

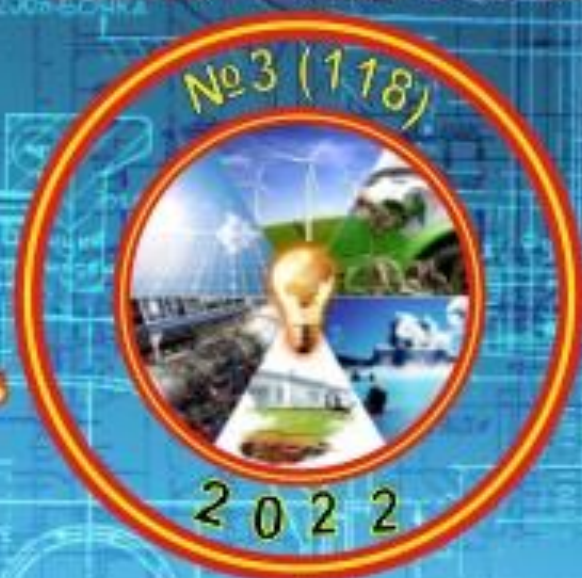


Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3



Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness

ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК



Всеукраїнський науково-технічний журнал

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

№ 3 (118) / 2022

м. Вінниця - 2022

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».
Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Токарчук О.А. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2022. № 3 (118). С. 133.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 9 від 23.12.2022 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 року №886);

- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);

- індексується в CrossRef, Google Scholar;

- індексується в міжнародній наукометричній базі [Index Copernicus Value](#) з 2018 року.

Головний редактор

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Веселовська Н.Р. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Відповідальний секретар

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік НААН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Севостьянов І.В. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет

Спірін А.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іванчук Я.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет

Твердохліб І.В. – д.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іскович – Лотоцький Р.Д. – д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет

Цуркан О.В. – д.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Яронуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

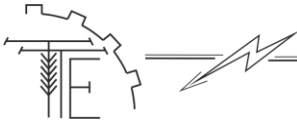
Зарубіжні члени редакційної колегії

Йордан Максимов – д.т.н., професор Технічного університету Габрово (Болгарія)

Відповідальний секретар редакції **Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет
Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. (0432) 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: pophv@ukr.net



ЗМІСТ

I. АГРОІНЖЕНЕРІЯ

*Анісімов В.Ф., Єленич А.П.***КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ТРАКТОРІВ ІНОЗЕМНОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА..... 5***Olena Trukhanska***INNOVATIVE APPROACHES AND METHODS OF INCREASING THE TECHNICAL LEVEL MACHINES AND UNITS..... 15***Солона О.В.***ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ..... 19***Serhiy Burlaka***DIESEL FUEL WAYS AND THEIR ELIMINATION METHODS..... 26**

II. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

*Веселовська Н.Р., Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ДЕТАЛІ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ПРОТЯГУВАННІ..... 31***Ємчик В.В., Полевода Ю.А., Ревва В.Ю.***ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРІАЛУ ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ..... 43***Ivan Sevostianov, Dina Tokarchuk, Andrii Didyk***CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF METHODS AND EQUIPMENT FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS..... 53***Купчук І.М., Гонтарук Я.В., Присяжнюк Ю.С.***ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМІЇ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ АПК УКРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ 59***Матвійчук В.А., Савків В.В., Богатюк М.О.***РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ..... 74***Oleksii Tokarchuk, Viktor Yemchuk***PECULIARITIES OF TRANSPORTATION OF GRAIN PRODUCTS BY CONVEYOR SPIRALS..... 83***Стаднік М.І., Колісник М.А.***ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ СПОЖИВАННЯ БІОГАЗУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ..... 90***Швець Л.В., Чмих К.В.***АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ..... 95***Яронуд В.М., Шаргородський С.А., Луц П.М., Лавренюк П.П.***СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ СУШАРЦІ..... 101**

III. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*Возняк О.М., Штуць А.А., Тихонов В.К.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ..... 110***Граняк В.Ф., Ємчик В.В., Кожушко О.В.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА..... 122**



CONTENTS

I. AGROENGINEERING

*Victor Anisimov, Anatoliy Yelenych***DESIGN FEATURES OF MODERN FOREIGN AGRICULTURAL TRACTORS..... 5***Olena Trukhanska***INNOVATIVE APPROACHES AND METHODS OF INCREASING THE TECHNICAL LEVEL MACHINES AND UNITS..... 15***Olena Solona***APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURAL PRODUCTION..... 19***Serhiy Burlaka***DIESEL FUEL WAYS AND THEIR ELIMINATION METHODS..... 26**

II. APPLIED MECHANICS. MATERIALS SCIENCE. INDUSTRY MACHINERY BUILDING

*Nataliia Veselovska, Yuriy Paladiychuk, Inna Telyatnuk***RESEARCH OF THE MICROHARDNESS OF THE SURFACE OF A CYLINDRICAL PART DURING DEFORMATION..... 31***Viktor Yemchyk, Yurii Polievoda, Viktor Revva***JUSTIFICATION OF THE DESIGN SCHEME OF THE INSTALLATION FOR PROCESSING GRANULAR MATERIAL WITH INFRARED RADIATION..... 43***Ivan Sevostianov, Dina Tokarchuk, Andrii Didyk***CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF METHODS AND EQUIPMENT FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS..... 53***Ihor Kupchuk, Yaroslav Gontaruk, Yurii Prysiazhniuk***PROSPECTS FOR INCREASING THE LEVEL OF ENERGY AUTONOMY OF PROCESSING ENTERPRISES OF AIC OF UKRAINE WITH THE HELP OF BIOGAS PRODUCTION..... 59***Viktor Matviychuk, Volodymyr Savkiv, Maxim Bogatiuk***DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF STAMPING BY ROLLING OF TUBULAR PREPARATIONS USING INDUCTION HEATING..... 74***Oleksii Tokarchuk, Viktor Yemchyk***PECULIARITIES OF TRANSPORTATION OF GRAIN PRODUCTS BY CONVEYOR SPIRALS..... 83***Mykola Stadnik, Mykola Kolisnyk***PERMISSIBLE LEVEL OF BIOGAS CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF ELECTRICITY FOR A LIVESTOCK FARM..... 90***Ludmila Shvets, Kateryna Chmykh***ANALYTICAL RESEARCH METHODS OF HOT DEFORMATION OF METALS..... 95***Vitalii Yaropud, Serhiy Shargorodskiy, Pavlo Luts, Petro Lavreniuk***SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF WALNUTS IN A CONVECTION DRYER..... 101**

III. ELECTRICAL ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

*Oleksandr Voznyak, Andrii Shtuts, Volodymyr Tykhonov***RESEARCH OF STARTING MODES OF ASYNCHRONOUS MOTORS AND DEVELOPMENT OF A SOFT START DEVICE..... 110***Valerii Hraniak, Viktor Yemchyk, Olexander Kozhushko***MATHEMATICAL MODEL OF THE PRIMARY MEASURING CONVERTER OF HUMIDITY TRANSFORMER OIL..... 122**



УДК 621.313

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-14

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА РОЗРОБКА ПРИБОРУ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Возняк Олександр Миколайович, к.н.т., доцент
Штуць Андрій Анатолійович, асистент
Вінницький національний аграрний університет
Тихонов Володимир Костянтинівич, доцент
Вінницький національний технічний університет

Oleksandr Voznyak, Ph.D., Associate Professor
Andrii Shtuts, Assistant
Vinnytsia National Agrarian University
Volodymyr Tykhonov, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University

Дослідження пускових режимів асинхронних електродвигунів. Зростання їх попиту в промисловості та повсякденні вимагає підвищення інтенсивності використання існуючих в АПК нових систем галузі.

