**Возняк О.М.**

к.т.н., доцент

Ярошенко Л. В.

к.т.н., доцент

Луц П.М.

к.т.н., ст. викладач

Тихоненко С. В.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Vozniak O.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Yaroshenko L.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Luts P.**

Ph.D., Senior Lecturer

Tikhonenko S.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 631.3.004.6****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-5**

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ АПК

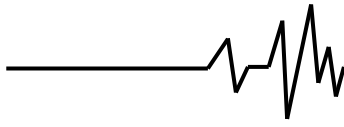
Керування електроприводами в електромеханічних системах агропромислового комплексу (АПК) є критичним чинником підвищення ефективності та надійності технологічних процесів, що безпосередньо впливають на продуктивність аграрного виробництва. У зв'язку з впровадженням новітніх технологій, зростанням вимог до якості продукції та необхідністю автоматизації процесів, сучасні агротехнології потребують удосконалення методів керування електроприводами. Актуальність цієї теми обумовлена потребою оптимізації управлінських процесів у сфері АПК для підвищення продуктивності, зниження енергоспоживання та підвищення надійності систем.

В огляді розглядаються класичні та сучасні підходи до керування електроприводами. Традиційні пропорційні, інтегральні та диференціальні методи забезпечують стабільність роботи систем і мінімізують похибки, адаптуючись до умов сільськогосподарського виробництва. Важливу роль відіграють системи зворотного зв'язку, які автоматично регулюють параметри роботи електроприводів у відповідь на зміни зовнішніх факторів. Важливою частиною є також нечіткі системи керування, які дозволяють приймати рішення на основі експертних оцінок у випадках, коли точні дані складно отримати. Окремо розглядаються адаптивні системи керування, здатні змінювати свої параметри в умовах змінності, що особливо важливо в аграрному секторі з його мінливими умовами.

У статті також висвітлюються сучасні інтелектуальні системи керування з використанням штучного інтелекту, машинного навчання та дистанційного моніторингу, що дозволяють аналізувати великі обсяги даних, прогнозувати потреби у ресурсах та підвищувати енергоефективність. Системи на основі інтернет-технологій, таких як SCADA, забезпечують операторів можливістю віддаленого моніторингу та керування обладнанням у реальному часі, що є важливим елементом сучасного сільськогосподарського виробництва.

У підсумку, керування електроприводами в АПК спрямоване на автоматизацію та підвищення ефективності виробничих процесів, оптимізацію використання енергоресурсів та забезпечення безпеки роботи систем, що робить їх невід'ємною частиною сучасних агротехнологій.

Ключові слова: електропривод, агропромисловий комплекс, автоматизація, енергоефективність, системи зворотного зв'язку, адаптивні системи оптимізація процесів.



Вступ. Керування електроприводами в електромеханічних системах агропромислового комплексу (АПК) є ключовим аспектом, що визначає ефективність і надійність технологічних процесів, які безпосередньо впливають на продуктивність аграрного виробництва. У сучасному агропромисловому виробництві спостерігається зростання складності технічних систем, що зумовлено впровадженням нових технологій, зростанням вимог до якості продукції та необхідністю забезпечення високого рівня автоматизації. Це створює потребу в оптимізації управлінських процесів, де вибір методів та засобів керування електроприводами відіграє вирішальну роль [1].

Актуальність даної теми зумовлена постійним розвитком технологій в агропромисловому секторі, що вимагає впровадження новітніх рішень для підвищення продуктивності, зменшення витрат енергії та підвищення надійності роботи систем. У цьому контексті, аналітичний огляд сучасних методів і засобів керування електроприводами дозволяє виявити їх сильні та слабкі сторони, а також дослідити можливості інтеграції нових технологій, таких як штучний інтелект, автоматизація та IoT, у традиційні виробничі процеси.

У цьому огляді розглядаються різноманітні підходи до керування електроприводами. Класичні пропорційні, інтегральні та диференційні методи забезпечують стабільність системи і зменшують похибки, адаптуючись під специфічні умови агропромислового виробництва. Системи зворотного зв'язку автоматично коригують роботу електроприводів, враховуючи зміни умов зовнішнього середовища та технологічного процесу. Адаптивні системи здатні самостійно змінювати свої параметри в умовах змінності, що є важливим у аграрному виробництві, де погодні умови та інші фактори можуть варіюватися.

Нечіткі системи керування дозволяють використовувати лінгвістичні експертні оцінки, що є особливо корисним у ситуаціях, коли точні вимірювання недоступні або складні для отримання. Системи оптимального керування спрямовані на досягнення максимальної ефективності в процесах, що виконуються, шляхом мінімізації витрат ресурсів або максимізації виходу продукції.

Важливість вибору правильних методів керування електроприводами також обумовлена специфікою агропромислового комплексу, де необхідно враховувати не лише технічні, але й економічні, екологічні та соціальні аспекти [2]. Під час управління електромеханічними системами в агропромисловому виробництві слід зосереджуватися на енергоефективності, зниженні негативного впливу на навколишнє середовище, а також на збереженні робочих місць і поліпшенні умов праці.

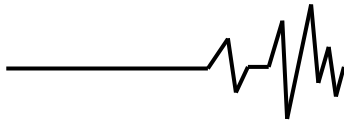
Таким чином, аналітичний огляд методів та засобів керування електроприводами в електромеханічних системах АПК дозволить визначити оптимальні рішення для сучасних вимог аграрного виробництва, а також окреслити перспективи для подальших досліджень і впроваджень нових технологій у цій важливій галузі.

Огляд останніх досліджень. Керована електромеханічна система в агропромисловому комплексі (АПК) є електроприводом, що належить до певного класу технічних систем. Вона представляє собою організовану та цілеспрямовану комбінацію взаємозалежних і взаємодіючих компонентів, які інтегруються в інші системи, що використовуються в аграрному виробництві. Основні елементи електроприводу включають джерело живлення, електричні та електромеханічні перетворювачі, пристрої керування і збору інформації, а також засоби взаємодії із зовнішніми електричними, механічними, керуваними та інформаційними системами.

Головна функція електроприводу в АПК полягає в забезпеченні роботи виконавчого органу сільськогосподарської машини та управлінні його рухом відповідно до заданого алгоритму. Електропривод забезпечує регульовану зміну швидкості обертання та переміщення виконавчого механізму в межах, що необхідні для виконання специфічних агрономічних завдань, гарантуючи при цьому необхідну точність і динаміку. Це дозволяє ефективно реалізувати технологічні процеси в сільському господарстві, такі як обробка ґрунту, посів, збирання врожаю та інші.

