

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КУЛИК Максим Володимирович



УДК 621.313.33:669.14.018

**АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД  
З ЦИФРОВОЮ СИСТЕМОЮ  
ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО УПРАВЛІННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі апаратури радіозв'язку, радіомовлення і телебачення Державного ВНЗ «Дніпровський державний технічний університет» (м. Кам'янське) Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**С'ЯНОВ Олександр Михайлович**, Дніпровський державний технічний університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри апаратури радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**МАЛЯР Андрій Васильович**, Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри електромехатроніки і комп'ютеризованих електромеханічних систем інституту енергетики та систем керування

кандидат технічних наук, доцент  
**КОЗАКЕВИЧ Ігор Аркадійович**, Криворізький національний університет Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті

Захист відбудеться «18» березня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: ауд. 102, корпус № 1, просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., 49005.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

Автореферат розісланий «17» лютого 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д.08.080.07, к.т.н., доцент



І. М. Удовик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Сучасний етап розвитку промисловості характеризується розширенням сфери застосування регульованого електропривода (ЕП) змінного струму. Поряд з різноманітністю систем управління (СУ) частотне управління асинхронним двигуном (АД) є своєрідним технічним стандартом, причому, не дивлячись на простоту і ефективність скалярних СУ, все більше застосовується векторне управління. Це пов'язано з тим, що асинхронні ЕП з векторним управлінням дозволяють отримати діапазон регулювання швидкості обертання ротора АД  $1 : 10000$ , високий рівень точності підтримки заданого значення швидкості обертання ротора АД при змінному навантаженні на валу, плавність обертання ротора АД на малих частотах, рівний максимальному пусковий момент, підтримання заданого моменту на валу АД.

Значний внесок у створення ЕП з частотним управлінням внесли Рудаков В. В., Столяров І. М., Слежановській О. В., Виноградов А. Б., Шидловський А. К., Пересада С. М., Дартау В. А., Синчук О. Н., Ulf Jacobson, Ковбаса С. М., Маляр А. В., Козакевич І. А., Алексєєв В. В., Thomas Korsell, Holtz J., Браславський І. Я.

Поряд з перевагами ЕП з частотним управлінням мають низку недоліків: складний алгоритм управління автономним інвертором напруги (АІН) і випрямлячем; можливість появи розриву фази струму в АД, що, в свою чергу, призводить до імпульсного спотворення його форми, істотного збільшення рівня високочастотних гармонік, а значить – до додаткових втрат в АД, його перегріву і проникненню значних перешкод в мережу живлення; для роботи необхідне знання параметрів АД, тобто необхідність адаптації СУ під конкретний тип двигуна, наприклад, за допомогою введення додаткових блоків визначення параметрів АД; схильність векторних систем зі зворотними зв'язками до самозбудження при різких змінах навантаження на валу або різких змінах заданого режиму роботи; низький ступінь захищеності силових модулів; складність забезпечення синфазної роботи систем рекуперації енергії.

Таким чином, *актуальною науковою задачею* є розробка та дослідження системи дискретно-фазового управління (ДФУ) асинхронним електроприводом (АЕП), яка зберігає переваги векторного методу, але, в той же час, принципово відрізняється від суто скалярного і суто векторного методів управління режимами роботи ЕП та передбачає розробку нового принципу завдання і відстеження фази положення ротора АД, та не використовує громіздкий алгоритм, пов'язаний з координатними перетвореннями, і дозволить оперативно відстежувати розбіжність заданої фази від поточної і синтезувати відповідний алгоритм управління, в тому числі при наявності зворотних зв'язків.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведених автором протягом 2007 – 2020р. Робота відповідає вимогам Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Сучасні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі». Робота виконувалася в Дніпровському державному технічному

університеті на кафедрі «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення» в рамках бюджетних НДР Міністерства освіти і науки України, де здобувач був співвиконавцем: «Разработка теории расчёта потерь энергии в асинхронных двигателях при питании от преобразователей энергии» (№ ДР 0107U000748); «Оптимизация процессов энергообмена в автономных инверторах при работе на асинхронный двигатель» (№ ДР 0109U002255); «Исследование характеристик и разработка асинхронного электропривода с цифровой системой управления для повторно кратковременных режимов работы» (№ ДР 0110U003447).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є подальший розвиток теорії асинхронних електроприводів шляхом створення систем дискретно-фазового управління, які на відміну від систем векторного керування не вимагають використання координатних перетворень і точного знання параметрів асинхронного двигуна і забезпечують при цьому співставні динамічні та статичні характеристики.

*Для досягнення поставленої мети розв'язано такі задачі:*

- розробка та дослідження принципу та алгоритму управління асинхронними електроприводами на основі законів дискретного формування фази частотно-модульованих сигналів;

- дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з дискретно-фазовим управлінням в різних режимах роботи;

- розробка та дослідження децентралізованої моделі системи управління асинхронним електроприводом з дискретно-фазовим управлінням, яка використовує симетричний мультипроцесорний режим роботи і дозволяє створювати перетворювачі частоти з будь-якою кількістю фаз і рівнів напруги;

- розробка та дослідження системи рекуперації енергії між асинхронним двигуном і мережею живлення при наявності зворотних зв'язків за швидкістю обертання ротора двигуна і струмом в обмотці статора з використанням дискретно-фазового управління;

- розробка та дослідження багатоступеневої системи захисту підвищеної надійності для силових модулів на IGBT або MOSFET для асинхронного електропривода з дискретно-фазовим управлінням;

- перевірка розробленого асинхронного електропривода з дискретно-фазовим управлінням в умовах лабораторії та підприємств, які використовують регульовані асинхронні електроприводи.

**Об'єкт дослідження** – процеси перетворення енергії в асинхронному електроприводі з дискретно-фазовим управлінням.

**Предмет дослідження** – характеристики асинхронного електропривода за схемою перетворювач частоти – асинхронний двигун з дискретно-фазовим управлінням.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених завдань використовувалися методи дискретної математики; ряди Маклорена; математичне моделювання у віртуальних середовищах MatLab і Proteus; Keil Embedded Development Tools for ARM і AVRStudio для складання алгоритмів функціонування розробленої системи управління; експериментальні дослідження дослідно-промислового зразка асинхронного електропривода на конкретних зразках двигуна.

### **Наукові положення, що виносяться на захист.**

1. Використання лінійного і квадратичного законів формування фази частотно-модульованих сигналів, вибір кожного з яких або їх комбінації здійснюється відповідно до необхідного режиму роботи, забезпечує точне відтворення заданої траєкторії руху електропривода.

2. Кускова апроксимація необхідного закону зміни швидкості обертання ротора АД за допомогою дискретно-фазового управління дозволяє усунути недоліки векторного і скалярного методів управління і не використовувати громіздкий алгоритм, пов'язаний з координатними перетвореннями, а відпрацювання необхідного закону управління здійснювати на основі значення кута положення ротора.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Доведено, що використання дискретно-фазового управління дозволяє забезпечувати рух асинхронного електроприводу за заданими траєкторіями покровоно на основі значення кута положення ротора.

2. Розроблений принцип дискретно-фазового управління кутовим положенням ротора АД, який, на відміну від існуючих, дозволяє виключити застосування блока визначення та завдання параметрів електродвигуна і на основі єдиного алгоритму здійснювати управління активним випрямлячем та інвертором напруги.

3. Доведено, що розроблений принцип дискретно-фазового управління асинхронним електроприводом дозволяє отримати керовані перехідні процеси з заданими якісними показниками і відрізняється від існуючих тим, що забезпечує підвищену точність відпрацювання необхідного закону обертання ротора асинхронного двигуна при одночасному спрощенні алгоритму обчислень.

