

А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.
А.А. Гуменюк, к.т.н., доц.
О.О. Добржанський, к.т.н., доц.
А.Р. Кравчук, доктор філософії
М.В. Богдановський, ст. викладач
Державний університет «Житомирська політехніка»

Енергоефективні стратегії керування електроприводами у системах Smart Grid

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності електроприводів у контексті впровадження концепції «розумних» енергетичних мереж (Smart Grid). Особливу увагу приділено інтеграції електроприводів як активних учасників енергетичного балансу, здатних не лише споживати, але й адаптивно регулювати свої режими роботи відповідно до параметрів мережі, навантаження та стану відновлюваних джерел енергії. У роботі акцентовано на доцільності використання інтелектуальних систем керування, які забезпечують високу якість регулювання та зниження енергоспоживання в умовах динамічних змін зовнішніх впливів. Проаналізовано методи оптимізації енергоспоживання на основі адаптивного керування частотно-регульованими приводами. Розглянуто принципи використання алгоритмів прогнозування навантаження, що дозволяють заздалегідь формувати оптимальні профілі роботи привода та уникати пікових перевантажень у мережі. Показано перспективність застосування рекуперативних режимів, що забезпечують повернення надлишкової енергії під час гальмування або зниження швидкості у мережу чи до локальних систем накопичення. Це дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії електроприводних систем та зменшити втрати електроенергії.

Результати моделювання, виконаного в середовищі MATLAB/Simulink із використанням адаптивних регуляторів і моделей навантаження, підтверджують ефективність запропонованих стратегій. Встановлено, що застосування інтелектуальних алгоритмів керування дає змогу знизити споживання електроенергії електроприводами порівняно з традиційними методами регулювання, підвищити коефіцієнт потужності та зменшити рівень гармонічних спотворень у мережі на 25–30 %. Додатково продемонстровано, що використання адаптивних регуляторів забезпечує стійкість системи навіть за умов змінних параметрів двигуна та зовнішніх збурень.

Практична реалізація таких рішень є можливою у широкому спектрі застосувань: на промислових технологічних лініях, у системах електротранспорту, в інтегрованих енергетичних комплексах із відновлюваними джерелами. Це відкриває нові перспективи для розвитку енергоефективних систем Smart Grid із високим рівнем гнучкості, надійності та здатності до самовідновлення після збурень. Запропоновані підходи сприяють формуванню нової парадигми електроприводів, орієнтованих на мінімізацію енергетичних втрат і підвищення загальної ефективності сучасних електроенергетичних систем.

Ключові слова: електропривід; енергоефективність; Smart Grid; рекуперация; керування.

Актуальність теми. Сучасна енергетика перебуває у стані динамічної трансформації. З одного боку, спостерігається зростання обсягів споживання електроенергії, з іншого – посилюється потреба в ощадливому використанні ресурсів та інтеграції відновлюваних джерел. Розвиток концепції Smart Grid, яка поєднує традиційну генерацію з децентралізованими установками, накопичувачами енергії та цифровими технологіями управління, висуває нові вимоги до всіх складових енергетичної системи.

Особливе місце у цій структурі належить електроприводам. Вони забезпечують роботу більшості технологічних процесів у промисловості, транспорті та комунальному господарстві й водночас формують основну частину енергоспоживання. За оцінками міжнародних енергетичних організацій, частка електроприводів у загальному балансі витрат електроенергії сягає двох третин, що робить їх ключовим об'єктом для впровадження енергоощадних технологій.

Електропривід – це система, що перетворює електричну енергію у механічну та забезпечує керування швидкістю, моментом і положенням виконавчого механізму. Основні складові елементи: джерело живлення (трифазна мережа змінного струму, відновлювані джерела енергії (сонячні, вітрові установки) або локальні накопичувачі енергії), силова електроніка, двигун, механічна передача та виконавчий механізм, система керування, вимірювальні пристрої.