Електроприводи класифікуються за кількома критеріями [3]:

1. За призначенням:
 - Головного руху: відповідають за основний технологічний процес.
 - Подача: керують рухом подачі або транспортування.
 - Допоміжні: забезпечують допоміжні функції (наприклад, охолодження, змащування).
2. За способом регулювання:
 - З постійним моментом.
 - З постійною потужністю.
 - Із зміною напруги на якорі двигуна постійного струму та струму збудження (двобічне регулювання).
3. За родом струму виконавчого двигуна:
 - Двигуни постійного струму.
 - Двигуни змінного струму.
4. За схемою силового перетворювача:
 - Керовані випрямлячі (одно- і багатофазні).
 - Широтно-імпульсні перетворювачі.
 - Автономні інвертори напруги або струму.



5. За структурою системи автоматичного регулювання:

- Одноконтурні.
- Багатоконтурні.

6. За способом керування:

- Аналогові (з датчиком інтенсивності та датчиком зворотного зв'язку).
- Аналогові або цифрові регулятори, що використовують для формування заданого закону керування швидкістю виконавчого двигуна.

Ці класифікації дозволяють визначити характеристики та функціональні можливості електроприводів у різних технологічних процесах.

Основними параметрами електроприводів є [4]:

- номінальний обертальний момент на валу електродвигуна;

- номінальна вихідна потужність на валу електродвигуна;

- номінальна кутова швидкість;

- максимальна кутова швидкість;

- діапазон регулювання – відношення максимальної швидкості до мінімальної, при якому зберігаються всі параметри вихідних координат електропривода за стабільністю для випадку зміни навантаження, напруги мережі, температури навколишнього середовища, реверсування двигуна і нерівномірності обертання;

- чутливість – мінімальний сигнал керування, що виконується елект-роприводом;

- перенавантажувальна здатність за потужністю; момен- в усталеному і перехідному режимах;

- динамічні характеристики за керуючим впливом – час пуску і гальмування;

- за збуренням в навантаженні – час становлення швидкості та динамічна зміна швидкості;

- масо-габаритні показники – P/m , кВт/кг; P/V , кВт/дм³, M/m , Н·м/кг; M/V , Н·м/дм³;

- надійність – виробіток на відмову, ймовірність безвідмовної роботи, строк служби, ремонтпридатність;

- вартість, економічність і простота обслуговування;

Механічні і електричні параметри, наприклад, електропривода постійного струму, пов'язані між собою відомими співвідношеннями, що математично описують різні способи регулювання швидкості:

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \Omega; P_{\text{ел}} = U \cdot I;$$

$$\Omega = (U - IR / c_m \Phi);$$

$$M = c_m / \Phi; c_m = p_d N / (2\pi a), \quad (1)$$

де $P_{\text{мех}}$ – механічна потужність на валу електродвигуна;

$P_{\text{ел}}$ – електрична потужність двигуна;

M – обертальний момент на валу двигуна;

Ω – швидкість двигуна;

U – напруга на якорі двигуна;

I – струм двигуна (діюче значення);

Φ – потік збудження двигуна;

c_m – конструктивна постійна двигуна;

p_d – кількість пар полюсів двигуна;

N – кількість активних провідників обмотки якоря пази;

a – кількість паралельних віток обмотки якоря.

Регулювання швидкості двигуна постійного струму здійснюється шляхом зміни двох основних електричних параметрів: напруги на якорі (U) і магнітного потоку збудження (Φ). У процесі регулювання виділяють три основні зони:

1. Зона I – регулювання при постійному моменті ($M=\text{const}$):

- Швидкість регулюється від 0 до номінальної швидкості ($\omega_{\text{ном}}$) шляхом зміни напруги на якорі від 0 до номінальної напруги ($U_{\text{ном}}$).

- У цій зоні обертальний момент залишається постійним і дорівнює номінальному моменту ($M_{\text{ном}}$).

- Потужність зростає пропорційно швидкості, досягаючи номінальної потужності ($P_{\text{ном}}$) при швидкості $\omega_{\text{ном}}$.

2. Зона II – регулювання при постійній потужності ($P=\text{const}$):

- Швидкість регулюється від номінальної ($\omega_{\text{ном}}$) до максимальної швидкості ($\omega_{\text{макс}}$) шляхом зменшення магнітного потоку збудження від номінального ($\Phi_{\text{ном}}$) до мінімального ($\Phi_{\text{мін}}$).

- Потужність залишається постійною, рівною номінальній потужності ($P_{\text{ном}}$), однак обертальний момент знижується пропорційно збільшенню швидкості.

3. Зона III – регулювання на заводських випробуваннях:

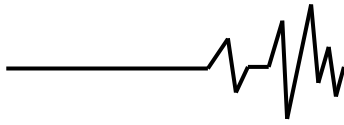
- У цій зоні параметри двигуна регулюються в спеціальних умовах, наприклад, при стендових випробуваннях, для перевірки характеристик двигуна.

Види регулювання швидкості електропривода [5]:

- Регулювання при постійному моменті (зона I): використовується для керування системами, де потрібен сталий обертальний момент на низьких швидкостях.

- Регулювання при постійній потужності (зона II): застосовується для роботи на вищих швидкостях, коли критично важливо підтримувати потужність, а не момент.

- Двобонне регулювання (поєднання зони I і II): дозволяє поєднувати переваги обох режимів, починаючи з регулювання моменту, а потім переходячи до регулювання потужності на більш високих швидкостях.



Ці типи регулювання широко використовуються в сучасних електроприводах для оптимізації робочих характеристик і ефективного управління технологічними процесами.

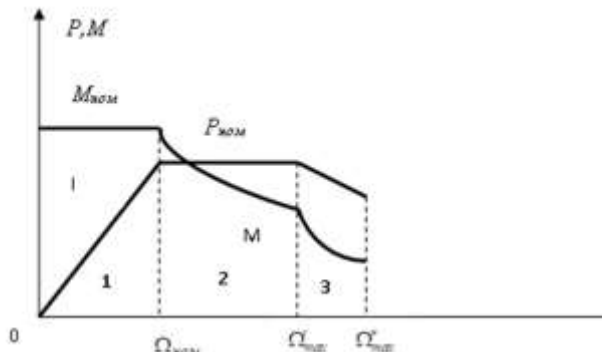


Рис. 1. Залежності граничних значень потужності і моменту від швидкості електродвигуна

Результати досліджень.