В даний час йде прагнення зробити технологічний процес найбільш автоматизованим, а також створювати обладнання найбільш функціональне і доступне для розуміння звичайному користувачеві. Електроприводи споживають більше 60% виробленої електроенергії, підвищення їх енергетичної ефективності суттєво досягається переходом від нерегульованого асинхронного електроприводу до регульованого, який сприяє поліпшенню якісних характеристик технологічних процесів, надає можливість автоматизації виробництва, підвищує рівень енергозбереження і ресурсозбереження.

З недавнього часу активно розробляються, удосконалюються і впроваджуються системи автоматизованого управління технологічними процесами, створеними на базі передового мікропроцесорного обладнання. У сучасності все більшого поширення набуває метод управління пуском двигунів за допомогою частотного перетворювача. Ще до недавня метод частотного регулювання електроприводу вважався дорогим та застосовувався лише при великому діапазоні регулювання швидкості, але зі здешевленням і вдосконаленням перетворювачів частоти дана система керування стає практично ідеальним технічним рішенням з точки зору управління роботою насоса як в період пуску/зупинки, так і в штатних режимах.

Модернізацією традиційних систем керування, та пуску може стати перетворювач частоти з відкритою програмною платформою, що дозволяє користувачам допрацьовувати програмне забезпечення, оптимізувати його під свої завдання, у тому числі розробляти і додавати власні програмні модулі як рівня управління силовим інвертором, так і рівня програмно-логічного контролера для вирішення завдань локальної автоматизації.

Широке застосування асинхронних двигунів пояснюється їх перевагами порівняно з іншими двигунами: висока надійність, простота ремонту, мала кількість конструктивних елементів, можливість роботи від мережі змінного струму, простота обслуговування.

Для вирішення проблем, що виявляються при неконтрольованому пуску асинхронного двигуна застосовують різні способи, які в тій чи іншій мірі забезпечують розгін асинхронного двигуна з заданим значенням струму, істотно меншому, ніж при прямому (неконтрольованому) пуску.

Це дозволяє запобігти передчасному виходу з ладу асинхронний двигун (АД), і приводяться в рух механізмів, збільшити ресурс комутаційної апаратури, забезпечити можливість управління електроприводом з використанням сучасних засобів автоматизації.

Крім того, застосування сучасного контрольованого пуску дозволяє знизити споживану активну потужність, істотно знизити споживання реактивної потужності, знизити рівень шуму, зменшити вібрацію електродвигуна.

Пуск асинхронних короткозамкнених двигунів прямим підключенням до мережі, як правило, супроводжується великим пусковим струмом, перевищує номінальне значення в кілька разів.

Ключові слова: дослідження, електропривод, асинхронний двигун, плавний пуск, пускові режими.

Ф. 27. Рис. 15. Табл. 1. Літ. 10.



1. Постановка проблеми

Момент двигуна при прямому пуску також може досягати значень, суттєво перевищуючих номінальний. Це призводить до великих навантажень як на приводимий в дію механізм, так і на живильну мережу. Для ряду механізмів потрібно плавне збільшення або зменшення моменту двигуна в процесі розгону, уповільнення або гальмування. Для вирішення цієї проблеми використовуються спеціальні пускові пристрої, що дозволяють знизити пусковий струм і момент двигуна [6, 7].

Застосування пристрою плавного пуску дозволяє:

- 1) обмежити пікові механічні навантаження як двигуна, так і механізму;
- 2) виконати м'який, без поштовхів пуск;
- 3) обмежити пусковий струм;
- 4) підвищити коефіцієнт потужності;
- 5) економити енергію при роботі двигуна в ненавантаженому режимі;
- 6) виключити піки струму при перемиканні;
- 7) у ряді випадків виключити застосування муфт ковзання та гідромуфт;
- 8) відмовитися від контакторів, або виробляти комутацію контакторів за відсутності струму.

Пристрій забезпечує керовані функції: захист від аномальних режимів і діагностику як при пуску, так і в робочому режимі, безударний пуск - пуск зі знизеним пусковим моментом з найбільш сприятливим для приводного механізму режимом, режим зупинки. Безударний пуск здійснюється подачею напруги на двигун за експоненціальним законом. При цьому пусковий момент може знижуватися приблизно в 10 разів у порівнянні з прямим пуском. Під керованим пуском розуміються також складний пуск (затягнутий пуск), коли час пуску регулюється в межах 0,2 - 60 с, і пуск з відсіченням струму, при цьому пускові струми за час пуску не перевищують заданого струму відсічки.

В режимі пуску з відсіченням струму, значення пускових струмів.

Загальним підсумком застосування пристрою плавного пуску є підвищення надійності роботи електроприводу і установки.

Застосування керованого пуску дозволяє істотно зменшити шкідливі динамічні дії на двигун і приводний механізм і, отже, збільшити термін служби електропривода. Якщо не потрібно регулювати частоту обертання приводного механізму, то застосування пристрою дозволяє з мінімальними витратами вирішити всі проблеми, пов'язані із забезпеченням плавного пуску і зупинки двигуна.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Електронні пристрої плавного пуску за своїм принципом дії діляться в основному на чотири категорії:

- 1) Регулятори пускового моменту

Регулятори пускового моменту контролюють тільки одну фазу трифазного двигуна. Управління однією фазою може забезпечити контроль пускового моменту двигуна, але пусковий струм знижується при цьому незначно. Струм, поточний по обмотках двигуна, майже дорівнює струму при прямому пуску і не контролюється пускачем. Такий струм протікає по обмотках двигуна протягом більш тривалого часу, ніж при прямому пуску, тому може викликати перегрів двигуна. Регулятори пускового моменту не можуть використовуватися там, де необхідне зниження пускових струмів, забезпечення частих пусків, а також для пуску високоінерційних навантажень.

- 2) Регулятори напруги без зворотного зв'язку по струму

Регулятори напруги без зворотного зв'язку по струму автоматично змінюють вихідну напругу відповідно до заданого користувачем часу пуску і

не мають сигналу зворотного зв'язку від двигуна. Вони відповідають стандартним вимогам з електричними і механічними характеристиками, які висуваються до пристроїв цього класу, і можуть керувати напругою як у двох, так і у всіх трьох фазах двигуна.

