ кВт,} \quad (3.29)$$

$$P_{IE2} = P_H / \eta_{IE2} = 5,5 / 0,877 = 6,271 \text{ кВт,}$$

$$P_{IE3} = P_H / \eta_{IE3} = 5,5 / 0,896 = 6,138 \text{ кВт,}$$

$$P_{IE4} = P_H / \eta_{IE4} = 5,5 / 0,898 = 6,125 \text{ кВт.}$$

Зменшення енергоспоживання завдяки застосуванню двигунів класів IE2–IE4:

$$\Delta P_1 = P_{AIP} - P_{IE2} = 6,418 - 6,271 = 0,146 \text{ кВт,} \quad (3.30)$$

$$\Delta P_2 = P_{AIP} - P_{IE3} = 6,418 - 6,138 = 0,279 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_3 = P_{AIP} - P_{IE4} = 6,418 - 6,125 = 0,293 \text{ кВт.}$$

Для двигуна класу енергоефективності IE2 додаткові витрати у розмірі $\Delta C_{IE2} = 6055$ грн за умови роботи протягом 8500 год/рік компенсуються протягом такого терміну окупності:

$$X_{IE2} = \Delta C_{IE2} / (\Delta P_1 \cdot c_e \cdot T_1) = 6055 / (0,146 \cdot 12,0 \cdot 8\,500) = 0,406 \text{ року;} \quad (3.31)$$

Для двигуна класу енергоефективності IE3 додаткові витрати у розмірі $\Delta C_{IE3} = 25040$ за умови роботи протягом 8500 год/рік компенсуються протягом такого терміну окупності:

$$X_{IE3} = \Delta C_{IE3} / (\Delta P_2 \cdot c_e \cdot T_1) = 25040 / (0,279 \cdot 12,0 \cdot 8\,500) = 0,572 \text{ року;}$$

Для двигуна класу енергоефективності IE4 додаткові витрати у розмірі $\Delta C_{IE3} = 58500$ за умови роботи протягом 8500 год/рік компенсуються протягом такого терміну окупності:

$$X_{1IE4} = \Delta C_{IE4} / (\Delta P_3 \cdot c_e \cdot T_1) = 58500 / (0,293 \cdot 12,0 \cdot 8500) = 1,665 \text{ року.}$$

3.3.2 Розрахунок та порівняння енергоефективності двигунів AIP та класів IE2, IE3, IE4 потужністю 11 кВт

Для порівняльного аналізу обрано асинхронні двигуни серії W22 виробництва WEG потужністю 11 кВт класів енергоефективності IE2, IE3 та IE4. Орієнтовний ККД двигуна класу IE2 становить 88,2–91 %, IE3 - 91,2–92 %, а двигуна класу IE4 - 93–94 %. При цьому вартість двигуна класу IE4 приблизно на 40–60 % вища, однак його застосування забезпечує зниження втрат електроенергії та підвищення енергоефективності електропривода.

Умови досліджень:

- АД (серія AIP) з паспортними даними:

$P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; ККД $\eta_n = 85,7$ %; ціна двигуна $C_1 \approx 16000$ грн.

- енергоефективний двигун WEG W22 рівня енергоефективності IE2 з паспортними даними:

$P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; ККД $\eta_n = 88,5$ %; ціна двигуна $C_2 \approx 53000$ грн.;

- енергоефективний двигун WEG W22 рівня енергоефективності IE3 з паспортними даними:

$P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; ККД $\eta_n = 91,5$ %; ціна двигуна $C_2 \approx 60000$ грн.;

- енергоефективний двигун WEG W22 рівня енергоефективності IE4 з паспортними даними:

$P_n = 11$ кВт; $n_0 = 1500$ об/хв; ККД $\eta_n = 93,5$ %; ціна двигуна $C_2 \approx 90500$ грн.;

- час роботи двигуна $T_1 = 8500$ год. та $T_2 = 4000$ годин за рік;

- ціну електроенергії на травень 2026 року взяти на рівні 12,0 грн/кВт·год згідно з п. 3.1.

Задача дослідження.

Встановити період окупності заміни електродвигуна типу AIP на електродвигун з електродвигуном WEG W22 рівня енергоефективності IE2.

Результати розрахунків.

