

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-97>

УДК 681.5:621.313.333:631.363

ВОЗНЯК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>

e-mail: Alex.voz1966@gmail.com

ГРИГОРЕНКО ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0009-3473-3433>

e-mail: olexgrvi@gmail.com

РЕАЛІЗАЦІЯ ФОС-КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРА В СИСТЕМАХ РОЗДАВАННЯ КОРМІВ

У статті представлено результати дослідження та реалізації системи керування асинхронним електродвигуном з використанням мікроконтролера та алгоритму векторного керування. Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення точності, надійності та енергоефективності електроприводів, що застосовуються в технологічних процесах тваринництва, зокрема у системах автоматизованого роздавання кормів. Одним із ключових технічних рішень у розробленій системі є використання двонаправленого режиму лічби таймера, що дозволяє формувати ШІМ-сигнали з високою частотою та мінімальними спотвореннями. Такий підхід забезпечує гнучкість у регулюванні напруги на статорі та точний контроль частоти, що безпосередньо впливає на динаміку та плавність зміни швидкості. Додатково застосована модуляція широкої амплітуди (Amplitude Wide Modulation) дозволяє розширити діапазон регулювання та покращити енергетичні характеристики системи. Гнучкість системи забезпечується можливістю зовнішнього формування завдання швидкості за допомогою аналогового входу мікроконтролера. Таке рішення дозволяє інтегрувати електропривод у комплексні автоматизовані системи керування, забезпечуючи швидку адаптацію до змін продуктивності технологічного процесу та зручність взаємодії з оператором або контролером верхнього рівня. Запропонований спосіб регулювання підвищує точність підтримання робочої швидкості навіть у разі значних і різких змін навантаження, які характерні для механізмів транспортування та роздавання кормів. Отримані результати свідчать про значний потенціал розробленої системи для впровадження в технологічне обладнання галузі тваринництва. Автоматизовані системи роздавання кормів, транспортери, змішувачі та інші механізми можуть працювати стабільніше, з меншими втратами енергії та кращою повторюваністю технологічних операцій. Загалом розроблена система демонструє комплексний підхід до керування асинхронним електроприводом, поєднуючи сучасні алгоритмічні рішення, гнучкі методи взаємодії з оператором та ефективні інструменти стабілізації швидкості. Це створює передумови для подальшого удосконалення та масштабування системи в промислових умовах, а також для її адаптації до обладнання інших галузей, де необхідна висока точність і надійність електропривода.

Ключові слова: кормороздавач, електропривод, асинхронний двигун, мікроконтролер, векторне керування, ШІМ-модуляція, ПІ-регулятор, сенсорна система, динамічні навантаження, система автоматизації, точне регулювання швидкості.

VOZNYAK OLEKSANDR, HRYHORENKO OLEKSANDR

Vinnitsia National Agrarian University

IMPLEMENTATION OF FOC CONTROL OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE USING A MICROCONTROLLER IN FEED DISTRIBUTION SYSTEMS

The article presents the results of the research and implementation of an asynchronous motor control system using a microcontroller and a vector control algorithm. The relevance of the topic is due to the need to improve the accuracy, reliability, and energy efficiency of electric drives used in livestock technological processes, particularly in automated feeding systems. One of the key technical solutions in the developed system is the use of a bidirectional timer counting mode, which allows generating PWM signals with high frequency and minimal distortions. This approach provides flexibility in regulating the voltage on the stator and precise control of the frequency, which directly affects the dynamics and smoothness of speed changes. Additionally, the applied Amplitude Wide Modulation allows expanding the control range and improving the energy performance of the system. The system's flexibility is ensured by the possibility of externally setting the speed command using the microcontroller's analog input. This solution enables the integration of the electric drive into complex automated control systems, providing quick adaptation to changes in the productivity of the technological process and convenience of interaction with the operator or the upper-level controller. The proposed control method improves the accuracy of maintaining operating speed even in the case of significant and abrupt load changes, which are typical for mechanisms for transporting and dispensing feed. The results obtained indicate a significant potential of the developed system for implementation in technological equipment of the livestock industry. Automated feed dispensing systems, conveyors, mixers, and other mechanisms can operate more stably, with lower energy losses and better repeatability of technological operations. Overall, the developed system demonstrates a comprehensive approach to controlling an asynchronous electric drive, combining modern algorithmic solutions, flexible operator interaction methods, and effective speed stabilization tools. This creates prerequisites for further improvement and scaling of the system in industrial conditions, as well as for its adaptation to equipment in other industries where high precision and drive reliability are required.

Keywords: feed distributor, electric drive, asynchronous motor, microcontroller, vector control, PWM modulation, PI controller, sensor system, dynamic loads, automation system, precise speed control.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Возняк Олександр, Григоренко Олександр

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення продуктивності тваринництва нерозривно пов'язане з удосконаленням технологій годівлі, покращенням якості кормів та оптимізацією їх використання. Забезпечення тварин збалансованими раціонами – зокрема гранульованими кормами та вологими сумішами, які містять необхідний комплекс поживних речовин та мікроелементів – значно покращує їх продуктивність і дозволяє зменшити витрати зерна на фураж. Ефективною технологічною складовою сучасних систем годівлі є можливість точного дозування кормів безпосередньо у індивідуальних годівницях тварин. Це забезпечує як високу продуктивність, так і мінімізацію втрат кормових матеріалів за рахунок автоматичного коригування доз відповідно до фізіологічних особливостей та потреб поголів'я.

Процес роздавання кормів є одним із найбільш трудомістких на тваринницьких фермах і комплексах: на нього припадає близько 30–40 % загальних затрат праці з обслуговування тварин. Саме тому механізація та автоматизація цього етапу відіграють ключову роль у підвищенні ефективності всього виробничого циклу. Якість і рівномірність подачі кормів суттєво впливають на результативність зоотехнічних заходів, збільшення приростів та стабільність продуктивності тварин. Для транспортування та роздавання сухих, сипучих, рідких кормів і вологих мішанок застосовують різноманітні кормороздавальні машини стаціонарного та мобільного виконання.

