**Стаднік М.І.**

д.т.н., доцент

Штуць А.А.

к.т.н. доцент

Колісник М.А.

д.ф. ст. викладач

Григоренко Н.В.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Stadnik M.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Shtuts A.**

Ph.D., Associate Professor

Kolisnyk M.

Ph.D., Senior Lecturer

Hryhorenko N.

postgraduate

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 629.8:621.3:004.8:621.3.015****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-6****ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАТРОННИХ ТА
РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИМИ МАШИНАМИ В
ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЯХ**

У статті досліджено можливість підвищення ефективності та надійності роботи дифузійного апарата цукрового заводу шляхом модернізації електроприводу на основі мехатронного підходу. Проведено аналіз існуючих систем, у яких застосовуються двигуни постійного струму, що характеризуються складністю технічного обслуговування, високими експлуатаційними витратами та обмеженою довговічністю. Для усунення цих недоліків запропоновано заміну двигуна постійного струму на асинхронний двигун змінного струму з короткозамкненим ротором і частотним регулюванням. Такий підхід дозволяє створити енергоефективну мехатронну систему електроприводу з можливістю адаптивного та інтелектуального керування технологічним процесом.

У роботі розроблено структуру мехатронного комплексу, який поєднує електромеханічний модуль, контролер, сенсорні елементи та модуль штучного інтелекту, що реалізує принципи самодіагностики та оптимізації режимів роботи. Застосування алгоритмів частотного керування типу $U/f = \text{const}$ забезпечує плавну зміну швидкості в діапазоні 0,4–1,2 об/хв при збереженні необхідного моменту на валу двигуна потужністю 90 кВт. Використання цифрових систем моніторингу дозволяє оперативно контролювати параметри електроприводу, виявляти відхилення у роботі та прогнозувати технічний стан обладнання.

Результати моделювання показали, що коефіцієнт регулювання швидкості становить 4,57, що повністю відповідає технологічним вимогам дифузійного процесу. Енерговитрати знижуються на 12–15 %, а рівень надійності системи підвищується завдяки усуненню вузлів, що зношуються (щітково-колекторного механізму). Мехатронний підхід забезпечує інтеграцію апаратних і програмних засобів в єдину систему, що дозволяє реалізувати концепцію «інтелектуального виробництва».

Отримані результати можуть бути використані для модернізації електроприводів інших технологічних агрегатів харчової промисловості, де потрібне точне регулювання швидкості, моменту і навантаження. Запропоноване рішення є важливим етапом переходу до мехатронних та робототехнічних систем нового покоління, орієнтованих на концепцію «Індустрія 4.0».

Ключові слова: мехатронна система, інтелектуальне керування, асинхронний електродвигун, частотне регулювання, дифузійний апарат, енергоефективність, цукрове виробництво.



Постановка проблеми. На даний момент у системі електроприводу дифузійного апарата цукрового виробництва застосовуються двигуни постійного струму, які, незважаючи на свою історичну поширеність, мають суттєві недоліки, що істотно впливають на ефективність, надійність і економічність роботи обладнання. Головною проблемою є значні експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговуванням та ремонтом таких двигунів. Це зумовлено складністю їх конструкції, наявністю колекторно-щіткового вузла, підвищеним зношуванням контактних елементів, і, як наслідок, частими простоями технологічного обладнання через необхідність технічного обслуговування [1, 2, 5].

Дифузійні апарати є одним із ключових агрегатів у технологічному циклі виробництва цукру, оскільки саме на цьому етапі відбувається вилучення сахарози з бурякової стружки. Стабільність та рівномірність процесу дифузії безпосередньо залежать від якості регулювання електроприводу, який забезпечує обертання шнека або барабана. Наявні електроприводи постійного струму характеризуються обмеженим діапазоном регулювання швидкості, низьким коефіцієнтом корисної дії при змінних навантаженнях і відносно невисокою стабільністю частоти обертання. У результаті це призводить до зниження рівномірності подачі бурякової стружки, коливань у температурному та концентраційному режимах процесу, а також до зниження якості кінцевого продукту.

Окрім цього, моральне та фізичне старіння обладнання призводить до зростання кількості відмов, підвищення енергоспоживання та зниження загальної ефективності виробництва. Через використання застарілих систем керування електроприводами виникають труднощі з точним підтриманням технологічних параметрів, що вимагає постійного втручання обслуговуючого персоналу. Це не лише збільшує трудомісткість процесу, але й створює ризики помилок оператора, які можуть спричинити порушення режиму дифузії [7, 8, 9].

Сучасні тенденції розвитку енергетики, електротехніки та автоматизації виробничих процесів вимагають переходу на більш надійні, енергоефективні та екологічні рішення. Зокрема, широкого поширення набули асинхронні двигуни з частотно-регульованими електроприводами, які завдяки відсутності колекторно-щіткового вузла, високій надійності та можливості плавного регулювання швидкості обертання ротора дозволяють досягати значного підвищення енергоефективності. Використання сучасних перетворювачів частоти забезпечує точне дотримання

технологічних параметрів, мінімізує втрати електроенергії та підвищує стабільність процесів.