Принцип дії електропривода з адаптивним регулюванням полягає у зазначеному далі. Джерело живлення подає електроенергію у систему. Перетворювач (VFD/інвертор) трансформує вхідну енергію у

напругу та струм із потрібними частотою та амплітудою. Саме він задає форму живлення електродвигуна, дозволяє плавно регулювати швидкість і момент. Електродвигун перетворює електричну енергію на механічну. У процесі роботи частина енергії втрачається на нагрівання (мідні та залізні втрати), решта передається у вигляді крутного моменту. Механічна система приймає енергію від двигуна та передає її на робочий механізм (насос, вентилятор, конвеєр, верстат тощо). Тут енергія знову частково втрачається у вигляді тертя та вібрацій. Сенсори вимірюють струм, напругу, швидкість і положення ротора. Ці дані є основою для формування сигналів зворотного зв'язку. Система керування отримує дані від сенсорів та порівнює їх із заданими параметрами (швидкість, момент, положення).

Адаптивний регулятор вносить корекції у параметри керування залежно від режиму роботи: автоматично змінює коефіцієнти регулятора при зміні навантаження; зменшує втрати електроенергії за рахунок оптимізації струму збудження; забезпечує стабільність навіть при невизначеності параметрів двигуна або мережі. Перетворювач отримує керуючі сигнали від регулятора та формує напругу для живлення двигуна.

Традиційні підходи до керування приводами забезпечували надійність та продуктивність, однак у нових умовах цього вже недостатньо. Зміна профілю навантаження, коливання вартості електроенергії, необхідність взаємодії з відновлюваними джерелами та системами акумулювання вимагають пошуку гнучкіших рішень. Саме тому останнім часом активно досліджуються стратегії, що орієнтуються не лише на стабільність роботи привода, а й на його роль у балансуванні енергосистеми.

Застосування енергоефективних алгоритмів керування дозволяє інтегрувати електроприводи в єдину цифрову інфраструктуру Smart Grid, перетворюючи їх із пасивних споживачів енергії на активних учасників енергетичного ринку. Такий підхід відкриває можливості для зменшення втрат електроенергії, підвищення якості напруги в мережах та скорочення викидів парникових газів. Крім того, оптимізація роботи електроприводів має важливе економічне значення для підприємств, оскільки сприяє зниженню витрат на енергоресурси та підвищенню конкурентоспроможності.

Таким чином, актуальність теми полягає у потребі створення таких систем керування електроприводами, які здатні одночасно зменшувати споживання електроенергії, оптимізувати режими роботи обладнання та сприяти інтеграції технологій Smart Grid.

Мета цієї статті полягає у розробці та аналізі енергоефективних стратегій, що враховують як технічні, так і економічні аспекти сучасних енергетичних систем.

Для досягнення поставленої мети у статті передбачено вирішення таких завдань:

1. Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку систем електроприводів у контексті енергетики Smart Grid;
2. Визначити основні фактори, що впливають на енергоефективність електроприводів, зокрема режими роботи, характер навантаження та умови взаємодії з мережею;
3. Дослідити можливості застосування адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування для зменшення енергоспоживання і втрат у мережі;
4. Оцінити потенціал рекуперативних режимів та інтеграції електроприводів із системами накопичення енергії;
5. Провести моделювання впливу запропонованих стратегій на показники енергоефективності, якості електроенергії та економічні результати для підприємств.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Проблематика підвищення енергоефективності електроприводів, оптимізації режимів їх роботи та інтеграції з сучасними енергетичними системами активно вивчається як в Україні, так і в країнах ЄС.

У контексті України науковці також активно досліджують аспекти енергоефективності в електроприводах – від практичної інтеграції в системи тепло- та водопостачання до модельних підходів для промислових приводів. Їхні роботи фокусуються на адаптації приводів, прогнозуванні втрат та застосуванні накопичувачів енергії для зниження енергоспоживання.

