Козенко Євген Леонідович
здобувач третього рівня вищої освіти
факультету комп'ютерних технологій та енергетики
Дніпровський державний технічний університет, Україна

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ СИНХРОНІЗОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

На сучасному етапі функціонування об’єднаної енергосистеми (ОЕС) України спостерігаються безпрецедентні виклики, зумовлені руйнівними наслідками повномасштабної військової агресії [1, 13]. Систематичні пошкодження об'єктів генерації та магістральних електромереж призвели до виникнення стійкого дефіциту генеруючих потужностей та суттєвого погіршення показників якості електроенергії, зокрема — значних коливань напруги та частоти. У цих умовах експлуатація потужних електромеханічних систем, які є основними споживачами електроенергії в промисловому секторі (підприємства металургійної, гірничодобувної галузей, об'єкти критичної інфраструктури та водопостачання) [2], вимагає концептуального перегляду традиційних підходів до забезпечення їхньої стійкості та енергоефективності. Класичні асинхронні електроприводи в умовах глибоких просадок напруги демонструють зниження динамічної стійкості, що призводить до порушення безперервності технологічних процесів. Раціональним компромісом, що поєднує високу надійність і пускові властивості асинхронних машин із фазним ротором та регулювальні можливості синхронних машин, є застосування синхронізованого асинхронного двигуна (САД) [3]. Аналіз режимів роботи САД свідчить, що впровадження систем синхронізації дозволяє комплексно вирішити низку критичних для енергетики України завдань:

- *Локальна компенсація реактивної потужності.* Внаслідок руйнування великих ТЕС та ГЕС енергосистема втратила значну частину маневрових потужностей та вузлів регулювання напруги. Робота САД у режимі перезбудження забезпечує генерацію реактивної потужності безпосередньо у вузлах споживання. Це розвантажує пошкоджені лінії електропередачі (ЛЕП) та трансформаторні підстанції від реактивних струмів, знижує активні втрати та діє як превентивний захід проти виникнення «лавини напруги» [9].
- *Підвищення динамічної стійкості.* Технічним викликом сьогодення є

збереження роботоздатності приводів під час ракетних атак на енергооб'єкти або оперативних перемикань. На відміну від базового асинхронного двигуна, електромагнітний момент якого пропорційний квадрату напруги ($M \sim U^2$), САД, оснащений швидкодіючою системою автоматичного регулювання збудження (АРЗ), здатен форсувати магнітний потік [5]. Це дозволяє зберігати синхронну швидкість та номінальну перевантажувальну здатність навіть при глибоких зниженнях напруги мережі [7].

• *Адаптація до "слабких" мереж та автономних джерел живлення.* Відновлення живлення критичної інфраструктури часто передбачає використання тимчасових схем з високим еквівалентним опором або підключення до дизель-генераторних установок (ДГУ). Прямий пуск потужних двигунів у таких умовах є неможливим через значні пускові струми. Технологія САД уможливлює здійснення реостатного пуску в асинхронному режимі з обмеженням струму, після чого відбувається плавний перехід у синхронний режим, що мінімізує негативний динамічний вплив на автономну енергосистему [12].

• *Мінімізація капітальних витрат на модернізацію.* В умовах обмежених фінансових ресурсів концепція синхронізації існуючого експлуатаційного парку асинхронних двигунів із фазним ротором є економічно доцільнішою альтернативою закупівлі нових синхронних машин. Швидка модернізація досягається шляхом інтеграції сучасних тиристорних систем збудження та мікропроцесорних комплексів керування в існуючу силову схему приводу [5].

З огляду на вищезазначене, дослідження перехідних процесів, енергетичних характеристик та розробка алгоритмів оптимального керування САД в умовах нестабільних параметрів мережі є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню енергетичної безпеки та живучості промислового комплексу України.