Аналіз досліджень та публікацій

Найбільш перспективними у виробничих умовах є електрифіковані кормороздавачі обмеженої мобільності. До них належать бункерні мобільні роздавачі, оснащені електроприводом і перемішувачем вздовж кормових проходів по напрямних рейках. Серед відомих промислових зразків можна виокремити моделі РС-5А, КС-1,5, КСП-0,8, а також естакадні варіанти типу КЕС-1,7. Окрему категорію становлять роздавачі, встановлені на шасі електрокарів, що забезпечують підвищену маневреність у приміщеннях та на відкритих майданчиках.

Сучасні тенденції розвитку технічних засобів для тваринництва визначаються не лише вимогами до продуктивності, але й глобальними екологічними пріоритетами. У багатьох країнах упроваджують нормативи, спрямовані на зниження енергоспоживання та скорочення викидів парникових газів. Це стимулює виробників електроустаткування застосовувати технології енергозбереження, серед яких одним із найбільш дієвих методів є регулювання швидкості електродвигуна. Така технологія забезпечує необхідну продуктивність привода за мінімальних витрат електроенергії, що робить її особливо актуальною для високопродуктивних кормороздавальних систем.

Виклад основного матеріалу

Для проведення дослідження в даній роботі розглянуто електропривід мобільного кормороздавача КЕС-1.7. Він складається з трьох незалежних електроприводів, які потребують модернізації існуючої системи керування з метою підвищення надійності, енергоефективності та точності регулювання. Керуюча станція кормороздавача включає контактно-комутаційні апарати для ручного та автоматичного управління, силові кола живлення електродвигунів, а також елементи захисту від коротких замикань і перевантажень, реалізовані за допомогою плавких запобіжників.

Захист електродвигунів від перегрівання забезпечується двополюсними тепловими реле серії РТЛ. Живлення мобільного кормороздавача здійснюється від трифазної чотирипровідної мережі змінного струму з глухозаземленою нейтраллю. Номінальна лінійна напруга становить 380 В, частота – 50 Гц.

Таблиця 1

Основні експлуатаційні та технічні параметри мобільного електричного кормороздавача КЕС-1,7

Тип	Продуктивність, т/год	Місткість бункера, м	Кількість обслуговуваних тварин, год	Потужність /кількість двигунів, кВт / шт.	Швидкість при роздачі, м/с
КЕС-1,7	31-62	1,7	600-1200 на відгодівлі	3,7/3	0,5

У електроприводах мобільних кормороздавачів поданого типу використовуються трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором старих серій. Системи керування таких приводів, як правило, реалізовані на основі релейно-контактною апаратури, виробництво якої розпочалося 20–30 років тому. Подібні рішення характеризуються низькою надійністю, обмеженою функціональністю та недостатньою точністю регулювання, що не відповідає сучасним вимогам до ефективності технологічного обладнання. У зв'язку з цим виникає необхідність модернізації електропривода, що включає заміну застарілих асинхронних двигунів на енергоефективні сучасні серії та впровадження інтелектуальних методів керування, таких як векторне (полеорієнтоване) керування.

Для забезпечення ефективного регулювання швидкості та моменту асинхронного електродвигуна необхідно детально аналізувати процеси комутації напруг і струмів у статорних та роторних обмотках. Вивчення часових діаграм напруг дозволяє оцінити фазові зсуви, симетрію сигналів та вплив методів модуляції на формування електромагнітного моменту. Це є ключовим етапом під час переходу від традиційних до сучасних систем керування.

Електромагнітний момент, що формується однією фазою асинхронного двигуна, може бути описаний таким виразом:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2 \cdot R'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2},$$

де: U_1 – фазна напруга статора;
 R_1, R'_2 – активні опори статорної та приведенної роторної обмоток;
 X_1, X'_2 – індуктивні реактивності статора та приведенного ротора;
 s – ковзання;
 ω_s – синхронна кругова частота.

Цей вираз показує залежність моменту від ковзання, параметрів двигуна та прикладеної напруги. Саме на цій залежності базується коректне формування керуючих сигналів у системах векторного керування, де струми у статорних обмотках розкладаються на ортогональні складові, що відповідають потокозчепленню та електромагнітному моменту.

У більшості асинхронних та безщіткових двигунів з простими системами керування застосовується прямокутна форма напруги під час комутації, відома як блокова комутація. Цей метод базується на подачі на обмотки статора напруги, яка має прямокутну часову діаграму, що значно спрощує силову частину привода та алгоритми керування, проте обмежує можливість точного контролю моменту.

На рис. 1 представлено типову блокову комутацію. Перемикання ключів силового інвертора здійснюється в моменти, коли ЕРС відповідної фази двигуна перетинає нульовий рівень. Це забезпечує узгодженість знаків фазного струму та ЕРС, тобто струм протікає у той проміжок, коли електромагнітна сила протидіє або сприяє його напрямку, що дозволяє отримати максимальний крутний момент при мінімальних втратних процесах у машині.

Такий підхід до комутації забезпечує простоту реалізації, однак має низку недоліків, серед яких: підвищений рівень гармонік у струмах, обмеженість формування електромагнітного моменту, а також недостатня точність керування швидкістю у широкому діапазоні навантажень. Це, своєю чергою, стає одним із ключових аргументів для переходу до більш складних, але ефективніших методів, таких як векторне керування, що дозволяє формувати струми необхідної форми і незалежно регулювати потокозчеплення та момент двигуна.

Методика керування швидкістю електродвигуна на основі широтно-імпульсної модуляції.