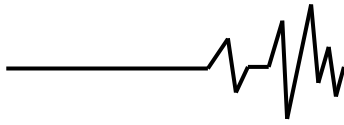
Однак перехід від систем постійного струму до асинхронних електроприводів вимагає ретельного технічного обґрунтування. Необхідно враховувати динамічні особливості роботи дифузійного апарата, інерційність механічної системи, характер навантаження, а також вимоги до плавності пуску, гальмування й стабільності швидкості. Без належного розрахунку параметрів електродвигуна, вибору оптимальної системи керування та алгоритмів регулювання неможливо забезпечити ефективну заміну існуючих приводів без шкоди для технологічного процесу.

Таким чином, постає науково-технічна проблема, що полягає у розробці енергоефективного, надійного та автоматизованого електроприводу для дифузійного апарата на базі асинхронного двигуна з частотним регулюванням. Це дозволить зменшити експлуатаційні витрати, підвищити стабільність технологічного процесу та знизити рівень енергоспоживання виробництва. Вирішення цієї проблеми сприятиме модернізації цукрових заводів, підвищенню їх конкурентоспроможності та відповідності сучасним вимогам енергоощадності й автоматизації промислових процесів.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від застарілих систем електроприводу постійного струму до сучасних асинхронних систем з частотним регулюванням, що забезпечують надійність, точність керування, зниження енергозатрат і підвищення технологічної ефективності дифузійного процесу [1, 2, 3].

Мета дослідження. Метою даної роботи є підвищення техніко-економічних показників та надійності колонної дифузійної установки (КДУ) цукрового заводу шляхом впровадження асинхронних електродвигунів змінного струму в мехатронний електропривод. Особлива увага приділяється інтелектуалізації системи керування через використання адаптивних алгоритмів, датчиків IoT, робототехнічних елементів та автоматизованого моніторингу параметрів процесу дифузії, що дозволяє оптимізувати швидкість і якість екстракції соку, знизити енергоспоживання та експлуатаційні витрати, а також підвищити надійність та безпеку роботи обладнання.

Виклад основного матеріалу. Процес отримання соку дифузійним методом ґрунтується на протиточному витяганні цукру з нарізаної стружки цукрового буряку за допомогою гарячої води. У цьому процесі



цукроза та частина нецукрів поступово переходять у воду, що призводить до зниження їх вмісту в стружці та одночасного збільшення концентрації у витяжному розчині [1,2].

Дифузія цукру відбувається у бурякопереробному відділенні цукрового заводу, де основним обладнанням є дифузійний апарат. Найбільш поширеними є апарати похилого типу.

При аналізі дифузійного апарату та його допоміжних агрегатів були виділені ключові характеристики та параметри, необхідні для його оптимальної роботи:

- повне проходження стружки вздовж апарату триває 70–80 хвилин;
- мінімальна швидкість обертання апарату становить 0,4 об/хв, максимальна – 1,2 об/хв;
- температура всередині апарату – 58–74 °C;
- швидкість обертання двигуна – 1470 об/хв;
- середня споживана двигуном потужність – близько 90 кВт.

Для регулювання швидкості обертання апарату в діапазоні 0,4–1,2 об/хв застосовується механічний редуктор із понижувальним передаточним числом 1:250. Мінімальна швидкість обертання валу двигуна постійного струму при цьому зберігає його механічні характеристики. Зазвичай максимальна швидкість обертання двигуна в системі привода дифузії обмежується 1500 об/хв.

Продуктивність дифузійного апарату залежить від питомого навантаження та швидкості переміщення стружки і складає близько 2,5 тис. тонн стружки на добу. На сучасних цукрових заводах для привода апаратів здебільшого використовуються електродвигуни постійного струму, які мають перевагу у відносно простому регулюванні частоти обертання [1, 2, 3].

Проте існуючі електроприводи постійного струму мають низку недоліків:

- низький ступінь захисту електродвигуна;
 - обмежена заводостійкість;
 - великі габарити;
 - складність налаштування;
 - нестабільність параметрів;
 - необхідність регулярного технічного обслуговування;
 - середній рівень надійності.
- Ці недоліки обумовлені двома основними факторами:

1. Низький ступінь захисту двигунів постійного струму, що експлуатуються у важких кліматичних умовах із наявністю агресивних

середовищ (пари аміаку, сірки), що призводить до їх прискореного зносу та передчасного виходу з ладу.

2. Використання тиристорних перетворювачів, які не відповідають сучасним вимогам щодо якості та надійності.

- Асинхронні електродвигуни є найбільш розповсюдженими у промисловості. Їхні основні переваги включають:

- простоту конструкції та експлуатації;
- високу надійність та відносну легкість ремонту;
- меншу масу, габарити та вартість.

- У системах електроприводу робочих машин найчастіше застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серій 4А, 4АМ та АИ. Вони мають наступні граничні номінальні параметри:

- номінальна потужність при напругах 220, 380, 660 В – від 0,025 до 400 кВт;

- при напругах 6–10 кВ – від 500 до 8000 кВт.

- синхронні частоти обертання: 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000 об/хв.

Ці двигуни знайшли застосування у всіх галузях господарства. Частота обертання ротора асинхронного двигуна визначається, як відомо, виразом:

$$n = 60f(1 - s)/p \quad (1)$$

f - частота напруги живлення, Гц

s - ковзання,

p - число пар полюсів,

З цього випливає, що частоту обертання асинхронних двигунів можна регулювати шляхом зміни будь-якої з трьох величин: ковзання, частоти струму в статорі або кількості пар полюсів в обмотці статора [5, 6, 8].