Розрахунки виконано в Mathcad та окремі фрагменти обчислень подано на рис. 3.8 – 3.10.

$$P_n := 11 \quad n := 1500 \quad \eta_{AIP} := 0.857 \quad CAIP := 16000 \quad cel := 12$$

$$\eta_{IE2} := 0.885 \quad CIE2 := 53000$$

$$T1 := 8500 \quad T2 := 4000$$

$$\Delta C := CIE2 - CAIP \quad \Delta C = 3.7 \times 10^4$$

Рішення

$$PAIP := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad PIE2 := \frac{P_n}{\eta_{IE2}} \quad \Delta P := PAIP - PIE2$$

$$\Delta P = 0.406$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T1} = 0.893 \quad PIE2 = 12.429$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot cel \cdot T2} = 1.898$$

Рисунок 3.8 - Фрагмент №4 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE2 ($P_n = 11,0$ кВт)

Оформимо результати розрахунків.

Витрати, пов'язані з придбанням енергоефективного двигуна WEG W22 класу енергоефективності IE2- IE4:

$$C = C_{IE2} - C_{AIP} = 53000 - 16000 = 37000 \text{ грн.}$$

$$C = C_{IE3} - C_{AIP} = 60000 - 16000 = 44000 \text{ грн.}$$

$$C = C_{IE4} - C_{AIP} = 90500 - 16000 = 74500 \text{ грн.}$$

$$\eta_{IE3} := 0.915 \quad C_{IE3} := 60000 \quad \Delta C := C_{IE3} - C_{AIP}$$

$$\Delta C = 4.4 \times 10^4$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE3} := \frac{P_n}{\eta_{IE3}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE3}$$

$$\Delta P = 0.814$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 0.53$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 1.127$$

Рисунок 3.9 - Фрагмент №5 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE3 ($P_n = 11,0 \text{ кВт}$)

$$\eta_{IE4} := 0.935 \quad C_{IE4} := 90500 \quad \Delta C := C_{IE4} - C_{AIP}$$

$$\Delta C = 7.45 \times 10^4$$

Рішення

$$P_{AIP} := \frac{P_n}{\eta_{AIP}} \quad P_{IE4} := \frac{P_n}{\eta_{IE4}} \quad \Delta P := P_{AIP} - P_{IE4}$$

$$X1 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T1} = 0.682$$

$$X2 := \frac{\Delta C}{\Delta P \cdot \text{cel} \cdot T2} = 1.45$$

Рисунок 3.10 - Фрагмент №5 розрахунків у Mathcad: визначення терміну окупності заміни двигуна серії AIP на двигун класу енергоефективності IE4 ($P_n = 11,0$ кВт)

Значення споживаної потужності двигунів AIP, класу енергоефективності IE2- IE4:

$$P_{AIP} = P_n / \eta_{AIP} = 11 / 0,857 = 12,835 \text{ кВт.}$$

$$P_{IE2} = P_n / \eta_{IE2} = 11 / 0,885 = 12,429 \text{ кВт.}$$

$$P_{IE3} = P_n / \eta_{IE3} = 11 / 0,915 = 12,022 \text{ кВт.}$$

$$P_{IE4} = P_n / \eta_{IE4} = 11 / 0,935 = 11,765 \text{ кВт.}$$

Зменшення енергоспоживання завдяки застосуванню двигуна WEG W22 класу енергоефективності IE2- IE4:

$$\Delta P_1 = P_{AIP} - P_{IE2} = 12,835 - 12,429 = 0,406 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_2 = P_{AIP} - P_{IE3} = 12,835 - 12,022 = 0,813 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_3 = P_{AIP} - P_{IE4} = 12,835 - 11,765 = 1,07 \text{ кВт.}$$

Для двигуна WEG W22 класу енергоефективності IE2- IE4 додаткові витрати у розмірі $\Delta C_{IE2} = 37000$ грн, $\Delta C_{IE3} = 44000$ грн, $\Delta C_{IE4} = 74500$ грн за