Процес пуску визначається користувачем шляхом завдання початкової напруги і часу наростання напруги до номінального значення. Багато які з таких приладів забезпечують також обмеження пускового струму, але, як правило, таке обмеження засноване на зниженні напруги в процесі пуску. Зазвичай такі регулятори забезпечують і управління уповільненням, плавно знижуючи напругу при зупинці і, збільшуючи, таким чином, його тривалість.

Двофазні регулятори напруги без зворотного зв'язку знижують пусковий струм у всіх трьох фазах, але струм при цьому виявляється незбалансованим. Регулятори, що змінюють напругу в одній фазі, також мають обмежені можливості регулювання часу пуску, однак через перегрів двигуна можуть використовуватися тільки при легких навантаженнях.



3) Регулятори напруги зі зворотним зв'язком по струму

Регулятори напруги зі зворотним зв'язком є розвитком пристроїв, описаних вище. Вони отримують інформацію про струми двигуна і використовують її для призупинення збільшення напруги в процесі пуску при досягненні струмом значення, заданого користувачем. Інформація про струми використовується також для організації різних захистів, наприклад, від перевантаження, електронного теплового реле і т.д.

4) Регулятори напруги зі зворотним зв'язком можуть використовуватися як комплексні системи пуску двигуна.

Провідні компанії - виробники пристроїв пуску, як правило, випускають різні ряди приладів, пов'язані з різними категоріям регуляторів і потрапляють в різні цінові діапазони.

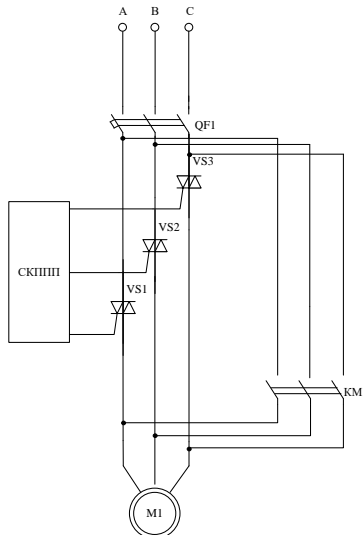


Рис. 1. Силова схема пристрою плавного пуску

Оскільки для роботи системи плавного пуску і гальмування потрібно здійснювати регулювання напруги двигуна шляхом зміни кута відкриття симисторів, які ввімкнені послідовно в коло статора приводного асинхронного двигуна, силова частина матиме наступний вигляд (рис1).

Послідовно в фази двигуна ввімкнені силові симістри VS1, VS2, VS3. На керуючі електроди відповідних симісторів поступають сигнали керування з системи керування пристроєм плавного пуску (СКППП). При цьому на виході отримуємо регульовану напругу та струм. При пуску двигун вмикається не на повну напругу мережі а відбувається пуск при пониженої напрузі з подальшим виходом на номінальне значення.

На рисунку 2 показана зміна моменту при прямому пуску (крива 1) та при плавному пуску (крива 2), як видно з рисунку момент двигуна при плавному пуску достатній для роботи виробничого механізму з приведеною механічною характеристикою (крива 3).

Як видно з рисунку 2 застосування пристрою прямого пуску дозволяє значно знизити пускові струми, на рисунку 2 крива 1 відповідає зміні струму при прямому пуску, крива 2 – плавному.

Роботу пристрою плавного пуску ілюструє рисунок 3. Для регулювання напруги підведеної до двигуна використовується фазовий метод суть якого полягає в зміні фази вмикання симісторів тобто кута α .

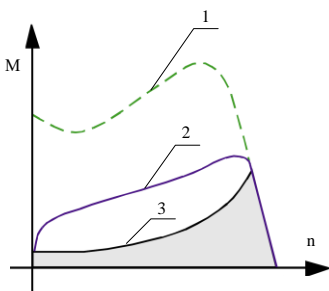


Рис. 2. Зміна моменту при плавному пуску

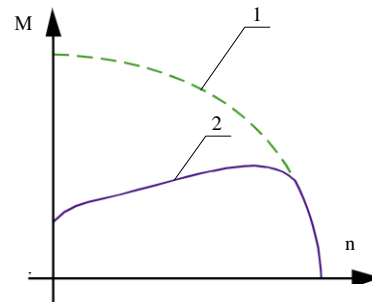


Рис. 3. Зміна струму при плавному пуску

Для керування привідним двигуном використовуємо перетворювач напруги, який на виході повинен забезпечувати номінальну напругу 380В та струм не нижче 4,6 А. Вибір силових елементів перетворювача проводимо по розрахунковим параметрам симісторів.

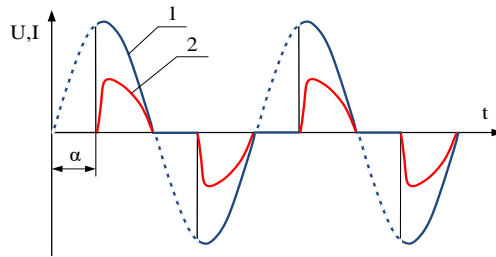


Рис. 4. Принцип роботи фазового регулятора напруги

Для розробки даного пристрою плавного пуску був вибраний двигун АИР 56 А2. Його основні параметри приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри двигуна АИР 56 А2

Параметр	Значення
Потужність, кВт	0.18
Синхронна частота обертання, об/хв	3000
Струм при 380В, А	0.55
ККД, %	65
Коефіцієнт потужності	0.78

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміненням первинної напруги здійснюється при $0 \leq U_{1\phi} \leq U_{1\phi\phi}$ [8].

Графіки побудовано при напругах $U_{1\phi} = (1; 0,8; 0,6; 0,4)$ за формулою

$$M(n) = \frac{3pU_{1\phi}^2 \frac{C_1 R_2'}{n_1 - n}}{2\pi f_1 \left[\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R_2'}{n_1 - n} \right)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X_2')^2 \right]} \quad (1)$$

Механічні характеристики асинхронного двигуна при $U_{1\phi} = var$ зображені на рисунку 5

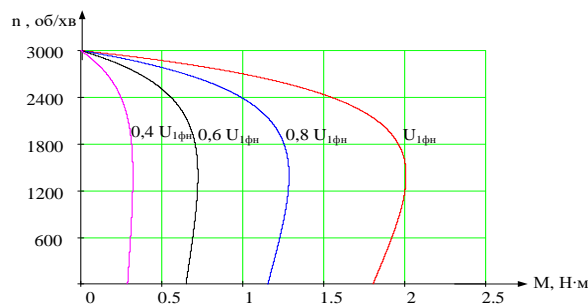


Рис. 5. Механічні характеристики АД при регулюванні напруги живлення

Структурна схема системи ТРН-АД представлена на рисунку 6

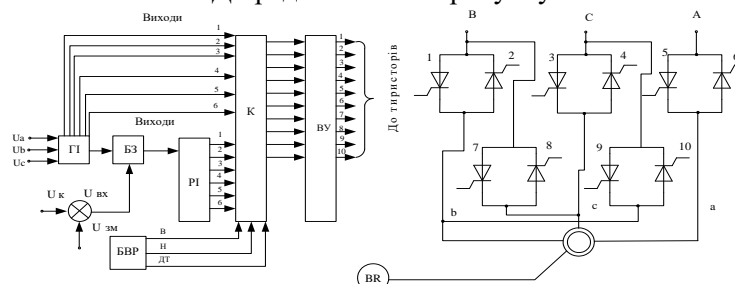


Рис. 6. Структурна схема пристрою пристроєм плавного пуску для фазового керування в статорному колі асинхронного двигуна



На рисунку 6: БВР – блок вибору режиму, ГІ – генератор імпульсів, БЗ – блок затримки, РІ – розподільювач імпульсів, К – комутатор, ВП – вихідні підсилювачі, U_k – напруга керування, $U_{зм}$ – напруга зміщення, $U_{вх}$ – напруга на вході блока затримки, ВР – тахогенератор.