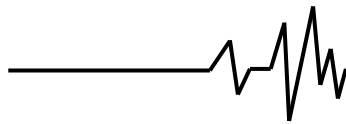
Сучасний розвиток силової перетворювальної техніки дозволив створення та серійне виробництво різних типів напівпровідникових перетворювачів частоти. Це сприяло стрімкому розвитку і широкому застосуванню частотно-регульованих асинхронних електроприводів.

Основними перевагами таких систем регульованого електроприводу є:

- плавність регулювання та висока жорсткість механічних характеристик, що забезпечує точне підтримання швидкості у широкому діапазоні;

- економічність регулювання, обумовлена тим, що двигун працює з малими величинами абсолютного ковзання, а втрати в ньому не перевищують номінальні значення.

Розглянемо можливість використання асинхронного двигуна з короткозамкненим



ротором у складі приводу з такими параметрами:

- потужність – 90 кВт;
- швидкість обертання – 1500 об/хв;
- діапазон регулювання швидкості – від 0,4 до 1,2 об/хв.

Механічні характеристики такого двигуна забезпечують стабільну роботу при частотно-регульованому приводі, а схема заміщення фази двигуна при частотному керуванні представлена на рисунку 1 [5, 6].

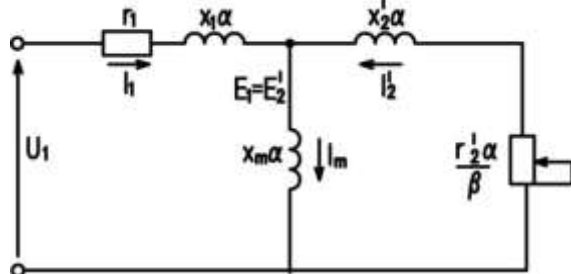


Рис. 1. Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному управлінні

Відносна частота статора - відношення частоти струму статора до її номінального значення $f_{1н}$.

$$\alpha = f_1 / f_{1н} \quad (2)$$

Параметр абсолютного ковзання, або відносна частота ротора - відношення абсолютного ковзання $\Delta\omega$ до синхронної швидкості при номінальній частоті

$$\beta = \Delta\omega / \omega_{1н} = f_2 / f_{1н} \quad (3)$$

Параметр β використовується замість ковзання S та зв'язаний з (1.2) ним відношенням

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = f_2 f_{1н} / f_1 f_{1н} = \beta / \alpha \quad (4)$$

Коефіцієнт розсіювання відповідно для статора і ротора:

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m} \quad (5)$$

$$\tau_2 = \frac{x_2'}{x_m} \quad (6)$$

Загальний коефіцієнт розсіювання:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad (7)$$

Крім того, з ціллю спрощення формул введені слідуочі позначення:

$$b = r_1(1 + \tau_2), \quad (8)$$

$$c = x_m \tau, \quad (9)$$

$$d = r_1 / x_m, \quad (10)$$

Електрична енергія ε_I зі значеннями U і f перетворюється в механічний обертовий

рух, характеризується моментом $M_{дi}$ і кутовою частотою обертання $\omega_{дi}$. Залежність вихідних параметрів модулів $ПЕВ_i$ від вхідних описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} M_{дi} = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_{1н}} \frac{r_2' \beta}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2' \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2'^2} \\ \omega_{дi} = f_1 \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

З використанням [5, 6, 8] виразів системи 10, побудовані механічні характеристики двигуна, представлені на рисунку 2.

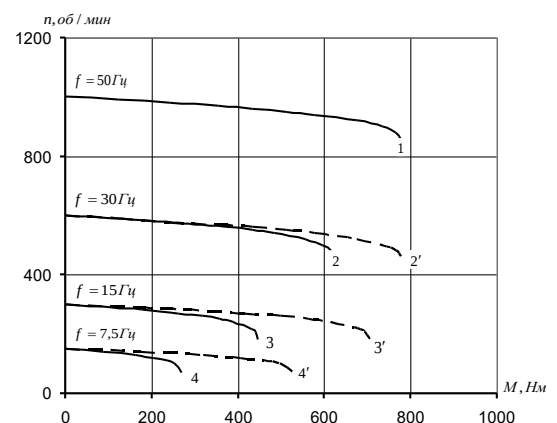


Рис. 2. Механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні

1, 2, 3, 4 - для закону регулювання $U / f = const$; 1', 2', 3', 4' - для закону регулювання, що забезпечує збільшення навантажувальної здатності двигуна.

Щоб порахувати максимальний момент та реалізовану перевантажувальну здатність приводу використовуємо формулу:

$$M_{\max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_{1н}} \frac{1}{r_1 \alpha \pm \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}, \quad (12)$$

Розглянемо діапазон регулювання швидкості

Стійкий момент приводу може розраховуватися за формулою:

$$M_y(\alpha) = \frac{M_k(\alpha)}{1 + 3\nu_c} \quad (13)$$

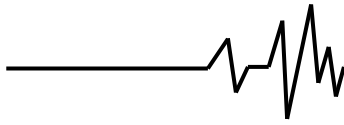
де $M_k(\alpha)$ = критичний момент електродвигуна;

$\alpha = f_1 / f_{1н}$ - відносна частота напруги (струму) статора;

f_1 - частота напруги (струму) статора;

$f_{1н} = 50$ Гц.