Узагальнена функціональна схема електропривода (ЕП) технологічних систем (ТС) включає кілька основних компонентів, що забезпечують рух робочого органу та його керування за заданими параметрами. До основних елементів схеми належать [6-7]:

▪ Електродвигунний пристрій (ЕДП): це електродвигун, який перетворює електричну енергію в механічну для забезпечення руху виконавчого механізму. Він є центральним елементом, відповідальним за виконання механічної роботи.

▪ Перетворювальний пристрій (ППП): цей блок відповідає за перетворення та подачу електричної енергії до електродвигуна. Він може включати такі компоненти, як випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти та напруги, які дозволяють регулювати параметри роботи двигуна (наприклад, швидкість, момент).

▪ Система автоматичного керування (САК): це електронна система, що забезпечує контроль і керування роботою електропривода. Вона отримує сигнали від датчиків та контролює роботу двигуна відповідно до заданих параметрів (швидкість, момент, потужність). САК може бути побудована на основі аналогових або цифрових регуляторів.

▪ Виконавчий механізм (ВМ): це механічна частина, яка безпосередньо виконує роботу, перетворюючи механічну енергію, що подається електродвигуном, у корисний рух робочого органу технологічної системи. ВМ може бути, наприклад, редуктором, системою передач або приводом робочого органу.

▪ Об'єкт керування (ОК): це кінцева технологічна система або процес, який контролюється і приводиться в рух електроприводом. ОК може бути будь-якою

машиною або механізмом, наприклад, транспортною стрічкою, верстатом або насосом, залежно від конкретної технологічної задачі.

Підсистеми електропривода:

• Механічна підсистема: відповідає за передачу механічної енергії від двигуна до виконавчого механізму, включає такі елементи, як вал, редуктори та інші передачі.

• Електрична підсистема: включає компоненти, які забезпечують подачу електроенергії на двигун, регулювання параметрів електроживлення, а також елементи захисту від перевантажень.

• Магнітна підсистема: стосується компонентів електродвигуна, які створюють та регулюють магнітний потік збудження, забезпечуючи відповідні характеристики роботи двигуна, такі як крутний момент і швидкість обертання.

Всі ці підсистеми тісно взаємодіють одна з одною [8]. Електрична система живить двигун, який через механічну підсистему передає енергію на робочий орган. САК, в свою чергу, керує всією системою, забезпечуючи необхідну точність і стабільність роботи.

Покращення ЕП і САК є ключовими для підвищення ефективності, надійності та продуктивності технологічного обладнання.

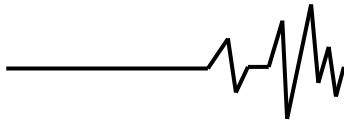
Джерело живлення (ДЖ) у системі електропривода (ЕП) є частиною системи електропостачання (СЕП), яка виконує ключову функцію забезпечення електричної енергії для роботи всіх елементів електропривода [9]. СЕП призначена для виробництва, розподілу і передачі електричної енергії необхідної кількості та якості до ЕП, і може працювати на постійному, змінному або комбінованому струмі.

Основні компоненти системи електропостачання (СЕП):

1. Джерело електроенергії: це можуть бути електричні станції (електромережі) або генератори, які виробляють електричну енергію. Залежно від вимог ЕП та умов експлуатації можуть використовуватися генератори постійного струму, змінного струму або їхні комбінації.

2. Регулюючі та узгоджуючі пристрої: забезпечують стабільність напруги та струму, необхідні для коректної роботи ЕП. До них відносяться трансформатори, стабілізатори, перетворювачі частоти або напруги, які гарантують, що енергія, яка надходить до ЕП, має необхідні параметри.

3. Акумуляторні батареї або альтернативні джерела: використовуються для забезпечення безперебійної роботи ЕП у випадках перебоїв у мережевому електропостачанні або для живлення ЕП в автономних системах. Альтернативні джерела можуть включати сонячні панелі, вітрові генератори тощо.



Види струму в системах електропостачання:

- Постійний струм: використовується у випадках, коли потрібен точний контроль швидкості та моменту двигуна (наприклад, для двигунів постійного струму). Джерела постійного струму часто використовуються в системах з перетворювачами енергії та акумуляторними батареями.

- Змінний струм: найчастіше застосовується в промисловості для живлення асинхронних двигунів, які широко використовуються завдяки простоті конструкції, надійності та економічності. Для змінного струму потрібні перетворювачі частоти для регулювання швидкості двигуна.

- Комбінований струм: використовується в складних технологічних системах, де необхідно поєднувати переваги обох типів струму. Наприклад, у деяких системах можуть використовуватися інвертори для перетворення постійного струму в змінний і навпаки.

Вибір джерела живлення:

Вибір джерела живлення для ЕП залежить від кількох факторів:

- Призначення електропривода: визначає тип і характеристики джерела живлення. Для важких механізмів або обладнання з високими енергетичними вимогами обираються потужні мережеві джерела, тоді як для невеликих або мобільних пристроїв можуть використовуватися акумулятори або інші автономні джерела.

- Завдання технологічного процесу: тип виробництва і його автоматизація визначають вимоги до надійності та безперебійності живлення.

- Техніко-економічне обґрунтування: враховуються витрати на встановлення і експлуатацію джерела живлення, енергоефективність, а також надійність системи. Економічні аспекти враховують витрати на енергію, обслуговування та можливість використання альтернативних джерел [8].

Таким чином, правильний вибір джерела живлення є важливою складовою проектування та ефективної експлуатації електроприводів у сучасних автоматизованих виробничих системах.

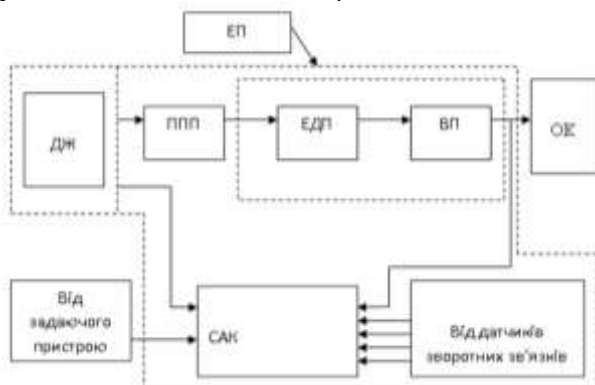


Рис. 2. Узагальнена функціональна схема побудови електропривода

Підсилювально-перетворювальний пристрій (ППП) є важливим елементом у структурі електропривода (ЕП), що забезпечує перетворення параметрів електричного струму і напруги для подачі живлення до електродвигуна відповідно до вимог технологічного процесу.