Електромеханічні та енергетичні процеси в САД полягають в штучному створенні постійного магнітного поля ротора, яке "зчеплюється" з обертовим полем статора. Це змінює енергетичний баланс машини, перетворюючи її з пасивного споживача на активний елемент мережі [3]. Завдяки відсутності ковзання ($s=0$) споживання активної потужності стабілізується. Регулюючи I_f, САД може працювати з $\cos \varphi = 1$ або генерувати реактивну потужність (перезбудження). Також варто зазначити, що на металургійних підприємствах Дніпропетровської області ("Камет-сталь", "Інтерпайп") переведення потужних димососів чи насосів у режим САД компенсує реактивну потужність десятків дрібних двигунів, знижуючи втрати в цехових мережах на 5–12% [2, 9]. В агросекторі регіону (елеватори, олійноекстракційні

заводи) САД за рахунок форсування I_f утримує швидкість вентиляторів та конвеєрів навіть при просадках напруги на 15–20%, запобігаючи завалу ліній [7].

САД має ділянку абсолютно жорсткої механічної характеристики: поки навантаження не перевищує критичне, швидкість незмінна ($\omega=\omega_0$), змінюється лише кут вибігу ротора θ [3]. Ударні навантаження (захват металу валками на трубних станах Дніпра, нерівномірна подача зерна на елеваторах Новомосковська) викликають коливання кута θ, які ефективно демпфуються замкненими контурами ротора, запобігаючи випаду із синхронізму. САД стійкий до просадок мережі, навіть при падінні напруги U синхронний момент падає [8]. Цифрова система за мілісекунди форсує струм ротора у 1.5–2 рази. Це рятує безперервні процеси (наприклад, насоси охолодження доменних печей) від зупинки.

Рівняння динаміки ротора має вигляд [8,10] *:*

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{sync}(\theta) + M_{async}(s) - M_{load}$$

де J — момент інерції, M_{sync} і M_{async} — синхронний та асинхронний моменти відповідно.

Для промисловості Дніпровського району головною перевагою динамічних характеристик САД є передбачуваність. Завдяки можливості керувати збудженням, ми перетворюємо пасивний двигун на "розумну" машину, яка здатна самостійно протистояти як механічним ударам з боку технологічного обладнання, так і електричним ударам з боку енергосистеми.

Розглядаючи експлуатаційні режими САД варто зазначити, що найбільш критичний режим це пуск та втягування в синхронізм [12]. Для потужних двигунів у Дніпровському регіоні (наприклад, насоси Південного водоканалу або вентилятори аглофабрик) прямий пуск є неприпустимим через просідання напруги. Сам пуск починається як асинхронний (з реостатом у колі ротора). Коли швидкість досягає 95-97% від номінальної, система автоматики подає постійний струм у ротор. Важливим технічним викликом є вибір моменту подачі збудження. Якщо подати струм у протифазі, виникне ударний момент, що може пошкодити муфту або редуктор. Наприклад на елеваторах при пуску завантаженого вертикального конвеєра (норії) важливо плавно вийти на робочу швидкість. САД дозволяє зробити це без ризику «завалу» двигуна, який міг би статися при звичайному синхронному пуску. В умовах воєнного стану та високих тарифів на електроенергію для підприємств, сталий режим САД використовується для мінімізації витрат. На

великих металургійних підприємствах таких як "Дніпроспецсталь" або "Дніпровський металургійний завод" працює велика кількість дрібних асинхронних двигунів. Один потужний САД (наприклад, на компресорі), працюючи в сталому режимі з перезбудженням, діє як безкоштовний компенсатор реактивної потужності для всього цеху [9]. Це дозволяє знизити рахунки за реактивну енергію, а також впливає на зниження нагріву кабельних ліній.

Реверс у САД складніший, ніж у звичайного двигуна, оскільки потребує чіткої послідовності дій - зняття збудження → реверс фаз статора → гальмування противмиканням або динамічне гальмування → розгін у зворотний бік → повторна синхронізація. Наприклад допоміжні механізми прокатних станів або засувки великих діаметрів на магістральних трубопроводах. Динамічне гальмування САД (шляхом подачі постійного струму в статор) дозволяє зупинити механізм миттєво і точно, що важливо для безпеки персоналу та обладнання [3].