В роботі [1] пропонується формула для визначення значень критичного моменту асинхронного електродвигуна на будь-який штучної характеристики:



$$M_{\kappa d}(\alpha) = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{нф}}^2 \cdot \gamma^2}{2 \cdot \omega_{1\text{ном}}} \cdot \frac{1}{r_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}} \quad (14)$$

Де $U_{1\text{нф}}$ - фактичне значення напруги обмотки двигуна при $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц;

$m_1 = 3$ - число фаз статора;

$\omega_{1\text{ном}}$ - номінальне значення кутової частоти обертання;

$\gamma = U_1 / U_{1\text{нф}}$ - відносна напруга на статорі;

U_1 - напруга на статорі;

$\tau_1 = x_1 / x_0$ - коефіцієнт розсіювання статора;

$\tau_2 = x / 2 / x_0$ - коефіцієнт розсіювання ротора;

$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$ - загальний коефіцієнт розсіювання;

В такому випадку закон регулювання напруги має вигляд

$$\gamma = \sqrt{\frac{r_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}{r_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}}} \quad (15)$$

Зазвичай приймається розімкнута система управління по закону частотного регулювання $U_1 / f_1 = \text{const}$ (або $\gamma = \alpha$) при регулюванні вниз від номінальної частоти ($\alpha < 1$). При $\alpha > 1$ приймається закон регулювання $U_1 = \text{const}$. Ефективне застосування більш складних замкнених систем управління (як скалярних, так і векторних) істотно ускладнюється. Для побудови залежності $M_{\kappa}(\alpha)$ для зазначеного вище управління в формулі 1.12 слід приймати $\gamma = \alpha$ при $\alpha < 1$ і $\gamma = 1$ при $\alpha > 1$. На рис.3 наведені графіки залежностей $M_{\kappa}(\alpha)$ і $M_u(\alpha)$ для параметрів приводу [10, 11].

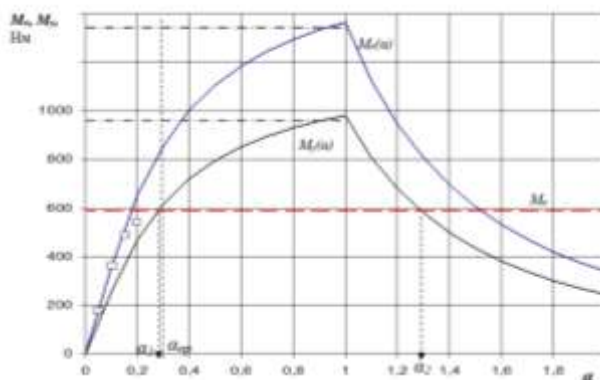


Рис. 3. Критичний і стійкий момент

На рис. 3 приведено значення номінального моменту M_n приводу (пунктирна лінія), який, як відомо, визначається з умови допустимого нагріву двигуна в тривалому

режимі при номінальній частоті живлення (тобто $\alpha = 1$). При цьому в першому наближенні прийнято, що величина допустимого по нагріванню моменту в розглянутому діапазоні регулювання не залежить від частоти живлення (або від α).

Точки перетину кривої $M_u(\alpha)$ з лінією M_n визначають межі діапазону регулювання α_1 і α_2 , в якому стійкий момент приводу перевищує номінальний [5,6,8,9].

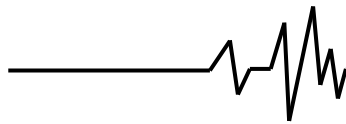
В даному випадку $\alpha_1 = 0,28$, $\alpha_2 = 1,28$, тобто номінальний момент двигуна може бути реалізований при частотах живлення від 14 до 64 Гц. Отримані граничні значення α повинні відповідати мінімальній і максимальній робочій швидкості механізму. Діапазон регулювання складає - 4,57, що перевищує - 3. Дані значення відповідають нашому діапазону отже ми можемо використовувати даний електропривід в дифузійному апараті.

Інтелектуалізація мехатронної системи електроприводу дифузійного апарату.

Принципи інтелектуальної системи. Інтелектуальна мехатронна система електроприводу дифузійного апарату є сучасною розробкою, що поєднує електромеханічні компоненти, сенсорні пристрої та програмно-логічні контролери (ПЛК) для забезпечення ефективного та надійного управління процесом дифузії цукрового буряку. Основна мета інтелектуалізації полягає у підвищенні точності керування електроприводом, оптимізації енергоспоживання та мінімізації ризику аварійних режимів [6,7].

Принципова ідея інтелектуальної системи полягає у комбінованому використанні сенсорів та контролерів, що дозволяє автоматично підтримувати оптимальну швидкість обертання дифузійного апарату, регулювати потужність електроприводу залежно від питомого навантаження та температури всередині апарату, а також виявляти і запобігати аварійним режимам, таким як перевантаження або блокування ротора.

Сенсорне обладнання. Інтелектуальна система базується на широкому застосуванні сенсорів, що забезпечують повний контроль параметрів технологічного процесу та роботи електроприводу.



Таблиця 1. Система оснащена датчиками для всебічного контролю параметрів процесу:

Тип датчика	Призначення	Технологія/Сигнал
Температурні	Контроль оптимальної температури стружки та води (58–74 °С)	Термопари або цифрові сенсори 4–20 мА
Швидкості обертання	Підтримка стабільного потоку стружки	Енкодери, індукційні сенсори
Навантаження на вал	Виявлення перевантаження, контроль крутного моменту	Тензометричні або магнітні сенсори
Рівень стружки та рідини	Автоматичне регулювання співвідношення буряку та води	Ультразвукові, ємнісні сенсори
Вібраційні/шумові	Діагностика редуктора та двигуна, попередження аварій	Вібраційні акселерометри, шумові датчики

Сигнали з усіх сенсорів передаються на ПЛК, що забезпечує обробку даних у реальному часі та управління виконавчими механізмами.