Основні функції ППП:

- Перетворення електричного струму і напруги:

- Перетворення змінного струму на постійний (випрямлячі).

- Перетворення постійного струму на змінний (інвертори).

- Перетворення змінного струму однієї частоти на змінний струм іншої частоти (частотні перетворювачі).

- Підвищення або зниження постійної напруги (імпульсні перетворювачі напруги).

Типи підсилювально-перетворювальних пристроїв:

- Транзисторні ППП: застосовуються для двигунів малої та середньої потужності, від мікровоат до кількох десятків кіловат. Вони забезпечують високоточне регулювання і мають високу швидкодію.

- Тиристорні та симісторні ППП: використовуються для двигунів великої потужності до 2000 кВт. Такі пристрої є ефективними в управлінні великими енергетичними потоками, часто застосовуються в промислових приводах.

Електродвигунний пристрій (ЕДП) [9]:

ЕДП перетворює електричну енергію в механічну для здійснення робочого руху, необхідного для керування об'єктом керування (ОК). Основне завдання ЕДП — це генерування механічних зусиль (крутного моменту або лінійного переміщення) для переміщення робочого органу відповідно до заданого закону керування.

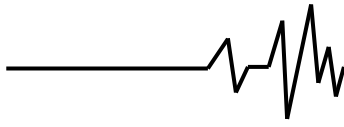
Типи електродвигунів у складі ЕДП:

1. Колекторні двигуни постійного струму: широко використовуються через можливість плавного регулювання швидкості і моменту, особливо в точних механізмах.

2. Безконтактні двигуни постійного струму: мають високу надійність і низький рівень зносу через відсутність колекторно-щіткового вузла.

3. Дво- і трифазні асинхронні двигуни (АД): є одними з найпоширеніших двигунів у промисловості, відзначаються простотою конструкції, надійністю і можливістю регулювання швидкості за допомогою частотних перетворювачів.

4. Синхронні двигуни з постійними магнітами: забезпечують високий ККД, точність керування і компактність, завдяки чому широко використовуються в системах автоматизації.



5. Реактивні двигуни: використовуються для специфічних застосувань, де потрібні високі значення крутного моменту.

6. Гістерезисні двигуни: відзначаються плавністю роботи і стабільністю швидкості, тому застосовуються в прецизійних системах.

7. Синхронні крокові двигуни: застосовуються там, де необхідне точне позиціонування, наприклад, у робототехніці і прецизійних приладах.

8. Лінійні двигуни: використовуються для створення лінійного руху, широко застосовуються у високоточних технологічних установках, наприклад, у транспортних системах або у виробництві.

Електромагнітні виконавчі пристрої (ВП)[9-10]:

Крім електродвигунів, в автоматизованих системах широко використовуються електромагнітні пристрої для здійснення механічної роботи:

- Електромагнітні муфти: забезпечують передачу крутного моменту на різних етапах технологічного процесу.

- Ходові електромагніти: використовуються для керування положенням і переміщенням робочих органів.

Підсилювально-перетворювальний пристрій у поєднанні з електродвигунним пристроєм є центральною частиною будь-якого електропривода, що дозволяє ефективно керувати рухом та продуктивністю об'єкта керування відповідно до заданих параметрів системи автоматизації.

Об'єкт керування (ОК) у контексті автоматизованого виробництва є ключовим компонентом, який безпосередньо взаємодіє з технологічним процесом і визначає кінцевий результат обробки або зміни заготовки. ОК представляє собою одиницю технологічного обладнання або систему, що здійснює конкретні функції у виробничому процесі, такі як обробка, контроль, транспортування або зберігання виробів.

Основні аспекти об'єкта керування:

1. Функції ОК:

- Обробка заготовки: включає різання, фрезерування, шліфування або інші види механічної обробки, що змінюють форму заготовки.

- Розмірний контроль: перевірка відповідності розмірів та геометрії заготовки або готового виробу до технічних вимог.

- Транспортування: переміщення заготовок або готових виробів між різними етапами технологічного процесу.

- Зберігання: зберігання заготовок або готових виробів у відповідних умовах до подальшого використання або відправки.

2. Складові частини ОК:

- Конструктивний модуль: це фізичний компонент або система, що забезпечує основні функції ОК. Може включати верстати, маніпулятори, автоматичні пристрої зміни інструмента, нагромаджувачі і т.д.

- Пружна система (ПС) ОК: сукупність усіх вузлів і механізмів, які складають корпусну нерухому частину та несучу систему, а також виконавчі механізми приводів.

- Корпусна частина: забезпечує механічну стійкість і підтримку для всіх рухомих частин і механізмів.

- Виконавчі механізми (ВМ): безпосередньо забезпечують переміщення робочих органів (наприклад, ріжучого інструмента) та впливають на точність і ефективність обробки.

3. Динамічні властивості ПС ОК:

- Динамічні характеристики ПС, такі як жорсткість, маса, та інерція, мають суттєвий вплив на точність і стабільність роботи електропривода.

- Вони визначають, як швидко і точно можуть бути здійснені необхідні переміщення робочих органів, що впливає на кінцеві характеристики виготовлених виробів.

Типи ОК у автоматизованих системах:

- Верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ): забезпечують точне позиціонування та обробку заготовок з високою продуктивністю.

- Автоматичні пристрої зміни інструмента: використовуються для автоматичної заміни інструментів у процесі обробки.

- Автоматичні нагромаджувачі: забезпечують зберігання і подачу заготовок або виробів у процесі виробництва.

- Системи маніпулювання: включають промислові роботи, які здійснюють автоматичне переміщення, маніпуляцію або обробку деталей.

Взаємодія з електроприводом:

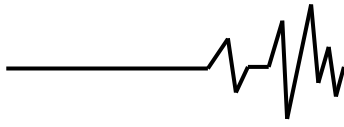
- Електропривод відповідає за точне і ефективне керування рухом або обробкою, забезпечуючи необхідні параметри (швидкість, момент, точність) для функціонування ОК.