Як було показано раніше, у багатьох випадках виникає необхідність точного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна. Це особливо важливо у мобільних кормороздавачах, де зміна навантаження, інерційність робочих механізмів та вимоги до плавності руху потребують гнучкого та динамічного керування. Одним із найбільш ефективних методів регулювання швидкості є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), що дозволяє формувати напругу необхідної амплітуди та частоти без використання додаткових трансформаторів чи механічних регуляторів.

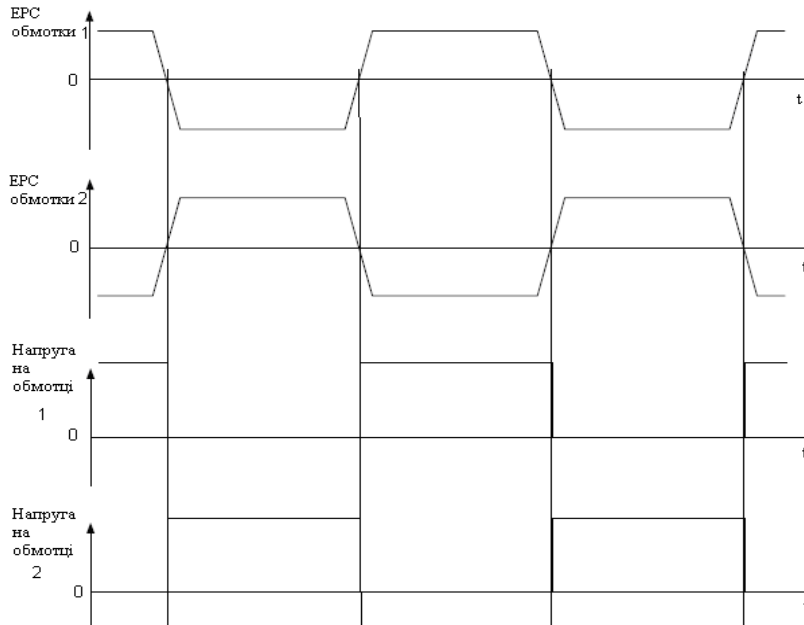


Рис. 1. Осцилограми напруг, що виникають під час комутаційних процесів

Для керування частотою обертання асинхронного двигуна одним із традиційних методів є регулювання робочої напруги. Впровадження схеми формувати регульовану напругу для живлення електродвигуна без використання додаткового апаратного каскаду значно збільшує вартість і складність системи.

Сучасна електроніка привода вже включає транзистори для комутації напруги на обмотках двигуна, застосування додаткового каскаду для регулювання напруги стає неефективним. Альтернативним та більш раціональним рішенням є використання існуючої електроніки для реалізації керування двигуном за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). При цьому мікроконтролер управляє ключами інвертора, формуючи імпульси напруги, які забезпечують необхідне середнє значення напруги на обмотках двигуна.

На рис. 2 показано принцип підключення ШІМ-генератора до обмоток електродвигуна. Коефіцієнт заповнення (duty cycle) ШІМ-сигналу визначає середнє значення напруги, що подається на обмотки. Збільшення коефіцієнта заповнення призводить до пропорційного зростання середньої напруги, а отже, до підвищення швидкості обертання та електромагнітного моменту двигуна.

Таким чином, застосування ШІМ дозволяє ефективно та гнучко керувати як швидкістю, так і моментом двигуна, знижуючи складність апаратної частини та підвищуючи енергетичну ефективність електропривода.

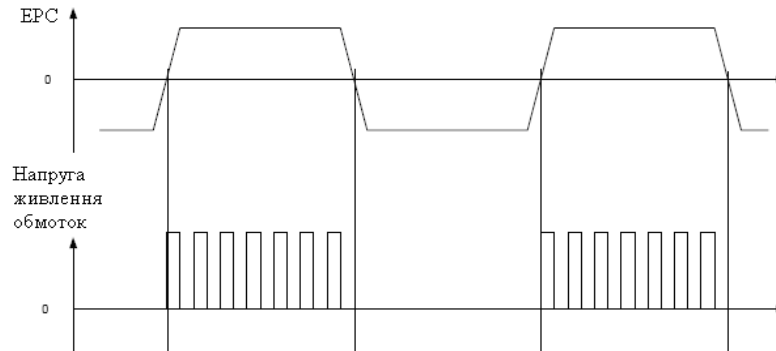


Рис.2. Форма напруги живлення обмоток асинхронного двигуна при широтно-імпульсній модуляції

При використанні ШІМ-керування бажано застосовувати апаратний генератор ШІМ у мікроконтролері. Це забезпечує точну часову діаграму без паразитних імпульсів, дозволяє регулювати коефіцієнт заповнення від 0 до 100 % та звільняє процесор для інших завдань, таких як керування комутацією, захист і стабілізація частоти обертання.

Основну частоту ШІМ слід обирати за межами чутного діапазону (вище 20 кГц), враховуючи при цьому механічні характеристики двигуна. Зі зростанням частоти збільшується розсіяна потужність на керуючих транзисторах, хоча акустичний шум часто залишається непомітним.

Частоту обертання двигуна зазвичай регулюють зовнішнім сигналом, який може бути аналоговим (наприклад, від потенціометра або датчика) або цифровим ШІМ-сигналом від головного контролера. Мікроконтролер із вбудованим АЦП дозволяє працювати з будь-яким типом сигналу для встановлення швидкості. Після визначення заданої швидкості змінюють коефіцієнт заповнення ШІМ для керування напругою обмоток, що дозволяє реалізувати систему зворотного зв'язку та підтримувати фактичну частоту обертання близькою до заданої.

На рис. 3 показано основні апаратні вузли безсенсорної системи керування двигуном на основі мікроконтролера. Схема керування включає транзистори, які комутують струм через обмотки, а паралельні конденсатори згладжують перехідні напруги та зменшують шум. Схема контролю узгоджує зовнішній сигнал із входом АЦП мікроконтролера за допомогою подільника напруги; це дозволяє враховувати падіння напруги на діоді та обмотках, а негативні рівні ЕРС зміщуються на позитивний постійний рівень. Діод між живленням і обмотками захищає систему від зворотної полярності. Виводи «АЦП Ф1/2» і «ШІМ Ф1/2» забезпечують підключення мікроконтролера до системи.