Датчики температури бурякової стружки та води дозволяють контролювати оптимальні умови дифузії у межах 58–74 °С. Використання цифрових сенсорів або термопар з вихідним сигналом 4–20 мА забезпечує точний моніторинг температури та передачу даних на ПЛК для адаптивного регулювання потужності електроприводу.

Датчики швидкості обертання ротора забезпечують підтримання стабільного потоку стружки та точне регулювання механізму. Енкодери або індукційні сенсори передають сигнали на ПЛК для обробки та корекції частоти обертання в межах 0,4–1,2 об/хв.

Датчики навантаження на валу двигуна визначають крутний момент і попереджають перевантаження. Тензометричні або магнітні сенсори інтегруються безпосередньо з валом двигуна та передають сигнали в систему для динамічного регулювання частоти та напруги.

Датчики рівня стружки та рідких фаз автоматично підтримують оптимальне співвідношення буряку та води в апараті. Ультразвукові або ємнісні сенсори передають інформацію про об'єм стружки та рідини для управління клапанами подачі води та адаптації швидкості переміщення стружки [6, 7].

Вібраційні та шумові датчики дозволяють ранньо виявляти механічні дефекти редуктора або електродвигуна. Своєчасне сповіщення про дисбаланс або зношення забезпечує запобігання аварій та продовжує ресурс обладнання.

Алгоритм інтелектуальної роботи.

Система управління реалізована на базі ПЛК та SCADA, що забезпечує високий рівень автоматизації та інтеграцію даних у реальному часі. Основні етапи алгоритму включають:

1. Зчитування сигналів з усіх сенсорів. ПЛК обробляє аналогові та цифрові сигнали, а SCADA відображає дані у вигляді графіків і таблиць, забезпечуючи візуальний контроль та логування.

2. Розрахунок необхідного моменту та частоти обертання двигуна за допомогою

математичних моделей приводу та формул критичного та стійкого моменту:

$$M_k(\alpha) = M_{k0} \cdot f(\alpha), \quad M_r(\alpha) = M_n \cdot g(\alpha) \quad (16)$$

Це дозволяє динамічно адаптувати режим обертання до зміни фізичних параметрів стружки та температури.

3. Передача команд на частотний перетворювач. Частотний перетворювач змінює напругу та частоту живлення статора, реалізуючи U/f-закон для забезпечення стабільного моменту при змінному навантаженні.

4. Моніторинг стану приводу та аварійна зупинка. ПЛК контролює допустимі межі параметрів. При відхиленні від номінальних значень активується сигнал тривоги або автоматична зупинка. Дані зберігаються для аналізу та оптимізації роботи.

Мехатронна система автоматизованого керування.

Архітектура системи:

1. Система керування будується за принципом трирівневої мехатронної структури.

2. Нижній рівень складається з виконавчих механізмів: асинхронного двигуна з редуктором, клапанів подачі води, регуляторів температури.

3. Середній рівень включає сенсорну та регулювальну систему: ПЛК, датчики температури, швидкості, навантаження та рівня стружки. Цей рівень здійснює обробку сигналів та реалізацію регуляторних алгоритмів [8].

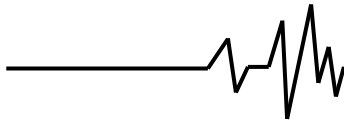
4. Верхній рівень – інтелектуальне управління: SCADA-система, алгоритми прогнозування та оптимізації, логіка обробки аварійних сигналів та зберігання історичних даних.



Рис. 4. Графічне представлення системи

Блок-схема системи може бути представлена наступним чином:

Для візуалізації використовуються графіки залежності моменту та частоти



обертання двигуна від часу або навантаження. В SCADA можна відображати динаміку температури стружки, рівня рідкої фази та моменту обертання валу в реальному часі.

Програмне забезпечення та алгоритми:

Система використовує кілька типів управління:

- Частотне регулювання: реалізація U/f-закону для стабільного моменту при зміні частоти;

- Скалярне управління: плавний старт і зупинка, запобігання перевантаженню редуктора;

- Векторне управління: високоточне підтримання моменту та обертання при змінному навантаженні.

Програмне забезпечення ПЛК забезпечує інтеграцію всіх сенсорів та виконавчих механізмів, а SCADA забезпечує дистанційний моніторинг та архівування даних.

Моделювання та дослідження

Механічні характеристики приводу. Механічні характеристики частотно-регульованого асинхронного двигуна визначаються формулами критичного та стійкого моменту:

$$M_k(\alpha) = M_{k0} \cdot f(\alpha), \quad M_y(\alpha) = M_n \cdot g(\alpha)$$

Діапазон регулювання частоти 14–64 Гц дозволяє підтримувати номінальний момент та робочу швидкість 0,4–1,2 об/хв. Симуляційне моделювання показало, що навіть при зміні температури стружки та питомого навантаження момент залишається стабільним, а швидкість обертання – точно підтримується [10].