- Інтеграція з системою автоматичного керування дозволяє забезпечити узгодженість між рухомими частинами ОК і електроприводом, що покращує загальну продуктивність і точність технологічного процесу.

Загалом, правильне проектування і налаштування ОК та його взаємодії з електроприводом і системою автоматичного керування є критичними для досягнення високої продуктивності, якості і надійності в автоматизованому виробництві.

Загальні принципи та структурна побудова систем керування ЕП [10].

Загальні принципи побудови систем керування електроприводами полягають у виявленні відхилень регульованих параметрів від заданих значень та формуванні керуючих впливів



для усунення цих відхилень. Змінна величина, яку необхідно утримувати на постійному рівні або змінювати згідно з заданим законом, називається керованою величиною (або координатою). Задане значення цієї величини називається опорним, а фактичне — поточним. Відхилення між ними визначається як різниця, або сигнал помилки.

Автоматичний регулятор, або динамічна система, — це сукупність пристроїв, що впливають на об'єкт керування і підтримують поточне значення керованої величини на рівні, близькому до заданого. Керуючий вплив, який застосовується регулятором для наближення поточного значення до опорного або для додання системі необхідних властивостей, відбувається через канал керування — сукупність пристроїв і середовищ, через які цей вплив реалізується.

Керування, яке здійснює регулятор, полягає в зміні заданого значення керованої величини або у виникненні відхилень нерегульованих параметрів, що впливають на керовану величину через зворотні зв'язки. Внутрішнім задаючим впливом називається зміна заданого значення керованої величини, а зовнішнім збуренням — зміна нерегульованих параметрів.

Принцип керування за відхиленням полягає в порівнянні поточного значення керованої величини з її заданим значенням. Це призводить до виникнення сигналу помилки Δ , який використовується для створення коригуючого впливу на об'єкт керування, щоб утримати відхилення в межах допустимих значень незалежно від його причин.

Функціональна схема автоматичної системи керування, що працює за цим принципом, складається з таких елементів:

- РО — регулюючий орган;
- ОК — об'єкт керування;
- Д — датчик;
- ЗП — задавальний пристрій;
- КП — керуючий пристрій (регулятор);
- ВМ — виконавчий механізм;
- Х — вхідний сигнал регулюючого органу;
- Y1 — опорне (задане) значення;
- Y2 — регульована величина (вихідна координата);

$\Delta = K_p (Y_2 - Y_1)$ — сигнал помилки;

U — керуючий сигнал;

K_p — коефіцієнт передачі датчика та задавального пристрою.

Ця схема працює таким чином, що сигнал помилки формує керуючий вплив, який зменшує відхилення керованої величини від її заданого значення.

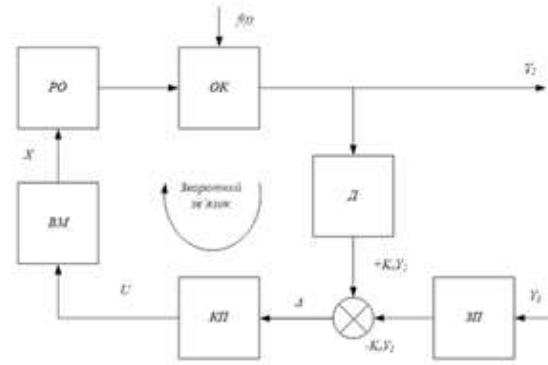


Рис. 3. Функціональна схема САК із зворотним зв'язком

Принцип керування за збуренням передбачає підтримання заданого значення регульованої величини без необхідності порівняння її поточного і заданого значень. Замість цього вимірюється збурюючий вплив, і на основі його величини формується керуючий вплив таким чином, щоб регульована величина залишалася в межах заданих значень. Точність такого регулювання залежить від того, наскільки точно описана залежність регульованої величини від збурювань та керуючих впливів, а також від стабільності характеристик елементів системи з часом.

У випадку використання комбінованого принципу керування, основні збурення компенсуються системою керування за збуренням, тоді як всі внутрішні та зовнішні, не враховані збурення, компенсуються системою керування за відхиленням [8-10].

Системи керування можна поділити на кілька типів залежно від керуючого впливу:

- Системи автоматичної стабілізації, які підтримують керовану величину на постійному рівні;
- Системи програмного регулювання, що змінюють керовану величину відповідно до заданого закону;
- Системи стеження, де задане значення керованої величини змінюється довільно у часі.

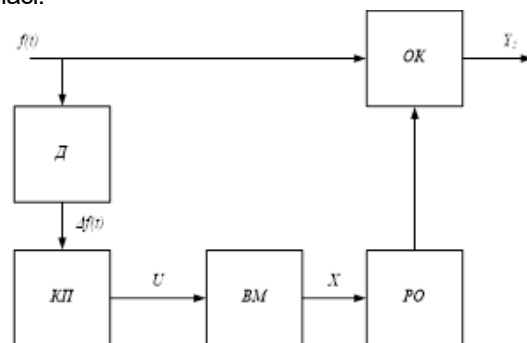
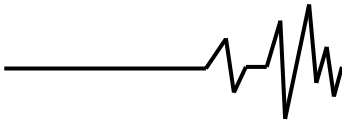


Рис. 4. Функціональна схема САК із принципом регулювання за збуренням



У загальному випадку на вхід керуючого пристрою подається сигнал похибки Δ , а з виходу знімається сигнал U , що керує виконавчим механізмом. У лінійних неперервних керуючих пристроях між величинами Δ і U існує лінійна залежність, вигляд якої визначає закон керування.

Нелінійні (релейні) системи керування отримали широке застосування завдяки своїй простоті. Вони працюють за принципом перемикачів між двома станами (вмикання/вимикання), що дозволяє досягти простого, але ефективного керування.

У разі великої інерційності об'єкта використовують імпульсні системи керування. Відмінною рисою таких систем є те, що регулюючий орган впливає на об'єкт імпульсами, а зворотний зв'язок між ними відключається. Частота імпульсів обирається з міркувань оптимальної керованості об'єкта, а їх амплітуда або ширина змінюється пропорційно відхиленню регульованої величини.

Оптимальні системи керування спрямовані на досягнення найкращих режимів роботи об'єкта керування, і вони також знаходять широке застосування. Мета керування формулюється у вигляді функціонала (критерію оптимальності), а завдання системи полягає у відшукуванні оптимального закону зміни керуючого впливу, який мінімізує або максимізує функціонал при дотриманні заданих обмежень.