Для безсенсорного керування двигуном потрібні два канали АЦП для вимірювання ЕРС і два виходи ШІМ для регулювання комутації та швидкості. Додатковий канал АЦП може використовуватися для зовнішнього задавання швидкості, а за потреби вимірювання частоти обертання — ще один вихід. Загалом система вимагає шість ліній введення-виведення.

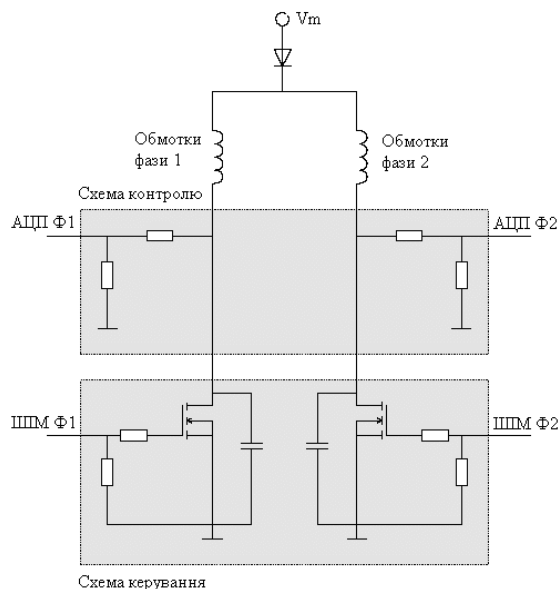


Рис.3. Архітектура драйверів та схема контролю параметрів у системі керування двигуном без датчиків положення

При формуванні сигналу частоти обертання використовується вивід скидання мікроконтролера. Для його використання як лінії введення-виведення необхідно встановити конфігураційний біт RSTDISBL. Навіть при його встановленні мікроконтролер може скинутися, якщо на вхід скидання подати напругу вище 10,5 В, тому в сигнальному колі слід передбачити обмежувач напруги до рівня Vcc (наприклад, стабілітрон). За потреби можна змінювати місцями виводи сигналу про швидкість і зовнішнє задання. Для вимірювання через АЦП використовується внутрішнє джерело опорної напруги 1,1 В, тому всі сигнали на вході АЦП повинні перебувати в межах 0–1,1 В.

Для контролю напруги активної обмотки та швидкості обертання двигуна використовуються два канали ШІМ, виходи яких підключені до транзисторів каскаду керування. ШІМ реалізується за допомогою двонаправленого таймера-лічильника, що генерує три події: дві події збігу для встановлення або скидання виходу та одне переривання при переповненні.

Двонаправлений режим лічби дозволяє запускати перетворення АЦП у моменти переповнення таймера, коли комутаційні шуми не впливають на сигнал ЕРС. Переривання використовується для оцінки положення ротора та комутації при досягненні порогу ЕРС, вимірюваного АЦП. Для забезпечення частоти ШІМ за межами чутного діапазону таймер налаштований на значення вершини лічби 240 при частоті внутрішнього RC-генератора 9,6 МГц, що забезпечує основну частоту ШІМ близько 20 кГц. Збільшення частоти генератора на 10 % не впливає на коректність роботи мікроконтролера.

Для безсенсорного керування асинхронним двигуном у системі використовується вбудований АЦП мікроконтролера для вимірювання зворотної ЕРС обмоток. АЦП має роздільну здатність до 10 біт і частоту перетворень до 15 тис. разів на секунду. Зі збільшенням частоти перетворень роздільна здатність знижується, тому для забезпечення достатньої точності вибрано частоту синхронізації 1,2 МГц, що становить 1/8 від частоти системного генератора. Навіть при цьому роздільна здатність досягає близько 8 біт, що дозволяє ефективно вимірювати сигнал ЕРС для керування комутацією обмоток.

Перед основним запуском виконується попереднє позиціонування ротора. Для цього на обмотки подається підвищена напруга, завдяки чому ротор займає задане положення. Після затримки на визначений час напруга зменшується, і ротор переходить у стан спокою. Початковий запуск двигуна проводиться без зворотного зв'язку, а інтервали між перемиканнями обмоток визначаються за таблицею перетворення, що дозволяє адаптувати керування під механічні характеристики конкретного двигуна. Затримки між перемиканнями можна розрахувати на основі відомих характеристик розгону або визначити експериментально через контроль напруги на обмотках за допомогою осцилографа.

Після завершення послідовності попереднього запуску відбувається безсенсорна комутація. Використовується блочна схема, де АЦП вимірює зворотну ЕРС. Значення ЕРС порівнюється з пороговим рівнем, і при його перетині відбувається перемикання обмоток. Для запобігання помилкових перемикань через перехідні процеси під час комутації кілька останніх вимірювань ігноруються. Переривання таймера-лічильника забезпечує синхронізацію комутації та вимірювань, а також мінімізує вплив комутаційних шумів на точність АЦП.

Задана швидкість обертання може надходити через аналоговий сигнал або ШІМ від головного контролера. Мікроконтролер перетворює його у цифрове значення для визначення бажаної частоти обертання. Зчитування сигналу здійснюється під час обробки переривання таймера після вимірювання ЕРС. Контур стабілізації швидкості імплементовано в основному циклі, де частота обертання плавно коригується поетапно або за допомогою ПІ-регулятора, що дозволяє компенсувати змінні навантаження та забезпечує стабільність роботи двигуна.

Для передачі інформації про частоту обертання до ЦПУ або іншого пристрою використовується вихід з відкритим колектором. Це дозволяє уникнути додаткових компонентів та знижує загальну вартість системи. Програмна реалізація алгоритму керування та послідовності комутацій представлена у вигляді блок-схеми на рис. 4. Система забезпечує високоточне і стабільне регулювання швидкості двигуна в умовах змінного навантаження, що робить її придатною для автоматизованих технологічних процесів, таких як керування мобільними кормороздавачами.