Симуляційне моделювання (MATLAB/Simulink). Для оцінки ефективності інтелектуальної мехатронної системи електроприводу дифузійного апарату було проведено детальне симуляційне моделювання динамічних характеристик приводу у середовищі MATLAB/Simulink. Метою моделювання було перевірити здатність системи підтримувати задані режими обертання та моменту при змінних параметрах технологічного процесу та навантаження [11, 12].

1. Основні параметри моделювання:

- Двигун: асинхронний з короткозамкненим ротором, потужність 90 кВт.

- Діапазон частот: 14–64 Гц, що відповідає швидкості обертання 0,4–1,2 об/хв.

- Навантаження: змінне питомою масою бурякової стружки та температурою рідини.

- Алгоритми управління: частотне регулювання (U/f-закон), скалярне та векторне управління.

- Сенсори: температура, швидкість обертання, крутний момент, рівень стружки, вібраційні датчики.

2. Результати моделювання:

- Точність підтримки швидкості та моменту: Система забезпечує стабільне підтримання номінальної швидкості обертання та моменту з відхиленням не більше $\pm 2\%$ від номіналу, що дозволяє мінімізувати технологічні коливання та втрати цукру при дифузії.

- Енергетична ефективність: Порівняння з приводами постійного струму показало зниження енергоспоживання на 15–20%, що забезпечується адаптивним регулюванням частоти та моменту двигуна відповідно до навантаження.

- Віддалений моніторинг: Система інтегрується з MES-платформою заводу, що дозволяє здійснювати дистанційний контроль технологічних параметрів та швидко реагувати на відхилення в роботі апарату.

- Динаміка після перевантажень: Моделювання показало, що після короткочасних перевантажень система швидко відновлює номінальний режим обертання та моменту. Реакція займає не більше 1–2 секунд, що запобігає негативному впливу на якість дифузії та ресурс електроприводу.

3. Графічні результати симуляцій

- Стабільний момент двигуна: графіки показують, що при зміні частоти живлення та навантаження момент валу залишається майже постійним.

- Швидка реакція на перевантаження: короткочасні піки навантаження компенсуються автоматично, без виходу за допустимі межі моменту та швидкості.

- Підтримка температури та рівня стружки: алгоритми регулювання адаптують швидкість обертання та потужність двигуна так, щоб температура стружки залишалася у межах 58–74 °C, а рівень рідини та стружки – оптимальним.

4. Висновки за результатами моделювання

1. Система демонструє високу точність підтримки технологічних параметрів, що є критично важливим для ефективного процесу дифузії.

2. Адаптивне регулювання частоти та моменту забезпечує зниження енергоспоживання на 15–20%.

3. Впровадження ПЛК із SCADA дозволяє реалізувати віддалений моніторинг та інтеграцію з MES, підвищуючи оперативність управління.

4. Швидка динамічна реакція на перевантаження підвищує надійність та безпеку роботи приводу, зменшуючи ризик аварійних режимів [6, 7].

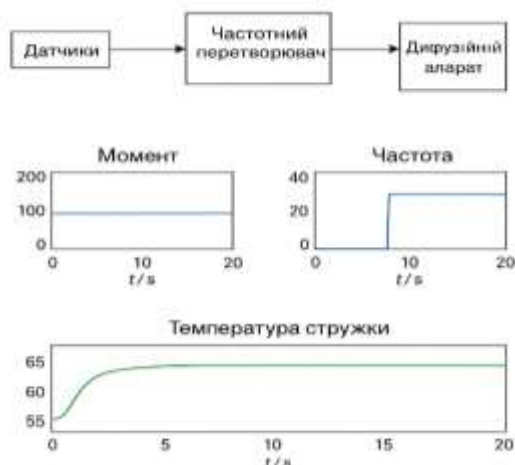
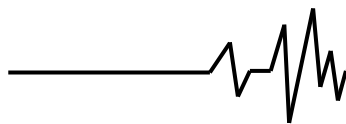


Рис. 5. Графічна стимуляція результатів

За допомогою MATLAB/Simulink було проведено моделювання динамічних характеристик приводу під навантаженням, регулювання швидкості при змінних параметрах стружки та температури. Моделювання показало:

- Високу точність підтримки заданої швидкості обертання та моменту;
- Зниження енергоспоживання на 15–20% порівняно з приводом постійного струму;
- Можливість віддаленого моніторингу та інтеграції з MES-системою.

Графіки симуляції показують стабільний момент двигуна при змінних частотах та навантаженнях, а також швидке відновлення номінального режиму після короточасних перевантажень [1, 2, 6, 7].

Інтелектуальний алгоритм управління мехатронним електроприводом дифузійного апарату



Рис. 6. Блок-схема алгоритму інтелектуального управління

Блок-схема ілюструє послідовність обробки вхідних сигналів, адаптивне ПІД-регулювання, формування команд на частотний

перетворювач (VFD) та інтеграцію з SCADA. Кожен блок має чітке функціональне навантаження, що забезпечує стабільність, безпеку та ефективність роботи дифузійного апарату.

Інтелектуальний алгоритм управління мехатронним приводом дифузійного апарату



Рисунок 7. Розширена структурна схема системи управління

Дана схема включає функції прогнозування зносу, фонові оптимізації ПІД-параметрів та профілів U/f, а також повну інтеграцію з SCADA та MES. Така архітектура дозволяє не лише підтримувати технологічні параметри в реальному часі, але й підвищувати енергоефективність і ресурс обладнання [9].