На жаль, через масштабні руйнування інфраструктури, енергосистема України у 2024–2026 роках функціонує таким чином, що постійні перепади напруги та різкі зміни навантаження перетворилися з аварійних ситуацій на повсякденну норму роботи для будь-якого промислового електропривода [1]. При падінні частоти мережі нижче 49 Гц, завдяки стійкості до коливань частоти, швидкість САД пропорційно падає, але він залишається в синхронізмі. Через обстріли підстанцій можливі короткочасні (до 1-2 сек) просадки напруги до 60% [7]. У цей момент спрацьовує форсування збудження [5]. Наприклад олійноекстракційні заводи. Якщо під час процесу віджиму станеться короткочасна просадка напруги, звичайний двигун зупиниться під навантаженням. САД «витягне» цей момент за рахунок запасу магнітної енергії в роторі, запобігаючи дорогому простою та очищенню обладнання вручну. Експлуатаційна гнучкість САД робить його ідеальним інструментом для промисловості України в умовах енергетичної нестабільності. Можливість адаптувати параметри збудження під конкретний режим дозволяє не лише економити ресурси, а й гарантувати стабільність роботи критичної інфраструктури Дніпровського району.

Математичний опис САД базується на поєднанні теорії класичної асинхронної машини та теорії двовісної моделі синхронної машини (рівняння Парка-Горева).

Рівняння електромагнітного моменту [10]

У синхронізованому стані загальний момент двигуна M можна представити як суму двох складових:

1. Основна складова (синхронна): залежить від напруги мережі та струму збудження.

2. Реактивна складова: зумовлена магнітною асиметрією ротора (якщо вона є).

$$M = \frac{mU\,E_0}{\omega_0 X_d}\,sin\,\theta + \frac{mU^2}{2\omega_0}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\,sin\,2\theta$$

На металургійних заводах, де використовуються великі подрібнювачі або змішувачі шихти, важливо розраховувати кут θ. Якщо при завантаженні порції сировини кут θ перевищить 90∘, двигун випаде із синхронізму [3]. Модель дозволяє розрахувати необхідний рівень збудження E_0, щоб утримати вал.

Моделювання перехідних процесів (Динаміка)

Динаміка описується диференціальним рівнянням руху ротора, яке враховує інерційні маси всього агрегату:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{sync} + M_{async} - M_{load}$$

Розглянемо для прикладу олійноекстракційний завод. При раптовому заклинюванні шнекового преса момент опору M_{load} різко зростає. Моделювання дозволяє визначити час спрацювання захисту та алгоритм форсування збудження. Якщо система керування встигне збільшити струм ротора, то за рахунок кінетичної енергії J і збільшеного M_{sync} привід може «проштовхнути» пробку без зупинки лінії.

Сьогодні мережі Дніпропетровщини, як і загалом всієї ОЕС, страждають від гармонік, що генеруються потужними випрямлячами та дуговими печами. Математична модель повинна враховувати втрати від вищих гармонік [6]. Технічним нюансом є те, що постійний струм у роторі створює жорстке поле, яке частково нівелює вплив зворотних послідовностей напруги, що виникають при нерівномірному розподілі фаз на сільських підстанціях навколо Дніпра. Моделювання підтверджує, що САД менше гріється при асиметрії напруги порівняно з АД.

Необхідно враховувати вплив систем автоматичного регулювання (АРЗ). У модель вводиться передавальна функція регулятора збудження. Для сучасних тиристорних систем, що виробляються в Україні, це зазвичай ПІ-регулятор (пропорційно-інтегральний) [5]. Приклад: насосна станція великого металургійного комбінату. При запуску сусідньої дугової печі напруга на шинах падає на 15%. Модель показує, що без АРЗ двигун насоса випаде із

синхронізму за 0.4 сек. З налаштованим ПІ-регулятором час стійкості стає необмеженим (за умови теплової витривалості обмотки ротора).

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що синхронний момент є гнучким інструментом: ми можемо "загрубити" або "пом'якшити" привід через параметри I_f, а також те, що для підприємств Дніпровського району використання моделей САД дозволяє створювати «цифрові двійники» приводів для прогнозування аварійних ситуацій. Моделювання підтверджує можливість зниження втрат у статорі на 7–10% при роботі з оптимальним кутом θ [3].

За результатами аналізу електромеханічних, енергетичних та динамічних процесів у синхронізованому асинхронному електроприводі можна стверджувати, що САД поєднує високий пусковий момент асинхронної машини з можливістю регулювання реактивної потужності синхронної. Це робить його ідеальним для механізмів з важким пуском (дробарки, млини «Дніпротяжмашу») та тривалою роботою (насоси водоканалів), що свідчить про технологічну гнучкість [2]. Математичне моделювання підтвердило, що використання систем автоматичного регулювання збудження (АРЗ) дозволяє утримувати привід у роботі при просадках напруги до 35-40%, що є критичним фактором для енергосистеми України в умовах воєнного стану [7]. Оптимізація кута навантаження θ дозволяє знизити споживання активної енергії на 3–5% та повністю компенсувати власне споживання реактивної енергії.

Для подолання технічних викликів (випад із синхронізму, кидки струму при пуску, нестабільна мережа) пропонуються наступні рішення:

- *Впровадження адаптивного мікропроцесорного керування:* Використання інтелектуальних контролерів, що прогнозують випад із синхронізму на основі аналізу швидкості зміни кута θ та миттєво активують режим форсування [5].
- *Синхронізація «на льоту»:* Розробка алгоритмів подачі збудження за вектором напруги мережі, що мінімізує ударні механічні навантаження на редуктори та муфти потужних агрегатів (актуально для аглофабрик Кам'янського).
- *Гібридні системи збудження:* Використання суперконденсаторів у колі збудження для підтримки струму ротора під час глибоких мікросекундних провалів напруги, коли зовнішня мережа не здатна забезпечити живлення самого збуджувача [11].

Тема САД має значний потенціал для подальших наукових досліджень:

• Вивчення впливу несинусоїдальності напруги (вищих гармонік від дугових печей) на додаткові втрати в синхронізованому роторі.

• Розробка алгоритмів участі САД у загальносистемному регулюванні частоти та напруги енергосистеми України (надання допоміжних послуг оператору систем розподілу) [4].

• Навчання нейронних мереж для розпізнавання патернів «передаварійних станів» приводу на основі вібрацій та спектрального аналізу струму.

• Детальне вивчення теплових режимів обмоток ротора при тривалому форсуванні збудження в умовах екстремально низької напруги мережі.

У висновку необхідно зазначити - синхронізація асинхронних двигунів є стратегічно правильним напрямом для модернізації промисловості, забезпечуючи перехід від простого споживання енергії до активного управління її параметрами в критичних умовах.

Список використаних джерел:

1. Офіційний звіт НЕК «Укренерго». (2024). *Оцінка стану та стійкості Об'єднаної енергосистеми України в умовах воєнного стану та масованих ракетних атак*. Київ: Укренерго.
2. Півняк Г. Г., Бешта О. С., Бойко О. В. (2010). *Енергозбереження та оптимізація в засобах електроприводу: монографія*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – с. 115-142.
3. Волков А. В., Загірняк М. В. (2015). *Синхронізовані асинхронні машини: теорія, математичне моделювання, експлуатаційні режими*. Кременчук: КрНУ. – с.88-104, 212-230
4. Денисюк С. П., Бурба О. І. (2022). Інтелектуальні технології керування режимами електроспоживання промислових підприємств в умовах Smart Grid. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (2). - с. 55-63.
5. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Пушкар М. В. (2018). *Сучасні системи керування електромеханічними комплексами*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – с. 145-168
6. Жежеленко І. В. (2010). *Вищі гармоніки в системах електропостачання промислових підприємств* (6-те вид.). Київ: Техніка. – с. 42-58
7. Жемчугов Г. А., Синчук О. М. (2021). Підвищення динамічної стійкості промислових електроприводів при короткочасних просадках напруги в мережах 6-10 кВ. *Технічна електродинаміка*, (3). – с. 45-52.
8. Чорний О. П., Луговий А. В. (2016). *Моделювання електромеханічних систем: Навчальний посібник*. Кременчук. – с. 120-135
9. Сабрі М. М., Кутнєв В. В. (2020). Компенсація реактивної потужності в цехових мережах металургійних підприємств за допомогою потужних синхронних машин. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, (40). - с. 112-120.
10. Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (3rd ed.). IEEE Press, John Wiley & Sons. – c.195-240
11. Bose, B. K. (2006). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall. – c. 352-380
12. Кузнецов В. В., Маренич К. М. (2019). Оптимізація режимів пуску потужних вентиляторних та насосних установок шляхом частотного регулювання та синхронізації. *Гірнича електромеханіка та автоматика*, (101). – с. 22-29.
13. Чорній В. (2022) Вплив війни на енергетичну систему України. *Вісник Хмельницького національного університету,* (304). – с. 196-202