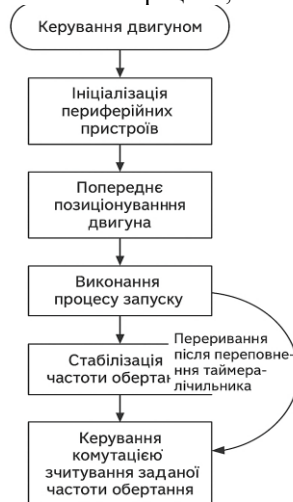


Рис.4. Структурно-алгоритмічна схема керування електродвигуном, що включає ініціалізацію, запуск, стабілізацію частоти обертання та обробку комутаційних переривань

Принцип постійності відношення напруга/частота (U/f) є одним із найпоширеніших методів керування асинхронними приводами. Його суть полягає у підтримці сталої пропорції між амплітудою напруги живлення U_s та частотою f_s , що забезпечує постійність магнітного потоку статора:

$$\Phi_s \sim \frac{U_s}{f_s}$$

Завдяки цьому обертальний момент двигуна залишається стабільним і пропорційним частоті ковзання s :
 $M \sim s$.

Для керування частотою обертання асинхронного двигуна використовується перетворювач частоти, який формує синусоїдальну напругу з регульованою амплітудою та частотою. Типова структура інверторного привода (рис. 7) включає:

1. Вхідний випрямляч, що формує постійну напругу U_{dc} .
2. Інверторний блок, який формує трифазну напругу з частотою f_s і амплітудою U_s .
3. Систему керування, яка забезпечує підтримку постійного відношення U_s/f_s та регулює вихідні параметри для досягнення бажаних значень обертального моменту та частоти обертання.

Під час роботи привода з низькими частотами амплітуда напруги зменшується відповідно до збереження відношення U_s/f_s , що дозволяє підтримувати магнітний потік і уникати насичення магнітної системи статора. На високих частотах магнітний потік залишається майже постійним, забезпечуючи стабільний крутний момент.

Метод U/f простий у реалізації, ефективний для широкого діапазону швидкостей і не потребує датчиків положення ротора. Однак він має обмеження:

- Обмежена точність регулювання моменту на низьких частотах через падіння напруги на опорах статора.
- Низькі динамічні характеристики, що роблять його менш ефективним для швидких прискорень і гальмувань.
- Можлива поява резонансів та перегріву при тривалих роботах на високих частотах через обмеження магнітного потоку.

Принцип U/f дозволяє ефективно регулювати частоту обертання та крутний момент асинхронного двигуна в широкому діапазоні, забезпечуючи просту, надійну та економічну схему керування. Його застосування особливо доцільне для систем, де не потрібна висока динаміка, а необхідно підтримувати стабільність обертального моменту при змінних навантаженнях, наприклад, у інверторних мобільних приводах кормороздавачів.

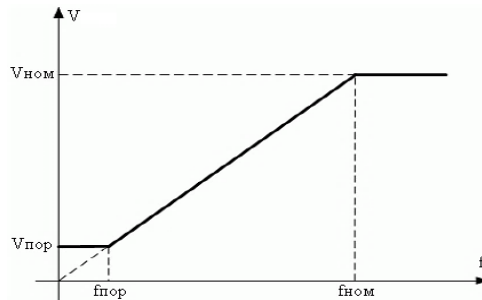


Рис.5. Лінійна характеристика $U-f$ для асинхронного двигуна

Принцип керування " V/f " базується на скалярному підході: на обмотки асинхронного двигуна подається трифазна синусоїдна напруга, амплітуда якої пропорційна частоті живлення. Винятком є частоти нижчі за порогове значення та вищі за номінальне, що зображено на рис. 5. Нахил, який визначає відношення амплітуди напруги до частоти, розраховується на основі номінальних значень напруги та частоти мережі, зазначених у паспорті двигуна. Порогова частота зазвичай обирається у відсотках від номінальної (наприклад, 5%).

Принцип " V/f " може бути використаний як основа для автоматичного регулювання швидкості (рис. 6). У цьому контурі відхилення фактичної швидкості від бажаної подається на ПІ-регулятор, який обчислює відповідну частоту напруги статора для підтримки заданої швидкості. Для спрощення алгоритму початковим значенням частоти напруги статора слугує абсолютне значення, обране за кривою V/f .

Якщо вихід ПІ-регулятора набуває від'ємного значення, параметри керування силовими транзисторами інвертора модифікуються для зміни напрямку обертання двигуна, забезпечуючи кероване та плавне реверсування.

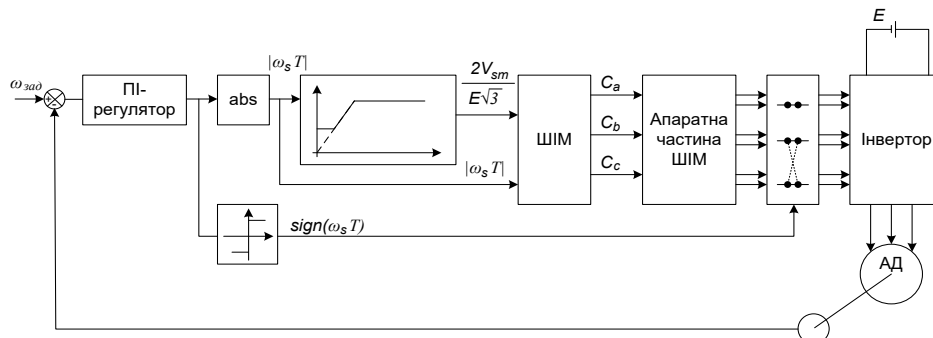


Рис.6. Структурна схема системи частотно-напругового керування (V/f)

Для визначення частоти та напрямку обертання ротора асинхронного двигуна використовуються різні типи датчиків:

1. Абсолютні шифратори (енкодери) або шифратори приростів – забезпечують високу точність вимірювання, але мають значну вартість, що збільшує загальну ціну електродвигуна.
2. Тахогенератори, механічно зв'язані з ротором, потребують лише одного каналу для підключення до АЦП мікроконтролера та забезпечують достатню точність для багатьох застосувань.
3. Датчики Холла – безконтактні, компактні та недорогі рішення. Включають датчик і схему формування вихідного сигналу, який можна безпосередньо підключати до порту введення-виведення мікроконтролера.