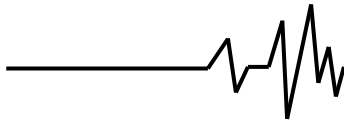
Практичні результати впровадження. Впровадження інтелектуальної мехатронної системи дозволяє:

- Скоротити час проходження стружки уздовж апарату та зменшити втрати цукру;
- Підвищити надійність електроприводу та знизити частоту аварійних зупинок;
- Оптимізувати енергоспоживання та зменшити витрати на технічне обслуговування;
- Дозволити дистанційний моніторинг та інтеграцію з MES-системою заводу для контролю виробничих процесів;

Завдяки використанню датчиків частоти обертання та моменту незалежно від змін у навантаженні та властивостях бурякової стружки.

Завдяки використанню датчиків температури, навантаження та вібрації система здатна прогнозувати можливі відмови, запобігаючи аварійним режимам та збільшуючи ресурс електроприводу.

Висновки. Проведене дослідження показало, що застосування асинхронних електродвигунів змінного струму з короткозамкненим ротором у системі мехатронного електроприводу дифузійного



апарата цукрового заводу є ефективним технічним рішенням для підвищення надійності та енергоефективності обладнання. Перехід від двигунів постійного струму до асинхронних приводів дозволяє усунути ключові недоліки існуючих систем, а саме: складність обслуговування, високі експлуатаційні витрати, обмежену довговічність щітково-колекторних вузлів та нестабільність технологічних параметрів.

Впровадження частотно-регульованого приводу на базі асинхронного двигуна забезпечує плавне регулювання швидкості обертання в діапазоні 0,4–1,2 об/хв, зберігаючи необхідний номінальний момент на валу потужністю 90 кВт. Розрахунки та моделювання показали, що коефіцієнт регулювання швидкості системи становить 4,57, що повністю відповідає технологічним вимогам дифузійного процесу та перевищує необхідний діапазон для ефективної роботи апарата.

Інтелектуалізація мехатронної системи керування за допомогою ПЛК, SCADA та сенсорних елементів дозволяє автоматично підтримувати оптимальні режими роботи, прогнозувати технічний стан обладнання та запобігати аварійним режимам. Використання алгоритмів частотного регулювання, сенсорів температури, навантаження, рівня стружки та вібраційних датчиків забезпечує точне регулювання моменту та швидкості, а також зменшує енергоспоживання на 12–20 % порівняно з приводами постійного струму.

Практичне впровадження запропонованого рішення дозволяє:

- підвищити надійність електроприводу та зменшити частоту аварійних зупинок;
- оптимізувати енергоспоживання та скоротити витрати на технічне обслуговування;
- забезпечити стабільне та точне регулювання швидкості обертання та моменту при змінному навантаженні;

- інтегрувати систему в MES-інфраструктуру заводу для дистанційного моніторингу та контролю технологічного процесу.

Отже, впровадження асинхронного двигуна змінного струму з частотним регулюванням у мехатронний електропривод дифузійного апарата є ефективним та економічно доцільним заходом модернізації цукрових заводів, що сприяє підвищенню технологічної ефективності, надійності обладнання та реалізації принципів «інтелектуального виробництва».

Список використаних джерел

1. Стаднік М.І., Штуць А.А., Єленич А.П. Дослідження методу забезпечення автономного електропостачання тваринницької ферми на основі комбінування базових та стохастичних

джерел енергії. *Вібрації в техніці та технологіях* 2025. № 1 (116). С. 63–74.

2. Стаднік М.І., Штуць А.А., Колісник М.А. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128) С. 122- 134

3. Возняк О.М., Штуць А.А., Тихонов В. К. Дослідження моделі галузі електроенергетики та методики виконання вимірювань якості електроенергії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 150-163.

4. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128). С.

5. Стаднік М. І., Грицун А.В., Проценко Д. П. Метод покриття графіку навантаження тваринницької ферми при автономному електропостачанні, на базі біогазових установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. № 4 (107). С. 79-87.

6. Стаднік М.І., Штуць А.А., Пилипенко О.В. Рівень енергозабезпечення тваринницьких ферм за рахунок біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 100 -112.

7. Стаднік М.І. Оптимізація складу генеруючого обладнання автономного електропостачання тваринницької ферми при використанні біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2018. №2(101). С. 81–88.

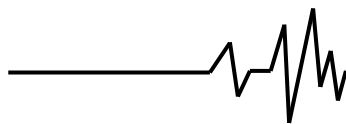
8. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. «Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика». Навчальний посібник. Вінниця. РВВ ВНАУ 2020. 331 с.

9. Возняк О. М., Штуць А.А., Наавгуст О.П. Аналіз комплексної моделі моніторингу параметрів якості електроенергетики. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С.

10. Розен В.П., Іншеков Є.М., Калінчик І.В. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою. *Енергетика*. 2013. №. 1. С. 20–26.

11. Калетнік Г. М. Біопаливо. Продовольча, енергетична та економічна безпека України : монографія. К. : Хай-Тек Прес, 2010. 516 с.

12. Калетнік Г. М. Біопалива. Ефективність їх виробництва та споживання в АПК України. Навчальний посібник. Г.М. Калетнік, В. М. Пришляк. Вінниця: ВНАУ, 2008. 192 с.