У статтях [1–2] система інтелектуальної енергомережі (Smart Grid) розглядається як фундамент для підвищення енергоефективності, надійності та інтеграції відновлюваних джерел. Основні компоненти, такі як системи управління енергією (EMS), розподільча автоматизація (DA) та передова інфраструктура вимірювань (AMI), істотно впливають на оптимізацію виробництва та споживання енергії.

Окремі огляди висвітлюють вплив Smart Grid на підвищення енергозбереження за допомогою управління попитом (Demand Response), EMS, а також цифрових технологій обліку й контролю [3].

Останні дослідження демонструють, що глибинне навчання (Deep Learning) може ефективно використовуватися для прогнозування навантажень, виявлення енергетичних викликів, оцінки стану мережі та підтримки Demand Response-сценаріїв [4].

У роботі [5] приведено дослідження використання нейронної мережі для оптимізації керування асинхронним двигуном у режимі прямого керування моментом. Алгоритм дозволив зменшити втрати та підвищити ККД електропривода в електромобілях.

У [6] запропоновано алгоритм оптимізації втрат у приводах за допомогою адаптивного пошуку оптимального рівня магнітного потоку. Результати показали зменшення втрат до 20 % без втрати стабільності керування.

У роботі [7] запропоновано нову схему керування для трифазного асинхронного двигуна, що базується на пошуковому алгоритмі. Вона визначає оптимальне значення напруги статора для кожної комбінації моменту й швидкості, що дозволяє працювати з максимальною ефективністю. Результати моделювання підтверджують суттєве зниження втрат енергії.

У [8] пропонуються методи покращення енергоефективності приводу трифазного асинхронного двигуна, що працює при високих температурах. Через моделювання виявлено, що регулювання параметрів управління може зменшити втрати та забезпечити більш стабільну роботу навіть у нагрітому стані.

Викладення основного матеріалу. Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» вже багато років проводиться дослідження автоматизованого електроприводу на предмет його енергоефективності та енергозбереження. Зокрема, електроприводу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки, електроприводу автоматизованих виробничих систем тощо.

Системи електроприводів сьогодні посідають провідне місце у промисловості, транспорті та комунальному господарстві, оскільки саме вони забезпечують механічну енергію для більшості технологічних процесів. Водночас електроприводи формують одну з найбільших статей енергоспоживання: за оцінками Міжнародного енергетичного агентства, їхня частка може перевищувати 60 % від загального промислового споживання електроенергії. Саме тому питання їхньої модернізації та інтеграції в інтелектуальні енергосистеми набуває особливої актуальності.

У класичному розумінні електропривід орієнтований на стабільність і забезпечення необхідного моменту та швидкості. Однак із появою концепції Smart Grid акценти змістилися. Від електроприводів очікують не лише надійної роботи, але й здатності адаптуватися до змін у мережі, взаємодіяти з відновлюваними джерелами, враховувати динаміку вартості електроенергії тощо.

Сучасні дослідження вказують на кілька чітких тенденцій розвитку:

1. Широке впровадження частотно-регульованих приводів (VFD). Застосування VFD дозволяє підтримувати відповідність швидкості двигуна навантаженню, що особливо ефективно для вентиляторів і насосів. Наприклад, зниження швидкості до 63 % може зменшити енергоспоживання до 25 % – завдяки законам афінності для циркулярних систем. Такі пристрої значно зменшують операційні витрати, продовжують ресурс обладнання завдяки м'якому пуску та пропонують енергетичний рекуператорний режим, що повертає надлишкову енергію до мережі або модулів накопичення [9];

2. Інтеграція алгоритмів машинного навчання для оптимізації режимів роботи, прогнозування навантаження й мінімізації втрат у реальному часі;

3. Використання рекуперативних режимів у транспортних та підйомних системах, що забезпечує повернення енергії в мережу або її збереження у накопичувачах;