На рис. 7 показані перехідні процеси частоти обертання та напруги статора при стрибкоподібній зміні заданої швидкості між +700 та -700 обертів за хвилину. Експеримент проводився з асинхронним двигуном потужністю 750 Вт із навантаженням до 370 Вт.

Аналіз графіків показує, що бажана швидкість досягається протягом приблизно 1 с після зміни швидкості. Після стабілізації частоти статора на виході ПІ-регулятора амплітуда напруги статора встановлюється на пороговому рівні ("boost voltage"), що забезпечує оптимальний пуск і підтримку моменту.

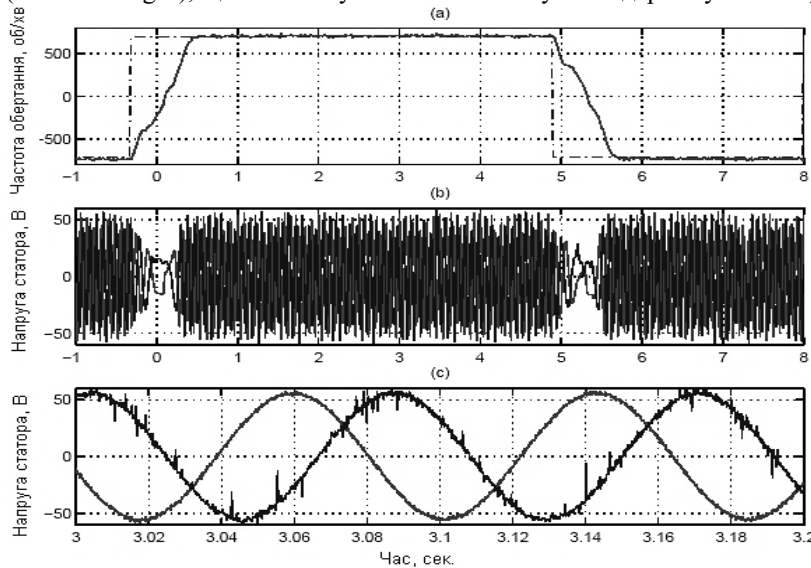


Рис.7. Вимірювання та аналіз синусоїдальної напруги на основі таблиці перетворення

У табл. 2 показано, що коефіцієнти заповнення імпульсів для різних секторів мають різні вирази. Однак, з огляду на властивість $\sin(x) = \sin(\pi - x)$, усі коефіцієнти можна записати уніфіковано:

$$d_a = \frac{2V_{sm} \sin n(\theta'')}{E\sqrt{3}}, d_b = \frac{2V_{sm} \sin n(\theta')}{E\sqrt{3}},$$

де $\theta'' = \pi/3 - \theta'$, а $\theta' = \theta - (k - 1)\pi/3$.

Оскільки область значень θ' завжди лежить у межах $0 \dots \pi/3$, для обчислення d_a і d_b необхідна таблиця синусів лише для цього інтервалу, що суттєво зменшує обсяг пам'яті для зберігання таблиці.

Мікроконтролери оснащені трьома контролерами силового каскаду (PSC), які генерують імпульсні сигнали за алгоритмом векторного керування. Лічильники виконують двонаправлену лічбу: від 0 до половини періоду комутації і назад до 0 (рис. 8). Значення для трьох регістрів порівняння наведені в табл. 3, що дозволяє ефективно реалізувати алгоритм ШІМ із мінімальним обсягом пам'яті та високою точністю сигналів.

Таблиця 2

Вирази duty cycle для секторів просторово-векторної модуляції

Номер сектора	θ	d_k	d_{k+1}
1	$[0, \frac{\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\theta)$
2	$[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$
3	$[\frac{2\pi}{3}, \pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$
4	$[\pi, \frac{4\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(2\pi - \theta)$
5	$[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{2\pi}{3} + \theta)$
6	$[\frac{5\pi}{3}, 2\pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(2\pi - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_s}{E} \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$

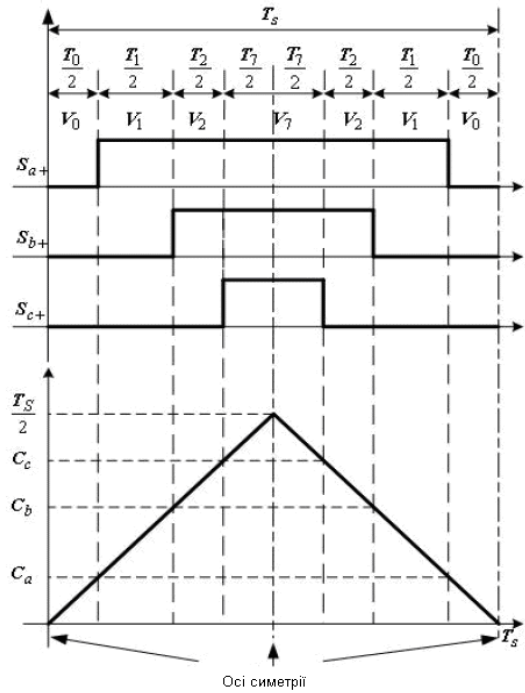


Рис.8. Візуалізація PWM та контроль регістрів порівняння інвертора

Таблиця 3

Фазові регістри порівняння та їх зміна по кроках

Номер сектора	$\frac{4}{T_s} C_a - 1$	$\frac{4}{T_s} C_b - 1$	$\frac{4}{T_s} C_c - 1$
1	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$
2	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$
3	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$
4	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
5	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
6	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$

Блок-схема (рис. 9) може бути використана для побудови контуру керування. У цьому контурі різниця між бажаною та фактичною швидкістю подається на вхід ПІ-регулятора, який визначає частоту напруги статора.