References

1. Stadnik M. I., Shtuts A. A., Yelenych A. P. (2025). Doslidzhennya metodu zabezpechennya avtonomnoho elektropostachannya tvarynnyskoyi fermi na osnovi kombinuvannya bazovykh ta stokhastychnykh dzherel enerhiyi. *Vibratsionnyy v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*. №1 (116). P. 63–74. [in Ukrainian].
2. Stadnik M. I., Shtuts A. A., Kolisnyk M. A. (2025). Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №1 (128). P. 122–134. [in Ukrainian].
3. Vozniak O. M., Shtuts A. A., Tykhonov V. K. (2022). Doslidzhennya modeli haluzi elektroenerhetyky ta metodyky vykonannya vymiryuvan yakosti elektroenerhiyi. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №1 (116). P. 150–163. [in Ukrainian].
4. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. (2025). Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №1 (128). P. 122–134. [in Ukrainian].
5. Stadnyk M. I., Hrytsun A. V., Protsenko D. P. (2019). Method of covering the load schedule of a livestock farm during autonomous power supply based on biogas plants. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №4 (107). P. 79–87. [in Ukrainian].
6. Stadnyk M. I., Shtuts A. A., Pylypenko O. V. (2021). Level of energy supply for livestock farms through biogas. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №1 (112). P. 100–112. [in Ukrainian].
7. Stadnyk M. I. (2018). Optimization of the composition of generating equipment for autonomous energy supply of livestock farms using biogas. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №2 (101). P. 81–88. [in Ukrainian].
8. Stadnyk M. I., Vydmysh A. A., Shtuts A. A., Kolisnyk M. A. (2020). Intelligent systems in power engineering. Theory and practice: Textbook. Vinnytsia: RVV VNAU. 331 p. [in Ukrainian].
9. Vozniak O. M., Shtuts A. A., Naavgust O. P. (2021). Analiz kompleksnoyi modeli monitoringu parametriv yakosti elektroenerhetyky. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. №4 (115). [in Ukrainian]. Rozen V. P., Inshekov Ye. M., Kalinchyk I. V. (2013). Optimization of electricity production processes in a combined energy system. *Enerhetyka*. №1. P. 20–26. [in Ukrainian].
10. Kaletnik H. M. (2010). Biofuel. Food, energy, and economic security of Ukraine: Monograph. Kyiv: High-Tech Press. 516 p. [in Ukrainian].
11. Kaletnik H. M., Pryshliak V. M. (2008). Biofuels. Efficiency of their production and

consumption in the agro-industrial complex of Ukraine: Textbook. Vinnytsia: VNAU. 192 p. [in Ukrainian].

RESEARCH OF MECHATRONIC AND ROBOTIC SYSTEMS OF INTELLECTUAL CONTROL OF ELECTRICAL MACHINES IN ELECTRICAL TECHNOLOGIES

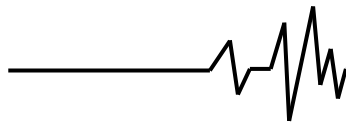
The article investigates the possibility of improving the efficiency and reliability of a sugar factory diffusion apparatus by modernizing its electric drive using a mechatronic approach. An analysis of existing systems employing DC motors, which are characterized by complex maintenance, high operating costs, and limited durability, is presented. To overcome these drawbacks, the replacement of the DC motor with an asynchronous AC motor with a squirrel-cage rotor and frequency control is proposed. This approach enables the creation of an energy-efficient mechatronic electric drive system with adaptive and intelligent control of the technological process.

The study develops the structure of a mechatronic complex that integrates an electromechanical module, controller, sensor elements, and an artificial intelligence module implementing self-diagnosis and operational mode optimization. The application of $U/f = \text{const}$ frequency control algorithms ensures smooth speed variation in the range of 0.4–1.2 rpm while maintaining the required torque on a 90 kW motor shaft. The use of digital monitoring systems allows real-time control of drive parameters, detection of operational deviations, and prediction of equipment condition.

Simulation results showed a speed regulation coefficient of 4.57, fully meeting the technological requirements of the diffusion process. Energy consumption is reduced by 12–15%, and system reliability increases due to the elimination of wear-prone components (brush-collector mechanism). The mechatronic approach ensures the integration of hardware and software into a unified system, enabling the implementation of the "intelligent manufacturing" concept.

The obtained results can be applied to modernize the electric drives of other food industry technological units where precise control of speed, torque, and load is required. The proposed solution represents an important step toward next-generation mechatronic and robotic systems aligned with the "Industry 4.0" concept.

Keywords: mechatronic system, intelligent control, asynchronous electric motor, frequency control, diffusion apparatus, energy efficiency, sugar production.

**Відомості про авторів**

Стаднік Микола Іванович – д.т.н., професор кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. stadnik1948@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3895-9607>).

Штуць Андрій Анатолійович – к.т.н., доцент, кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Колісник Микола Анатолійович – д.ф. ст. вкладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Григоренко Назар Вікторович – аспірант кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: 34grigorenko34@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0694-5740>

Stadnik Mykola – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine. stadnik1948@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3895-9607>).

Shtuts Andriy– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Kolisnyk Mykola – Ph.D., Senior Lecturer of the Department of "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

Hryhorenko Nazar – Postgraduate Student of the Department of "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: 34grigorenko34@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0694-5740>

Стаття надійшла 13.10.2025

Стаття прийнята 23.10.2025

Опубліковано 25.12.2025