Структурна схема системи з підпорядкованим регулюванням представлена на рисунку 7.

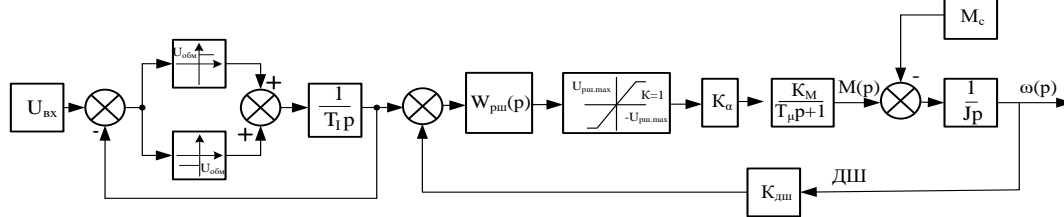


Рис. 7. Структурна схема системи з підпорядкованим регулюванням

Принцип роботи електропривода з пристроєм плавного пуску полягає в тому, що мінімальний кут відкриття тиристорів α_{\min} повинен відповідати фазовому куту струму короткого замикання двигуна [9]:

$$\alpha_{\min} = \varphi_k, \quad (2)$$

де φ_k – фазовий кут струму короткого замикання двигуна.

$$\varphi_k = \arccos(0,77) = 39,646. \quad (3)$$

де $\cos \varphi_k$ – коефіцієнт потужності короткого замикання двигуна.

Для розрахунку коефіцієнта передачі СІФК K_α умовно приймемо, що зміні кута відкриття повинна відповідати зміна керуючого сигналу U_y на вході системи, рівне максимальному значенню фазонесучої опорної напруги $U_{оп.макс} = 10V$.

$$K_\alpha = \frac{\alpha_{\max} - \varphi_k}{U_{оп.макс}}, \quad (4)$$

α_{\max} – максимальний кут відкриття тиристорів.

$$K_\alpha = \frac{110 - 39,646}{10} = 7,035.$$

Тиристорний перетворювач напруги представляє собою ланку з передаточною функцією:

$$W_M(p) = \frac{K_{ТРН}}{T_M p + 1}, \quad (5)$$

де $K_{ТРН}$ – коефіцієнт підсилення, що пов'язує діюче значення фазної напруги першої гармоніки з кутом включення тиристорів.

$$K_{ТРН} = \frac{U_{1*макс}^2 - U_{1*мін}^2}{\alpha_{макс} - \varphi_k} \cdot \frac{U_L^2}{(\sqrt{3})^2}, \quad (6)$$

де $U_{1*макс}$ – максимальне відносне значення лінійної напруги ($U_{1*макс}=1$); $U_{1*мін}$ – мінімальне відносне значення лінійної напруги ($U_{1*мін}=0,05$).

$$K_{ТРН} = \frac{1^2 - 0,05^2}{110 - 39,646} \cdot \frac{380^2}{(\sqrt{3})^2} = 649,952.$$

Мала некомпенсована стала часу розраховується:

$$T_M = \frac{1}{2 \cdot \omega_{ср}}, \quad (7)$$

де $\omega_{ср}$ – частота зрізу, рад/с.

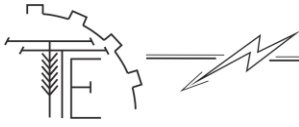
Для того щоб електромагнітні процеси не викликали практичного впливу на динаміку електричної частини двигуна, і як наслідок на поведінку електропривода з пристроєм плавного пуску на основі ТРН, частота зрізу контуру регулювання швидкості повинна бути розрахована з наступного співвідношення [1]:

$$\omega_{ср} = \frac{s_{кр} \cdot \omega_M}{4 \div 6}, \quad (8)$$

де ω_M – кутова частота напруги живлячої мережі, $\omega_0=314$ рад/с; $s_{кр}$ – критичне ковзання двигуна.

$$s_{кр} = \frac{M_{макс} \cdot s_H}{M_H}, \quad (9)$$

де $M_{макс}$ – максимальний момент двигуна, Н·м; M_H – номінальний момент двигуна, Н·м; s_H – номінальне ковзання.



$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (10)$$

де P_H – номінальна потужність двигуна, Вт; ω_H – номінальна кутова швидкість обертання ротора двигуна, рад/с.

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60}, \quad (11)$$

де n_H – номінальна швидкість обертання двигуна, об/хв.

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2760}{60} = 289,0276 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right).$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}, \quad (12)$$

$$s_H = \frac{314,159 - 289,027}{314,159} = 0,08,$$

$$M_H = \frac{250}{289,027} = 0,865 (\text{Н} \cdot \text{м}),$$

$$s_{\text{кр}} = \frac{2,009 \cdot 0,08}{0,865} = 0,186,$$

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{0,186 \cdot 314}{4 \div 6} = 9 \div 14,586 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right),$$

Приймаємо $\omega_{\text{cp}} = 10$ рад/с.

Тоді мала некомпенсована стала часу:

$$T_\mu = \frac{1}{2 \cdot 10} = 0,05 (\text{с}).$$

$$W_M(p) = \frac{649,952}{0,05p + 1}.$$

Асинхронний двигун, як і машина постійного струму, може бути представлена в вигляді електричної та механічної частини двигуна. Електрична частина зв'язує електромагнітний момент двигуна, що розвивається двигуном, з фазною напругою, яка підводиться до статорної обмотки.

Якщо розглядати лінеаризовану модель АД, то коефіцієнт підсилення асинхронного двигуна по моменту [3]:

$$K_{\text{АД}} = \frac{M_{\text{max}}}{U_\phi^2}, \quad (13)$$

де U_ϕ – фазна напруга, В; M_{max} – максимальний момент двигуна, Н·м.

$$K_{\text{АД}} = \frac{2,009}{380^2} = 0,000042.$$

Передаюча функція, котра зв'язує момент двигуна з кутом ввімкнення тиристорів:

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_\mu p + 1}, \quad (14)$$

де T_μ – мала некомпенсована постійна часу, с; K_M – коефіцієнт підсилення по моменту.

$$K_M = K_{\text{АД}} \cdot K_{\text{ТРН}}, \quad (15)$$

$$K_M = 0,00004 \cdot 649,952 = 0,027,$$

$$W_M(p) = \frac{0,027}{0,05p + 1}.$$

Механічна частина двигуна разом з передавальним пристроєм та виконавчим органом описується рівнянням механічної рівноваги:

$$M - M_c = J_d \frac{d\omega}{dt}, \quad (16)$$

де i – передаюче число редуктора; $J_{\text{во}}$ – момент інерції виконавчого органу, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; J_d – момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

$$W_{\text{мчд}} = \frac{1}{J_p}, \quad (17)$$



$$W_{мчд} = \frac{1}{0,00047p}$$

Для створення однократно інтегруючої системи регулювання швидкості двигуна відповідно з П – регулятором швидкості, який використовується в електроприводах, які працюють в режимах стабілізації швидкості, так і для відпрацювання електроприводам заданих переміщень, необхідно розрахувати коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості $K_{дш}$.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості розраховується:

$$K_{дш} = \frac{U_{зш}}{\omega_n}, \quad (18)$$

де $U_{зш}$ – напруга на вході регулятора швидкості, В; ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с.

$$K_{дш} = \frac{10}{289,027} = 0,761$$

Передаточна функція П – регулятора швидкості виражається залежністю:

$$W_{П-РШ} = K_{П-РШ} = \frac{J}{2T_{\mu} \cdot K_{\alpha} \cdot K_M \cdot K_{дш}}, \quad (19)$$

$$W_{П-РШ} = K_{П-РШ} = \frac{0,00047}{2 \cdot 0,05 \cdot 7,035 \cdot 0,027 \cdot 0,035} = 0,712.$$

В результаті дії навантаження на вал двигуна статична помилка по швидкості буде відповідати залежності:

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{M_n}{K_{\alpha} \cdot K_M \cdot K_{дш} \cdot K_{П-РШ}}, \quad (20)$$

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{0,865}{7,035 \cdot 0,712 \cdot 0,035 \cdot 0,027} = 182,743(\text{рад/с}).$$

При реалізації регулятора швидкості необхідно обмежити за допомогою блока обмеження допустимий момент двигуна на рівні максимально допустимого значення з цією метою необхідно визначити величину напруги обмеження вихідного сигналу регулятора швидкості:

$$U_{рш.макс} = \frac{M_{макс}}{K_{\alpha} \cdot K_M}, \quad (21)$$

де $M_{макс}$ – максимальний момент, Н·м.

$$U_{рш.макс} = \frac{2,009}{7,035 \cdot 0,027} = 10,526(\text{В})$$

Час розгону електропривода визначається за формулою:

$$t_p = \frac{J \cdot \omega_{н.дв}}{0,8 \cdot M_n}, \quad (22)$$

$$t_p = \frac{0,00047 \cdot 289,027}{0,8 \cdot 0,856} = 0,196(\text{с})$$

Тоді стала інтегрування за датчика інтенсивності:

$$T_n = 0,1 \cdot t_p, \quad (23)$$

$$T_n = 0,1 \cdot 0,196 = 0,0196(\text{с}).$$

Функціональна схема пристрою плавного пуску представлена на рисунку 8.

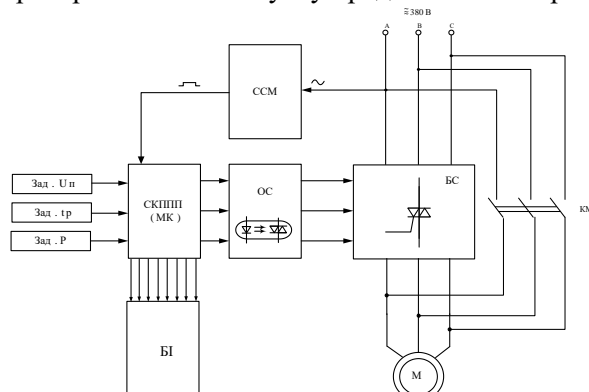


Рис. 8. Функціональна схема пристрою плавного пуску АД



Живлення пристрою плавного пуску здійснюється від трифазної мережі. Керування пристроєм плавного пуску здійснюється системою керування пристроєм плавного пуску (СКППП), функції якої може виконувати мікроконтролер (МК). Для роботи СКППП необхідно отримувати

синхронізуючі імпульси напруги мережі від яких будуть відраховуватись кути відкриття симісторів, для цього до складу функціональної схеми введено систему синхронізації СКППП з мережею (ССМ). Для керування блоком симісторів (БС), який складається з трьох симісторів ввімкнених послідовно в кожну фазу двигуна, необхідно забезпечити гальванічну розв'язку між колом керування та силовою високовольтною частиною. Для забезпечення опторозв'язки використаємо блок оптосимісторів (ОС) до

складу якого входять три оптосимістори для забезпечення керування трьома керуючими електродами силових симісторів. Для налаштування параметрів СКППП в схемі передбачено задатчики початкової напруги, часу пуску та задання режиму. Індикація режиму здійснюється за допомогою блоку індикації (БІ), який реалізовується на основі семисегментного індикатора і трьох світлодіодів.

Електрична принципова схема пристрою плавного пуску представлена на рисунку 9

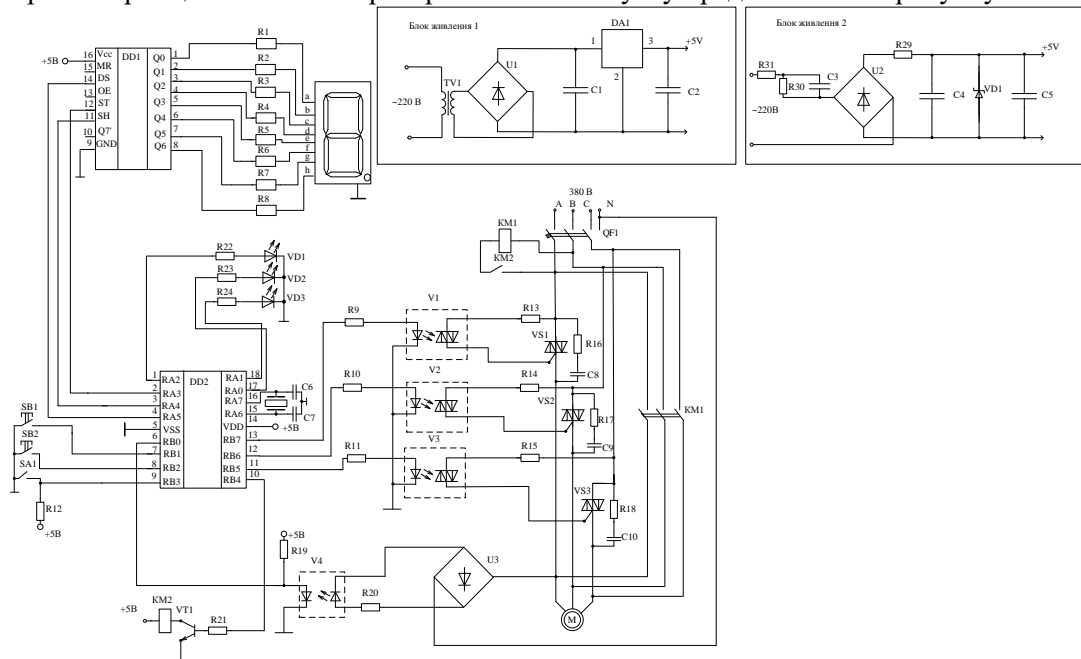


Рис. 9. Електрична принципова схема пристрою плавного пуску

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи: дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробкою пристрою плавного пуску.

Основне завдання, яке вирішується при пуску - отримання плавного наростання струму, моменту і частоти обертання двигуна. При використанні пристрою плавного пуску вона забезпечується плавним наростанням напруги на двигуні.

4. Виклад основного матеріалу

На сучасному етапі розвитку систем керування електроприводами мікропроцесорні системи керування набувають все більшої актуальності за рахунок їхньої гнучкості та багатофункціональності. Побудуємо мікропроцесорну систему керування пристроєм. На першому етапі визначимось з типом мікроконтролера який буде генерувати, сигнали керування на силові симістори. В якості МК вибираємо RISC мікроконтролер фірми Microchip PIC16F628A. Кнопка S3 забезпечує перемикання вибір режиму роботи пристрою плавного пуску. Кнопки S1 та S2 здійснюють пуск та зупинку двигуна в ручному режимі.

Для синхронізації роботи МК з мережею використаємо детектор нуля.

Вибираємо елементи схеми детектора проходження синусоїди напруги живлення через нуль.



Схема детектора зображена на рисунку 10 і складається з таких елементів: діодний міст, транзисторний оптрон і два резистори.

На рисунку 11 зображений принцип роботи детектора проходження синусоїди напруги живлення через нуль.

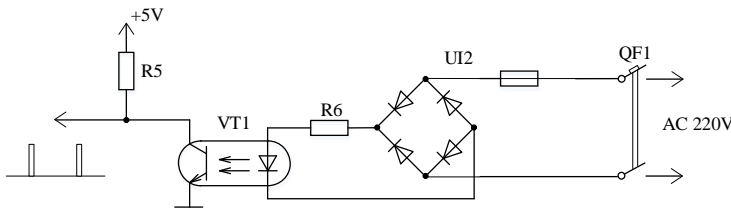


Рис. 10. Детектор проходження синусоїди напруги живлення через нуль

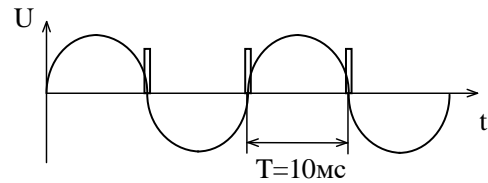


Рис. 11. Принцип роботи схеми детектора проходження синусоїди напруги живлення через нуль

Поки напруга мережі живлення має високе значення, ніжка мікроконтролера закорочена на масу транзисторним оптронам. Коли синусоїда мережі проходить через нуль, фототранзистор в оптроні закривається і на ножці мікроконтролера короткочасно з'являється сигнал і так повторюється під час кожного проходження через нуль синусоїди мережі живлення.

Вибираємо діодний міст МІС 2W10M, який також використаний в схемі блока живлення.

Вибираємо транзисторний оптрон РС817С з такими характеристиками:

- Максимальний вхідний струм – 50мА;
- Пряма вхідна напруга – 1.2В;
- Максимальна зворотня вхідна напругам – 6В;
- Максимальна вихідна напруга – 35В;
- Максимальний вихідний струм – 50мА;
- Коефіцієнт передачі – 200...400%;
- Гранична частота – 80кГц;
- Діапазон робочих температур – -30...+100С;
- Корпус – DIP-4.

Також були використані резистори С2 - 22 - 20 кОм, 0,125 Вт і С2 - 22 - 33 кОм, 0,125 Вт.

Для живлення пристроїв автоматики та керування необхідно розробити стабілізований блок живлення до складу якого входить трансформатор,

діодний міст, інтегральний стабілізатор вхідні та вихідні ємності. Живлення необхідне для контролера +5В, для цього використаємо відповідний інтегральний стабілізатор L7805CV.

Також розроблено блок живлення (Рис. 12) , яки містить в собі діодний міст, інтегральний стабілізатор вхідні та вихідні ємності. Перевагою такого блоку живлення над попереднім є його суттєва дешевизна і габаритні розміри оскільки в такій схемі немає трансформатора. Недолік – відсутня гальванічна розв'язка між високою і низькою сторонами.

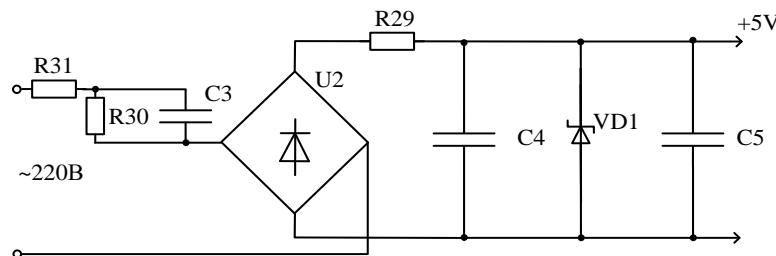


Рис. 12. Принципова електрична схема блоку живлення пристроїв автоматики

Виберемо симістори для силової частини схеми.

Середнє значення струму, що протікає через симістор:

$$I_B = \frac{K_B \cdot I_{dH}}{m \cdot K_{ox}}, \quad (24)$$

де I_{dH} – номінальний струм двигуна; K_B – коефіцієнт, що враховує збільшення струму перехідному режимі ($K_B=2$); K_{ox} – коефіцієнт охолодження ($K_{ox}=0,35$); m – кількість фаз живлячої мережі ($m=3$).



Таким чином, середнє значення струму, що протікає через транзистор:

$$I_B = \frac{2 \cdot 4,6}{3 \cdot 0,35} = 8,76$$

Амплітудне лінійне значення напруги мережі:

$$U_{\text{МЛ}}^{\text{max}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{МЛ}}, \quad (25)$$

$$U_{\text{МЛ}}^{\text{max}} = \sqrt{2} \cdot 400 = 566.$$

Максимальна величина зворотної напруги на транзисторі:

$$U_{\text{об.мах}} = K_3 \cdot K_{\text{посл}} \cdot U_{\text{МЛ}}^{\text{max}}, \quad (26)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу по напрузі ($K_3=1,25$); $K_{\text{посл}}$ – коефіцієнт запасу по напрузі, що враховує нерівномірний розподіл напруги ($K_{\text{посл}}=1,1$),

$$U_{\text{об.мах}} = 1,25 \cdot 1,1 \cdot 566 = 778$$

Найбільш можливий пусковий струм:

$$I_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{дн}}, \quad (27)$$

де $k_{\text{п}}$ – кратність пускового струму ($k_{\text{п}} = 6,2$),

$$I_{\text{п}} = 6,2 \cdot 4,6 = 28,54$$

Отже вибираємо симістори які надійно працюватимуть в різні режимах роботи, враховуючи максимальні показники. Тому для пристрою плавного пуску вибираємо симістори типу BT137 [5].

Для опторозв'язки виходів контролера які йдуть на керування силовими симісторами використовуємо оптосимістори MOC3023 оптична розв'язка дозволить захистити контролер від можливих перенапруг на його виводах. Підключення інших елементів до драйвера проводимо згідно технічної документації на мікросхему [1].

Для індикації режимів та стану перетворювача використовуємо світлодіодні індикатори VD1-3, та семисигментний індикатор.

Структурна схема моделювання в середовищі Proteus зображена на рисунку 13.

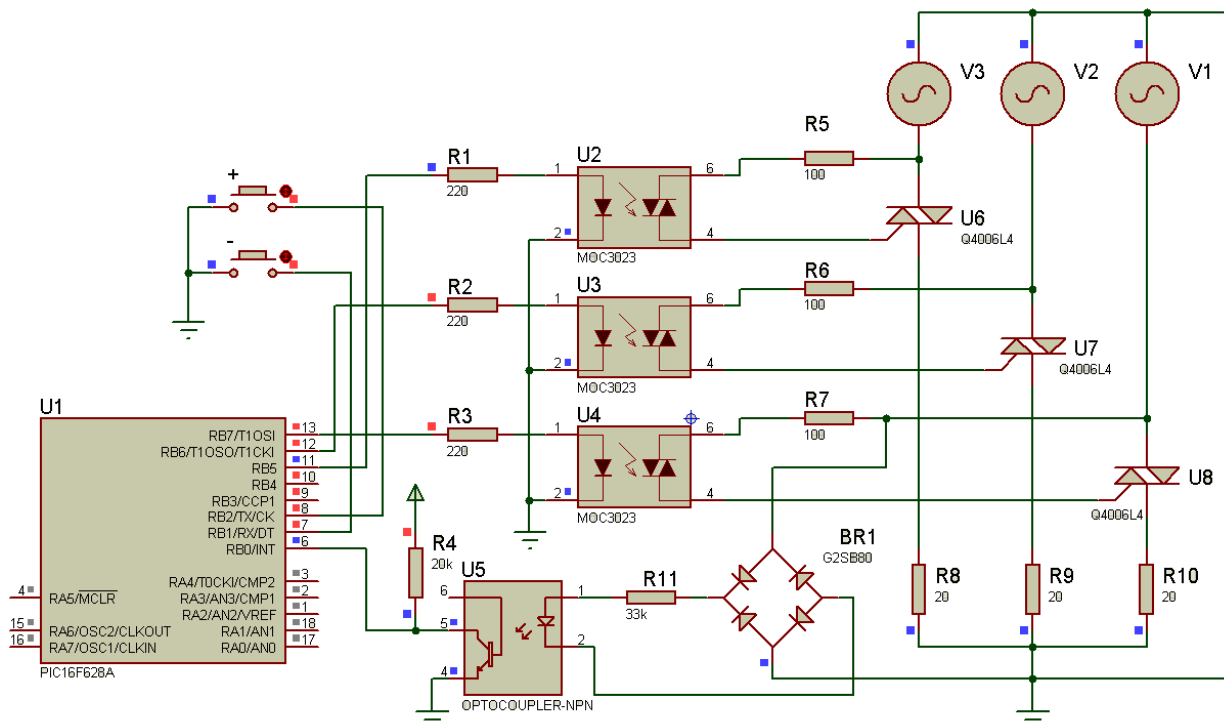


Рис. 13. Структурна схема моделювання в середовищі Proteus

Результати моделювання схеми при повністю відкрити симісторах і при кутів 45° зображені на рисунках 14 і 15.

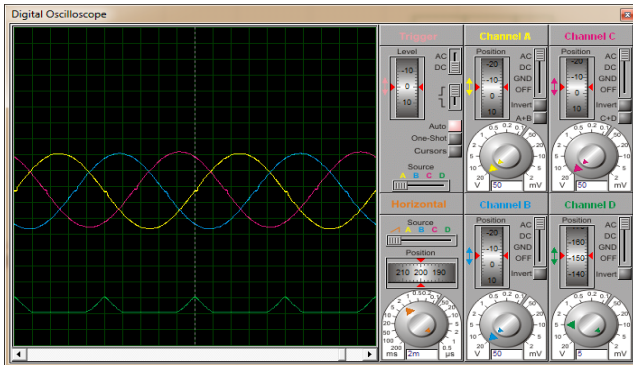


Рис. 14. Графіки моделювання при повністю відкритих симісторах

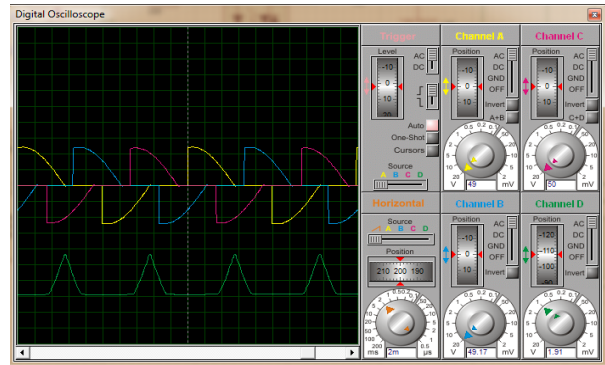


Рис. 15. Графіки моделювання при куті 45°

Отже як показало моделювання схема працює вірно.

5. Висновки

В роботі було проведено дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробка пристрою плавного пуску.

Момент двигуна при прямому пуску також може досягає значень, суттєво перевищуючих номінальний. Це призводить до великих навантажень як на приводимий в дію механізм, так і на живильну мережу. Для ряду механізмів потрібно плавне збільшення або зменшення моменту двигуна в процесі розгону, уповільнення або гальмування. Для вирішення цієї проблеми використовуються спеціальні пускові пристрої, що дозволяють знизити пусковий струм і момент двигуна.

Основне завдання, яке вирішувалося, що при пуску отримання плавного наростання струму, моменту і частоти обертання двигуна. При використанні пристрою плавного пуску вона забезпечується плавним наростанням напруги на двигуні.

Отже нами було вибрано симістори які надійно працюватимуть в різних режимах роботи, враховуючи максимальні показники.

Для опторозв'язки виходів контролера, які йдуть на керування силовими симісторами, було використано автосимістори які дозволили захистити контролер від перенапруг на його виходах. Підключення інших елементів до драйвера проводимо згідно технічної документації на мікросхему.

Для індикації режимів та стану перетворювача використаємо світлодіодні індикатори, та семисегментний індикатор.

Пристрій забезпечує керовані функції: захист від аномальних режимів і діагностику як при пуску, так і в робочому режимі, безударний пуск-пуск зі знизеним пусковим моментом з найбільш сприятливим для приводного механізму режимом, режим зупинки. Безударний пуск здійснюється подачею напруги на двигун за експоненціальним законом. При цьому пусковий момент може знижуватися приблизно в 10 разів у порівнянні з прямим пуском. Під керованим пуском розуміються також складний пуск (затягнутий пуск), коли час пуску регулюється в межах 0,2 – 60 с, і пуск з відсіченням струму, при цьому пускові струми за час пуску не перевищують заданого струму відсічки.

Список використаних джерел

1. Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навч. посіб. Вінниця: ТОВ "ТВОРИ", 2020. 332 с.
2. Возняк О. М., Штуць А. А., Колісник М. А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ТВОРИ, 2021. 280 с.
3. Возняк О. М., Штуць А. А. Розрахунок нестандартних W-параметрів чотириполосника на біполярному транзисторі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 2 (109). С. 122–128.
4. Видмиш А. А. Штуць А. А. Дослідження динамічних характеристик замкненої системи електропривода гравітаційного бетонозмішувача шляхом комп'ютерного моделювання *Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки*. 2021. №1 (293). С. 113–125.
5. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В.. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 388 с.



6. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М., Казак М. О. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 197 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. Київ: Либідь, 1997. 544 с.
8. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Ю., Сисюк О. В. Моделювання електромеханічних систем. Підручник. Кременчук, 2001. 376 с.
9. Перетворювач частоти. Каталог Altivar 28 фірми Schneider electric. URL: http://files.imcsYs.com/se/Q2cat_atv.28.pdf (дата звернення: 12.12.2022).
10. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. Vol. 20. № 1. P. 19–25.

References

- [1] Stadnik, M.I., Vydmysh, A.A., Shtucz, A.A., Kolisnyk, M.A. (2020). *Intelektualni systemy v elektroenergetyци. Teoriya ta praktyka: navch. posib. Vinnytsya: TOV "TVORY"*. [in Ukrainian].
- [2] Vozniak, O.M., Shtuts, A.A., Kolisnyk, M.A. (2021). *Suchasni systemy elektropryvodiv. Teoriia ta praktyka. Chastyna 1. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: TOV "TVORY"*. [in Ukrainian].
- [3] Vozniak, O.M., Shtuts, A.A. (2020). Rozrakhunok nestandartnykh W-parametriv chotyrypoliusnyka na bipoliarnomu tranzystori. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2 (109). 122–128. [in Ukrainian].
- [4] Vidmish, A.A. Shtuts, A.A. (2021). Doslidzhennja dinamichnih charakteristik zamknoї sistemi elektroprivoda gravitacijnogo betonozmishuvacha shljahom komp'juternogo modeljuvannja. *Visnik HNU. Serija: Tehnichni nauki*, 1 (293). 113–125. [in Ukrainian].
- [5] Vydmysh, A.A., Yaroshenko, L.V. (2020). *Fundamentals of electric drive. Theory and practice. Part 1. Textbook. Vinnytsia: VNAU*. [in Ukrainian].
- [6] Grabko, V.V., Rozvodyuk, M.P., Levitsky, S.M., Kazak, M.A. (2007). *Experimental studies of electric machines. Part III. Asynchronous machines. Textbook. Vinnytsia: VNTU*. [in Ukrainian].
- [7] Popovich, M.H., Kovalchuk, A.V. (1997). *Theory of automatic control. Kyiv: Libid*. [in Ukrainian].
- [8] Cherny, A.P., Lugovoy, A.V., Rodkin, D.Yu., Sisyuk, A.V. (2001). *Modeling of electromechanical systems. A textbook. Kremenchug*. [in Ukrainian].
- [9] *Frequency converter. Catalog of Altivar 28 by Schneider electric*. URL: http://files.imcsYs.com/se/Q2cat_atv.28.pdf. (Last accessed: 12.12.2022). [in Ukrainian].
- [10] Shtuts, A., Kolisnyk, M., Yavdyk, V. (2018). Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 20 (1). 19–25. [in English].

RESEARCH OF STARTING MODES OF ASYNCHRONOUS MOTORS AND DEVELOPMENT OF A SOFT START DEVICE

Study of starting modes of asynchronous electric motors. The growth of their demand in industry and everyday life requires an increase in the intensity of use of new systems of the industry existing in the agricultural sector.

Currently, there is an aspiration to make the technological process the most automated, as well as to create the most functional and accessible equipment for an ordinary user to understand. Electric drives consume more than 60% of the produced electricity, increasing their energy efficiency is significantly achieved by switching from an unregulated asynchronous electric drive to a regulated one, which contributes to the improvement of the quality characteristics of technological processes, provides the opportunity to automate production, and increases the level of energy and resource conservation.

Recently, systems of automated control of technological processes created on the basis of advanced microprocessor equipment have been actively developed, improved and implemented. Nowadays, the method of controlling the start of engines using a frequency converter is becoming more and more common. Until recently, the method of frequency regulation of the electric drive was considered expensive and was used only for a large range of speed regulation, but with the decrease in price and improvement of frequency converters, this control system becomes an almost ideal technical solution from the point of view of controlling the operation of the pump both in the start/stop period and in normal modes.

Modernization of traditional control and start-up systems can become a frequency converter with an open software platform, which allows users to refine the software, optimize it for their tasks, including



developing and adding their own software modules both at the power inverter control level and at the software-logic level controller for solving local automation tasks.

The wide use of asynchronous motors is explained by their advantages compared to other motors: high reliability, ease of repair, small number of structural elements, the possibility of operation from an alternating current network, ease of maintenance.

Various methods are used to solve the problems that appear during the uncontrolled start of an asynchronous motor, which to one degree or another ensure the acceleration of the asynchronous motor with a given value of current, which is significantly lower than with a direct (uncontrolled) start [1].

This makes it possible to prevent the premature failure of the asynchronous motor (AD) and driven mechanisms, to increase the resource of the switching equipment, to ensure the possibility of controlling the electric drive using modern automation tools.

In addition, the use of modern controlled start-up allows you to reduce the active power consumption, significantly reduce the reactive power consumption, reduce the noise level, and reduce the vibration of the electric motor.

The start of asynchronous short-circuited motors by direct connection to the network is usually accompanied by a large starting current, which exceeds the nominal value by several times.

Key words: research, electric drive, asynchronous motor, soft start, start modes.

F. 27. Fig. 15. Tab. 1. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Возняк Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: alex.voz1966@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Штуць Андрій Анатолійович – асистент 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>).

Тихонов Володимир Костянтинович – доцент кафедри «Фізичного виховання» Вінницького національного технічного університету (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, email: tykhonovvolodymyr@vntu.edu.ua).

Oleksandr Voznyak – candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: alex.voz1966@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Andrii Shtuts – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Volodymyr Tykhonov – Associate Professor of the Department of Physical Education, Vinnitsia National Technical University (Khmelnyske Shosse, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine, email: tykhonovvolodymyr@vntu.edu.ua).