Для спрощення контролера обчислення правил V/f та алгоритму векторного ШІМ-керування виконуються на основі абсолютного значення частоти напруги статора.

Якщо вихід ПІ-регулятора набуває від'ємного значення, відбувається обмін вмістом двох змінних, що керують силовими транзисторами інвертора, забезпечуючи зміну напрямку обертання двигуна.

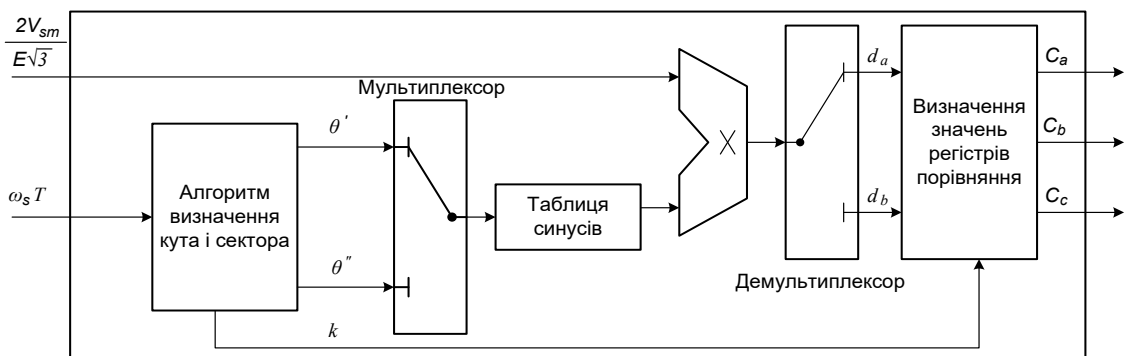


Рисунок 9- Векторне ШІМ-керування: блок-схема регуляторів і інвертора

Верифікація результатів та порівняльний аналіз

На рис. 12 представлені перехідні процеси швидкості та напруги статора асинхронного двигуна потужністю 750 Вт при керуванні мікроконтролером із стрибкоподібною зміною заданої швидкості між +700 та -700 об/хв.

З аналізу графіків видно, що при стандартному ШІМ-керуванні бажана швидкість досягається за 1,2 с, а при підході з векторним ШІМ-перетворенням перехідний процес стає більш плавним, хоча його тривалість збільшується.

Основні спостереження:

1. Стандартне ШІМ-керування:
 - Швидкість досягає заданого значення швидко.
 - Перехідні процеси більш різкі, можливі коливання напруги та моменту.
2. Векторне ШІМ-керування:
 - Перехідний процес плавніший, з меншими коливаннями струму та напруги.
 - Тривалість стабілізації трохи збільшується, але забезпечується більш стабільна робота двигуна.

Таким чином, експериментально підтверджується, що векторний ШІМ-контроль підвищує якість керування асинхронним двигуном: зменшує коливання електромеханічних параметрів, забезпечує більш точну стабілізацію швидкості та знижує електричні та акустичні навантаження на двигун.

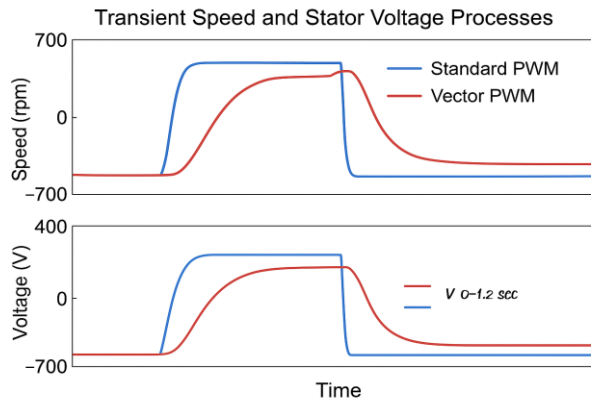


Рис.10. Графічна схема порівняння перехідних процесів стандартного та векторного ШІМ із зазначенням часу стабілізації та амплітуд

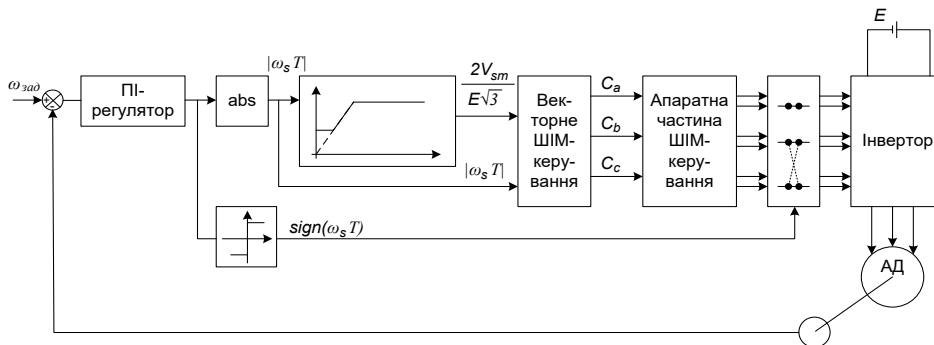


Рисунок 11 - Структурна схема комплексного керування електроприводом

Висновок

У даній роботі запропоновано модернізацію електроприводу на основі мікроконтролерного керування з алгоритмом векторного регулювання швидкості асинхронного двигуна. Система призначена для застосування у механізмах тваринницької галузі, таких як кормороздавачі, де характерні змінні навантаження та часті стрибкоподібні зміни швидкості.