умови роботи протягом 8500 год/рік компенсуються протягом такого терміну окупності:

$$X_{1IE2} = \Delta C_{IE2} / (\Delta P_1 \cdot c_e \cdot T_1) = 37000 / (0,406 \cdot 12,0 \cdot 8500) = 0,893 \text{ року};$$

$$X_{1IE3} = \Delta C_{IE3} / (\Delta P_2 \cdot c_e \cdot T_1) = 44000 / (0,813 \cdot 12,0 \cdot 8500) = 0,53 \text{ року};$$

$$X_{1IE4} = \Delta C_{IE4} / (\Delta P_3 \cdot c_e \cdot T_1) = 74500 / (1,07 \cdot 12,0 \cdot 8500) = 0,682 \text{ року};$$

за умови роботи протягом 4000 год/рік:

$$X_{2IE2} = \Delta C_{IE2} / (\Delta P_1 \cdot c_e \cdot T_2) = 37000 / (0,406 \cdot 12,0 \cdot 4000) = 1,898 \text{ року}.$$

$$X_{2IE3} = \Delta C_{IE3} / (\Delta P_2 \cdot c_e \cdot T_2) = 44000 / (0,813 \cdot 12,0 \cdot 4000) = 1,127 \text{ року}.$$

$$X_{2IE4} = \Delta C_{IE4} / (\Delta P_3 \cdot c_e \cdot T_2) = 74500 / (1,07 \cdot 12,0 \cdot 4000) = 1,45 \text{ року}.$$

Результати проведених розрахунків зведемо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Розрахунок та порівняння енергоефективності двигунів з оцінкою строків окупності

Енергетичні показники / терміни окупності	Типи двигунів AIP / WEG W22			
Клас енергоефективності	IE1	IE2	IE3	IE4
Номінальна потужність, кВт	5,5			
ККД, %	85,7	87,7	89,6	89,8
Ціна, грн	8745	14800	25040	58500
Додаткові витрати на придбання двигуна, грн	-	6055	25040	58500
Споживана потужність, кВт	6,418	6,271	6,138	6,125
Зменшення енергоспоживання, кВт	-	0,146	0,279	0,293
Термін окупності (T_1 / T_2), рік	-	0,406/0,862	0,572/1,215	1,665/3,538
Номінальна потужність, кВт	11,0			
ККД, %		88,5	91,5	93,5
Ціна, грн	16000	53000	60000	90500
Додаткові витрати на придбання двигуна, грн	-	37000	44000	74500

Споживана потужність, кВт	12,835	12,429	12,022	11,765
Зменшення енергоспоживання, кВт	-	0,406	0,813	1,07
Термін окупності (T_1/ T_2), рік	-	0,893/1,898	0,53/1,127	0,682/1,45

ВИСНОВКИ

У роботі отримано такі результати:

1) На основі аналізу наукових джерел, нормативно-технічної документації та інформації з відкритих джерел досліджено роль асинхронних електродвигунів у системах електроспоживання України та провідних промислово розвинених країн. Встановлено, що електроприводи на базі асинхронних двигунів споживають близько 75–85 % усієї виробленої електроенергії.

2) За результатами аналізу досвіду провідних світових виробників електротехнічного обладнання - ABB, Nidec, Siemens, Shanghai Electric, Toshiba та WEG - встановлено, що основним напрямом розвитку сучасного електромашинобудування є створення та впровадження високоефективних асинхронних електродвигунів класів енергоефективності IE3, IE4 та IE5.

3) Визначено, що з урахуванням технічних характеристик, енергоефективності та доступності на українському ринку перспективними для впровадження є електродвигуни серій W22 класів IE2–IE5 компанії WEG, двигуни Ledermann класу IE3, а також електродвигуни Lammers класу IE4.

4) На основі техніко-економічного аналізу та порівняння вартості двигунів серії AIP із сучасними енергоефективними електродвигунами класів IE2, IE3 та IE4 обґрунтовано доцільність поступової заміни застарілих електроприводів на сучасні енергоефективні аналоги.

5) Встановлено, що застосування електродвигунів високих класів енергоефективності дозволяє знизити споживання електроенергії, скоротити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи електроприводів та

зменшити негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок скорочення викидів CO₂.

б) Визначено, що при вартості електроенергії 12,0 грн/кВт·год термін окупності заміни загальнопромислових електродвигунів на енергоефективні двигуни класів IE3–IE5 у більшості випадків становить до 3 років та залежить від потужності двигуна, режиму його роботи та умов експлуатації.