4. Розвиток систем моніторингу на базі IoT, які забезпечують двосторонній обмін даними та контроль енергоспоживання з високою точністю. Використання високочутливих датчиків у поєднанні з алгоритмами цифрової обробки сигналів та машинного навчання дозволяє мінімізувати похибки навіть у складних умовах (наприклад, за наявності гармонічних складових або електромагнітних завад). Це критично важливо для Smart Grid, де рішення про балансування енергії чи участь у програмі Demand Response приймаються в реальному часі. Таким чином, розвиток IoT-моніторингу забезпечує не лише підвищення надійності та прозорості даних про енергоспоживання, а й створює новий рівень інтеграції між електроприводами, мережею та системами керування. У перспективі саме такі технології стануть базою для повноцінного впровадження цифрових двійників електроприводів і переходу до предиктивного керування, що забезпечить істотне скорочення енерговитрат і підвищення ефективності всієї енергосистеми.

Таким чином, сучасний етап розвитку електроприводів у контексті Smart Grid характеризується переходом від локальних оптимізацій до системної інтеграції, коли привід стає не лише виконавчим механізмом, а й активним учасником енергетичного ринку. Цей підхід відкриває перспективи як для зменшення енергоспоживання на рівні підприємств, так і для підвищення гнучкості та надійності всієї енергосистеми.

Основні фактори, що визначають енергоефективність електроприводів. Ефективність роботи електропривода не є сталою величиною – вона змінюється залежно від низки технічних і експлуатаційних чинників. Передусім варто наголосити на режимах роботи. Двигун, що постійно функціонує поблизу номінальних параметрів, зазвичай демонструє вищий коефіцієнт корисної дії, ніж той, що часто запускається, зупиняється або працює на малих навантаженнях. Надмірні пуски, особливо у традиційних схемах без плавного регулювання, спричиняють втрати енергії та додаткові теплові навантаження.

Модель втрат в електроприводі:

$$P_{\text{ВТРАТ}} = P_M + P_C + P_D, \quad (1)$$

де P_M – втрати у міді обмоток;

P_C – втрати в сталі;

P_D – додаткові втрати (вентиляція, гармоніки, механічні).

Адаптивна оптимізація моменту двигуна:

$$T(t) = T_{\text{ПОТ}}(t) + P_{\text{ПР}}(t) + \Delta\omega(t), \quad (2)$$

де $T_{\text{ПОТ}}$ – поточне навантаження;

$P_{\text{ПР}}$ – прогнозовані втрати (з ML / фаззі-моделі);

$\Delta\omega(t)$ – відхилення швидкості від номіналу.

Не менш важливим є характер прикладеного навантаження. Для вентиляторів і насосів, які підпорядковуються так званим законам подібності, зменшення швидкості навіть на невеликий відсоток призводить до істотної економії енергії. Натомість у приводах з інерційними чи ударними навантаженнями домінує потреба в стабільності й динамічній точності, що змушує використовувати інші стратегії оптимізації. Отже, вид і профіль навантаження безпосередньо впливають на рівень енергоспоживання.

Важливу роль відіграють також умови взаємодії електропривода з енергосистемою. Робота в мережі з коливаннями напруги чи наявністю гармонічних складових може знижувати ефективність і навіть пришвидшувати зношування обладнання. У сучасних умовах, коли електроприводи дедалі частіше інтегруються у Smart Grid, фактори зовнішньої взаємодії набувають ще більшої ваги. Привід може бути не лише споживачем, а й елементом балансування, реагуючи на сигнали попиту, тарифи чи параметри якості електроенергії.

Таким чином, на енергоефективність електропривода впливають три взаємопов'язані групи чинників: внутрішні режими роботи, особливості навантаження та зовнішнє енергетичне середовище. Лише врахування усіх цих складових дозволяє досягти реального зниження споживання електроенергії без шкоди для надійності й продуктивності системи.