Для забезпечення стабільності та точності роботи системи використано ПІ-регулятор у поєднанні з датчиками швидкості. Експериментальні випробування показали, що запропонований підхід дозволяє зменшити відхилення швидкості двигуна до $\pm 2\%$ від заданого значення навіть при різких змінах навантаження, тоді як традиційні методи регулювання показують відхилення до $\pm 8\%$.

Аналіз перехідних процесів при комутації обмоток двигуна продемонстрував, що впровадження векторного керування дозволяє скоротити час розгону на 25–30% порівняно з класичною схемою керування. Це забезпечує більш ефективну та плавну подачу корму, що особливо важливо для автоматизованих систем годівлі.

Таким чином, запропонована система поєднує високу точність регулювання, енергоефективність та адаптивність до змінних умов експлуатації. Вона демонструє значний потенціал для підвищення продуктивності та надійності механізмів тваринницької галузі та може стати основою для подальшого розвитку автоматизованих електроприводів у цій сфері.

Література

1. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 146 с.
2. Boldea I., Nasar S. A. Vector control of AC machines. – Boca Raton : CRC Press, 2010. – 456 p. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/9781420010848>
3. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – 611 p. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/9781420014235>
4. Rahman M., Islam R. Microcontroller-based control of AC drives for industrial applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 63, No. 2. – P. 1239–1248. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2475510>
5. Pelly B. J., Chan T. Implementation of field-oriented control using microcontrollers // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 134–141. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TIA.2004.841134>
6. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern control systems. – 13th ed. – Harlow : Pearson, 2017. – 1040 p.
7. Krivtsov V. I. et al. Automated feed distribution systems in livestock farming // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2015. – Vol. 134. – P. 45–52. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jaer.2015.03.002>
8. Кузьменко В. П., Петренко С. М. Електроприводи і системи автоматизації для технологічних процесів тваринництва. – Харків : Техніка, 2018. – 320 с.
9. Новицький А. В. Оцінка надійності засобів для приготування і роздавання кормів в залежності від умов і режимів їх експлуатації // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212, № 1. – С. 141–148.
10. Велит І. А., Корж В. О., Пашченко С. А. Дозатори вивантаження кормової суміші кормороздавачів для свиноферм // Техніка та технології в агропромисловому виробництві : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Полтава, 7–8 жовт. 2021 р.). – Полтава : ПДАУ, 2021. – С. 95–99.
11. Войтех В. О. Застосування мікроконтролерів компанії Microchip серії dsPIC33MC для керування напівпровідниковими інверторами напруги // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – Вип. 43. – С. 107–110.
12. Нич О. П. Розробка системи керування синхронним електродвигуном // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6 (1). – С. 257–262.
13. Возняк О. М., Штуть А. А. Керування асинхронним електродвигуном змінного струму за принципом постійності V/F і звичайного ШІМ-керування // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2022. – № 4 (119). – С. 102–109.
14. Возняк О. М., Штуть А. А., Тихонов В. К. Дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробка пристрою плавного пуску // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2022. – № 3 (118). – С. 110–122.
15. Tsurkan O., Kupchuk I., Polievoda Y., Wozniak O., Hontaruk Y., Prysiazhniuk Y. Digital processing of one-dimensional signals based on the median filtering algorithm // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – Vol. 98, No. 11. – P. 51–56. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15199/48.2022.11.10>

References

1. Hrabko V. V., Kucheruk V. Yu., Voznyak O. M. Microprocessor Control Systems for Electric Drives. Textbook. - Vinnytsia: VNTU, 2009. – 146 p.
2. Boldea, I., Nasar, S. A. Vector Control of AC Machines. CRC Press, 2010.
3. Krishnan, R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press, 2009.
4. Rahman, M., Islam, R. Microcontroller-Based Control of AC Drives for Industrial Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016.
5. Pelly, B. J., Chan, T. Implementation of Field-Oriented Control Using Microcontrollers. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005.
6. Dorf, R. C., Bishop, R. H. Modern Control Systems. Pearson, 2017.
7. Krivtsov, V. I., et al. Automated Feed Distribution Systems in Livestock Farming. Journal of Agricultural Engineering Research, 2015
8. Kuzmenko, V. P., Petrenko, S. M. Electric Drives and Automation Systems for Livestock Processing Technologies. Kharkiv: Tekhnika, 2018.
9. Novytskyi, A. V. "Reliability Assessment of Feed Preparation and Distribution Equipment Depending on Conditions and Operating Modes." Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Agricultural Engineering and Energy 212 (1) (2015): 141-148.
10. Velit, I. A., Korzh, V. O., Pashchenko, S. A., "Feed mixture discharge dosers of feed distributors for pig farms." Equipment and Technologies in Agro-Industrial Production (dedicated to the 55th anniversary of the Faculty of Engineering and Technology of Poltava State Agrarian University): materials of the International Scientific and Practical Conference, October 7-8, 2021. Poltava: PSAU, 2021. 200 p. 2021.
11. Voytech, V. O. "Application of Microchip dsPIC33MC series microcontrollers for controlling semiconductor voltage inverters." Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine 43 (2016): 107-110.
12. Nych, O. P., "Development of a control system for a synchronous electric motor." Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences 6 (1) (2018): 257-262.
13. Voznyak O.M., Shtuts A.A. Control of an asynchronous AC motor based on the V/F constant principle and conventional PWM control. Technology, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex. 2022. No. 4 (119). Pp. 102-109.
14. Voznyak O.M., Shtuts A.A., Tikhonov V.K. Study of starting modes of asynchronous motors and development of a soft-start device. Technology, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex. 2022. No. 3 (118). Pp. 110-122.
15. Tsurkan O., Kupchuk I., Polievoda Y., Wozniak O., Hontaruk Y., Prysiazhniuk Y. Digital processing of one-dimensional signals based on the median filtering algorithm. Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 98 (11). Pp. 51–56.