Окремий клас складають адаптивні системи, що працюють в умовах неповної апріорної інформації про об'єкт керування. Основним завданням таких систем є пошук режиму роботи, який відповідає заданим умовам, забезпечуючи стабільне керування в мінливих умовах.

До цього класу систем відносяться [9-10]:

- Екстремальні системи керування, які мають особливість у тому, що залежність показника якості процесу від керуючого впливу має екстремум (максимум або мінімум). Цей екстремум відповідає оптимальному режиму роботи об'єкта. Завданням таких систем є забезпечення найкращого статичного режиму роботи, відповідно до показника якості.

- Самоналагоджувані системи керування, які здатні автоматично змінювати свої параметри та структуру в залежності від змін у зовнішньому середовищі. Вони самостійно адаптуються до змінних умов для досягнення ефективного керування.

- Системи керування, що самонавчаються, до яких належать нейромережні системи. Вони мають здатність накопичувати інформацію, узагальнювати її, робити висновки та самостійно вибирати стратегію керування. Нейромережні системи побудовані за аналогією з людським мозком і складаються з безлічі елементарних елементів (нейронів), з'єднаних між

собою інформаційними каналами. Кінцева мета таких систем — створення електроприводів з елементами штучного інтелекту.

Останнім часом все ширше застосовуються нечіткі системи керування, які дозволяють використовувати лінгвістичні експертні оцінки. Це робить можливим керування складними технологічними об'єктами, для яких немає формалізованого опису або де вимірювання ключових технологічних параметрів є неможливим.

Під керуванням в електроприводі в контексті агропромислового комплексу розуміється організація перетворення електричної енергії в механічну так, щоб забезпечити необхідний закон зміни регульованих координат у часі та реалізувати алгоритм функціонування електропривода (ЕП) в технологічних установках аграрного виробництва.

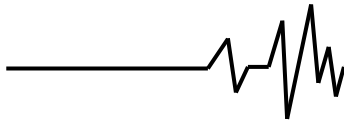
Процес керування в цьому випадку полягає у формуванні керуючих впливів на об'єкт керування, що дозволяє досягти бажаного закону зміни вихідних регульованих координат, наприклад, в системах поливу, обробки ґрунту чи обробки врожаю[9]. Пристрій керування (ПК) визначається як сукупність технічних засобів, які забезпечують цей процес, включаючи датчики для моніторингу стану рослин або ґрунту, регулятори для налаштування роботи обладнання, виконуючі механізми та інформаційні технології.

Для ефективного керування об'єктами в агропромислових системах необхідна інформація, що охоплює:

- Перелік можливих станів об'єкта, наприклад, стану рослин, вологості ґрунту тощо.
- Перелік вхідних параметрів об'єкта та діапазони їх зміни.
- Допустимі керуючі впливи, як-от обсяги поливу чи час обробки.
- Характер збурень, які можуть виникати через погодні умови або шкідників.
- Мету керування об'єктом, яка може включати підвищення врожайності або зменшення витрат ресурсів.

На основі цієї інформації, для досягнення цілей керування, розробляються алгоритми та засоби, які трансформують вхідні дані об'єкта в потрібні керуючі впливи, а також перетворюють мету керування в послідовність станів об'єкта.

Алгоритм керування можна розглядати як набір чітко визначених правил, які описують процес перетворення вихідних даних у вихідні сигнали в керуючому пристрої з метою формування керуючого впливу на об'єкт керування (ОК). Об'єктом керування в агропромисловому комплексі є сукупність елементів, які входять до складу силового каналу електропривода: електричні та електромеханічні компоненти, механічні перетворювачі та робочі органи машин, що функціонують у рамках аграрних процесів.



Для реалізації алгоритму керування в агропромисловому комплексі використовуються різноманітні пристрої керування, в яких активно застосовуються цифрові, аналогові та гібридні інтегральні мікросхеми, а також мікропроцесорні пристрої. Важливо зазначити, що інформація в таких системах може передаватися та перетворюватися як у вигляді цифрових кодів, так і у формі аналогових (неперервних) сигналів.

При практичному проектуванні систем керування завжди постає задача вибору способу реалізації електронного пристрою, з урахуванням таких факторів [5-8]:

- Виду сигналів, які використовуються для задаючого та керуючого впливу, а також вихідного сигналу вимірювального пристрою, що передає інформацію про керувану величину.
- Операцій, необхідних для формування сигналів задаючого та керуючого впливу.
- Способу задання та підстроювання параметрів передатної функції керуючого пристрою.
- Розміру допустимої похибки керування в установленому режимі та похибки відтворення динамічних характеристик процесу керування.

Системи формування сигналів у цифрових і аналогових пристроях керуючої частини, а також комплекс вимірювальних пристроїв зазвичай є змінними компонентами системи і містять взаємодіючі канали для перетворення всіх видів інформації. Багато об'єктів керування (ОК) в агропромисловому комплексі можуть включати кілька взаємопов'язаних електроприводів, що утворює складну єдину технологічну систему (ТС). Керування в таких системах може здійснюватися за однією основною регульованою координатою (одновимірна система) або за кількома координатами (багатовимірна система).

У загальному випадку пристрій керування забезпечує прийом команд (таких як запуск, регулювання процесу) і встановлення вихідних координат, які називаються задаючими впливами. Ці впливи можуть надходити від системи керування вищого рівня або від людини-оператора. Якщо всі функції керування

виконуються автоматично без участі людини, то таке керування називається автоматичним, а електропривод із таким керуючим пристроєм — автоматизованим.

Система керування електропривода (СКЕ) складається з елементів інформаційного каналу, які беруть участь у процесі керування. Вона включає пристрій керування, пристрій для введення команд оператора, пристрій для виведення інформації про стан привода та технологічного процесу, інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і схеми зв'язку (інтерфейси) між пристроєм керування та іншими компонентами.

Узагальнено, інформаційно-вимірювальна система СКЕ містить: датчики параметрів мережі (напруги, частоти тощо); датчики електричних змінних на входах і виходах електричних перетворювачів (напруга, струм, потужність); датчики електричних і електромагнітних величин, які характеризують стан електромеханічного перетворювача. До комплектуючих ІВС також входять датчики механічних змінних на валу двигуна або робочого органу (швидкість, положення, прискорення, момент, зусилля) та датчики параметрів технологічного процесу (температура, тиск, витрата тощо). Ці компоненти забезпечують первинну інформацію про поточний стан електромеханічної системи в цілому.