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій та результатів** забезпечується коректністю використання положень теорії сигналів і процесів, теорії електричних машин і електропривода, використання широко апробованих моделей асинхронних машин і підтверджується збігом теоретичних положень з результатами математичного моделювання та даними експериментальних досліджень, а також позитивним впровадженням результатів роботи.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Представлені в дисертаційній роботі теоретичні розробки дозволили:

- створити і рекомендувати до використання в керованих електроприводах розроблену децентралізовану систему управління, яка використовує дискретно-фазовий спосіб, симетричний мультипроцесорний режим роботи та реалізована на основі сучасної елементної бази з використанням тридцятидворозрядного мікроконтроллера і відповідного алгоритму;

- розробити і рекомендувати до використання багатоступеневу систему захисту підвищеної надійності для силових модулів на IGBT або MOSFET, а також систему рекуперації енергії між асинхронним двигуном і мережею живлення, що є невід'ємною частиною всього комплексу асинхронного електропривода з дискретно-фазовим управлінням, охопленого зворотними зв'язками за струмом в обмотці статора і швидкістю обертання ротора двигуна;

– розробити і рекомендувати до використання систему аналізу і обробки даних, яка утворює єдине інформаційне середовище з одним або декількома комплексами ПЧ АД з дискретно-фазовим управлінням;

– створити і дослідити в умовах ТОВ «Інтернік Україна» (м. Дніпродзержинськ) та Дніпродзержинського комунального підприємства Дніпродзержинської міської ради «Міськводоканал» експериментальний зразок асинхронного електропривода з децентралізованою мікроконтролерною системою дискретно-фазового управління;

– впровадити результати досліджень у практику побудови потужних перетворювачів нового типу для роботи у високонавантажених повторно короткочасних режимах роботи асинхронного електропривода і передати відповідну науково-технічну документацію спеціалізованим організаціям-виробникам електроустановок, що підтверджується актами впровадження ТОВ «Інтернік Україна» (акт впровадження від 30 листопада 2017 року) (м. Дніпродзержинськ) і Дніпродзержинського комунального підприємства Дніпродзержинської міської ради «Міськводоканал» (акт впровадження від 15 травня 2017 року).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпровського державного технічного університету при підготовці студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в рамках викладання лекційних, практичних і лабораторних занять з дисциплін: системи управління електроприводами, системи оптимального управління електроприводами, моделювання електромеханічних систем, сучасні методи синтезу систем управління.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми підвищення ефективності електромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (м. Севастопіль, 2007р. та 2009р.), 12-ому Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке» (м. Харків, 2008р.), VII всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2009р.), Міжнародній науково-практичній конференції «The development of technical sciences: problems and solutions» (м. Брно, Чеська Республіка, 2018р.), IV всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління, пошук ідей та рішень» (м. Покровськ, 2020р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 22 друкованих працях, з них 2 статті – в зарубіжних фахових виданнях, включених до наукометричних баз даних (Scopus), 13 статей – у фахових виданнях України, отримано 1 патент України на винахід, 6 – в тезах доповідей на наукових конференціях. Дві роботи опубліковані без співавторів.

**Особистий внесок автора.** Автор самостійно сформулював мету і завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, виконав теоретичну частину роботи, розробив і виконав дослідно-промисловий зразок ПЧ експериментальної установки і провів експериментальні дослідження.

**Структура і обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації становить 240 сторінок друкованого тексту і містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Основну частину викладено на 156 сторінках. Список використаних джерел складається зі 167 найменувань і займає 18 сторінок. Дисертація містить 112 рисунків і 4 таблиці, з них 16 рисунків і 1 таблиця повністю займають 19 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про рівень апробації, кількість публікацій за тематикою виконаних досліджень.

*У першому розділі* проведено аналіз двох основних методів управління – скалярного і векторного. Проведено моделювання таких методів з СУ та жорстким управлінням і зворотними зв'язками за швидкістю обертання ротора АД, струмом статора, моментом на валу ротора, фазі положення ротора. Показано, що незважаючи на простоту реалізації скалярного методу в даний час частіше використовується векторний, що дозволяє регулювати швидкість обертання в широких межах і забезпечує менше відхилення реального режиму обертання від заданого оператором. Використання транзисторів в силових блоках має перевагу в порівнянні з використанням в них тиристорів, однак, існуючі СУ для АЕП з MOSFET або IGBT і векторної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) забезпечують збереження стійкості роботи ЕП в динамічних режимах роботи за рахунок значних переважань за струмом, спотворення його форми, і в той же час не завжди забезпечує безперервність фази напруги живлення. При цьому використовуються складні розрахункові алгоритми, що особливо ускладнює оперативне управління режимом роботи АД при одночасній наявності сигналів зворотних зв'язків і змінного сигналу завдання режиму роботи АЕП.

Існуючі СУ передбачають можливість обміну енергією між мережею живлення і АД, проте більшість існуючих систем рекуперації енергії є автономними і містять окремий випрямляч і інвертор, що пов'язує такі системи з мережею живлення. При цьому виникає складність, обумовлена необхідністю постійного відстеження поточної фази напруги мережі і формування на її основі ШІМ сигналу для автономного інвертора напруги (АІН), який повертає енергію в мережу.

Використання напівпровідникових приладів в силових блоках сучасних СУ висуває підвищені вимоги до їх надійності. В існуючих перетворювачах частоти (ПЧ) використовуються різні методи формування захисних інтервалів для силових модулів зазвичай орієнтоване тільки на конкретний тип модуля, тобто алгоритм роботи СУ не має достатньої універсальності.

*У другому розділі* запропоновано новий принцип управління АЕП, складена математична модель СУ з ДФУ. Розроблено структуру СУ ПЧ – АД з використанням фазового управління і доведено, що така система дозволяє формувати вихідну напругу ПЧ за заданим оператором алгоритмом, забезпечує безперервність навігу

фази при будь-яких змінах режимів роботи АД зі збереженням відношення ефективного значення вихідної напруги до частоти обертання ротора.

У загальному вигляді задача управління характеристиками АД зводиться до забезпечення заданої кутової швидкості обертання  $\omega$  і сили струму в обмотках  $I$ :  $\Delta\omega(t) = \omega_{зад}(t) - \omega_{ном}(t)$ ,  $\Delta i(t) = i_{зад}(t) - i_{ном}(t)$ , при  $\Delta i(t), \Delta\omega(t) \rightarrow 0$ ,  $\Delta t_{пер} \rightarrow 0$ , де  $\omega_{зад}(t)$ ,  $\omega_{ном}(t)$  – задана і поточна кутова частота обертання ротора,  $i_{зад}(t)$ ,  $i_{ном}(t)$  – заданий і поточний струм в обмотці АД, а  $\Delta t_{пер}$  – час перехідного процесу.

Пропонується модель ДФУ АЕП, функціональну схему якої наведено на рис. 1. Модель складається з блока визначення сигналу помилки (блок 1), блоків порівняння отриманої помилки на двох сусідніх відлікових інтервалах (блоки 2, 3, 7, 8), комутаційної матриці (блоки 9, 10), яка вибирає і мультиплексує заздалегідь заготовлені закони формування кута положення ротора АД (блоки 5, 6), блоків контролю безперервності фази (блоки 4, 11), формувача необхідного закону зміни фази (блок 14) і заданої напруги живлення (блоки 12, 13), а також блоків ШІМ (блоки 15 – 18) і силового модуля (блок 19).

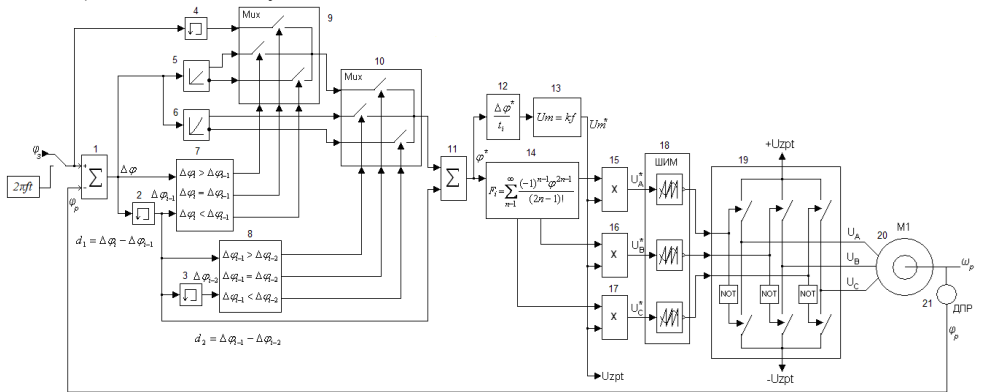


Рисунок 1 – Функціональна схема дискретно-фазового управління АД

Алгоритм роботи запропонованого способу формування електричного кута повороту ротора полягає в наступному. Положення ротора  $\varphi_P$  однозначно визначається фазою його обертального руху, тобто кутом повороту, відлічуваним від початку обертання (надалі – фаза ротора). Швидкість обертання ротора АД  $\omega_P$  забезпечується формуванням необхідної частоти напруги  $f_{ЗН}^*$ , яка живить АД, та однозначно задається фазою цієї напруги  $\varphi^*$ . Значення  $\varphi^*$  визначається з функції відхилення  $\Delta\varphi$  поточного положення ротора  $\varphi_P$  від його заданого значення  $\varphi_3$ .

У системі регулювання кутової швидкості обертання ротора АД можливе використання датчика положення ротора (ДПР) або сигналу заданого електричного кута повороту ротора. Поточний кут положення ротора  $\varphi_P$  порівнюється із заданим



кутом  $\varphi_3$ , розрахованим на підставі алгоритму управління АД. Для цього в блоці (1) визначають помилку положення ротора на  $i$ -му відліку:  $\Delta\varphi_i = \varphi_{3i} - \varphi_{Pi}$ .

Для визначення динаміки помилки на сусідніх відлікових інтервалах вводяться величини  $d_1$  і  $d_2$  (три сусідніх відліку  $i-2, i-1, i$ ):  $d_1 = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_{i-1}$ ,  $d_2 = \Delta\varphi_{i-1} - \Delta\varphi_{i-2}$ .

Якщо помилка відпрацювання заданого положення ротора дорівнює нулю, в блоках 7 та 8 (рис. 1) вибирається рівняння рівномірної зміни фази, якщо ж ця помилка відмінна від нуля, спочатку вибирається пропорційний закон зміни  $\varphi_i^*$  і якщо цього недостатньо, – квадратичний або їх комбінація з урахуванням знака величини помилки. У блоках 7 та 8 (рис. 1) логічними операторами визначають можливі варіанти функціонування системи:

1 – помилка відпрацювання кута положення ротора відсутня:

$$\varphi_i^* = \varphi_{i-1}^*, \quad \Delta\varphi_i = 0, d_1 = d_2 = 0; \quad (1)$$

2 – помилка тільки з'явилася:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i > 0, \Delta\varphi_{i-1} = 0, (d_1 = \Delta\varphi_i) \\ \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i < 0, \Delta\varphi_{i-1} = 0, (d_1 = \Delta\varphi_i) \end{cases}; \quad (2)$$

3 – помилка продовжує мати місце, але не збільшується:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > 0, d_2 \geq d_1 \\ \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 < 0, d_2 \geq d_1 \end{cases}; \quad (3)$$

4 – помилка збільшується:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i > 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i < 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \end{cases}. \quad (4)$$

З огляду на знак  $\Delta\varphi_i$ , сигнал миттєвого значення фази  $\varphi_i^*$  матиме вигляд:

$$\varphi_i^* = \begin{cases} \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i > 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \\ -\beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i^2 + \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i < 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 > d_2 \\ \beta \cdot |d_1| \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} \neq 0, d_1 \neq 0, d_2 \geq d_1 \\ \beta \cdot \Delta\varphi_i + \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i \neq 0, \Delta\varphi_{i-1} = 0, (d_1 = \Delta\varphi_i) \\ \varphi_{i-1}^*, & \Delta\varphi_i = 0, d_1 = d_2 = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

де  $\beta$  – константа, яка визначається глибиною зворотного зв'язку.

Квадратична складова заданого кута положення ротора з'являється тільки у випадку, коли помилка відпрацювання  $\Delta\varphi_i$  збільшується. В результаті спільної дії лінійного і квадратичного доданків (4) відбувається вирівнювання  $d_1$  і  $d_2$  так, що  $d_1 = d_2$ , і для відпрацювання кута положення ротора використовується рівняння (3) до зникнення помилки (1).

Для досягнення поставленої мети розроблена СУ АЕП з ДФУ, яка складається з цифрового процесора, який відпрацьовує закони формування сигналів фази  $\varphi$  і кутової швидкості обертання ротора АД  $\omega$  з використанням ДФУ, синтезатора

сигналів управління для IGBT модуля і блоку контролю струму в обмотці і швидкості обертання ротора АД з алгоритмом, який дозволяє виключити застосування ПІД-регуляторів і формувати керуючі сигнали в реальному масштабі часу в цифровому форматі. Вхідними змінними СУ є сигнали заданого оператором закону зміни кутової швидкості обертання  $\omega_{3i}(t_i)$ , зміни прискорення  $T_{Ci}(t_i)$ , заданого максимального діючого значення струму в обмотці АД  $I_{\max i}(t_i)$ , а також сигнали поточного значення кутової швидкості обертання ротора  $\omega_{RETi}(t_i)$  і сигнал поточного значення струму в обмотці  $I_{RETi}(t_i)$ , які задаються зворотними зв'язками.

Спочатку сигнал кутової швидкості обертання  $\omega_{3i}(t_i)$  перетворюється в сигнал управління частотою таймерів  $f_{3i}(t_i)$ , а реалізація різних режимів роботи АД з урахуванням максимальних струмових навантажень передбачає різні закони формування сигналу фази  $\varphi$  і кутової швидкості обертання ротора АД  $\omega$ .

Вибір відповідного закону управління АД формується на підставі вхідних сигналів блоку, поточне значення яких порівнюється з попереднім та за значенням результату порівняння виробляється сигнал  $\delta$  вибору відповідного режиму (закону) та керуючий імпульс  $\gamma$  запуску цифрового генератора:

$$\delta = \begin{cases} 0, & f_{3i} = f_{3(i-1)} \\ 1, & f_{3i} \neq f_{3(i-1)} \end{cases} \quad \gamma_i = \begin{cases} 0, & \delta_i = 1, \quad \gamma_{i-1} = 1 \\ 1, & \delta_i = 1, \quad \delta_i' = \delta_{i-1}' = 0 \end{cases}, \text{ де } \delta_i' = \begin{cases} 0, & \gamma_{i-1} = 0 \\ 1, & \gamma_{i-1} = 1, \quad T_{CHi} \leq \tau \end{cases}. \quad (6)$$

При змінах режиму роботи АД ( $\delta = 1$ ), використовується фазове управління (ФУ), на підставі якого формуються закони зміни фази відповідно до заданного оператором алгоритму. Поточне значення частоти  $f_i$  визначається виразом:

$$f_i = \begin{cases} f_{3Hi}, & \gamma = 0 \\ \left( \frac{(f_{3Hi} - f_{OLDi}) \cdot \tau_i}{T_{CHi}} \right) + f_{OLDi}, & \gamma = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

де  $f_{OLD}$  – поточне значення частоти в момент часу переходу сигналу  $\gamma$  з «0» на «1», що відповідає моменту зміни режиму роботи АД.

На ділянках зміни швидкості обертання ротору миттєве значення сигналу фази матиме вигляд:

$$\varphi_i = 2\pi \cdot f_{OLDi} \cdot \tau_i + \frac{2\pi \cdot (f_{3Hi} - f_{OLDi}) \cdot \tau^2}{2T_{CHi}}. \quad (8)$$

У момент зміни режимних ділянок сигнал  $\tau$  обнуляється, але сигнал фази  $\varphi$  при цьому не повинен мати розривів. Повний сигнал миттєвого значення фази  $\varphi_i$  для всіх режимів роботи:

$$f_i = \begin{cases} 2\pi \cdot f_{OLDi} \cdot \tau_i + \frac{2\pi \cdot (f_{3Hi} - f_{OLDi}) \cdot \tau^2}{2T_{CHi}} + \varphi_{OLDi}, & \gamma = 1, \quad \gamma' = 0 \\ 2\pi \cdot f_{3Hi} \cdot \tau_i + \varphi_{OLDi}, & \gamma = 0, \quad \gamma' = 1 \\ \varphi_{OLDi}, & \gamma = 0, \quad \gamma' = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Сформований сигнал фази  $i$ -го відліку  $\varphi_i$  подається на вхід формувача необхідного закону зміни фази (рис 1, блок 14) з метою отримання фазозалежної гармонічної функції:

$$F = \begin{cases} \varphi_i - \frac{\varphi_i^3}{3!} + \frac{\varphi_i^5}{5!} - \frac{\varphi_i^7}{7!} + \frac{\varphi_i^9}{9!}, i \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ F\left(\frac{\pi}{2}\right) - \varphi_i + \frac{\varphi_i^3}{3!} - \frac{\varphi_i^5}{5!} + \frac{\varphi_i^7}{7!} - \frac{\varphi_i^9}{9!}, i \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right] \\ (-1) \cdot \left( F(\pi) + \varphi_i - \frac{\varphi_i^3}{3!} + \frac{\varphi_i^5}{5!} - \frac{\varphi_i^7}{7!} + \frac{\varphi_i^9}{9!} \right), i \in \left[\pi, \frac{3\pi}{2}\right] \\ F\left(\frac{3\pi}{2}\right) + \varphi_i - \frac{\varphi_i^3}{3!} + \frac{\varphi_i^5}{5!} - \frac{\varphi_i^7}{7!} + \frac{\varphi_i^9}{9!}, i \in \left[\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right] \end{cases} \quad (10)$$

Те чи інше уявлення функції  $F$  для певної фази вибирається за допомогою порівняння поточного значення функції  $F$  з переходом через нуль, і попереднім значенням функції з урахуванням вектора сигналу фази ( $0 \dots 2\pi$ ).

На підставі  $\varphi_i$  та  $U_i$  формуються ШІМ сигнали, автоматичне регулювання шпаруватості яких здійснюється відповідно до заданого алгоритму управління АД та фазозалежної гармонічної функції  $F$ .

Загальний вигляд частотозалежного керуючого сигналу для ШІМ з урахуванням його уніполярного значення та динамічним діапазоном  $[0 \dots 5]$  має вигляд  $G_i = 2.5 + 0,05 \cdot F_i \cdot f_i$ , а сигнал зміни режиму IGBT:

$$S_i = i \cdot \frac{1}{F_{PWM}} - k_i, \text{ де } k_i = \begin{cases} k_{i-1}, & S_{i-1} < S_{\max} \\ i \cdot \frac{1}{F_{PWM}}, & S_{i-1} \geq S_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

Повний сигнал управління верхнім і нижнім IGBT певної фази:

$$\text{IGBT}_{\text{HIGH}} = \begin{cases} 0, & S_i < G_i \\ 1, & S_i \geq G_i \end{cases}; \quad \text{IGBT}_{\text{LOW}} = \begin{cases} 0, & S_i \geq G_i \\ 1, & S_i < G_i \end{cases} \quad (12)$$

Вище описаний процес формування керуючих сигналів для силового IGBT модуля однієї фази АД. Точно таким же чином можуть бути сформовані керуючі сигнали для довільної кількості фаз багатофазних систем, однак при цьому необхідно при розрахунку функції  $F$  (10) врахувати відповідні фазові зсуви.

В роботі також наведені варіанти використання СУ ПЧ з ДФУ та багаторівневих силових IGBT модулів.

Для реалізації СУ, яка дозволяє повертати надлишкову енергію в мережу живлення (рекуперацію) був запропонований спосіб з ДФУ, в якому поточне значення напруги в колі постійного струму  $U_{zpt}$  віднімається від заданого  $U_{zpt\_max}$  з інверсією знака та формується біполярний сигнал помилки, який надходить на двосторонній обмежувач за рівнем, що захищає від перевантаження ПЧ.

Сигнал помилки використовується для формування тимчасових інтервалів відкриття і закриття кожного напівмоста силового IGBT модуля, та через масштабний

підсилювач подається на один з входів суматора, а на другий вхід – число 0,75, яке представляє собою синус кута, відповідного середині чверті синусоїди плюс захисний інтервал і формує сигнал, який виключає можливість одночасного відкриття транзисторів на сусідніх фазах, тобто короткого замикання «фаза-фаза». Масштабування необхідне для того, щоб вектор керуючого сигналу не вийшов за межі відповідного квадранта, але мав максимальний розмах для ефективного управління станом транзисторів.

Залежно від співвідношення між відмасштабованою величиною сигналу помилки і опорною величиною 0,75 вихідний транзистор відмикається на різних ділянках будь-якого з чотирьох квадрантів. Для реалізації режиму скидання надлишку енергії в мережу використовується ділянка від 0 до 0,75, для режиму споживання енергії від мережі ділянка від 0,75 до 1, у точці 0,75 напруга в колі постійного струму дорівнює заданій і енергообмін між споживачем і мережею практично відсутній.

Алгоритм СУ, який реалізує контроль струму в обмотці і швидкості обертання ротора АД з урахуванням зворотних зв'язків містить цифровий генератор, в якому на підставі необхідного значення частоти обертання ротора АД  $f_{3i}$ , який задається оператором, і сигналів звороних зв'язків формуються сигнали управління  $f_{3i}^*$ ,  $f_{vi}$ ,  $T_{CVi}$ . Дані сигнали формуються на підставі системи пріоритетів, яка враховує, що в момент пуску АД задані оператором сигнали зміни кутової швидкості обертання і прискорення повинні мати вищий пріоритет, для всіх наступних моментів часу вищий пріоритет мають сигнали зміни режиму з урахуванням корекції зворотними зв'язками, а для стаціонарного режиму – сигнали зворотних зв'язків.

Оскільки відхилення реальної частоти обертання АД від заданого значення можуть бути як додатнім, так і від'ємним, то сформується два цифрових сигнали:  $a_{US}$  – сигнал включення корекції кутової швидкості обертання АД в сторону її збільшення на  $\Delta f_{KOP}$  і  $a_{DS}$  – сигнал включення корекції кутової швидкості обертання АД в сторону її зменшення на  $\Delta f_{KOP}$ :

$$a_{USi} = \begin{cases} 1, & \Delta f_i' > \Delta f_{i-1}' \\ 0, & \Delta f_i' \leq \Delta f_{i-1}' \end{cases}, \text{ де } \Delta f_i'(t) = \begin{cases} f_{3i}(t) - (\omega_{RET}(t)/\pi), & \omega_{RET}(t) > 0 \\ 0, & \omega_{RET}(t) = 0 \end{cases}, \text{ а } \Delta f_i' = \begin{cases} \Delta f_i, & \Delta f \geq 0 \\ 0, & \Delta f < 0 \end{cases};$$

$$a_{UPi} = \begin{cases} 0, & a_{Ri} = 1, & a_{UP(i-1)} = 1 \\ 1, & a_{USi} = 1, & a_{Ri} = a_{R(i-1)} = 0 \end{cases}; \quad a_{Ri} = \begin{cases} 1, & \Delta f_i = 0 \quad (f_{3i} = f_i) \\ 0, & \Delta f_i \neq 0 \quad (f_{3i} \neq f_i) \end{cases}; \quad a_{DSi} = \begin{cases} 1, & \Delta f_i'' < \Delta f_{i-1}'' \\ 0, & \Delta f_i'' \geq \Delta f_{i-1}'' \end{cases};$$

$$a_{DPi} = \begin{cases} 0, & a_{Ri} = 1, & a_{DP(i-1)} = 1 \\ 1, & a_{DSi} = 1, & a_{Ri} = a_{R(i-1)} = 0 \end{cases}, \text{ де } \Delta f_i'' = \begin{cases} \Delta f_i, & \Delta f < 0 \\ 0, & \Delta f \geq 0 \end{cases}. \quad (13)$$

Для повної корекції поточного характеру обертання ротора АД сигналів  $a_{UP}$  і  $a_{DP}$  недостатньо. Необхідно ввести зворотний зв'язок за струмом в обмотках АД оскільки деякі динамічні режими роботи можуть викликати перевантаження саме за струмом, а запропонований алгоритм управління повинен оперативно впливати на формований режим роботи АД, не допускаючи перевищення заданих оператором максимальних

значень струму, причому сигнал корекції за струмом  $a_{Iof}$  повинен мати найвищий пріоритет в загальній системі зворотних зв'язків.

Загальний сигнал корекції  $f_{KOP}$  з урахуванням коригуючих сигналів  $a_{UP}$ ,  $a_{DP}$ ,  $a_{Iof}$  має вигляд  $f_{KOPi} = f_{Ai} + f_{UPi} - f_{DOWNi} - f_{Ii}$ , де

$$f_{Ai} = \begin{cases} f_{(i-1)}, & \gamma_i = 1, \quad \gamma_{(i-1)} = 0 \\ f_{A(i-1)}, & \gamma_i = 0 \end{cases} ; \quad f_{Ii} = \begin{cases} \Delta f_{KOP}, & a_{Iofi} = 1 \\ 0, & a_{Iofi} = 0 \end{cases} ;$$

$$f_{UPi} = \begin{cases} \Delta f_{KOP}, & a_{UPi} = 1 \\ 0, & a_{UPi} = 0 \end{cases} ; \quad f_{DOWNi} = \begin{cases} \Delta f_{KOP}, & a_{DPi} = 1 \\ 0, & a_{DPi} = 0 \end{cases} ; \quad (14)$$

$f_A$  – сигнал поточного реального значення частоти обертання АД  $f$  з урахуванням сигналу  $f_{KOP}$  на попередньому відліку  $(i - 1)$  і сигналу зміни режиму обертання ротора АД  $\gamma$ .

На рис. 2 показані результати моделювання роботи АД 4AA63A4УЗ, підключеного до СУ ПЧ з ДФУ і зворотними зв'язками за струмом в обмотці і швидкістю обертання при зміні зовнішнього навантаження, переходом на знижену швидкість обертання ротора і реверсі.

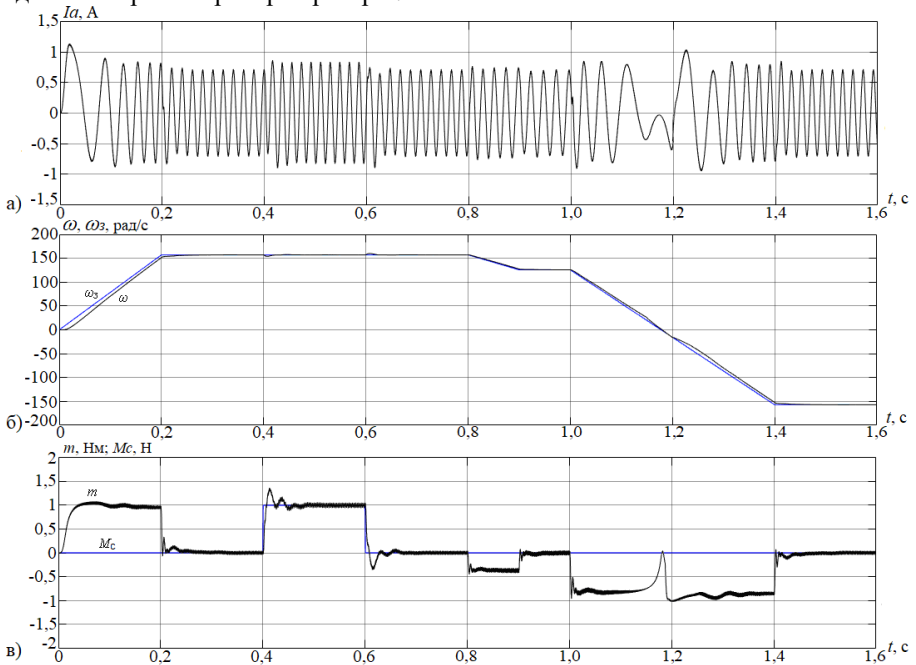


Рисунок 2 – Робота АЕП з ДФУ і контролем фази:

- а)  $i_a$  – фазний струм АД;  
 б)  $\omega_3$  – задана і  $\omega$  – поточна кутова швидкість обертання ротора АД;  
 в)  $M_C$  – момент опору на валу і  $m$  – електромагнітний момент АД

Пуск АД здійснюється із заданою інтенсивністю і обмеженням пускового струму. Через 0,4 с здійснюється накид номінального навантаження АД (1,0 Н·м). Падіння швидкості обертання складо менше 1%, а тривалість відпрацювання системи управління – 100 мкс. Через 0,4 с здійснений керований перехід на знижену швидкість до 125,6 рад/с, при цьому гальмівний момент має постійне значення. На 1 с двигун перейшов в режим керованого реверсу з точним рухом заданою траєкторією, при цьому гальмування здійснювалося плавно до зупинки з переходом в режим реверсу. Під час реверсу момент залишався в заданих значеннях.

Як видно з наведених часових залежностей, кутова швидкість обертання ротора АД відпрацьовує алгоритм, заданий оператором, при цьому система враховує задане максимальне значення струму в обмотці.

*У третьому розділі* наведені алгоритми функціонування СУ ПЧ, підсистеми контролю і візуалізації даних, а також протокол і алгоритм обміну даними між ними, відповідно до розробленої в другому розділі віртуальної математичної моделі АЕП з ДФУ. Показано, що поділ блоку формування ШІМ імпульсів на блок генерації і блок формування захисного інтервалу дозволив реалізувати можливість оперативної адаптації розроблених алгоритмів під різні типи мікроконтролерів (МК) та IGBT модулів.

Розроблена децентралізована СУ ПЧ, яка використовує симетричний мультипроцесорний режим роботи і дозволяє знизити навантаження при обробці даних і створити систему управління ПЧ, яка відрізняється від існуючих економією мультипроцесорного часу з одночасним збільшенням точності формування керуючих сигналів для IGBT модулів, частоти опитування датчиків електричного і механічного режимів роботи АД, а також кола постійного струму. У розділі обґрунтовано поділ СУ ПЧ на дві частини: блок управління і блок аналізу і візуалізації даних, що дозволило розробити модульну структуру перетворювача з підвищеною надійністю і швидкодією.

Доведено, що застосування сучасних 32-х розрядних МК в СУ ПЧ з ДФУ найбільш ефективно в багаторівневих, багатофазних системах управління і візуалізації даних за зворотними зв'язками, активним випрямлячем, рекуперацією енергії і контролем напруги в колі постійного струму.

Розроблена система ДФУ АЕП і підсистема візуалізації, симетрична мультипроцесорна обробка і 32-х розрядні МК забезпечують поділ математичної і логічної обробки даних за їх типами в різних контроллерах, використовує розроблений спеціальний алгоритм, який перешкоджає переповненню МК даними, і захищає їх від спустошення оперативної пам'яті даних, оскільки в пам'яті контролера завжди знаходяться достовірні дані. Це дозволило створити оперативну систему захисту, яка незалежно від блоку математичної обробки даних безпосередньо аналізує інформацію на загальній шині і запобігає одночасному відкриттю верхнього і нижнього IGBT силового модуля. Таким чином, вперше розроблені алгоритми формування ШІМ напруги з урахуванням зворотних зв'язків для побудови універсальних систем ДФУ з вибором оптимального способу формування ШІМ сигналів в залежності від зовнішніх впливів на АЕП.

**Четвертий розділ** присвячений експериментальним дослідженням розробленого АЕП з ДФУ.

На підставі математичних моделей системи АЕП з ДФУ та її складових, розроблених в другому і третьому розділах, створена експериментальна установка АЕП, яка дозволяє досліджувати функціональні можливості ЕП з АД типу 4AA63A4У3.

Проведені експериментальні дослідження роботи АЕП включають зняття робочих характеристик двигуна, дослідження додаткових втрат в АД, дослідження динаміки нагріву обмотки АД, а також форми напруги, яка знімається з вимірювального витка розташованого в повітряному проміжку між ротором і статором АД для оцінки магнітного потоку двигуна.

На рис. 3 наведена осцилограма режиму пуску АД з виходом на постійну швидкість обертання ротора за заданий інтервал часу та обмеженням струму в розробленій системі ДФУ.

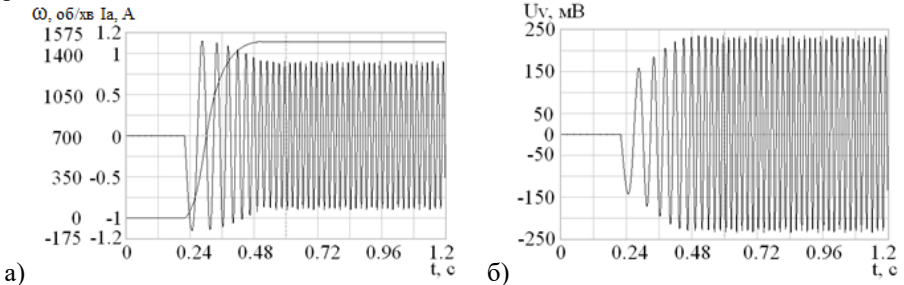


Рисунок 3 – Пуск АД при роботі від АЕП з ДФУ та виходом на номінальну швидкість

а) струм в обмотці статора ( $I_a$ ) і швидкість обертання ротора АД ( $\omega$ );

б) ЕРС, індукована у вимірювальному витку ( $U_v$ )

Показано, що при пуску двигуна відносне відхилення кутової швидкості, отриманої в результаті моделювання, відрізняється від експериментальної менш ніж на 4% і повністю збігається в квазістатичному режимі роботи АД. Пусковий струм, отриманий в результаті математичного моделювання та експериментально, повністю відтворюється за розміром і формою. Такі ж результати отримані при затягнутому пуску двигуна. На основі проведеного експерименту можна зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі АЕП і алгоритму ДФУ.

Силкові модулі 1 – 4 поколінь мають різні часи перемикання (ефект «хвоста») і, незважаючи на наявність спеціального формувача керуючих імпульсів і вставки захисних інтервалів, завжди існує ризик виникнення наскрізних струмів, перевантаження за струмом, порушення номінальних теплових режимів, що призводить до виходу з ладу силових модулів.

Реалізована потрібна система захисту силових IGBT модулів, яка включає жорстке завдання максимальних режимів роботи і відключення силового модуля при їх перевищенні.

На рис. 4 представлені експериментальні результати з імітацією короткого замикання в АД і реакцією на дану ситуацію різних систем захисту ( $t_{K3}$  – момент, відповідний короткому замиканню,  $t_I$  – момент спрацьовування системи захисту).

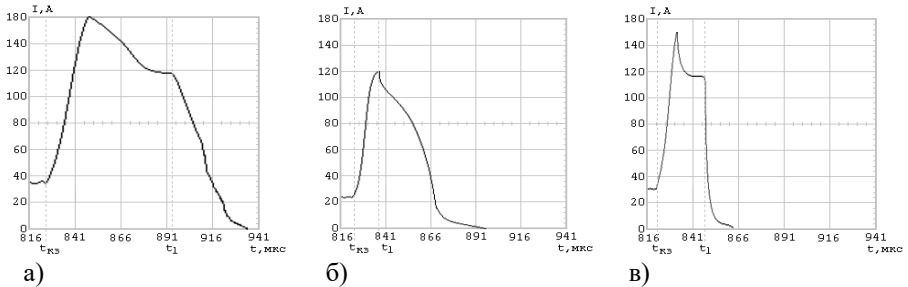


Рисунок 4 – Результати експериментальних досліджень функціонування систем захисту:

- а) програмна система захисту; б) система захисту на логічних пристроях;  
в) розроблена потрібна програмно-апаратна система захисту

## ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеною науковою роботою на основі систематизації теоретичних і прикладних результатів розв'язано актуальну науково-прикладну задачу створення високоефективної універсальної системи дискретно-фазового управління асинхронним електроприводом. Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволили отримати наступні наукові результати.

1. Аналіз існуючих систем управління асинхронним електроприводом показує, що використання скалярного або векторного методів управління забезпечує відповідність режимів роботи електродвигуна заданому оператором алгоритму з відносним відхиленням по швидкості обертання ротора менше 1,5%, збереження стійкості роботи електропривода в динамічних режимах, в тому числі при зміні зовнішніх умов, за рахунок значних переважень по струму і спотворення його форми, а також не завжди забезпечує безперервність фази напруги живлення. При цьому використовуються складні розрахункові алгоритми, що особливо ускладнює оперативне управління режимом роботи асинхронного двигуна при одночасній наявності сигналів зворотних зв'язків і змінного сигналу завдання.

2. Доведено високу ефективність розробленого принципу завдання закону обертального руху ротора асинхронного двигуна через функцію зміни фази від часу, яка, в свою чергу, апроксимується кусковим чином різними відрізками трьох законів зміни електричного кута повороту – рівномірним, лінійним або квадратичним в залежності від необхідного закону зміни швидкості обертання ротора асинхронного двигуна від часу. Це підтверджено розробленими математичними моделями асинхронного електропривода з контролем напруги в колі постійного струму, керованим випрямлячем, рекуперацією енергії в мережу живлення, багаторівневої системи перетворювач частоти – асинхронний двигун і системи зі зворотними зв'язками. Метод управління асинхронним двигуном, заснований на



запропонованому принципі, має співставні динамічні та статичні характеристики порівняно з векторним, але дозволяє уникнути громіздких обчислень, пов'язаних з координатними перетвореннями, при цьому завдання режимів обертання ротора асинхронного двигуна і порівняння з поточними показниками цього режиму здійснюється покроково через інтервали часу не більше 1мкс, що забезпечує оперативність управління і високу стійкість розробленого асинхронного електроприводу в перехідних режимах.

3. Розроблено структуру асинхронного електропривода та відповідний алгоритм з використанням дискретно-фазового управління і доведено, що така система дозволяє формувати напругу живлення асинхронного двигуна за заданим законом та забезпечує безперервність набігу фази при будь-яких змінах режимів роботи двигуна за умови збереження алгоритму формування значення напруги живлення та частоти обертання ротора.

4. Проведене математичне моделювання показало, що запропонований спосіб дискретно-фазового управління асинхронним електроприводом із зворотними зв'язками за струмом і швидкістю обертання ротора двигуна дозволив реалізувати його пуск без перевищення заданого максимального значення сили струму в обмотці статора, задану інтенсивність пуску, керування електромагнітним моментом, перехід на підвищену і знижену швидкість обертання, реверс, збереження частоти обертання двигуна при накидах навантаження на валу та енергообмін між асинхронним електроприводом і мережею живлення.

5. Показано, що при пуску двигуна відносне відхилення кутової швидкості, отриманої в результаті моделювання, відрізняється від експериментальної менше ніж на 4%; в режимах реверсу, переходу на знижену і підвищену швидкість – менше 1%; та повністю співпадає в квазістатичному режимі роботи АД. Пусковий струм, отриманий в результаті математичного моделювання та експериментально, повністю відтворюється за величиною і формою. Такі ж самі результати отримані при зняттю пуску двигуна. На основі проведеного експерименту можна зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі асинхронного електропривода та алгоритму системи дискретно-фазового управління.

6. Час відпрацювання запропонованою системою миттєвого збурення, наприклад, кидка навантаження на валу асинхронного двигуна 4AA63A4Y3, становить величину не більше 10мс, а відносне відхилення за швидкістю обертання ротора від заданого режиму – менше 1%.

7. Вперше запропоновано потрібну систему захисту перетворювача частоти, засновану на вимірі вхідної ємності IGBT з формуванням відповідного захисного інтервалу, що знижує ризик протікання струму короткого замикання, реалізує жорстке завдання максимальних режимів роботи інвертора, а також своєчасно формує сигнал його відключення чи зміни алгоритму функціонування.

8. Доведено, що суто програмний варіант системи захисту для асинхронного електропривода з дискретно-фазовим управлінням і IGBT 4-го покоління забезпечує час спрацьовування захисту близько 150мс, при повністю апаратній системі захисту забезпечується час спрацювання близько 25мс, а комбінований метод забезпечує час спрацювання близько 36мс, що на 76% менше, ніж для повністю програмної системи

захисту і на 31% більше, ніж для повністю апаратної. Однак, в цьому випадку повністю виключається помилкове спрацьовування системи захисту при перенапружених режимах роботи АД, що передбачено програмою управління.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті в зарубіжних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних:*

1. Ryazancev, O.V., Kylik, M.V., Manukyan, A.S. Efficient application of power modules in energy converter with microprocessor control // *Radioelectronics and Communications Systems*, August 2010, Volume 53, Issue 8, pp 442–445.

2. Kulik, M.V. Ryazancev, O.V. About protection of power modules of multi-layer frequency converters // *Radioelectronics and Communications Systems*, August 2016, Volume 59, Issue 8, pp 369–374.

*Статті у провідних фахових виданнях, включених до переліку МОН України:*

3. Кулик М. В. Экспериментальные исследования динамических режимов работы асинхронных двигателей / М. В. Кулик, О. М. С'янов // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. – 2007. – № 1 (8). – С.135-139.

4. Кулик М. В. Математические модели асинхронного двигателя для совместного моделирования с преобразователем энергии. / А. М. С'янов, М. В. Кулик // *Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки)*. Тематический выпуск: Проблемы автоматизированного электропривода теория и практика. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – С.183-184.

5. Кулик М. В. Математические модели асинхронных двигателей при питании от преобразователей энергии / О. М. С'янов, М. В. Кулик // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. – 2008. – № 1 (9). – С.180-184.

6. Кулик М. В. Исследование инвертора напряжения на базе микроконтроллера МСЗРНАС / М. В. Кулик, О. С. Манукян // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. – 2009. – № 1 (11). – С.158-163.

7. Кулик М. В. Моделирование переходных режимов в асинхронном двигателе при питании от различных преобразователей частоты / М. В. Кулик, О. М. С'янов, О. В. Качура // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. – 2009. – № 1 (11). – С.123-128.

8. Кулик М. В. Снижение дополнительных потерь в асинхронных двигателях при питании от преобразователей энергии / М. В. Кулик, А. М. С'янов, А. В. Качура // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – №4 (57), частина 1. – С.48-50. (*Index Copernicus*)

9. Кулик М. В. Согласование силовых IGBT модулей с микроконтроллером / М. В. Кулик, А. М. С'янов, О. С. Манукян // *Збірник наукових праць*

Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – 2009. – № 2 (12). – С.115-119.

10. Кулик М. В. Модель преобразователя энергии с линейно частотной модуляцией / М. В. Кулик, А. М. Съянов, А. С. Манукян // Проблемы автоматизированного электропривода теория и практика. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: ХПИ. – 2010. – № 28. – С.152-153.

11. Кулик М. В. Система управління перетворювачем енергії з використанням модуля РКІ / М. В. Кулик, О. М. С'янов, О. С. Манукян // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – 2010. – № 1 (14). – С.254-258.

12. Кулик М. В. Модель системы микроконтроллер-автономный инвертор напряжения / М. В. Кулик, О. М. С'янов, О. Я. Бородай // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – 2011. – № 2 (17). – С.155-159.

13. Кулик М. В. Исследование асинхронных двигателей с нелинейными элементами фазного ротора / М. В. Кулик, А. В. Качура, А. М. Съянов // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації», Інститут електромеханіки, енергозбереження і систем управління. – Кременчук: КНУ, – 2012р. – №3/19 – С.408 –411.

14. Кулик М. В. Разработка и исследования многоуровневых систем управления инверторов преобразователей частоты / О. М. С'янов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – 2012. – № 3 (20). – С.88-94.

15. Кулик М. В. Адаптивная система управления режимами работы асинхронного двигателя / М. В. Кулик, О. В. Рязанцев, А. М. Съянов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – № 3(104) – ч.1. – С.180-184. (*Index Copernicus*)

#### *Патент:*

16. Кулик М. В. Патент на винахід UA110595 Спосіб керування асинхронним двигуном; власник Кулик Максим Володимирович. – а201505188; Заявл. 27.05.2015; Опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1.

#### *Матеріали конференцій:*

17. Кулик М. В. Оптимизация параметров ПИД регулятора в замкнутых системах управления / М. В. Кулик, А. М. Съянов, А. С. Манукян // Материалы международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». 12-й Международный молодежный форум. 1-3 апреля 2008г. – Харьков: ХНУРЭ – 2008. – С.57.

18. Кулик М. В. Моделирование переходных процессов АД при питании от преобразователя частоты / М. В. Кулик, А. М. Съянов // Збірник матеріалів VII всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації». КДПУ – 2009. – С. 83-84.

19. Кулик М. В. Исследования электрических машин специальных конструкций на основе численных методов / М. В. Кулик, А. В. Качура, А. М. Съянов, // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». – Севастополь, 21 – 25 сентября 2009. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С. 121 – 123.

20. Кулик М. В. Автономная микропроцессорная система управления преобразователем энергии / М. В. Кулик, А. С. Манукян, А. М. Съянов // Материалы международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». – Севастополь, 21 – 25 сентября 2009. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С. 124 – 125.

21. Kulik M. V. Система управління перетворювачем частоти з використанням лінійної частотної модуляції / The international research and practical conference "The development of technical sciences: problems and solutions", Brno, the Czech Republic, April 27-28, – 2018 – pp 139 – 142.

22. Кулик М. В. Конструктивні методи зниження втрат в асинхронних двигунах при живленні від перетворювачів енергії / О. М. С'янов, О. С. Косухіна // Збірник тез IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління, пошук ідей та рішень» в м. Покровську 21 травня 2020 р., ДонНТУ. – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2020. – С. 36-41.

Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих особисто і в співавторстві: [4, 5, 7, 12, 18, 19] – моделювання перехідних режимів роботи АД при живленні від різних ПЧ, [10, 15, 16, 21] – розробка методу дискретно-фазового управління АД, [6, 9, 14, 17, 20] – розробка СУ з дискретно-фазовим управлінням і зворотними зв'язками для замкнутого комплексу ПЧ – АД, [11] – розробка універсальної системи візуалізації та контролю режиму роботи АД, [3, 13, 19] – експериментальні дослідження динамічних режимів роботи АД від ПЧ, [8, 22] – дослідження способів зниження додаткових втрат при роботі АД від ПЧ, [1, 2] – розробка методу узгодження силових IGBT модулів і мікроконтролера з метою підвищення надійності їх роботи та багаторівневої системи захисту IGBT.

## АНОТАЦІЯ

**Кулик М. В. Асинхронний електропривод з цифровою системою дискретно-фазового управління.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі створення нового принципу управління швидкістю обертання ротора асинхронного двигуна, який зберігає переваги векторного методу управління, але в той же час принципово відрізняється від чисто скалярного і чисто векторного методів і передбачає розробку системи управління, яка не використовує громіздкий алгоритм координатних

перетворень і забезпечує максимальну відповідність режимів роботи асинхронного двигуна заданому оператором алгоритму.

Розроблено дискретно-фазовий спосіб управління асинхронним електроприводом і доведено, що така система дозволяє формувати вихідні напруги перетворювача частоти по заданому оператором алгоритму, забезпечує безперервність набігу фази при будь-яких змінах режимів роботи двигуна зі збереженням умови відносини ефективного значення вихідної напруги до частоти обертання ротора.

Розроблено нову систему рекуперації енергії з дискретно-фазовим управлінням, яка не містить окремих випрямлячів і автономний інвертор напруги з блоком формування широтно-імпульсно модульованого сигналу і автоматично відстежує поточні фази мережі живлення і одночасно є стабілізатором напруги в колі постійного струму.

Вперше запропонована потрібна система захисту перетворювача частоти, заснована на вимірі вхідної ємності IGBT з формуванням відповідного захисного інтервалу, що знижує ризик протікання струму короткого замикання, реалізує жорстке завдання максимальних режимів роботи інвертора, а також оперативно формує сигнал його відключення.

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, система управління асинхронним двигуном, фазове управління, дискретне управління, перетворювач частоти, рекуперація енергії, багатоступеневий захист силового модуля.

## АННОТАЦІЯ

*Кулик М. В. Асинхронный электропривод с цифровой системой дискретно-фазового управления.* – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи создания нового принципа управления скоростью вращения ротора асинхронного двигателя, который сохраняет преимущества векторного метода управления, но в то же время принципиально отличается от чисто скалярного и чисто векторного методов и предусматривает разработку системы управления, которая не использует громоздкий алгоритм координатных преобразований и обеспечивает максимальное соответствие режимов работы асинхронного двигателя заданному оператором алгоритму с относительным минимальным отклонением по скорости вращения ротора и сохранением устойчивости работы асинхронного электропривода в динамических режимах.

Разработан дискретно-фазовый способ управления асинхронным электроприводом и доказано, что такая система позволяет формировать выходное напряжения преобразователя частоты по заданному оператором алгоритму, обеспечивает непрерывность набега фазы при любых изменениях режимов работы двигателя с сохранением условия отношения эффективного значения выходного напряжения к частоте вращения ротора. Кроме того, данная система обеспечивает

защиту IGBT модуля от сквозных токов и поддерживает заданное выходное напряжение в звене постоянного тока.

Разработана новая система рекуперации энергии с дискретно-фазовым управлением, которая не содержит отдельный выпрямитель и автономный инвертор с блоком формирования широтно-модулированного сигнала, и автоматически отслеживает текущие фазы сети питания и одновременно является стабилизатором напряжения в цепи постоянного тока.

Впервые предложена тройная система защиты преобразователя частоты, основанная на измерении входной ёмкости IGBT с формированием соответствующего защитного интервала, что снижает риск протекания тока короткого замыкания, реализует жесткое задание максимальных режимов работы инвертора, а также оперативно формирует сигнал его отключения.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, система управления асинхронным двигателем, фазовое управление, дискретное управление, преобразователь частоты, многофазные и многоуровневые системы, рекуперация энергии, многоступенчатая защита силового модуля, IGBT модули.

## ABSTRACT

*Kulik M. V. Asynchronous electric drive with digital system of discrete-phase control.* – On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”. – National Technical University “Dnipro University of Technology”, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific problem of creating a new principle of control of the rotor speed of an induction motor, which retains the advantages of the vector control method, but at the same time is fundamentally different from purely scalar and purely vector methods and provides for the development of a control system that does not use a cumbersome algorithm of coordinate transformations and ensures maximum correspondence of the operating modes of the asynchronous motor to the algorithm specified by the operator.

A discrete-phase method for controlling an asynchronous electric drive has been developed and it has been proven that such a system makes it possible to form the output voltage of the frequency converter according to the algorithm specified by the operator, ensures the continuity of the phase incursion for any changes in the engine operating modes while maintaining the condition of the ratio of the effective value of the output voltage to the rotor speed.

A new system of energy recovery with discrete-phase control has been developed, which does not contain a separate rectifier with a pulse-width-modulated signal generating unit, and automatically monitors the current phases of the power supply.

For the first time, a triple frequency converter protection system was proposed, based on measuring the input capacity of the IGBT with the protective interval.

**Keywords:** asynchronous electric drive, asynchronous motor control system, phase control, discrete control, frequency converter, multiphase and multilevel systems, energy recovery, multi-stage protection of the power module, IGBT modules.

Кулик Максим Володимирович

**АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД  
З ЦИФРОВОЮ СИСТЕМОЮ  
ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО УПРАВЛІННЯ**

(Автореферат)

Підписано до друку 17.02.2021. Формат 60x90/16  
Папір офсет. Цифровий друк. Умовн. друк. арк 0,9.  
Обіково-видавн. арк 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 16055

Дніпровський державний технічний університет  
вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Дніпропетровська обл., 51918