Адаптивні та інтелектуальні алгоритми керування для зменшення енергоспоживання і втрат у мережі. Сучасні електроенергетичні системи характеризуються високим рівнем складності та динамічності. Це зумовлено інтеграцією відновлюваних джерел енергії, зростанням частки електроприводів у промисловості та необхідністю підтримання стабільної якості електроенергії. За таких умов традиційні методи керування, що базуються на фіксованих налаштуваннях і статичних моделях, не забезпечують оптимальної ефективності. Саме тому зростає інтерес до впровадження адаптивних і інтелектуальних алгоритмів, здатних реагувати на зміни режимів у реальному часі та мінімізувати енергетичні втрати.

Адаптивні регулятори передбачають зміну своїх параметрів залежно від умов роботи системи. Для електроприводів це означає можливість автоматичного підлаштування під різні профілі навантаження, температурні коливання чи зміни напруги в мережі. Прикладом є використання адаптивних фільтрів Калмана для відокремлення корисного сигналу від завад та оптимізації моменту двигуна. Такий підхід дозволяє знизити миттєві перевитрати енергії та забезпечити стабільність процесу. Адаптивне керування передбачає модифікацію внутрішніх параметрів контролера в реальному часі, залежно від показників системи. Наприклад, використання алгоритмів MRAC (модельно орієнтованих адаптивних регуляторів) дозволяє динамічно підлаштовувати структуру керування відповідно до змін навантаження чи геоелектричного стану мережі:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= A_m x_m + B_m r, \quad y_m = C x_m, \\ e &= y - y_m, \\ \dot{\theta} &= -\Psi \varphi e, \end{aligned} \quad (3)$$

де A_m – матриця динаміки референс-моделі (описує, як змінюється система без збурень);

B_m – матриця входів у референс-моделі;

C – матриця спостереження (зв'язує вектор станів із виходом);

Ψ – матриця коефіцієнтів адаптації (визначає швидкість зміни параметрів);

$\dot{\theta}$ – вектор адаптивних параметрів;

$e = y - y_m$ – помилка керування;

φ – вектор вимірних сигналів;

r – задавальний сигнал.

Референс-модель задає, як саме має поводитися система. Похибка e порівнює реальну поведінку з бажаною. Вектор параметрів θ автоматично підлаштовується (адаптується), щоб зменшити похибку.

Застосування методів машинного навчання, нечіткої логіки та нейро-фаззі систем створює передумови для принципово нової якості управління. Нейронні мережі здатні прогнозувати зміну навантаження й завчасно коригувати режими роботи приводу, що особливо важливо для систем з нерівномірним споживанням. Нечіткі регулятори своєю чергою ефективно функціонують за умов неповної або неточної інформації про стан мережі. Це дозволяє зменшити як активні, так і реактивні втрати, водночас забезпечуючи плавність регулювання [10].

Інтелектуальні контролери можуть також керувати рекуперативними режимами електроприводів, повертаючи надлишкову енергію у мережу чи до локальних накопичувачів. Це особливо актуально для транспортних систем та виробничих механізмів із частими циклами гальмування. В умовах Smart Grid така функціональність дозволяє інтегрувати електроприводи у загальну систему керування попитом (Demand Response), коли споживачі енергії беруть участь у балансуванні навантажень.

Моделювання та експериментальні дослідження свідчать, що впровадження адаптивних і інтелектуальних алгоритмів дає змогу [11–13]:

- знизити середньоквадратичні втрати електроенергії на 10–25 %;
- скоротити пікові навантаження на мережу за рахунок прогнозування та оптимізації;
- підвищити стабільність напруги та покращити коефіцієнт потужності;
- збільшити ресурс електроприводів завдяки більш рівномірним режимам роботи [11–13].

Таким чином, застосування адаптивних і інтелектуальних алгоритмів керування є перспективним напрямом розвитку енергетичних систем, що забезпечує не лише економію енергоресурсів, але й підвищує надійність та стійкість електричних мереж.