Первинні перетворювачі, які визначають положення об'єкта керування, можуть мати різну природу, наприклад [10]:

Оберткові трансформатори з пристроєм виділення зміщення фаз або фотоелектричні перетворювачі.

Індуктосинусні перетворювачі зі скануючими головками, на яких нанесені друковані обмотки.

У цифрових слідкуючих електроприводах вихідні сигнали датчиків можуть бути перетворені в коди, імпульси (двійковий код) та дискретні сигнали кінцевих вимикачів, релейних датчиків температури й тиску, об'єднані в групи та підключені до різних ліній паралельних портів для введення з одночасним запитом до мікропроцесорної системи.

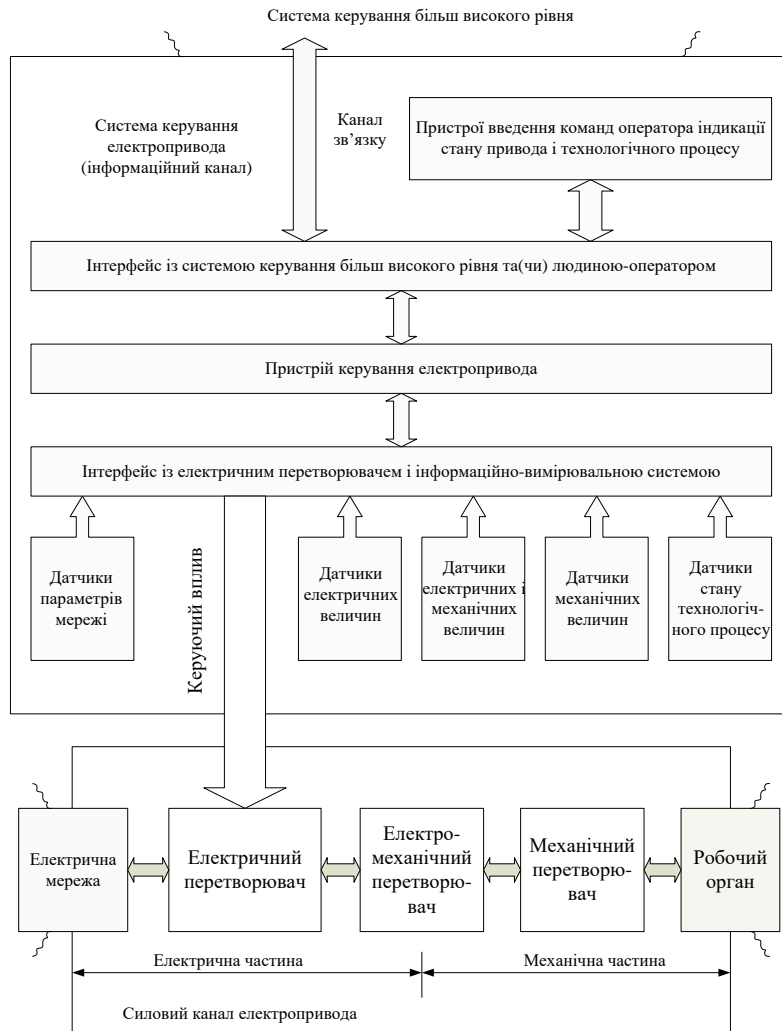
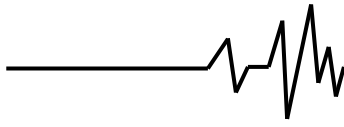


Рис. 5. Система керування електродвиговою

Висновки. Методи керування електродвиговими для агропромислового комплексу мають низку специфічних особливостей, обумовлених вимогами до ефективності, надійності та автоматизації сільськогосподарських процесів. Однією з ключових характеристик є автоматизація процесів, яка підвищує продуктивність, дозволяючи працювати без постійного втручання людини. Це забезпечується за допомогою систем зворотного зв'язку, що використовують сенсори і датчики для автоматичного регулювання параметрів роботи відповідно до змін умов, таких як вологість, температура чи кількість продукції.

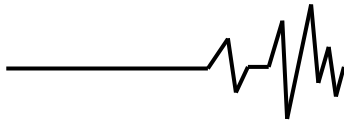
Регулювання швидкості є ще одним важливим аспектом, оскільки різні процеси вимагають різних режимів роботи. Для цього використовують частотні перетворювачі і регулятори напруги, які дозволяють плавно і точно змінювати швидкість роботи електродвиговою. Один із найпоширеніших методів регулювання швидкості – це широтно-імпульсна модуляція (ШИМ), яка дозволяє плавно змінювати частоту і

напругу для досягнення необхідної швидкості та плавності руху.

Також важливим є керування крутним моментом, що особливо актуально при роботі з важкими або неоднорідними матеріалами. Для цього використовуються методи керування моментом із застосуванням частотних перетворювачів або прямого керування моментом (DTC), що дозволяє адаптувати електродвигову до зміни навантаження і запобігти перегріву або перевантаженню обладнання.

Програмовані логічні контролери (PLC) активно використовуються для складних сільськогосподарських процесів, таких як збирання врожаю, обробка зерна, транспортування і сортування продукції. Вони забезпечують гнучке і надійне керування, дозволяючи інтегрувати різні датчики та механізми в єдину систему. PLC можуть виконувати складні алгоритми і підтримувати різні режими роботи, що дозволяє оптимізувати процеси залежно від умов.

Сучасні інтелектуальні системи керування, зокрема з використанням штучного інтелекту і машинного навчання, дозволяють автоматизувати



процеси на основі аналізу даних і прогнозувати потреби у ресурсах, підвищуючи ефективність використання енергії та знижуючи ризики поломок. Такі системи можуть автоматично коригувати параметри роботи електроприводів у відповідь на зміну зовнішніх умов.

Дистанційне керування і моніторинг стають важливою частиною сучасних методів керування в сільському господарстві. Використання інтернету і систем SCADA дозволяє операторам контролювати роботу техніки в реальному часі, а також дистанційно керувати обладнанням. Мобільні додатки і хмарні сервіси спрощують отримання оперативної інформації та керування процесами з будь-якої точки.

Особливу увагу приділяють захисту електроприводів від перевантажень, коротких замикань, перегріву та інших аварійних ситуацій. Вбудовані захисні схеми і алгоритми дозволяють автоматично вимикати приводи при небезпечних умовах, а функції самодіагностики допомагають виявляти потенційні несправності на ранніх етапах. Методи керування електроприводами орієнтовані на підвищення ефективності та автоматизацію, забезпечуючи точне регулювання процесів і зменшення витрат на енергію та технічне обслуговування.