Рекуперативні режими в електроприводах. В умовах інтенсивної експлуатації електроприводів значна частина витраченої енергії безповоротно втрачається під час гальмівних процесів. Традиційно надлишкова кінетична енергія розсіювалася у вигляді тепла на гальмівних резисторах, що знижувало загальну ефективність і призводило до додаткового теплового навантаження на обладнання. Сучасні технології дозволяють перетворювати ці енергетичні втрати на корисний ресурс. Застосування рекуперативних режимів у системах керування приводами забезпечує повернення частини електроенергії до внутрішньої мережі або у зовнішнє енергетичне середовище.

Рекуперативним називають режим роботи електропривода, коли електрична машина функціонує не як споживач, а як генератор, повертаючи частину накопиченої механічної енергії у вигляді електроенергії назад у мережу або до локальної системи накопичення. Це можливо тоді, коли швидкість обертання ротора перевищує синхронну або коли момент навантаження стає від'ємним. У таких умовах електромагнітні процеси в машині сприяють перетворенню кінетичної енергії у зворотний потік електричної потужності (рис. 1).

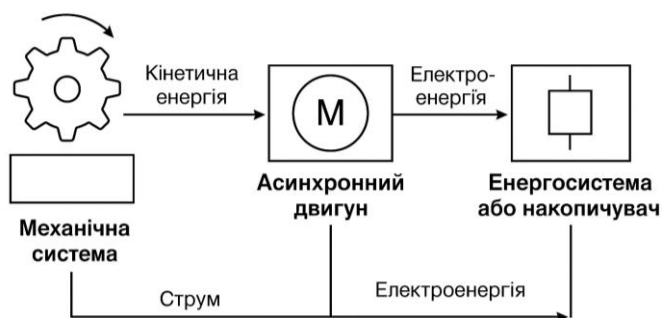


Рис. 1. Схема роботи асинхронного двигуна у рекуперативному режимі

Масштаб потенційного ефекту залежить від характеру процесу. У транспортних і підйомних установках, де відбувається чергування фаз розгону та уповільнення, частка відновленої енергії може сягати 20–40 % від витраченої на робочому ході. У міських системах електротранспорту рекуперативне гальмування вже довело здатність зменшувати енергоспоживання на рівні 15–25 %.

Ефективність рекуперації суттєво зростає у разі поєднання електроприводів із накопичувачами енергії. У випадках, коли мережа не здатна прийняти надлишкову потужність, акумулюючі пристрої забезпечують її збереження та подальше використання. Батарейні системи (BESS) і суперконденсатори дають можливість згладжувати пікові навантаження, компенсувати коливання напруги та підтримувати роботу обладнання у перехідних режимах. Суперконденсатори особливо цінні завдяки високій щільності

потужності, що дозволяє накопичувати енергію навіть під час короткочасних гальмувань та швидко її віддавати при наступному розгоні.

Моделювання впливу запропонованих стратегій на показники енергоефективності. Для оцінки ефективності впровадження адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування електроприводами було застосовано математичне та імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Схема моделі включала: джерело живлення, систему керування на базі частотно-регульованого перетворювача (VFD), трифазний асинхронний двигун та змінне навантаження. Для аналізу інтеграції застосовано також блок накопичувача енергії (BESS / суперконденсатори). У моделі реалізовано два варіанти керування: базовий сценарій – традиційне ПІ-регулювання та оптимізований сценарій – адаптивний контролер з елементами машинного навчання та нечіткої логіки.

Результати підтвердили зменшення енергоспоживання за рахунок оптимізації моменту двигуна та гнучкої реакції системи на змінні профілі навантаження. Середній рівень економії склав від 12 до 20 %, залежно від робочих умов. Особливо відчутним ефект був у випадках непостійного або циклічного навантаження, де традиційне керування демонструвало значні втрати. Також моделювання показало поліпшення якості електроенергії. При застосуванні інтелектуальних алгоритмів коефіцієнт спотворення гармонік зменшився майже на третину, а коефіцієнт потужності підвищився в середньому з 0,86 до 0,95. Це безпосередньо впливає на стабільність мережі, знижує ризики перегріву обладнання та зменшує реактивні втрати.

Встановлено, що плавний пуск і зупинка електроприводів зменшують механічне навантаження на вузли машин, а це подовжує їхній ресурс і скорочує витрати на технічне обслуговування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У проведеному дослідженні було розглянуто можливості підвищення енергоефективності електроприводів шляхом використання адаптивних та інтелектуальних стратегій керування, а також інтеграції рекуперативних режимів і систем накопичення енергії. Адаптивне та інтелектуальне керування забезпечує істотне зниження енергоспоживання електроприводів у змінних режимах роботи. Застосування алгоритмів нечіткої логіки, машинного навчання та регуляторів з адаптацією параметрів дозволяє скоротити втрати на 12–20 % порівняно з традиційним ПІ-регулюванням.

Рекуперативні режими в поєднанні з накопичувачами енергії формують додатковий резерв підвищення ефективності. Відновлена енергія може бути повторно використана для живлення споживачів або для згладжування пікових навантажень, що підвищує стабільність локальної мережі та сприяє зменшенню експлуатаційних витрат. Моделювання якості електроенергії підтвердило позитивний ефект від запропонованих стратегій: зменшення гармонічних спотворень, підвищення коефіцієнта потужності та стабілізація напруги. Це не лише покращує роботу самих приводів, але й позитивно впливає на функціонування енергосистеми в цілому.

References:

1. Perera, D., Herath, D. and Weerasekara, N. (2024), «An Extensive Review of Smart-Grid Technology», *J. Res. Technol.*, pp. 169–202, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/388701625_An_Extensive_Review_of_Smart-Grid_Technology
2. Khalid, M. (2024), «Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges», *Energy Strategy Reviews*, Vol. 51, doi: 10.1016/j.esr.2024.101299.
3. Tosin, M.O. (2024), «Azubuike Chukwudi Okwandu, Dorcas Oluwajuwonlo Akande, Zamathula Queen Sikhakhane», *Engineering Science & Technology Journal*, Vol. 5, Issue 4, pp. 1257–1269, doi: 10.51594/estj/v5i4.1016.
4. Prabadevi, B., Pham, Q.-V., Liyanage, M. et al. (2021), «Deep Learning for Intelligent Demand Response and Smart Grids: A Comprehensive Survey», *Computer Science Review*, Vol. 51, doi: 10.48550/arXiv.2101.08013.
5. Saleeb, H., Kassem, R. and Sayed, K. (2022), «Artificial neural networks applied on induction motor drive for an electric vehicle propulsion system», *Electrical Engineering*, Vol. 104, pp. 1769–1780, [Online], available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-021-01418-y>
6. Farhani, F., Zaafouri, A. and Chaari, A. (2017), «Real time induction motor efficiency optimization», *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 354, Issue 8, pp. 3289–3304, doi: 10.1016/j.jfranklin.2017.02.012.
7. Sarhan, H. et al. (2011), «Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor Drive», *Energy and Power Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 107–112, doi: 10.4236/epe.2011.32014.
8. Jirasuwankul, N. et al. (2017), «Simulation of Energy Efficiency Improvement in Induction Motor Drive by Fuzzy Logic Based Temperature Compensation», *Energy Procedia*, Vol. 107, pp. 291–296, doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.154.
9. Ibekwe, K.I., Fabuyide, A., Hamdan, A. et al. (2024), «Energy efficiency through variable frequency drives: industrial applications in Canada, USA, and Africa», *International Journal of Science and Research Archive*, pp. 730–736, doi: 10.30574/ijrsra.2024.11.1.0113.
10. Spiegel, R.J., Turner, M.W. and McCormick, V.E. (2003), «Fuzzy-logic-based controllers for efficiency optimization of inverter-fed induction motor drives», *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 137, Issue 3, pp. 387–401, doi: 10.1016/S0165-0114(02)00280-4.

11. Mecke, R. (2019), «Energy saving potential of induction motor drives with variable rotor flux», *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'19)*, Tenerife, Spain, [Online], available at: <https://www.icrepq.com/icrepq19/304-19-mecke.pdf>
12. Dinolova, P. (2023), «Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Challenges, and Opportunities», *Energies*, Vol. 16, No. 20, doi: 10.3390/en16207136.
13. Akbulut, O. et al. (2024), «Hybrid Neuro-Fuzzy Control for Smart Grids: Enhancing Energy Efficiency and Demand Response», *Energies*, Vol. 17, No. 11, doi: 10.3390/en17112539.

Ткачук Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані електроприводи;
- енергоефективність та енергозбереження мехатронних систем;
- мобільні роботизовані платформи;
- системи стабілізації озброєння.

Гуменюк Анна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-5744-4599>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані вимірювальні системи;
- гравіметрія;
- автоматизація проектування гнучких виробничих систем.

Кравчук Антон Романович – доктор філософії, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8305-2492>.

Наукові інтереси:

- промислова та мобільна робототехніка;
- САПР;
- вбудовані системи.

Добржанський Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4330-0287>.

Наукові інтереси:

- системи релейного захисту;
- гіроскопічні гравіметри;
- розробка програмного забезпечення для промислових та бізнес-процесів (C, C++, C#, VBA, JS/HTML/CSS, Python, Lua);
- програмування PLC та SCADA (LD, FBD, SFC, IL, ST);
- 3D моделювання в технологіях Unity, VR;
- дистанційно керовані мобільні платформи.

Богдановський Мартін Віталійович – старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2870-4248>.

Наукові інтереси:

- автоматизоване управління виробничими процесами;
- мобільна робототехніка;
- системи енергоефективності та енергозбереження;
- дистанційно керовані мобільні платформи.

Tkachuk A.H., Humeniuk A.A., Dobrzhansky O.O., Kravchuk A.R., Bogdanovsky M.V.

Energy-efficient strategies of electric drive control in Smart Grid systems

The article examines modern approaches to improving the energy efficiency of electric drives in the context of implementing the concept of smart energy networks (Smart Grid). Particular attention is given to the integration of electric drives as active participants in the energy balance, capable not only of consuming energy but also of adaptively regulating their operating modes in accordance with network parameters, load conditions, and the state of renewable energy sources. The study emphasizes the feasibility of using intelligent control systems that ensure high-quality regulation and reduced energy consumption under dynamically changing external conditions.

Methods of energy consumption optimization based on adaptive control of variable-frequency drives are analyzed. The principles of using load forecasting algorithms are considered, enabling the formation of optimal operating profiles in advance and preventing peak overloads in the grid. The potential of regenerative operating modes, which allow excess energy during braking or speed reduction to be returned to the grid or local storage systems, is highlighted. This approach improves the overall efficiency of electric drive systems and reduces power losses.

The results of simulation modeling performed in MATLAB/Simulink, using adaptive regulators and load models, confirm the effectiveness of the proposed strategies. It has been established that the application of intelligent control algorithms reduces the electricity consumption of electric drives compared to traditional control methods, increases the power factor, and decreases harmonic distortion levels in the grid by 25–30 %. Additionally, it is demonstrated that the use of adaptive regulators ensures system stability even under varying motor parameters and external disturbances.

The practical implementation of such solutions is feasible in a wide range of applications: industrial production lines, electric transport systems, and integrated energy complexes with renewable sources. This opens new prospects for the development of energy-efficient Smart Grid systems with a high level of flexibility, reliability, and self-recovery capability after disturbances. The proposed approaches contribute to shaping a new paradigm of electric drives focused on minimizing energy losses and enhancing the overall efficiency of modern power systems.

Keywords: electric drive; energy efficiency; Smart Grid; regeneration; control.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2025.