Список використаних джерел

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. За редакцією М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка”. К.: Либідь, 2005. 680 с.
2. Возняк О. М., Видмиш А. А., Штуць А. А.. Дослідження графоаналітичного методу визначення стандартних W-параметрів чотириполюсника. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*.-2019.-№ 4 (107).-С. 67-78. 2019.
3. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (Теорія і практика). М.Г.Попович, В.І. Кострицький та ін. Навч. посібник з грифом МОН України. К.: КНУТД . 2008. 408 с.
4. Возняк О. М., Штуць А. А., В. К. Тихонов. Дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробка пристрою плавного пуску. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*.№ 3: 133. 2022.
5. Розробка та дослідження електромеханічних систем автоматизації та складових електропривода. М.Г.Попович, В.І.Кострицький та ін. Навчальний посібник з грифом МОН України. К: КНУТД , 2011. 492 с.
6. Бондаренко В.І. Основи електропривода: Навчальний посібник.

В.І.Бондаренко, Ю.О.Крисан. Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. 402 с.

7. Richard Crowder. *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control* / Richard Crowder. Newnes, Published Date: 2006. 312 p.

8. Видмиш, А. А., С. М. Бабій, В. В. Петрусь. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів. 2012.

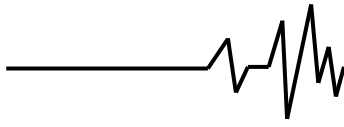
9. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 146 с.

10. Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А.. Теоретичні основи електротехніки. Вінниця: ВНАУ (2017).

11. Ярошенко Л.В. Вібраційні технологічні машини із вертикальним приводним валом: монографія. Вінниця: ТВОРИ, 2023. 280 с. ISBN 978-617-552-252-3.

References

1. Popovych, M. H., & Lozynskyi, O. Yu. (Eds.). (2005). *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropryvody*. Kyiv: Lybid. [in Ukrainian]
2. Vozniak, O. M., Vydmysh, A. A., & Shtuts, A. A. (2019). Doslidzhennia hrafoanalychnoho metoda vyznachennia standartnykh W-parametriv chotyrypoliusnyka. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 4(107), 67-78. [in Ukrainian]
3. Popovych, M. H., Kostytskyi, V. I., et al. (2008). *Elektromekhanichni systemy avtomatyzatsii ta elektropryvid (Teoriia i praktyka)*. Kyiv: KNUITD. [in Ukrainian]
4. Vozniak, O. M., Shtuts, A. A., & Tykhonov, V. K. (2022). Doslidzhennia puskovykh rezhymiv asynkhronnykh dyvuhuniv ta rozrobka prystroiu pлавного pуску. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3, 133. [in Ukrainian]
5. Popovych, M. H., Kostytskyi, V. I., et al. (2011). *Rozrobka ta doslidzhennia elektromekhanichnykh system avtomatyzatsii ta skladovykh elektropryvody*. Kyiv: KNUITD. [in Ukrainian]
6. Bondarenko, V. I., & Krysan, Yu. O. (2013). *Osnovy elektropryvody*. Zaporizhzhia: ZNTU. [in Ukrainian]
7. Crowder, R. (2006). *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*. Newnes. [in Poland]
8. Vydmysh, A. A., Babii, S. M., & Petrus, V. V. (2012). *Teoriia elektropryvody. Kursove ta dyplomne proektuvannia. Samostiina ta indyvidualna robota studentiv*. [in Ukrainian]
9. Hrabko, V. V., Kucheruk, V. Yu., & Vozniak, O. M. (2009). *Mikroprotsesorni systemy*



keruvannia elektropyvodamy. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian]

10. Vydmysh, A. A., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2017). *Teoretychni osnovy elektrotekhnyky*. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian]

11. Yaroshenko L.V. *Vibrating technological machines with a vertical drive shaft: monograph*. Vinnytsia: TVORY, 2023. 280 p. ISBN 978-617-552-252-3. [in Ukrainian]

ANALYTICAL REVIEW OF THE METHODS AND MEANS OF CONTROLLING ELECTRIC DRIVES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF APC

Control of electric drives in electromechanical systems of the agro-industrial complex (APC) is a critical factor in increasing the efficiency and reliability of technological processes that directly affect the productivity of agricultural production. In connection with the introduction of the latest technologies, the growth of product quality requirements and the need to automate processes, modern agricultural technologies require the improvement of electric drive control methods. The relevance of this topic is due to the need to optimize management processes in the agricultural sector to increase productivity, reduce energy consumption, and increase system reliability.

The review examines classical and modern approaches to the control of electric drives. Traditional proportional, integral and differential methods ensure the stability of systems and minimize errors, adapting

to the conditions of agricultural production. An important role is played by feedback systems that automatically adjust the operating parameters of electric drives in response to changes in external factors. Fuzzy management systems are also an important part, allowing decisions to be made based on expert judgments in cases where accurate data is difficult to obtain. Adaptive management systems capable of changing their parameters in conditions of variability are considered separately, which is especially important in the agricultural sector with its changing conditions.

The article also highlights modern intelligent control systems using artificial intelligence, machine learning and remote monitoring, which allow analyzing large volumes of data, predicting resource needs and increasing energy efficiency. Internet-based systems such as SCADA provide operators with the ability to remotely monitor and control equipment in real time, an essential element of modern agricultural production.

In conclusion, the control of electric drives in agriculture is aimed at automating and increasing the efficiency of production processes, optimizing the use of energy resources and ensuring the safety of the systems, which makes them an integral part of modern agricultural technologies.

Keywords: *electric drive, agro-industrial complex, automation, energy efficiency, feedback systems, adaptive systems, process optimization.*

Відомості про авторів

Возняк Олександр Миколайович – к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Ярошенко Леонід Вікторович кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Луц Павло Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

Тихоненко Сергій Володимирович – аспірант першого року навчання Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Vozniak Oleksandr - Ph.D., Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine).

Yaroshenko Leonid candidate of technical sciences, associate professor of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa national agrarian university, Service address: Vinnitsa, st. Sonyachna 3, VNAU 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Luts Pavlo – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of machines and equipment of agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Sonyachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: luts@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>).

Tikhonenko Serhiy - first-year graduate student of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine).