

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: **«Комп'ютерне моделювання системи керування  
трьохфазними електродвигунами аграрного  
виробництва на підставі використання векторного  
алгоритму»**

Виконав: студент 2 курсу групи Акт-22сп

Спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва)

Кураш Андрій Васильович  
(Прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Тригуба А.М.  
(Прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доцент Шолудько Я.В.  
(Прізвище та ініціали)

**ДУБЛЯНИ-2023**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти  
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

д.т.н., проф. А. М. Тригуба

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Курашу Андрію Васильовичу

1. Тема роботи: «Комп'ютерне моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму»

Керівник роботи Тригуба Анатолій Миколайович, професор  
затверджені наказом по університету від 30.12.2022 року № 453/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: вимоги до систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва; методика моделювання систем автоматичного керування; характеристики трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) \_\_\_\_\_

Вступ.

1. Стан питання та постановка завдання.

2. Аналіз об'єкту керування та вибір засобу моделювання.

3. Розробка моделі системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

4. Результати моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

5. Охорона праці.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): особливості систем керування трьохфазними електродвигунами; огляд існуючих систем керування трьохфазними електродвигунами; вибір засобу моделювання; модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва; результати моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

6. Консультанти з розділів:

| Розділ     | Прізвище, ініціали та посада консультанта                                           | Підпис, дата   |                  |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
|            |                                                                                     | завдання видав | завдання прийняв |
| 1, 2, 3, 5 | <i>Тригуба А.М., зав. кафедри ІТ</i>                                                |                |                  |
| 4          | <i>Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва</i> |                |                  |

7. Дата видачі завдання

30 грудня 2022 р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                 | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | <i>Написання першого розділу</i>                                                                    | <i>01.01-05.02.23</i>           |          |
| 2     | <i>Виконання другого розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>                       | <i>06.02-05.03.23</i>           |          |
| 3.    | <i>Виконання третього розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>                      | <i>06.03-15.04.23</i>           |          |
| 4.    | <i>Виконання четвертого розділу та аркушів ілюстраційного матеріалу до нього</i>                    | <i>16.04-12.05.23</i>           |          |
| 5.    | <i>Написання розділу «Охорона праці»</i>                                                            | <i>13.05-23.05.23</i>           |          |
| 6.    | <i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та аркушів ілюстраційного матеріалу</i> | <i>24-31.05.23</i>              |          |
| 7.    | <i>Завершення роботи в цілому</i>                                                                   | <i>01 -10.06.23</i>             |          |

Студент \_\_\_\_\_ Кураш А.В.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Тригуба А.М.  
(підпис)

УДК 621.31:681.51.01

Комп'ютерне моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму.

Кураш А.В. Кафедра ІТ – Дубляни, Львівський НУП, 2023.

Кваліфікаційна робота: 62 с. текст. част., 13 рис., 2 табл., 12 арк. ілюстраційного матеріалу, 34 джерела.

Наведена класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва. Подано особливості проектування систем керування трьохфазними електродвигунами в аграрному виробництві. Виконано аналіз існуючих систем керування електродвигунами. Обґрунтована доцільності комп'ютерного моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

Запропонована структура системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму. Виконано синтез контурів регулювання швидкості і струму трьохфазних електродвигунів. Здійснено вибір засобів моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

Розроблено моделі системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму. Подано результати комп'ютерного моделювання трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва.

Розроблено заходи з охорони праці під час використання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва. Визначено економічну ефективність від впровадження системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                                                         | 7  |
| РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ .....                                                                                                 | 9  |
| 1.1. Доцільність підвищення енергетичної ефективності електроприводів аграрного виробництва .....                                                   | 9  |
| 1.2. Класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва .....                                                        | 12 |
| 1.3. Особливості проектування систем керування трьохфазними електродвигунами в аграрному виробництві .....                                          | 14 |
| 1.4. Аналіз існуючих систем керування електродвигунами .....                                                                                        | 16 |
| 1.5. Обґрунтування доцільності комп'ютерного моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва .....                | 22 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ.....                                                                                            | 24 |
| 2.1. Структура системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму.....             | 24 |
| 2.2. Синтез контурів регулювання швидкості і струму трьохфазних електродвигунів .....                                                               | 25 |
| 2.3. Вибір засобів моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва .....                                          | 29 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЬОХФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ПІДСТАВІ ВИКОРИСТАННЯ ВЕКТОРНОГО АЛГОРИТМУ ..... | 35 |
| 3.1. Структура системи векторного керування електродвигуном .....                                                                                   | 35 |
| 3.2. Модель системи керування електродвигуном .....                                                                                                 | 37 |
| 3.3. Модель підсистеми pmsm With Encoder .....                                                                                                      | 38 |
| 3.4. Модель підсистеми Inverter With Current Sensors .....                                                                                          | 39 |
| 3.5. Моделі підсистем Phase Currents Computation та Position And Speed Computation .....                                                            | 40 |
| 3.6. Моделі підсистем Current Loop та Speed Loop.....                                                                                               | 41 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7. Результати комп'ютерного моделювання трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва .....                                               | 43 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                                                                   | 46 |
| 4.1. Аналіз умов праці .....                                                                                                                    | 46 |
| 4.2. Мікроклімат робочої зони .....                                                                                                             | 47 |
| 4.3. Виробниче освітлення.....                                                                                                                  | 48 |
| 4.4. Електробезпека .....                                                                                                                       | 49 |
| 4.5. Пожежна безпека.....                                                                                                                       | 51 |
| РОЗДІЛ 5. ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД<br>ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЬОХФАЗНИМИ<br>ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА..... | 53 |
| ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....                                                                                                                      | 56 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                                 | 60 |

## ВСТУП

У сучасному аграрному виробництві трифазні електродвигуни є невід'ємною складовою для забезпечення ефективного руху та функціонування різних пристроїв та механізмів [7]. Керування цими електродвигунами має вирішальне значення для досягнення оптимальних режимів їх роботи та енергоефективності.

У нашій роботі пропонується застосувати векторний алгоритм комп'ютерного моделювання систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва. Векторний алгоритм базується на теорії полярних координат [1], дозволяє ефективно керувати параметрами електродвигунів, забезпечуючи точність, стабільність та надійність їх роботи.

Основним засобом для виконання цієї роботи є створення комп'ютерної моделі системи керування, яка дозволить дослідити та проаналізувати вплив векторного алгоритму на роботу трьохфазних електродвигунів для умов аграрного виробництва. Результати цієї роботи будуть корисними для розробників, інженерів та спеціалістів, які працюють із системами керування електродвигунами, допомагаючи їм усвідомити та вдосконалити ефективність такої системи.

У роботі буде використано методи моделювання, математичного аналізу та експериментальної перевірки, щоб дослідити властивості та параметри трьохфазних електродвигунів, а також ефективність їх керування за допомогою векторного алгоритму. Використовуючи розроблену комп'ютерну модель, можна виконати чисельні моделювання та аналіз різних сценаріїв роботи системи керування.

Крім того, у роботі буде враховуватися вплив змінних навантажень та режимів роботи на ефективність системи керування, а також забезпечення стабільності та точності регулювання. Векторний алгоритм дозволяє врахувати особливості електродвигунів, такі як несиметричність фази, наявність магнітних насичень та інші фактори, що впливають на їх роботу [12].

Отримані результати цієї роботи сприяють вдосконаленню системи керування електродвигунами в аграрному виробництві, покращенню їх продуктивності та зниженню витрат енергії. При цьому, дана робота несе практичний внесок у галузь автоматизації процесів аграрного виробництва.



## РОЗДІЛ 1.

### СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

#### 1.1. Доцільність підвищення енергетичної ефективності електроприводів аграрного виробництва

В останні роки розвинені країни активно працюють над такими проблемами:

- енергозбереження за рахунок обмеження та виснаження запасів викопної сировини (нафти, вугілля, природного газу, урану тощо);
- зростання світового попиту на енергію внаслідок постійного зростання економіки, промисловості та добробуту населення;
- збільшення викидів парникових газів, що призводить до глобальних змін клімату;
- тривале і непередбачуване зростання цін на електроенергію та боротьба «партії зелених» проти ядерної енергетики в багатьох країнах західної Європи.

Аналіз проблем енергозбереження показує, що більше половини електроенергії у світі споживається електродвигунами. Тому всі провідні електротехнічні компанії світу наполегливо працюють над їх удосконаленням. Це призвело до появи енергоефективних електродвигунів (рис. 1.1), які виконують більше роботи на одиницю енергії, ніж їхні аналоги (з вищим ККД) [12].

Вищий ККД забезпечує менше споживання електроенергії, що у літературі називається енергоощадними електродвигунами [31]. При цьому виникає потреба встановити можливі шляхи впровадження енергоефективних електродвигунів, що використовуються у аграрному виробництві як чинника збереження енергії у електроприводах машин та обладнання.



Рисунок 1.1 – Чинники актуальності підвищення енергетичної ефективності електроприводів

До основних показників енергетичної ефективності електроприводу належать втрати енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  і коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ . Ефективність роботи електроприводу в будь-якому режимі характеризується ККД – відношенням виконаної механічної роботи до витраченої при ній електроенергії:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} M_{\text{м}}(t) \omega_{\text{м}}(t) dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P dt}, \quad (1.1)$$

де  $\eta_{\text{ц}}$  – ККД циклу електроприводу;

$T_{\text{ц}}$  – тривалість робочого циклу, год;

$A_{\text{мех}}$ ,  $A_{\text{ел}}$  – корисна механічна робота та споживана з мережі електроенергія, Дж;

$M_{\text{м}}$  – крутний момент на валу робочої машини, Н·м;

$\omega_{\text{м}}$  – кутова швидкість вала передачі робочої машини, с<sup>-1</sup>;

$P$  – потужність, споживана електроприводом від мережі, Вт.

Якщо відомі значення ККД  $\eta_{\text{ел}}$  перетворювача, двигуна  $\eta_{\text{дв}}$  і механічної передачі  $\eta_{\text{мех}}$ , то ККД електроприводу визначається:

$$\eta = \eta_{ел} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{мех}, \quad (1.2)$$

Характеристикою ефективності електроенергії мережі є коефіцієнт потужності, тобто відношення активної потужності  $P$  до повної потужності  $S$  :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (1.3)$$

У Європейському Союзі розроблено та набув чинності новий стандарт ІЕС 60034-30, згідно з яким для одношвидкісних трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором визначено три класи ефективності (рис. 1.2):

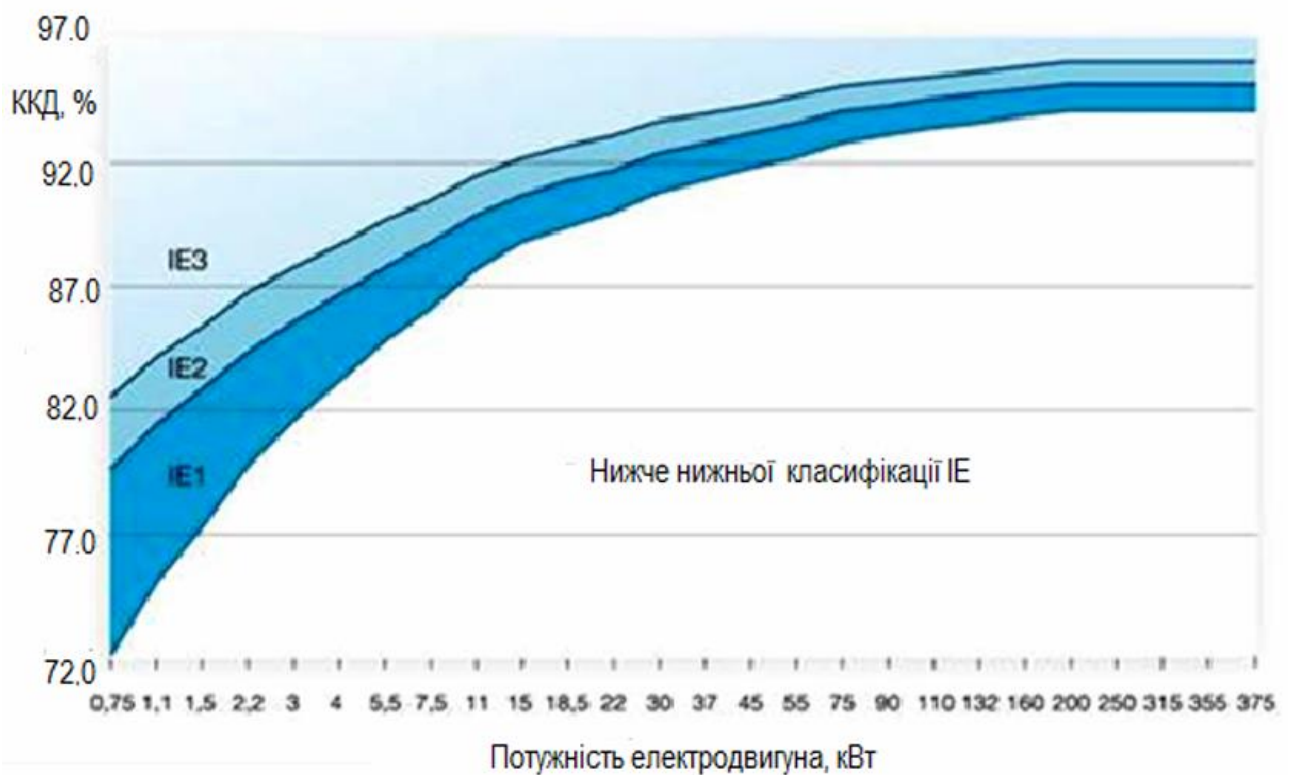


Рисунок 1.2 – Класи енергетичної ефективності асинхронних електродвигунів аграрного виробництва

1. IE1 – стандартний рівень енергоефективності, приблизно еквівалентний рівню енергоефективності Eff2, який зараз використовується в Європі;
2. IE2 – високий рівень енергоефективності, приблизно еквівалентний рівню енергоефективності Eff1;

3. ІЕЗ – найвищий рівень енергоефективності, новий рівень енергоефективності в Європі. Крім того, зараз розробляються вимоги до двигунів класу ІЕ4.

Ці зміни стосуються майже всіх двигунів у діапазоні потужностей від 0,75 кВт до 375 кВт, як того вимагають вищезазначені стандарти. Очікується, що втрати енергії будуть зменшені на 15% порівняно з класом ІЕЗ.

Енергозберігаючі двигуни аграрного виробництва – це двигуни, ефективність яких на 1...10% перевищує стандартні двигуни.

## **1.2. Класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва**

Класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва може бути здійснена за різними критеріями. Основні критерії класифікації включають тип керування, метод регулювання швидкості, архітектуру системи та використання векторного алгоритму (рис. 1.3).

Давайте розглянемо ці критерії більш детально. Стосовно типу керування вони мають:

- пряме керування (Direct Control) – у цьому типі керування кожна фаза електродвигуна керується окремо без урахування взаємодії між фазами.
- векторне керування (Vector Control) – використовується векторний алгоритм керування електродвигуном, що дозволяє врахувати взаємодію між фазами та покращити регулювання динаміки та точності.

Щодо методу регулювання швидкості, то системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва мають:

- векторний контроль швидкості (Vector Speed Control) – застосовується векторний алгоритм для регулювання швидкості електродвигуна з високою точністю та динамікою.

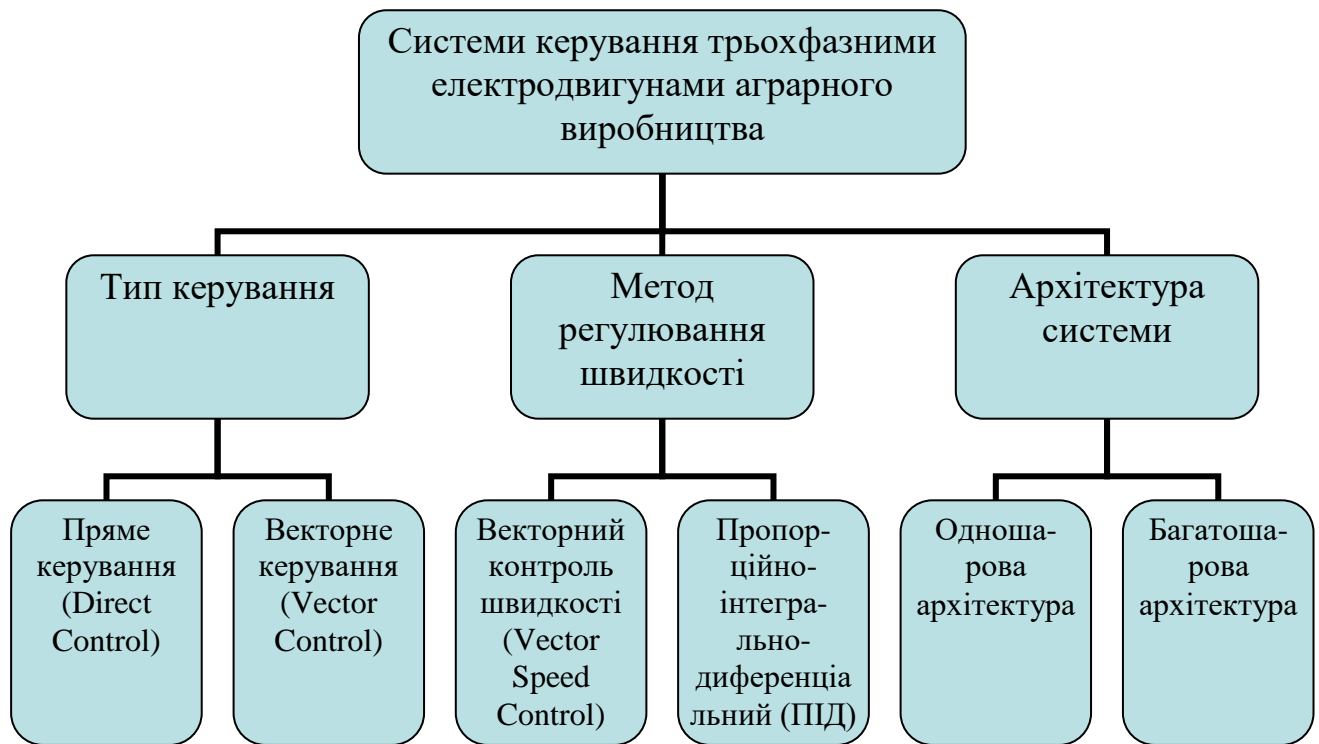


Рисунок 1.3 – Класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва

➤ пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) контроль швидкості – використовується класичний ПІД-регулятор для керування швидкістю електродвигуна.

Системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва можуть мати такі архітектури:

➤ одношарова архітектура – використовується проста архітектура з одним контролером для керування всіма фазами електродвигуна.

➤ багатошарова архітектура – використовується складна архітектура з розподіленими контролерами для кожної фази електродвигуна.

Отже, виконана класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва свідчить про те, що слід звернути особливу увагу на векторний алгоритм керування електродвигунами, що дозволяє врахувати взаємодію між фазами та покращити регулювання динаміки та точності.

### **1.3. Особливості проектування систем керування трьохфазними електродвигунами в аграрному виробництві**

Особливості проектування системи керування трьома фазними електродвигунами в аграрному виробництві зумовлюються особливостями їх використання та включають наступні аспекти [13; 22; 27]:

1. Висока надійність – аграрне виробництво часто відбувається у важких умовах, де електродвигуни піддаються зносу, пилу, вологості та високим температурам. Системи керування повинні бути відповідним чином захищені та мати високу надійність для забезпечення безперебійної роботи.

2. Енергоефективність – оптимізація споживання енергії є вагомим фактором у сільському господарстві. Системи керування повинні підтримувати ефективні режими роботи електродвигунів, забезпечуючи економію електроенергії та зменшення витрат.

3. Гнучкість – сільське господарство вимагає різних типів роботи, від поливу до обробки сільськогосподарської продукції. Системи керування повинні бути гнучкими, здатними до адаптації до різних завдань та забезпечувати регулювання параметрів електродвигунів.

4. Управління з віддаленої точки – у аграрному виробництві важливо мати можливість віддаленого управління системами керування, особливо у великих сільськогосподарських площах. Це дозволяє забезпечити ефективне керування та діагностику проблем, скоротити час зупинки та підвищити продуктивність.

5. Використання сенсорів та систем моніторингу – для досягнення оптимальної роботи електродвигунів в аграрному виробництві слід використовувати сенсори та системи моніторингу. Це дозволяє підтримувати реальний часовий зворотний зв'язок щодо стану електродвигунів, вимірювання параметрів, таких як температура, вібрація, струм та напруга, і своєчасно виявляти будь-які аномалії або проблеми. Системи моніторингу не можуть

забезпечити проактивне технічне обслуговування, запобігаючи виникненню аварій та зниженню простого обладнання.

6. Адаптація до вимог сільськогосподарського середовища – використання систем управління трьохфазними електродвигунами в аграрному виробництві повинно враховувати особливості цього середовища. До таких особливостей можна віднести захист від пилу, вологи, вібрації та електромагнітних перешкод, а також врахування різних типів навантаження, які зустрічаються в аграрному секторі.

7. Інтеграція з іншими системами – системи керування трьохфазними електродвигунами повинні бути інтегровані з іншими системами.

8. Застосування управління на основі ПЛК – у сільському господарстві часто використовуються програмовані логічні контролери (ПЛК), які забезпечують гнучке та програмоване керування системами електродвигунів. Це дозволяє швидко досліджувати параметри роботи, витримувати логіку управління та інтегруватися з іншими сільськогосподарськими процесами.

9. Забезпечення безпеки – у системах керування трьохфазними електродвигунами важливо враховувати аспекти безпеки праці. Наприклад, встановлення захисних пристроїв, система аварійного вимкнення, контроль за перевантаженням та перегрівом для запобігання небезпечним ситуаціям.

10. Регулювання параметрів роботи – системи регулювання параметрів роботи електродвигунів, такі як швидкість обертання, крутний момент, напруга та струм. Це дозволяє пристосувати роботу електродвигунів до конкретних вимог аграрного виробництва, оптимізувати енергоспоживання та забезпечити ефективну роботу обладнання.

11. Використання режимів зі зниженою потужністю – у деяких випадках, наприклад, при роботі з невеликими навантаженнями або в періоди перерви, можна ефективно використовувати режими зі зниженою потужністю. Системи керування дозволяють забезпечити плавний перехід до таких режимів, що забезпечує зниження енергоспоживання та використання обладнання.

12. Реалізація автоматичного пуску та зупинки – системи керування з можливістю плавного пуску та зупинки електродвигунів. Це спрощує процес експлуатації, зменшує ризик помилок та дає змогу зберегти електродвигуни від сильного виносу.

13. Діагностика та прогнозування поломок – застосування системи діагностики та прогнозування поломок дозволяє виявити можливості несправності або збої в роботі електродвигунів. Це дозволяє виконувати планове технічне обслуговування, уникати непередбачених зупинок та зниження продуктивності.

14. Системи управління збереження енергії – деякі системи можуть мати функції збереження енергії, які дозволяють ефективно використовувати енергію, встановлюють оптимальні режими роботи та мінімізують витрати.

#### 1.4. Аналіз існуючих систем керування електродвигунами

Для вибору конкретної системи керування електродвигунами, необхідно знати її переваги та недоліки. Це допоможе вам вибрати найоптимальнішу систему для подальшого використання [4]. Розглянемо систему керування електродвигунами з прямий пуском (рис. 1.4).

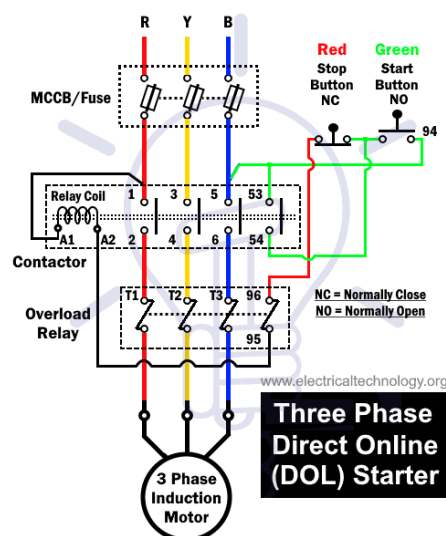


Рисунок 1.4 – Схема системи керування електродвигунами з прямий пуском



Основними перевагами системи керування електродвигунами з прямим пуском є проста та економічна система керування, а також легке встановлення та налагодження.

До недоліків системи керування електродвигунами з прямим пуском належать відсутність точного регулювання швидкості та обертового моменту, великі початкові струми, які можуть вплинути на енергоефективність та знос електродвигуна.

Заслуговує на увагу система керування електродвигунами з використанням розподільчих панелей (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Система керування електродвигунами з використанням розподільчих панелей

До переваг системи керування електродвигунами з використанням розподільчих панелей належить простота використання та доступність, а також базові функції керування та захисту.

До недоліків системи керування електродвигунами з використанням розподільчих панелей належить відсутність точного регулювання швидкості та обертового моменту, обмежені можливості моніторингу та діагностики.

Наступною розглянемо систему керування електродвигунами з використанням частотного приводу (VFD). Як правило, VFD складається з

чотирьох блоків або секцій, де кожна секція виконує свою функцію. Чотири блоки або секції VFD: випрямляч, шина/фільтр постійного струму, інвертор і блок керування. Блок-схема VFD також наведена нижче (рис. 1.6).

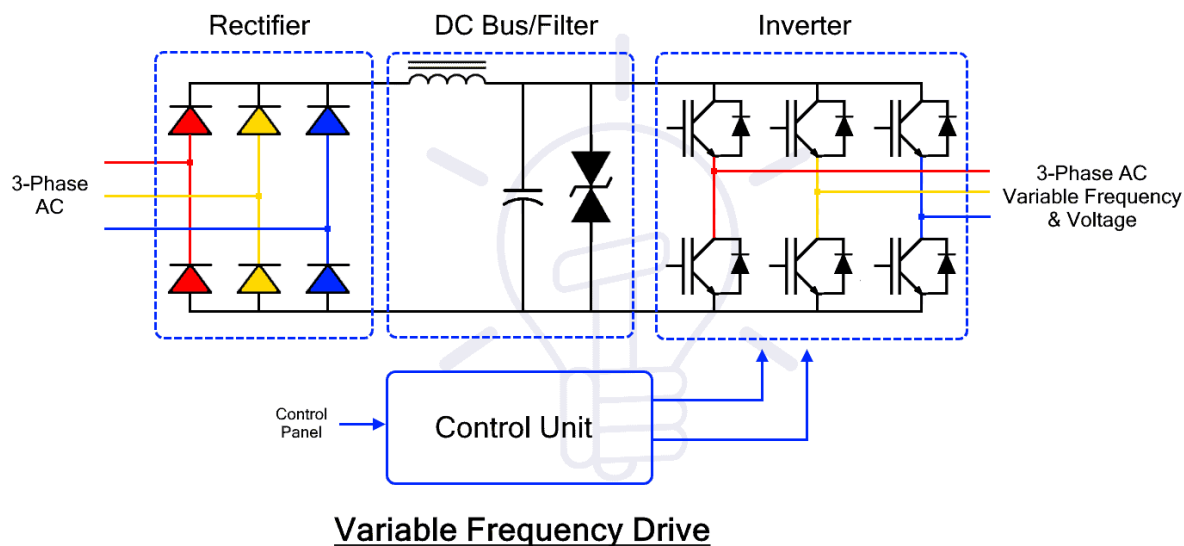


Рисунок 1.6 – Блок-схема VFD

Переваги системи керування електродвигунами з використанням частотного приводу – плавний старт та зупинка електродвигуна; точне регулювання швидкості та обертового моменту, а також збільшена енергоефективність та зменшення втрат потужності.

До недоліків системи керування електродвигунами з використанням частотного приводу належить висока вартість в порівнянні з іншими системами керування, вимагає додаткових налаштувань та знань для ефективного використання.

Заслугове на увагу система керування електродвигунами із використанням векторного алгоритму (рис. 1.7). Векторне керування – це спосіб керування безщітковими електродвигунами змінного струму, що дозволяє незалежно і практично безінерційно регулювати швидкість обертання і крутний момент на валу двигуна.

Основна ідея векторного управління полягає в контролі не тільки величини і частоти напруги живлення, але і фази. Іншими словами,

контролюється величина і кут просторового вектора [32]. Векторне управління в порівнянні зі скалярним має більш високу продуктивність. Векторне керування усуває майже всі недоліки скалярного керування.

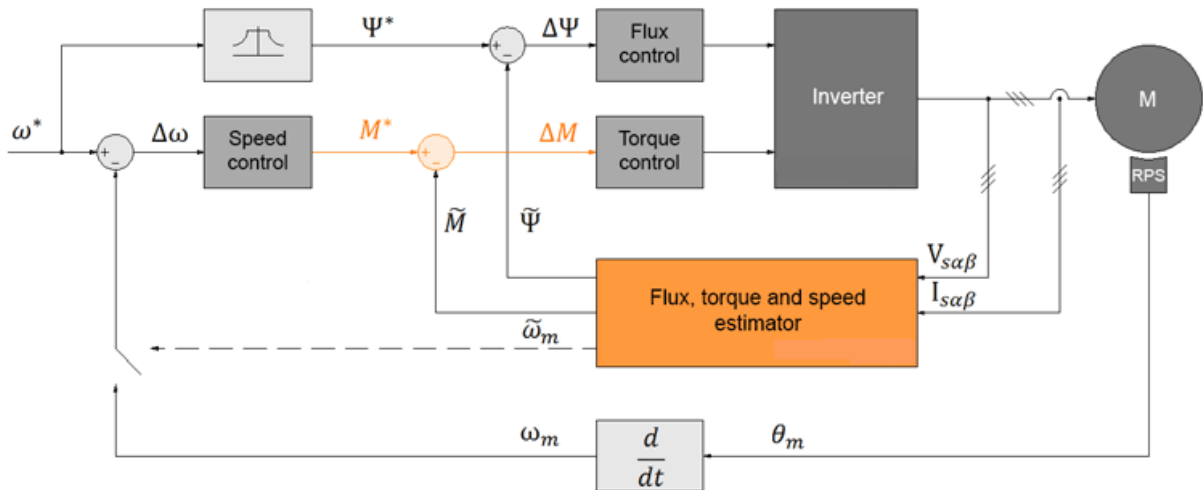


Рисунок 1.7 – Система керування електродвигунами із використанням векторного алгоритму

Загальна блок-схема високопродуктивної системи регулювання швидкості для безщіткового двигуна змінного струму показана на рис. 1.7. Схема заснована на контурах керування потоком і крутним моментом разом із блоком оцінки, який може бути реалізований різними способами. При цьому зовнішній контур регулювання швидкості значною мірою уніфікований і формує керуючі сигнали для регуляторів моменту  $M$  і потоку  $\Psi$  (через блок програмування потоку). Швидкість двигуна може бути виміряна механічним датчиком (швидкість/положення) або отримана за допомогою програмного оцінювача, який дозволяє реалізувати безсенсорне керування.

Переваги векторного керування:

- висока точність регулювання швидкості;
- плавний пуск і плавне обертання двигуна в повному діапазоні обертів;

- швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження швидкість практично не змінюється;
- підвищений діапазон регулювання і точність регулювання;
- зменшуються втрати на нагрівання і намагнічування, підвищується ККД електродвигуна.

До недоліків векторного контролю можна віднести:

- необхідність налаштування параметрів двигуна;
- великі коливання швидкості при постійному навантаженні;
- велика обчислювальна складність.

Керування орієнтоване на поле (FOC) – це метод керування, який керує безщітковим двигуном змінного струму (PMSM, SCIM) як машиною постійного струму з незалежним збудженням, що означає, що потік і крутний момент можна контролювати окремо (рис. 1.8).

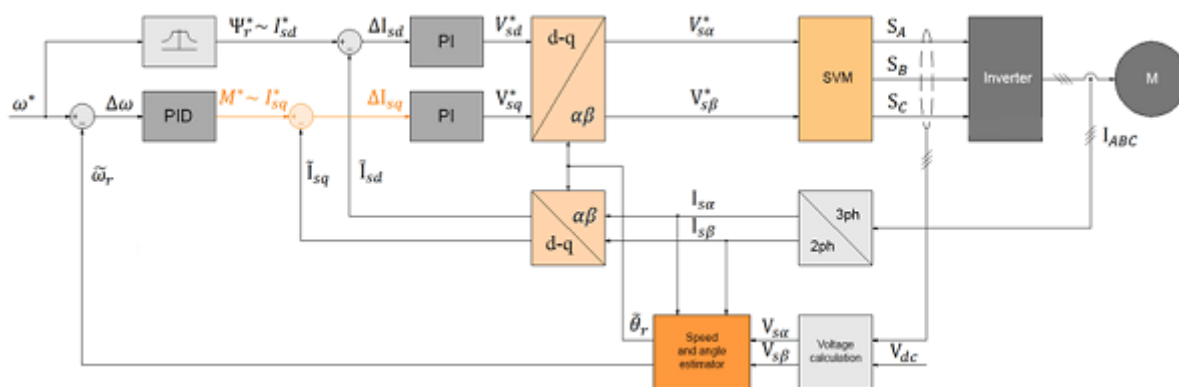


Рисунок 1.8 – Система керування електродвигунами орієнтована на поле (FOC)

Керування, орієнтоване на поле, запропоноване в 1970 році Блашке і Хассе [29], засноване на аналогії з механічно комутованим двигуном постійного струму з роздільним збудженням. У цьому двигуні обмотки збудження та якоря розділені, потік контролюється струмом збудження індуктора, а крутний момент незалежно контролюється регулюванням струму якоря. Таким чином, струми потоку і крутного моменту електрично і магнітно розділені.

Безщітчні двигуни змінного струму (SCIM, PMSM) найчастіше мають трифазну обмотку статора, і вектор струму статора  $I_s$  використовується для керування як потоком, так і моментом.

Таким чином, струм збудження і струм якоря об'єднані в вектор струму статора і не можуть управлятися окремо. Відокремлення може бути досягнуто математично шляхом розкладання миттєвого значення вектора струму статора  $I_s$  на дві складові: пряму складову струму статора  $I_{sd}$  (створення поля) і квадратурну складову струму статора  $I_{sq}$  (створення крутного моменту) в обертовій системі координат  $dq$ , орієнтованій на потік ротора (R-FOC - rotor flux-oriented control).

Таким чином, управління безщітковим двигуном змінного струму стає ідентичним управлінню двигуном постійного струму з окремим збудженням і може бути реалізовано за допомогою ШІМ-інвертора з лінійним ПІ-регулятором і просторово-векторною модуляцією напруги.

Миттєві значення струмів статора перетворюються в обертову систему координат  $d_q$  за допомогою перетворення Парка  $\alpha_\beta/d_q$ , для якого також потрібна інформація про положення ротора. Потік регулюється через пряму складову струму  $I_{sd}$ , а крутний момент – через квадратурну складову струму  $I_{sq}$ . Зворотне перетворення Парка ( $d_q/\alpha_\beta$ ), математичний модуль перетворення координат, дозволяє розрахувати опорні складові вектора напруги  $V_{sa}$  і  $V_{s\beta}$  (рис. 1.9).

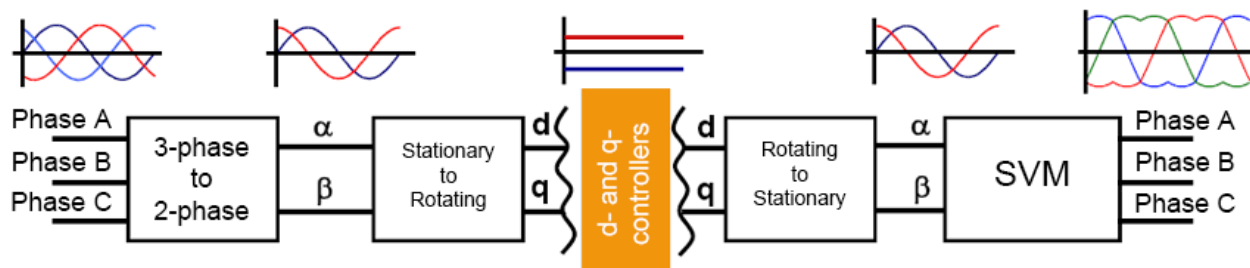


Рисунок 1.9 – Сигнали на різних етапах перетворення

Для визначення положення ротора використовується або датчик положення ротора (RPS), встановлений в електродвигуні, або реалізований в системі керування алгоритм безсенсорного керування, який розраховує

інформацію про положення ротора в режимі реального часу на основі даних, наявних у системі керування.

Пряме керування крутним моментом із просторовою векторною модуляцією буває наступних видів:

- пряме керування крутним моментом із просторовою векторною модуляцією напруги;
- пряме керування крутним моментом із векторною модуляцією потоку.

Пряме керування крутним моментом із просторовою векторною модуляцією, що працює в системі відліку статора, тому для цього керування не потрібна інформація про положення ротора.

Зокрема, за допомогою цього методу реалізовано безсенсорне керування синхронним двигуном з постійними магнітами у всьому діапазоні швидкостей, включно з малими, без необхідності подачі високочастотного сигналу та зміни конструкції ротора, як це робиться при бездатчиковому управлінні електродвигуном.

Для подальшого розгляду вибираємо векторне керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва, так як воно має низку переваг порівняно із іншими видами керування.

### **1.5. Обґрунтування доцільності комп'ютерного моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва**

Комп'ютерне моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва з використанням векторного алгоритму має кілька обґрунтувань:

1. Оптимізація системи роботи – комп'ютерне моделювання дозволяє аналізувати та оптимізувати роботу системи керування трьохфазними

електродвигунами. Векторний алгоритм керування є потужним інструментом, який дозволяє точно контролювати швидкість, крутний момент і напругу електродвигуна, забезпечуючи оптимальну продуктивність та енергоефективність.

2. Ефективне використання ресурсів – комп'ютерне моделювання дозволяє виявити оптимальні налаштування системи керування, що дозволяє ефективно використовувати ресурси, такі як електроенергія. Векторний алгоритм може контролювати режими роботи електродвигуна з високою точністю, що покращує енергоспоживання та забезпечує оптимальну ефективність роботи системи.

3. Прогнозування та аналіз режимів роботи – комп'ютерна модель системи керування дозволяє прогнозувати та аналізувати різні режими роботи електродвигунів у різних сценаріях. Це дозволяє оцінити ефективність та стійкість системи під час різних умов, враховуючи змінні фактори, такі як навантаження, температура, гальмування тощо.

4. Впровадження нових функцій та алгоритмів – комп'ютерне моделювання дозволяє випробовувати та впроваджувати нові функції та алгоритми керування трьохфазними електродвигунами без реального впливу на фізичну систему. Це дозволяє оцінити ефективність нових функцій та алгоритмів без ризику пошкодження обладнання або зупинки виробництва.

5. Виявлення і усунення проблем – комп'ютерне моделювання системи виявляє можливості проблеми або недоліки в системі керування електродвигунами до їх фізичного впровадження. Шляхом аналізу взаємодії компонентів систем, можна виявити проблеми та знайти рішення перед тим, як буде включене в роботу фізичне обладнання.

## РОЗДІЛ 2.

### АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ ТА ВИБІР ЗАСОБІВ

#### 2.1. Структура системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму

Якість векторного керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва залежить багато в чому від налаштування регуляторів швидкості та струму, дискретності аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та алгоритмів векторної широтно-імпульсної модуляції (ВШІМ). Для якісного налаштування систем векторного управління необхідно розробити та реалізувати алгоритми налаштування контурів регулювання за параметрами схеми заміщення трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва, а також алгоритми ВШІМ, прагнучи їх максимально адаптувати для системи керування двигуном на базі мікроконтролера.

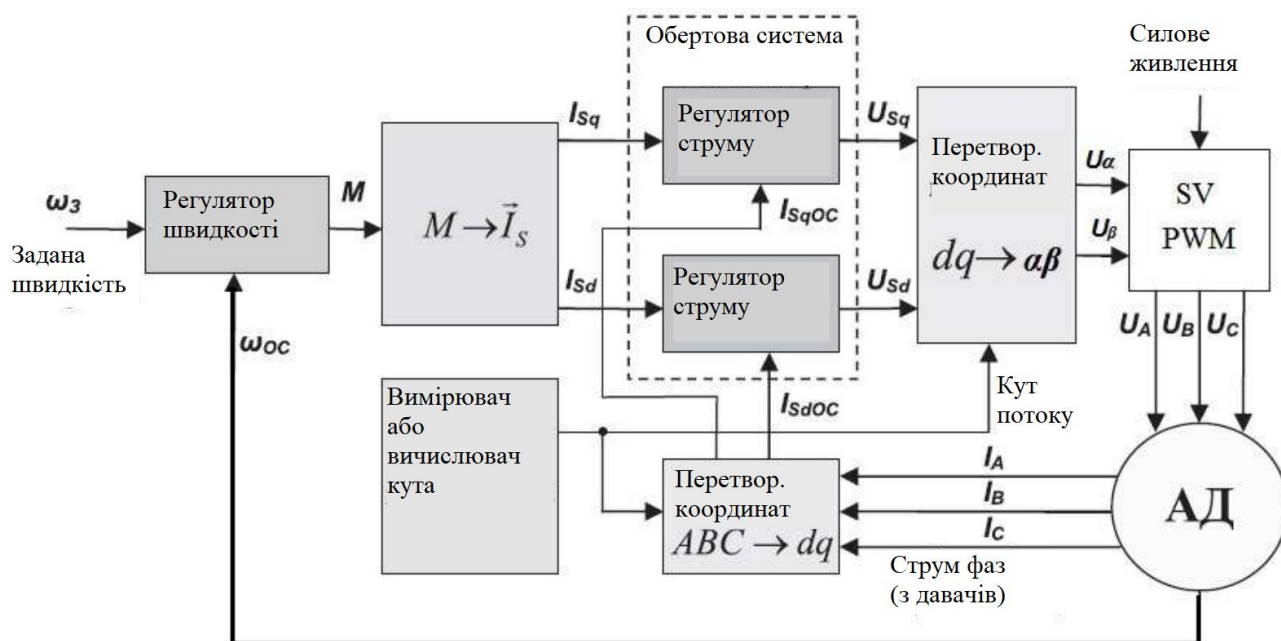


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму



Для моделювання та налагодження алгоритмів векторного керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва можуть бути використані програмно-апаратні симулятори електроприводу [33], а також інші засоби імітаційного моделювання. У нашій роботі пропонується використовувати середовище імітаційного моделювання MatLab/Simulink.

Структурна схема системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму, обрана для дослідження та моделювання [24], представлена на рис. 2.1.

Для побудови моделі системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму необхідно виконати синтез контурів регулювання швидкості і струму.

## 2.2. Синтез контурів регулювання швидкості і струму трьохфазних електродвигунів

Синтез та налаштування регуляторів струму по осях d і q провадимо за відомою методикою [22]. На рис. 2.2 зображено контур регулювання складової струму  $I_{Sq}$ .

Для силового перетворювача приймаємо пропорційний коефіцієнт  $k_n = U_{нф}$  та постійну часу:

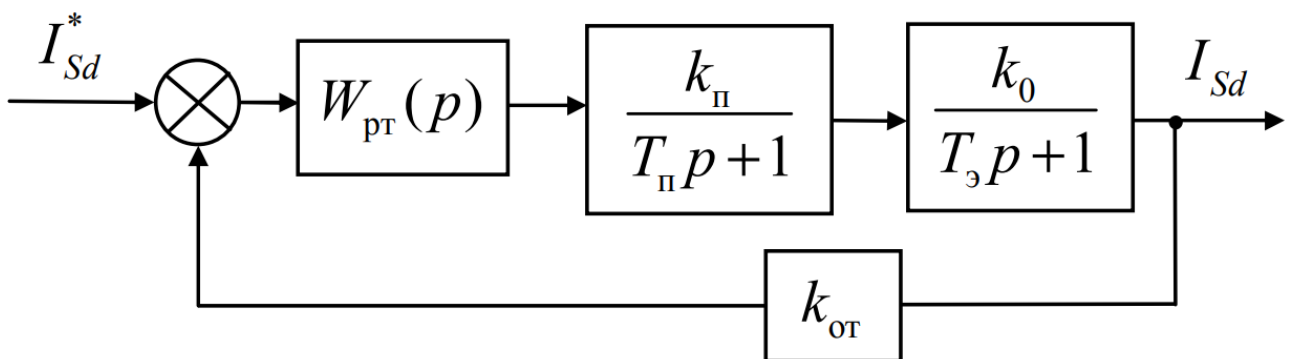


Рисунок 2.2 – Контур регулювання струму  $I_{Sq}$

$$T_n = 2T_{\text{шум}} = \frac{2}{f_{\text{шум}}}. \quad (2.1)$$

З урахуванням компенсації перехресних зворотних зв'язків [34] отримуємо коефіцієнти для складової ланцюга статора по осі  $q$ .

$$k = \frac{1}{R_s}, \quad (2.2)$$

$$T_e = \left( L_{\sigma s} + \frac{L_{\sigma R} \cdot L_m}{L_{\sigma R} + L_m} \right) / R_s, \quad (2.3)$$

де  $R_s$  – опір статора;  $L_{\sigma s}$  – індуктивність розсіювання статора;  $L_{\sigma R}$  – індуктивність розсіювання ротора;  $L_m$  – головна індуктивність.

Коефіцієнт зворотний зв'язок датчика струму  $k_{om} = 1$ .

Налаштування контуру струму робимо на технічний оптимум [26], компенсуючи велику постійну часу  $T_e$ , тому  $T_\mu = T_n$ . В результаті процедури синтезу отримано передатну функцію ПІ-регулятора струму:

$$W = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1) \cdot \frac{k_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{k_0}{T_e p + 1}}, \quad (2.4)$$

Передатна функція замкнутого контуру статора по осі  $q$

$$W = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1) \cdot \frac{k_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{k_0}{T_e p + 1}} = \frac{1}{2T_\mu p^2 + 2T_\mu p + 1} \approx \frac{1}{2T_\mu p + 1}, \quad (2.5)$$

Аналогічно виконуються синтез та налаштування контуру регулювання складової струму  $I_{sd}$ .

Далі розглянемо налаштування контуру регулювання швидкості. В результаті процедури синтезу [4, 5] отримана схема контуру регулювання швидкості (рис. 2.3), який включає безпосередньо сам регулятор швидкості  $W_{pc}(p)$ , обчислювач струму  $I_{sd}$ , замкнутий контур регулювання струму ( $ЗКР T_q$ ), механічну частину електродвигуна і зворотну зв'язок як датчика швидкості ( $K_c$ ).

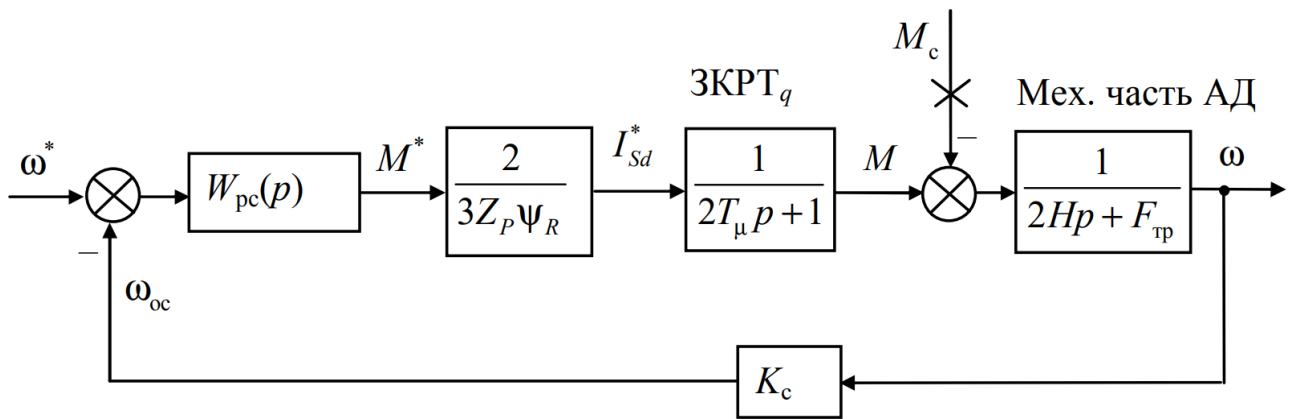


Рисунок 2.3 – Контур регулювання швидкості

Передатна функція механічної частини трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва визначається з математичного опису електродвигунів на підставі використання імітаційного моделювання MatLab/Simulink [33]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (M - F_{mp}\omega - M_c), \quad (2.6)$$

де  $M$  – електромагнітний момент,  $F_{mp}$  – коефіцієнт тертя,  $H$  – сумарна інерційна стала машини,  $M_c$  – статичний момент навантаження.

Приймаючи  $M_c = 0$ , отримуємо передатну функцію механічної частини трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва:

$$W_{MEX} = \frac{1}{2Hp + F_{mp}} = \frac{1/F_{mp}}{\frac{2H}{F_{mp}}p + 1}, \quad (2.7)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку датчика швидкості приймаємо  $k_{om} = 1$ .

Налаштування контуру швидкості виконуємо на технічний оптимум [32], меншу постійну часу приймаємо  $T_{\mu C} = 2T_{\mu}$ .

В результаті процедури синтезу [10] отримано передатну функцію ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{pc} = \frac{1}{2T_{\mu C} (T_{\mu C} p + 1) \cdot \frac{2}{3Z_p \Psi_R} \cdot \frac{1}{2T_{\mu C} p + 1} \cdot \frac{1}{2Hp + F_{mp}}}, \quad (2.8)$$

При побудові системи моделі векторного управління необхідно врахувати компенсацію нелінійних зворотних зв'язків [18].

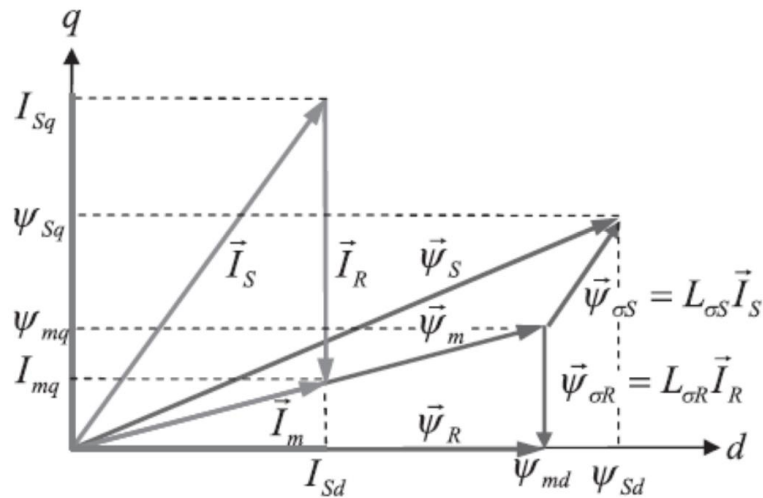


Рисунок 2.4 – Векторна діаграма трьохфазних електродвигунів аграрного

$$\text{виробництва при } \psi R = \text{const} \begin{matrix} U_{Sd} \\ I_{Sq} \end{matrix}$$

Для цього скористаємося векторною діаграмою двигуна (рис. 2.4) при  $\psi R = \text{const}$  і виразимо потокозчеплення в рівняннях рівноваги статора через струми статора:

$$\psi_{Sd} = L_{\sigma S} I_{Sd} + \psi_{md} = (L_{\sigma S} + L_m) I_{Sd}, \quad (2.9)$$

$$\psi_{Sd} = L_{\sigma S} I_{Sd} + \psi_{md} = L_{\sigma S} I_{Sd} + L_m I_{mq} = \left( L_{\sigma S} + \frac{L_{\sigma S} L_m}{L_{\sigma S} + L_m} \right) I_{Sd}, \quad (2.10)$$

Аналізуючи отриману систему рівнянь (2/10), бачимо, що у напрузі  $U_{Sd}$  присутня складова, яка від  $I_{Sd}$ , а напрузі  $U_{Sq}$  – складова, залежить від  $I_{Sd}$ .

Отже, при синтезі системи управління між каналами регулювання складових  $I_{Sd}$  та  $I_{Sq}$  існуватиме взаємовплив. Канали будуть надавати один на одного збурювальний вплив, особливо сильно виявляється в перехідних режимах. Щоб цього уникнути, виконаємо компенсацію перехресних зв'язків та отримаємо компенсуючі складові.

## 2.3. Вибір засобів моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва

При розрахунку системи електроприводу необхідно знайти параметри регулятора. Для складних математичних моделей об'єктів керування це вимагає складних структурних перетворень, переміщення вузлів чи блоків тощо. Для цього вибираємо пакет програм Matlab, а точніше Nonlinear Control Design Blockset (NCD Blockset), що дозволяє знайти параметри регулятора, не вдаючись до складної математики. Питання полягає в тому, чи дасть цей інструмент такі ж результати, як перевірений метод.

Нами проаналізовано можливості NCD Blockset та з'ясовано переваги та недоліки цього методу розрахунку регуляторів систем електроприводу. Ним передбачається, що в основі електроприводу лежить асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Двигун живиться від перетворювача частоти і оснащений контуром зворотного зв'язку по струму і швидкості.

Для моделювання будемо використовувати лінійну модель трьохфазного електродвигуна аграрного виробництва та представлення перетворювача частоти у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [34].

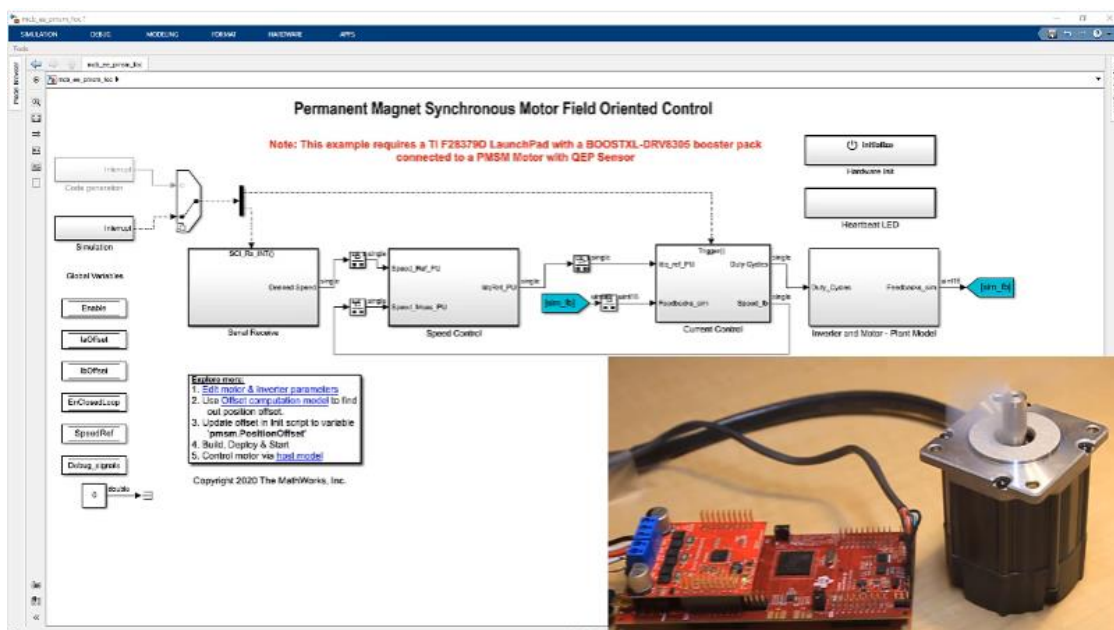


Рисунок 2.5 – Комп'ютерна модель системи електроприводу

Для прикладу на рис. 2.5 представлена комп'ютерна модель системи з асинхронним двигуном потужністю 0,55 кВт, частотою обертання 1440 об/хв, перевантажувальною здатністю 2,5 і контуром зворотного зв'язку, налаштованим як модульний критерій оптимальності.

Двигун представлений компонентами Transfer Fcn 3 і 4, а перетворювач частоти представлений Transfer Fcn 2. Регулятор струму (крутного моменту) має пропорційно-інтегральну структуру, а регулятор швидкості приймає пропорційну структуру. Контур зворотного зв'язку не враховує затримки фільтра датчика і перетворювача нормалізації керованого параметра. Опорний сигнал подається на вхід моделі через фільтр Transfer Fcn 1. До двигунів застосовуються навантаження вентиляторного типу.

Графік кутової швидкості двигуна та струму (крутного моменту), отриманого за допомогою такого налаштування регулятора, показано на рис. 2.6.

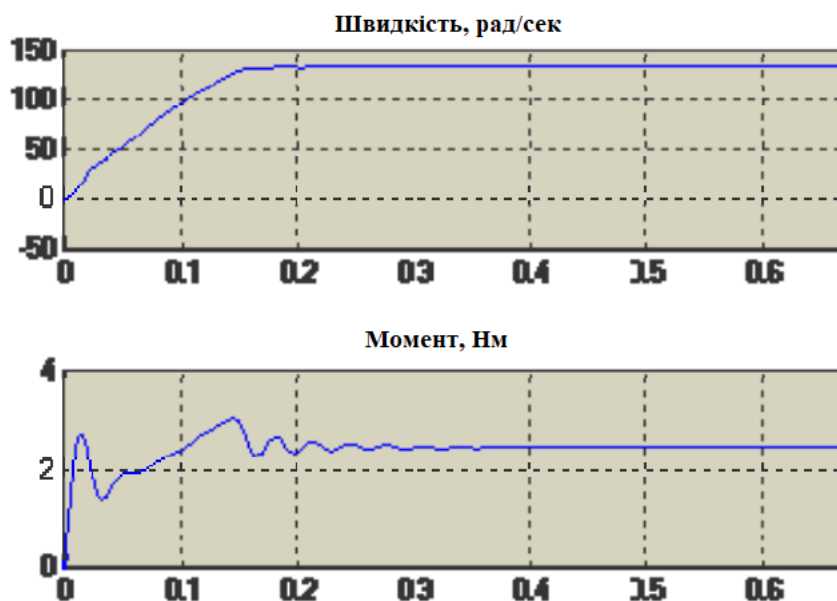


Рисунок 2.6 – Результати оптимізації комп'ютерного моделювання для параметрів Output

Для визначення параметрів регулятора використовують інструмент NCD Blockset. Для цього необхідно підключити елемент NCD Output (бібліотека

NCD Blockset) до виходу контрольованого параметра (кутова швидкість або струм).

Розглянемо іншу ситуацію:

1. В якості контрольованого параметра вибираємо кутову швидкість двигуна. Регулятор струму (моменту) – пропорційного інтегрального типу, а регулятор швидкості – пропорційного. Значення пропорційної та інтегральної складових регулятора повинні бути встановлені як змінні елемента NCD.

Далі у вікні NCD Outport необхідно встановити обмеження на перехідний процес контрольованої величини (в даному випадку кутової швидкості). Вікно параметрів NCD Outport показано на рис. 2.7.

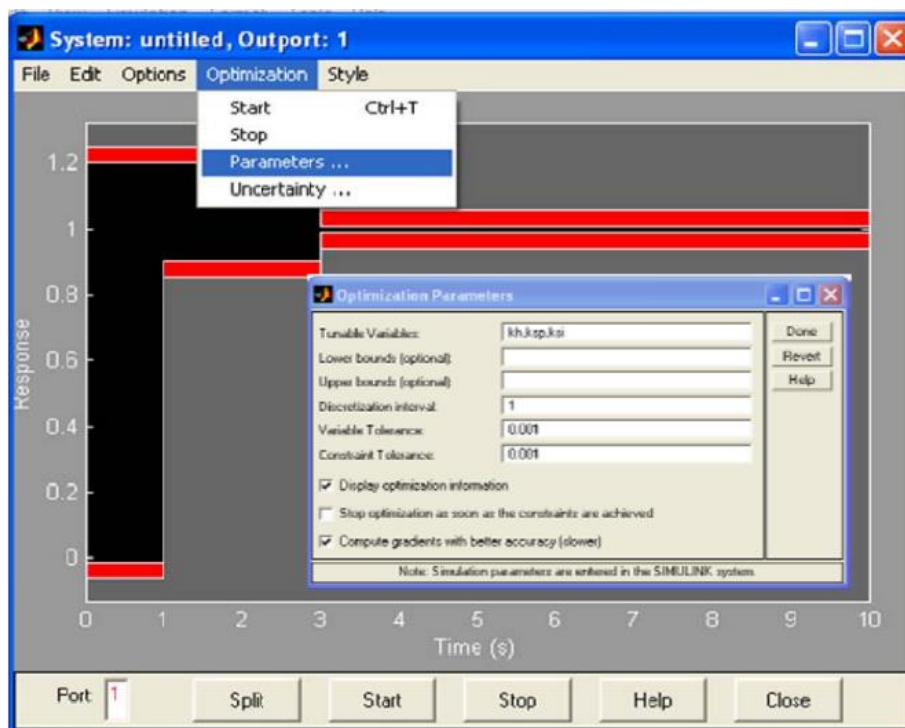


Рисунок 2.7 – Діалогове вікно для вибору параметрів NCD Outport

Для проведення оптимізації необхідно вказати початкові умови, тобто пропорційність регулятора та початкові значення інтегральних складових визначаються у вікні команд. Якщо натиснути кнопку «Пуск» у вікні NCD Outport, можна помітити, що поведінка контрольованого параметра змінюється при заміні різних значень змінних оптимізації.

Вибір параметрів регулятора здійснюється з «входом» названої характеристики в канал, визначений межами перехідного процесу. Підставляючи отримані параметри в комп'ютерну модель системи електроприводу, отримуємо діаграму перехідного процесу швидкості та моменту двигуна, як показано на рис. 2.8.

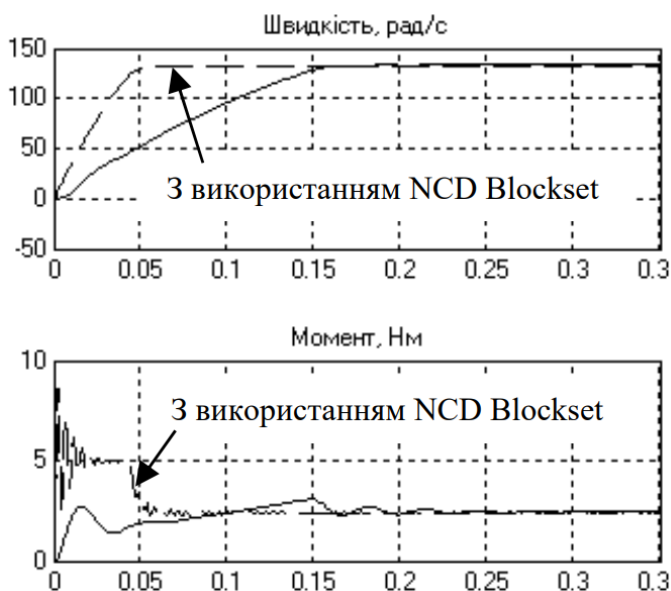


Рисунок 2.8 – Результати комп'ютерного моделювання

Як контрольований параметр вибираємо частоту обертання електродвигуна. Регулятори струму (моменту) і швидкості пропорційно-інтегральні. В результаті оптимізації ми отримаємо результат, зображений на рисунку 2.8.

Порівнюючи отримані графіки перехідних процесів, можна зробити висновки щодо характеристик застосування оптимізованого пакету розрахунків у Matlab NCD Blockset Calculations for electric системи приводу:

а) якщо система електроприводу є багатоконтурною, то оптимізація всіх ланцюгів разом дасть кращі результати;

б) для вибору контролера для системи електроприводу необхідно розглянути всі можливі варіанти контролера, оскільки пропорційно-інтегральний характер контролера (як більш часто використовуваного типу контролера) може «затримувати» перехідний процес системи в часі.



Переваги використання оптимізаційного розрахункового пакету Matlab NCD Blockset для розрахунку параметрів регулятора системи електроприводу:

- а) висока швидкість розрахункового процесу;
- б) простий у реалізації;
- в) гнучкість і видимість для встановлення обмежень на перехідний процес контрольованих параметрів.

Основними недоліками оптимізованого пакету розрахунків Matlab NCD Blockset є:

- а) показники якості отриманих властивостей гірші порівняно з розрахунковими налаштуваннями системи на модульну або симетричну оптимізацію;
- б) неможливо підібрати тип регулятора, який забезпечував би кращу картину перехідного процесу;
- в) не вдається визначити виправлені типи посилянь, які покращують показники якості та стабільності.

Тому для отримання кращого показника якості регулювання системи електроприводу необхідно використовувати класичний метод розрахунку регулятора. Коли форма регулятора відома, а форма об'єкта регулювання є складною, для спрощення процесу розрахунку рекомендується використовувати функції оптимізаційного розрахункового пакету Matlab NCD Blockset.

Також пропонується використовувати бібліотеку Simscape Electrical (раніше SimPowerSystems або SimElectronics). Ця бібліотека вміщує компоненти для моделювання та імітації електронних, мехатронних та електричних систем живлення.

Бібліотека Simscape Electrical включає в себе моделі напівпровідників, двигунів і компонентів для таких програм, як електромеханічне керування, розумні мережі та системи відновлюваної енергії. При цьому можна використовувати зазначені компоненти для оцінки архітектури аналогових схем, розробки мехатронних систем з електроприводами та аналізу генерації, перетворення, передачі та споживання електроенергії на рівні мережі.

Simscape Electrical допомагає розробляти системи керування та тестувати продуктивність на рівні системи. Можна із її використанням параметризувати свої моделі за допомогою змінних і виразів MATLAB, а також проектувати системи керування для електричних систем у Simulink. Водночас можна інтегрувати механічні, гідравлічні, термічні, та інші фізичні системи у проєктовану модель за допомогою компонентів сімейства продуктів Simscape. Для розгортання моделей в інших середовищах моделювання, включаючи апаратні системи в циклі (HIL), Simscape Electrical підтримує генерацію коду на мові C.

Нами пропонується створювати модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму. Термін «векторне управління» електродвигунами достатньо розповсюджений [24]. При цьому за допомогою мікроконтролера можна керувати двигуном змінного струму.

## РОЗДІЛ 3.

### РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЬОХФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ПІДСТАВІ ВИКОРИСТАННЯ ВЕКТОРНОГО АЛГОРИТМУ

#### 3.1. Структура системи векторного керування електродвигуном

Для початку векторного керування електродвигуном знадобиться знати положення ротора, щоб можна було відміряти  $90^\circ$ . Це найпростіше зробити встановивши, власне, датчик положення на вал ротора. Потім слід розібратися, як створити вектор струму, підтримуючи бажані струми у фазах  $\alpha$  та  $\beta$ . На двигун прикладаємо напругу, а не струм. Але якщо хочемо щось підтримувати, то потрібно це вимірювати. Тому для векторного керування електродвигуном знадобляться датчики струмів фаз. Далі потрібно представити структуру системи векторного керування електродвигуном у вигляді програми на мікроконтролері.

А якщо потрібно регулювати не момент приводу, а все-таки швидкість (правильний кутову швидкість, частоту обертання), то слід передбачити ще один ПІ-регулятор – регулятор швидкості (РС). На вхід подаємо значення швидкості, а на виході маємо завдання моменту. Так як струм осі  $q$  пропорційний моменту, то для спрощення вихід регулятора швидкості подати відразу на вхід регулятора струму осі  $q$ , ось так на рис. 3.1.

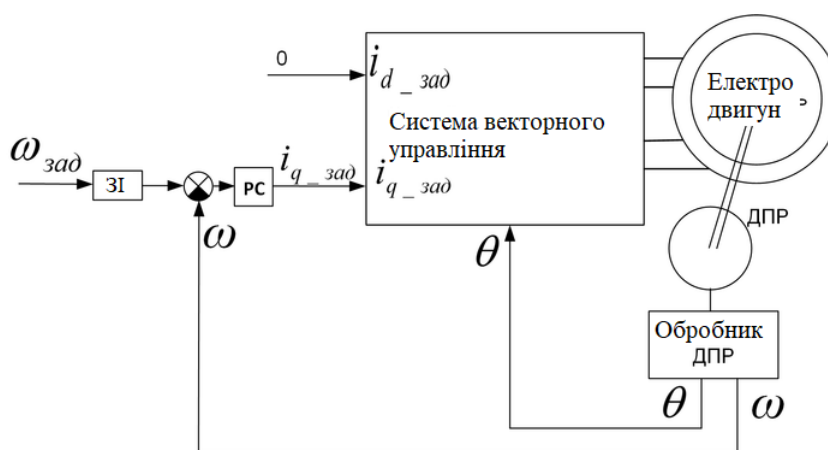


Рисунок 3.1 – Схема регулятора швидкості для векторного керування

У запропонованій схемі регулятора швидкості для векторного керування встановлено датчик інтенсивності (ЗІ), що плавно змінює свій вихід, щоб електродвигун розганявся з потрібним темпом, а не працював на повному струмі до задачі швидкості. Поточна частота обертання  $\omega$  взята з датчика положення ротора, так як це похідна від кутового положення  $\theta$ , або ж просто час між імпульсами датчика контролю.

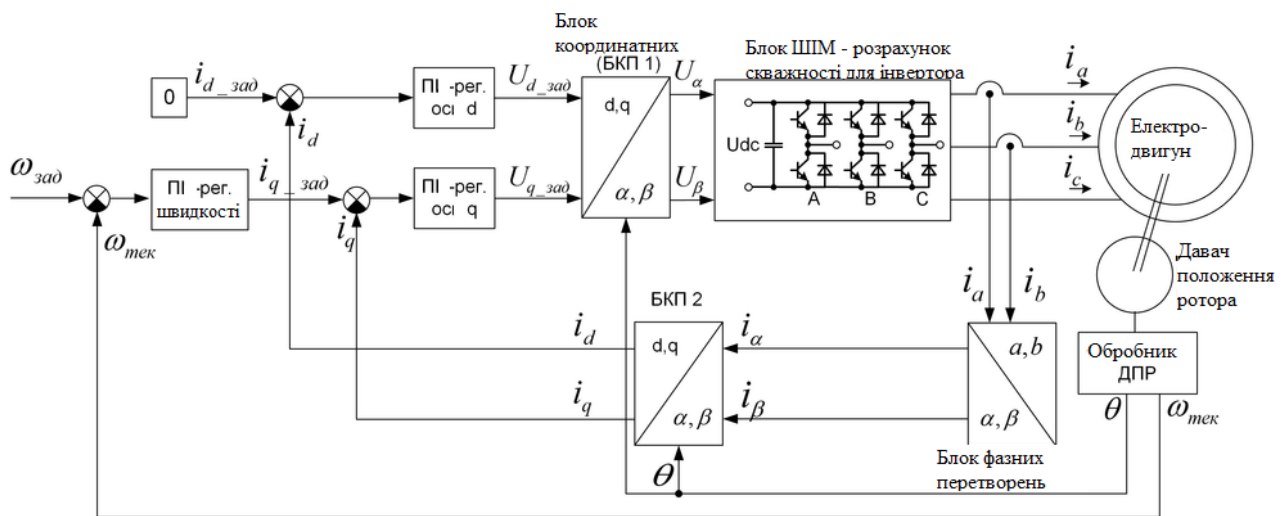


Рисунок 3.2 – Структура векторного керування для трифазного електродвигуна аграрного виробництва

Трифазні струми, так само як і двофазні, служать для однієї мети – створити вектор струму статора  $I_s$ , спрямований у потрібну сторону, що має потрібну амплітуду. Тому трифазні струми можна просто перерахувати у двофазні, а далі залишити ту саму систему управління, що вже була зібрана для двофазного електродвигуна. У закордонній літературі таку зміну називають перетвореннями Кларка – Clarke transformation, у вітчизняній – фазними перетвореннями. У структурі векторного давачевого керування для трифазного електродвигуна аграрного виробництва (рис. 3.2), відповідно, ця операція проводиться блоком фазних перетворень.

### 3.2. Модель системи керування електродвигуном

Відповідно до існуючих задач керування електродвигунами та для оптимізованої автоматичної генерації коду було створено бібліотеку Motor Control Blockset [34]. У описі цієї бібліотеки є теоретичний мінімум за способами керування трифазними двигунами, а також є готовий приклад із реалізацією векторного управління. Але звернувши увагу на те, як моделюється сам електродвигун, виникла наступна задача. У більшості наявних трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва фазні обмотки з'єднані за схемою «трикутник», а бібліотеці, що розглядається, не виявилось блоку, що описує поведінку подібного двигуна. Довелося використати блоки із бібліотеки Simscape Electrical.

При цьому було створено нову модель із використанням бібліотек Motor Control Blockset та Simscape Electrical, яка представлена на рис. 3.3.

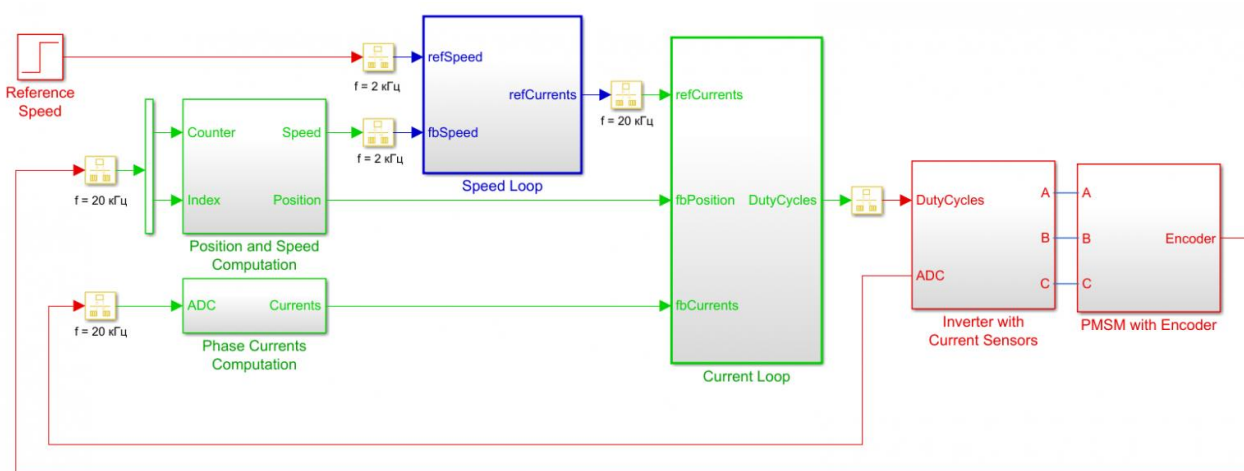


Рисунок 3.3 – Модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва

Модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва складається з кількох блоків:

- 1) PMSM with Encoder – модель електродвигуна з інкрементальним енкодером;
- 2) Inverter with Current Sensors – модель інвертора із давачами струму;

- 3) Phase Currents Computation – перетворення цифрових сигналів від датчиків струму на фізичні сигнали струму;
- 4) Position and Speed Computation – обробка сигналів від інкрементального енкодера;
- 5) Current Loop – струмовий (внутрішній) контур керування;
- 6) Speed Loop – швидкісний (зовнішній) контур керування.

### 3.3. Модель підсистеми PMSM with Encoder

Підсистема PMSM with Encoder включає вже згаданий блок самого електродвигуна з урахуванням впливу тертя та примітивна модель енкодера. Контролер (датчик) положення об'єкта, що обертається, або енкодер – це електромеханічний пристрій, за допомогою якого можна визначити положення осі обертання (вала) (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Вигляд електромеханічного пристрою (енкодера) для визначення положення осі обертання (вала)

У пропонованій моделі енкодер представлено простим коефіцієнтом підсилення (кількістю міток на диску – кількість сформованих імпульсів на мітку) (рис. 3.5).

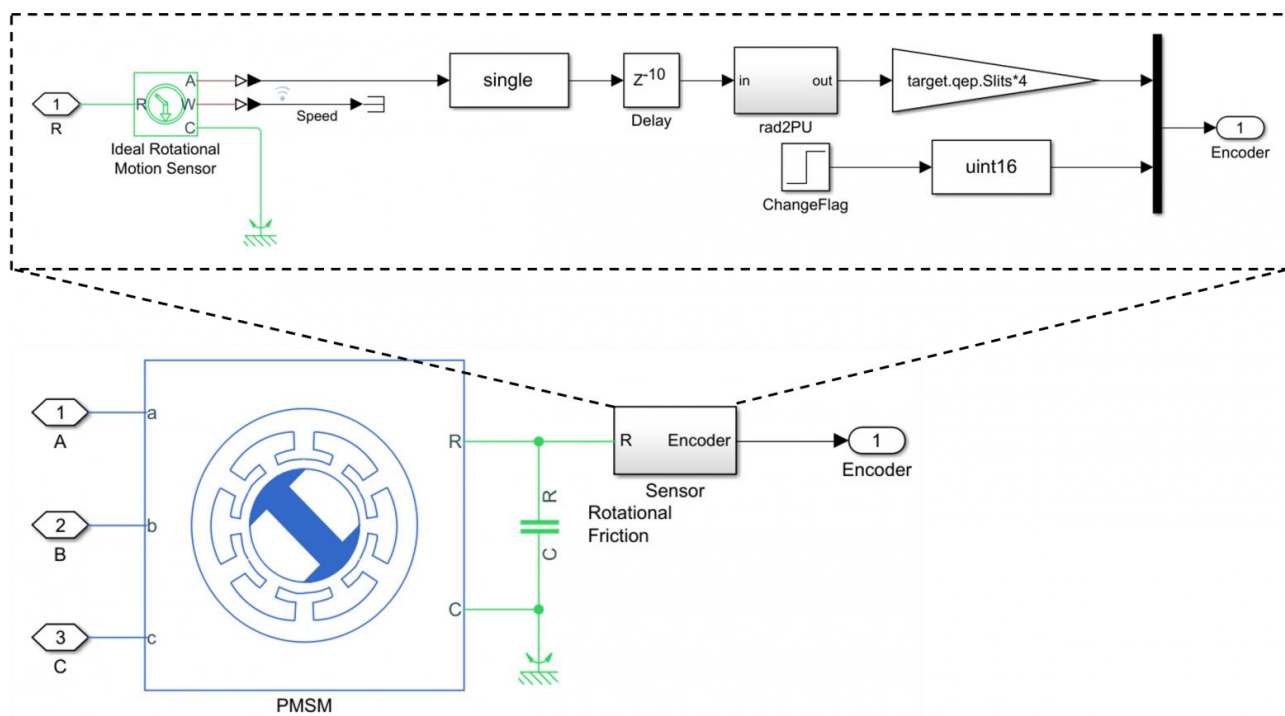


Рисунок 3.5 – Модель підсистеми PMSM with Encoder

Сигнал повного обороту енкодера моделюється простим джерелом одиничного сигналу ChangeFlag, час переходу з нульового на одиничний (тобто видачу енкодером імпульсу повного обороту). При цьому рівень можна виставляти самому. Також виставляється сигнал зворотного зв'язку включена затримка Delay, яка становить 10 тактів роботи мікроконтролера.

### 3.4. Модель підсистеми Inverter with Current Sensors

У підсистемі Inverter with Current Sensors знаходяться блок Average-Value Inverter, на виході якого виходить усереднене значення вихідної напруги трифазного інвертора (рис. 3.6). Окрім того, є блок M, в якому розташовані ідеальні датчики струму та підсистема Convert Currents, в якій сигнали з датчиків струму перетворюються на рівні аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) з урахуванням його зміщення.

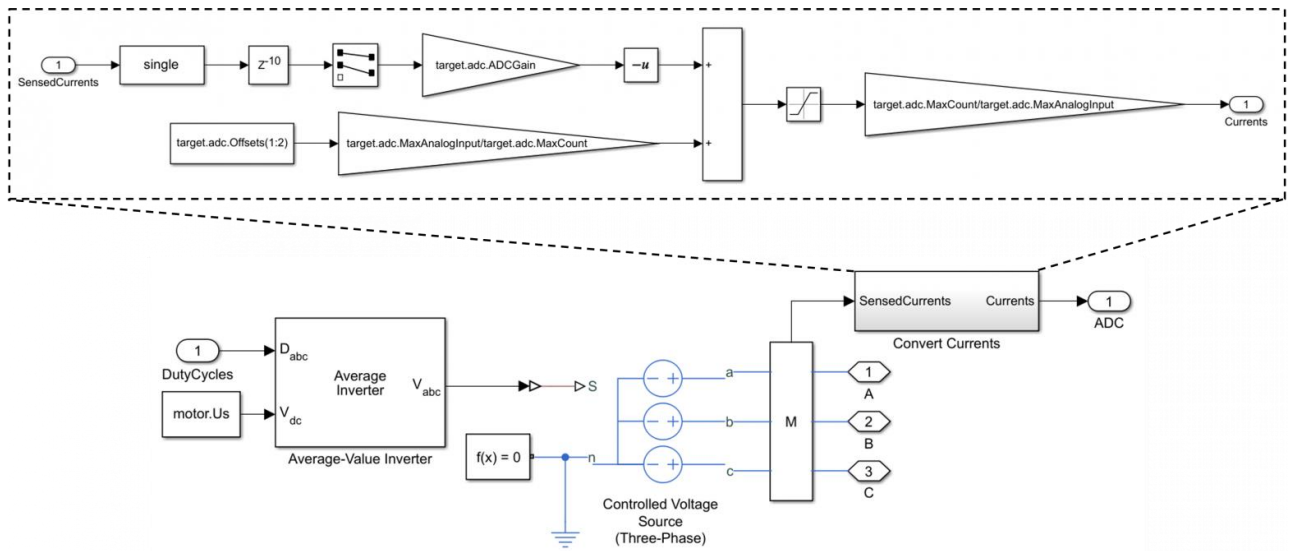


Рисунок 3.6 – Модель підсистеми Inverter with Current Sensors

У моделі підсистеми Inverter with Current Sensors враховується затримка перетворення сигналів АЦП.

### 3.5. Моделі підсистем Phase Currents Computation та Position and Speed Computation

У підсистемі Phase Currents Computation виконуються зворотні перетворення: рівні АЦП перетворюються на фізичні сигнали струму.

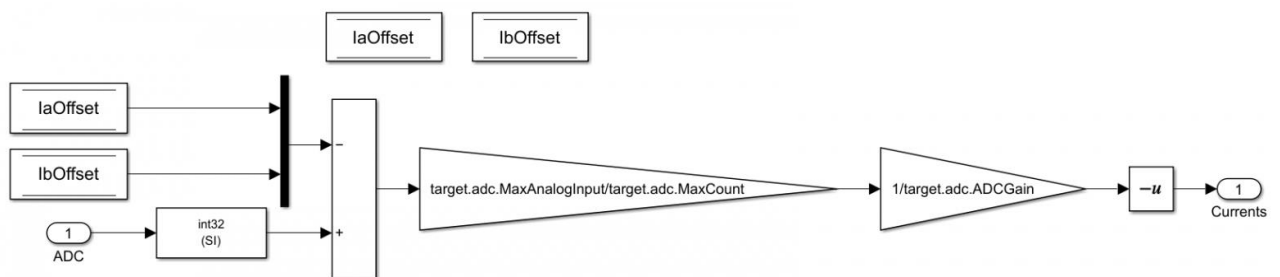


Рисунок 3.6 – Модель підсистеми Phase Currents Computation



У підсистемі Position and Speed Computation на основі сигналів від енкодера обчислюються швидкість та положення ротора двигуна. А також із механічного положення ротора обчислюється електричне (рис. 3.6).

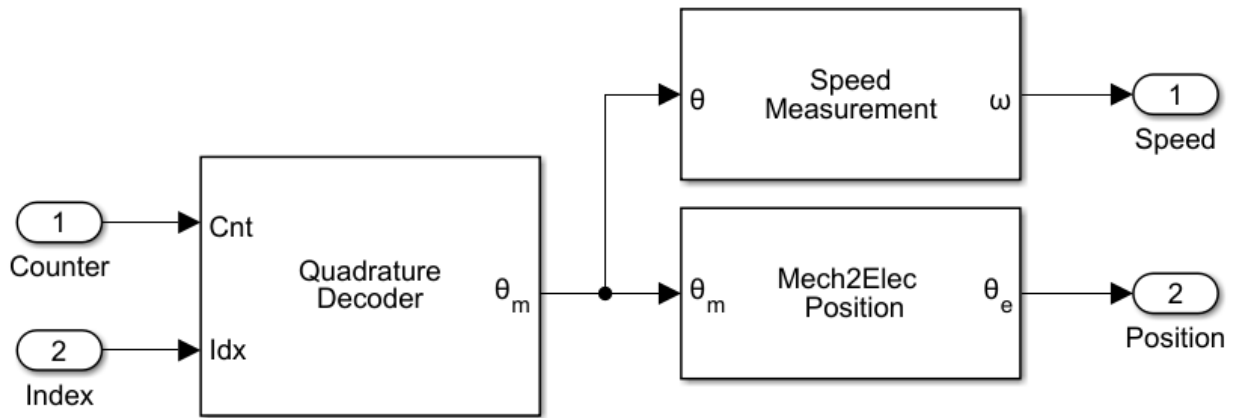


Рисунок 3.6 – Модель підсистеми Position and Speed Computation

У блоці Quadrature Decoder знаходиться алгоритм розрахунку положення ротора на основі лічильника положення, в нього вводяться кількість міток на диску енкодера, кількість імпульсів на мітку та розрядність лічильника положення. Вимірювання швидкості реалізовано як різниця між двома положеннями за певний період.

### 3.6. Моделі підсистем Current Loop та Speed Loop

Всі тригонометричні перетворення, регулятори струмового контуру та генератор ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) розташовані у підсистемі Current Loop. Як у струмовому контурі (контурі d- і q-компонент струму), так і в швидкісному, використовували ПІ-регулятори з функцією позбавлення інтегрального насичення.

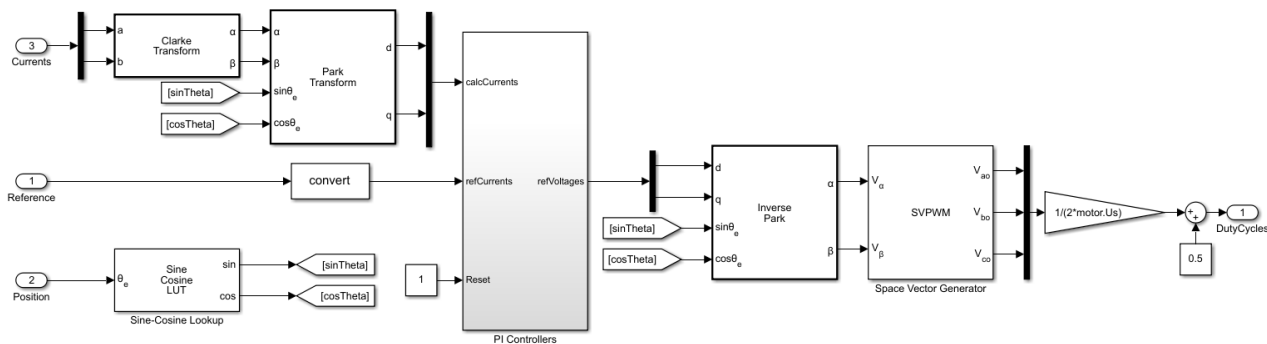


Рисунок 3.7 – Модель підсистеми Current Loop

Слід зазначити, що обчислення синуса та косинуса кута між  $d$ -віссю та вектором потокозчиплення ротора обчислюється таблично, і в блоці Sine-Cosine Lookup можна задати кількість елементів таблиці залежно від необхідної точності. Такий алгоритм обчислення тригонометричних функцій є оптимальним для реалізації на мікроконтролері.

Для генерації ШІМ нами вибрано схему SVPWM, хоча можна було поставити і звичайну схему формування.

Регулятор швидкісного контуру знаходиться у підсистемі Speed Loop (рис. 3.8).

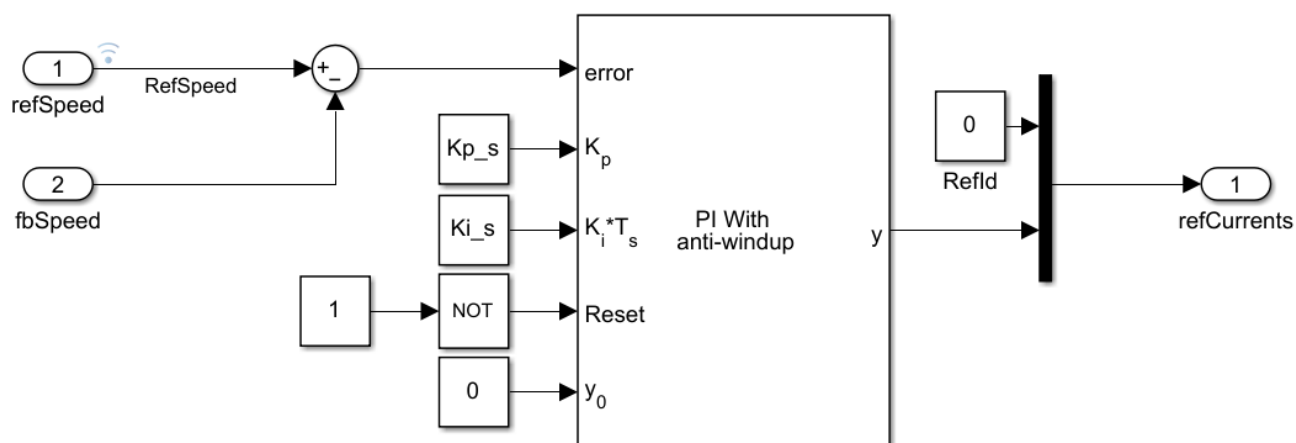


Рисунок 3.8 – Модель підсистеми Speed Loop

Коефіцієнт посилення інтегральної частини у вибраних блоках ПІ-регуляторів з бібліотеки Motor Control Blockset необхідно множити на період дискретизації того контуру, в якому він працює.

### 3.7. Результати комп'ютерного моделювання трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва

Запропонована нами модель враховує частоти дискретизації контурів: контур струму працює 20 кГц, а контур швидкості на 2 кГц. Частина моделі з об'єктом керування та інвертором може розраховуватися з будь-яким кроком інтегрування, головне, що алгоритм завжди працював на вибраних частотах дискретизації.

Щодо електродвигуна, то нами взято параметри з документації, щоб перевірити працездатність розробленої моделі. Зокрема, вибрано електродвигун BLY171D-24V-4000 компанії Anaheim Automation, яким має характеристики, подані на рис. 3.9.

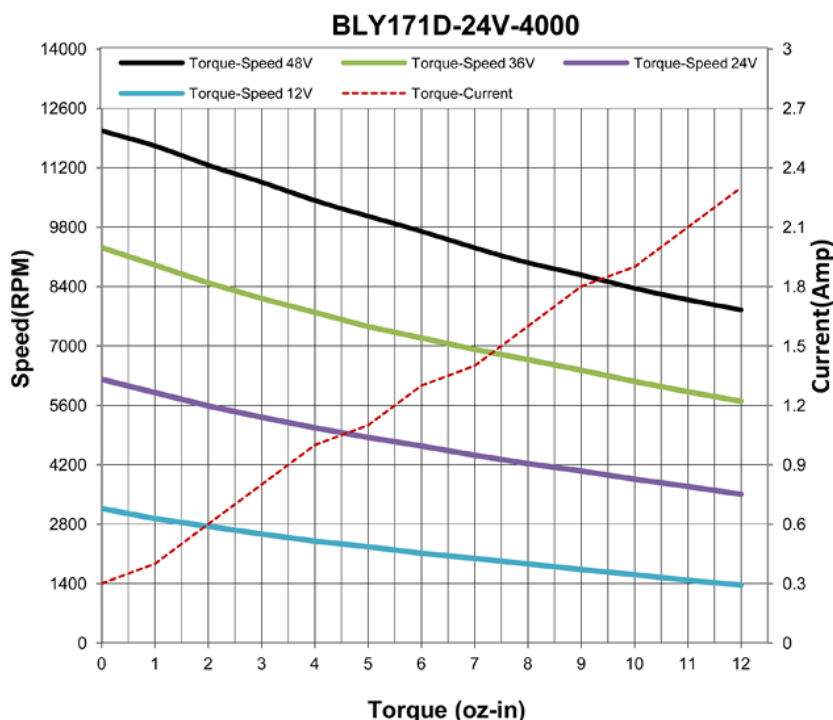


Рисунок 3.9 – Характеристики електродвигуна BLY171D-24V-4000

Після цього виконується налаштування регуляторів. На цьому етапі здійснено ручний підбір. Нами було відключено контур швидкості та подано на вхід контуру струму ступінчастий сигнал. Для  $d$ -компоненти налаштування дорівнює нулю, а для  $q$ -компоненти – 0.1 А. Нами отримано перехідний процес  $q$ -компоненти для контуру струму (рис. 3.10).

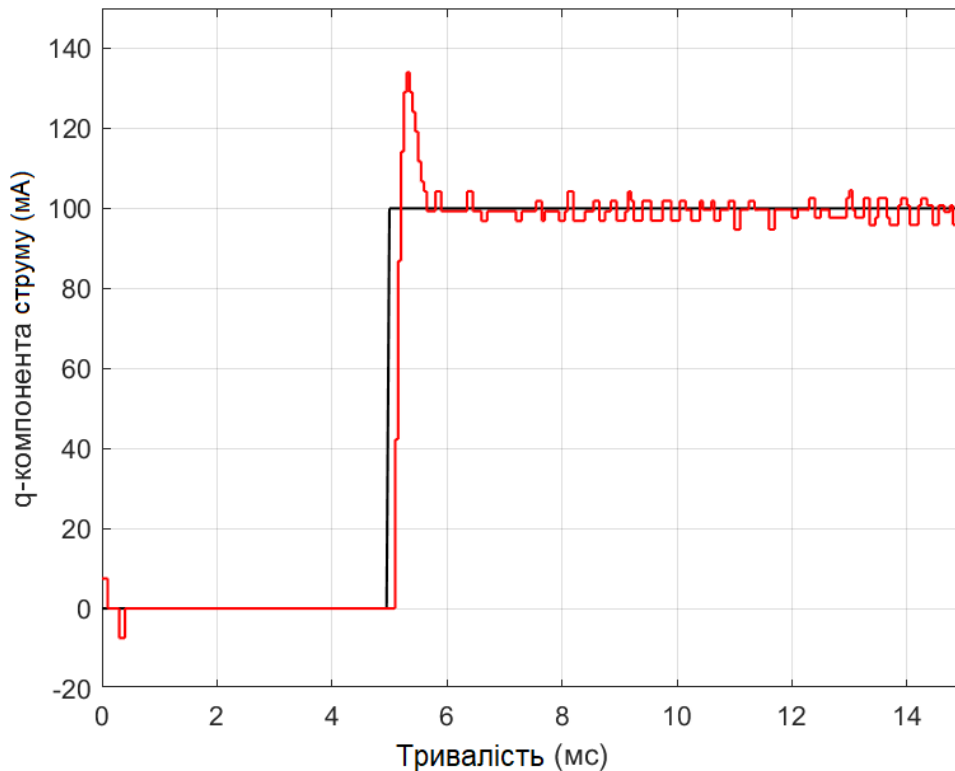


Рисунок 3.10 – Перехідний процес  $q$ -компоненти струму

Далі підбираємо параметри регулятора контуру швидкості, щоб задовольняв потрібний перехідний процес.

На підставі проведеного моделювання нами було встановлено, що створена модель працює із належною точністю відхилення – 5,8%. На наступному етапі можна виконувати комп'ютерне моделювання трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва ввівши до неї реальні параметри електродвигуна.

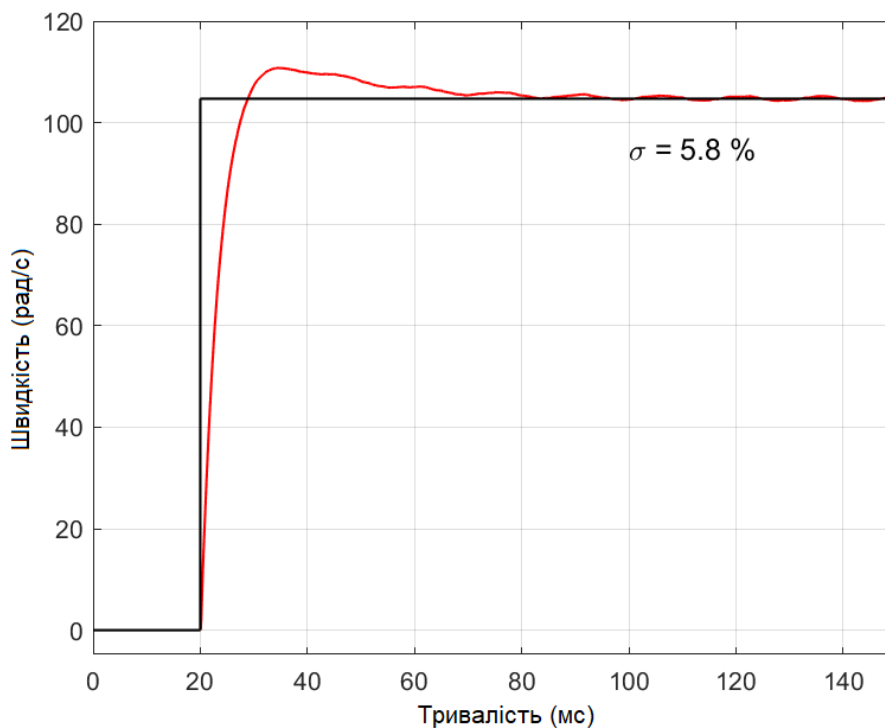


Рисунок 3.11 – Перехідний процес швидкості

Отже, нами створено модель векторного керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва з підсистемами обробки датчиків зворотного зв'язку, що враховує роботу контурів керування на різних частотах дискретизації. Також експериментально підтвердили для заданого електродвигуна та за допомогою можливостей програми MATLAB/Simulink достовірність модельованих значень перехідних процесів q-компонент струму та перехідних процесів швидкості.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Аналіз умов праці

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Мета охорони праці – забезпечення безпечних, нешкідливих і сприятливих умов праці через вирішення багатьох складних завдань. Темою кваліфікаційної роботи є «Комп'ютерне моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму». Для забезпечення безпеки потрібно строго виконувати заданий режим, безперервно слідкувати за роботою апаратури, забороняється залишати її без нагляду.

При обслуговуванні системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва, оператор знаходиться в операторській. Площа операторської 15 м<sup>2</sup>, висота 3 м, тобто  $V=45\text{м}^3$ , в ній працює 1 оператор.

На робочому місці оператора наявні наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- повітря робочої зони;
- виробниче освітлення;
- електробезпека;
- пожежна безпека.

## 4.2. Мікроклімат робочої зони

Для запобігання професійним отруєнням служать технологічні, технічні, санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні заходи та засоби. Радикальним способом захисту є заміна отруйних неотруйними або менш токсичними речовинами, дотримання правил безпеки і виробничої санітарії, введення нових технологій, санітарно-гігієнічна експертиза хімічних речовин, їх гігієнічна стандартизація, комплексна механізація та автоматизація виробничих процесів.

За станом повітря виробничої зони необхідно здійснювати систематичний контроль з метою порівняння його з гігієнічними нормативами. Роботодавець має забезпечувати всіх працюючих ЗІЗ органів дихання, спеціальним одягом, спеціальним взуттям, засобами захисту рук, обличчя, очей.

Для очищення робочого середовища від шкідливих речовин, що можуть у нього потрапляти, а також для подачі свіжого повітря використовується припливно-витяжна вентиляція. Засоби індивідуального захисту є допоміжною мірою захисту працівників від шкідливої дії професійних факторів.

Для захисту дихальних шляхів використовують протигази ИП-4М. Для захисту очей використовуються захисні окуляри.

Працівники отримують захисний одяг – індивідуальний спецодяг – від впливу продуктів, газів, високих та низьких температур:

- бавовняні костюми;
- рукавиці спеціальні, гумові технічні рукавички;
- захисні окуляри;
- захисні каски;
- захисні щитки лицьові.

Індивідуальні фільтруючі протигази зберігаються в спеціальних шафах з комірками. Передача протигаза однією особою іншій забороняється.

До засобів нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць ставляться освітлювальні прилади, світлові прорізи.

Додатково до технологічних заходів системами опалення й вентиляції повітряне середовище в приміщеннях доводиться до вимог санітарних норм і правил техніки безпеки.

Опалення виробничих приміщень – повітряне, сполучене із проточною вентиляцією. Показниками, що характеризують мікроклімат, є: 1) температура повітря; 2) відносна вологість повітря; 3) швидкість руху повітря; 4) інтенсивність теплового випромінювання.

Фактичні метеорологічні умови в операторській для роботи середньої важкості:

➤ Температура повітря, °С – Перехідний та холодний період року – 18-24 °С. Теплий період року – 19-28 °С. Фактичні метеорологічні умови – 21-24 °С. • Відносна вологість повітря, % Холодний період року – 45-65 %. Теплий період року – 40-75 %. Фактичні метеорологічні умови – 35-60 %.

➤ Швидкість руху повітря, м/с – Холодний період року – 0,15 м/с. Теплий період року – 0,25 м/с. Фактичні метеорологічні умови – 0,08м/с.

Всі метеорологічні умови повністю відповідають ДСН 3.3.6.042-99.

### **4.3. Виробниче освітлення**

У денний час в операторській передбачене денне освітлення згідно ДНБ В 25.28-2006. Роботи, виконувані в операторській, пов'язані зі зняттям показань з контрольно-вимірювальної апаратури, відносяться до III розряду зорових робіт. У приміщенні КВП (контроль вимірювальних пристроїв) є вікна розміром 3300x2300 мм. Вони забезпечують значення коефіцієнта природного освітлення 8 - 10 %. Коефіцієнт природного освітлення для даного розряду робіт при верхньому і комбінованому освітленні складає 8 %.

Отже, фактичне значення КПО відповідає нормам. У темний час доби використовують штучне освітлення. Для забезпечення освітленості, відповідної



III розряду зорових робіт при газорозрядних лампах, використаємо лампи ЛДЦ15-4, які мають освітленість  $E_n=250\text{Лк}$ , світловий потік  $F_l=2800\text{ Лм}$ .

Пропонуємо встановити 9 світильників, що забезпечать освітленість приміщення для даного розряду зорових робіт. При цьому  $E_{\text{факт}}=275\text{Лк}$ .  $E_{\text{нор}}=250\text{ Лк}$ . Освітленість приміщення відповідає нормам відповідно до ДНБ В 25.282006.

#### **4.4. Електробезпека**

Відповідно до правил улаштування електроустановок виробничі цех із використання електродвигунів за небезпекою електротравм відноситься до приміщення з підвищеною небезпекою. В приміщенні застосовується трифазна чотирипровідна мережа напругою 380 В з глухозаземленою нейтраллю та частотою 50 Гц. У цьому випадку захисне заземлення не є досить надійним захистом щодо профілактики електротравм. Більш ефективним засобом попередження електротравм при замиканні на корпус у даному випадку вважається занулення – навмисне електричне з'єднання неструмовідних елементів електроустановки, які можуть опинитися під напругою в результаті замикання на корпус, з нульовим проводом.

##### ***Система технічних засобів і заходів з електробезпеки.***

Основні технічні засоби і заходи що застосовуються для забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок в цеху включають:

➤ ізоляція струмовідних частин – забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок;

➤ недоступність струмовідних частин – застосовуються захисні огороження, закриті комутаційні апарати, неізольовані струмовідні частини розміщуються на висоті, недосяжній для ненавмисного доторкання до них

інструментом, різного роду пристосуваннями, обмежується доступ сторонніх осіб в електротехнічні приміщення;

➤ блоківки безпеки – унеможливають доступ до неізольованих струмовідних частин без попереднього зняття з них напруги, попереджують помилкові оперативні та керуючі дії персоналу при експлуатації електроустановок, не допускають порушення рівня електробезпеки та вибухозахисту електрообладнання;

➤ засоби орієнтації в електроустановках – дають можливість персоналу чітко орієнтуватися при монтажі, виконанні ремонтних робіт і запобігають помилковим діям.

### ***Система електрозахисних засобів.***

Основні електрозахисні засоби для роботи з електричним обладнанням в цеху:

- ізолювальні штанги;
- ізолювальні кліщі;
- електровимірювальні кліщі;
- покажчики напруги;
- діелектричні рукавички;
- інструмент з ізолювальним покриттям;
- діелектричне взуття;
- сигналізатори напруги;
- захисні огороження (щити, ширми);
- переносні заземлення;
- в аварійному режимі використовується занулення з автоматичним відключенням згідно ГОСТ 12.1.030-84.

#### 4.5. Пожежна безпека

При обслуговуванні системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва, оператор знаходиться в операторській, в якій, окрім виробничого обладнання, знаходяться робочі місця операторів (стілці та столи), необхідна документація, а також можуть знаходитися особисті речі операторів.

Площа операторської 15 м<sup>2</sup>, висота 3 м, в ній працює 1 оператор. Тому, приміщення відповідає класу В, зона П-ІА. У цеху підвищена пожежна небезпека відсутня, так як в процесі не використовуються легкозаймисті та вибухонебезпечні речовини, але повинна існувати система попередження вибухів і пожеж.

##### *Система попередження вибухів і пожеж.*

Попередження утворення пожежі в цеху забезпечується наступними загальними заходами:

- підтримуються відповідні значення температур та тиску середовища, за яких поширення полум'я виключається;
- максимально механізовані та автоматизовані технологічні процеси; - видаляються пожежонебезпечні відходи виробництва;
- використовуються машини, механізми, устаткування, пристрої, при експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;
- використовуються швидкодійні засоби захисного відключення можливих джерел запалювання;
- використовуються технологічні процеси і устаткування, що задовольняє вимогам статичної іскробезпеки;
- температури нагріву поверхні машин, устаткування, пристроїв, речовин і матеріалів, які можуть увійти в контакт з горючим середовищем, підтримуються нижче гранично допустимої, яка не повинна перевищувати 80% температури самозаймання горючого середовища;

- виключається можливість появи іскрового розряду в горючому середовищі з енергією, яка дорівнює або перевищує мінімальну енергію запалювання;
- використовується інструмент, робочий одяг і взуття, які не викликають іскроутворення при виконанні робіт;
- виконуються вимоги чинних стандартів, норм та правил пожежної безпеки;
- використовується електроустаткування, що відповідає за своїм виконанням пожежонебезпечним та вибухонебезпечним зонам, групам та категоріям вибухонебезпечних сумішей;
- використовуються порошкові засоби пожежогасіння САМ-9;
- для захисту органів дихання використовуються повітряні апарати МПА.

## РОЗДІЛ 5.

### ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЬОХФАЗНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Визначення економічної ефективності від впровадження запропонованої системи керування трьохфазними електродвигунами можна виконати за різними підходами. Нами використана загальна методика, яка може бути застосована для умов будь-якого підприємства агропромислового комплексу, що використовує трьохфазні електродвигуни.

Насамперед виконують визначення витрат на впровадження системи керування трьохфазними електродвигунами. Для слід оцінити вартість придбання та встановлення систем керування трьохфазними електродвигунами. Окрім того, слід врахувати витрати на необхідне програмне забезпечення, апаратне забезпечення та інші додаткові витрати, пов'язані з впровадженням систем.

Після цього виконують визначення очікуваних економічних вигод. Для цього слід оцінити обсяги зниження енергоспоживання, що можливо досягти з використанням системи керування. Це можна зробити шляхом порівняння споживання електроенергії до і після впровадження системи керування трьохфазними електродвигунами. Припустимо, що сільськогосподарське підприємство споживає електроприводами із трьохфазними електродвигунами 460834 кВт·год на рік. Зниження енергоспоживання завдяки впровадженню системи керування трьохфазними електродвигунами становить 27650 кВт·год на рік, що становить 6% від загального річного споживання.

Визначення вартості системи керування трьохфазними електродвигунами проводиться за формулою:

$$C_c = C_k + C_i + C_n, \quad (6.1)$$

де  $C_c$  – вартість системи керування трьохфазними електродвигунами, грн;  $C_k$  – вартість основних компонент, грн;  $C_i$  – вартість додаткових компонент системи керування трьохфазними електродвигунами, грн;  $C_n$  – вартість програмного забезпечення, грн.

Підставивши відповідні значення вартості складових системи керування трьохфазними електродвигунами у формулу (6.1) отримаємо:

$$C_c = 76530 + 18450 + 8580 = 103560 \text{ грн.}$$

Обсяг економії витрат на електроенергію трьохфазними електродвигунами визначаються за формулою:

$$C_c = E_c \cdot C_{el}, \quad (6.2)$$

де  $E_c$  – економія витрат на електроенергію трьохфазними електродвигунами, кВт.год;  $C_{el}$  – вартість електроенергії, грн/кВт.год.

Підставивши відповідні значення отримаємо вартість економії завдяки впровадженню системи керування трьохфазними електродвигунами:

$$C_c = 27650 \cdot 2,64 = 72996 \text{ грн.}$$

Розрахунок коефіцієнта економічної ефективності системи керування трьохфазними електродвигунами проводиться за формулою:

$$E_{ef} = \frac{C_c}{C_c}. \quad (6.3)$$

Підставивши відповідні значення отримаємо значення коефіцієнта економічної ефективності:

$$E_{ef} = \frac{103560}{72996} = 1,42.$$

Розрахунок терміну окупності системи керування трьохфазними електродвигунами проводиться за формулою:

$$T_{ок} = \frac{C_c}{E_c}. \quad (6.4)$$

Підставивши відповідні значення отримаємо термін окупності системи керування трьохфазними електродвигунами:

$$T_{ок} = \frac{72996}{103960} = 0,7 \text{ року.}$$

Отриманий результат показує, що впровадження системи керування трьохфазними електродвигунами у базовому господарстві забезпечить економію коштів у розмірі 72966 грн/рік, а інвестиції в систему керування окупляться приблизно через 0,7 року.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

У сучасному аграрному виробництві трифазні електродвигуни є невід'ємною складовою для забезпечення ефективного руху та функціонування різних пристроїв та механізмів. Керування цими електродвигунами має вирішальне значення для досягнення оптимальних режимів їх роботи та енергоефективності. У нашій роботі пропонується застосувати векторний алгоритм комп'ютерного моделювання систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.

Нами проаналізована доцільність підвищення енергетичної ефективності електроприводів аграрного виробництва. Встановлено, що є потреба використовувати енергозберігаючі електродвигуни у аграрному виробництві – це двигуни, ефективність яких на 1...10% перевищує стандартні електродвигуни.

Виконана класифікація систем керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва. Вона свідчить про те, що слід звернути особливу увагу на векторний алгоритм керування електродвигунами, що дозволяє врахувати взаємодію між фазами та покращити регулювання динаміки та точності.

Також виконано аналіз існуючих систем керування електродвигунами. Зокрема, це стосується системи керування електродвигунами з прямим пуском, керування електродвигунами з використанням розподільчих панелей, керування електродвигунами із використанням векторного алгоритму, керування електродвигунами орієнтоване на поле (FOC). Усі вони мають свої переваги та недоліки. Для подальшого розгляду вибираємо векторне керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва, так як воно має низку переваг порівняно із іншими видами керування.

При цьому виникає доцільність створення комп'ютерної моделі системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва.



Нами запропонована структура системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму. Для моделювання та налагодження алгоритмів векторного керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва можуть бути використані програмно-апаратні симулятори електроприводу, а також інші засоби імітаційного моделювання. У нашій роботі пропонується використовувати середовище імітаційного моделювання MatLab/Simulink.

Виконано синтез контурів регулювання швидкості і струму трьохфазних електродвигунів. Під час синтезу системи керування між каналами регулювання складових  $I_{sd}$  та  $I_{sq}$  існуватиме взаємовплив. Канали будуть створювати збурювальний вплив один на одного, особливо це виявляється в перехідних режимах. Щоб цього уникнути, виконаємо компенсацію перехресних зв'язків та отримаємо компенсуючі складові.

Виконано вибір засобів моделювання системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва. Для цього вибираємо пакет програм Matlab, а точніше Nonlinear Control Design Blockset (NCD Blockset), що дозволяє знайти параметри регулятора, не вдаючись до складної математики.

Для моделювання будемо використовувати лінійну модель трьохфазного електродвигуна аграрного виробництва та представлення перетворювача частоти у вигляді аперіодичної ланки першого порядку. Для визначення параметрів регулятора використовують інструмент NCD Blockset. Для цього необхідно підключити елемент NCD Output (бібліотека NCD Blockset) до виходу контрольованого параметра (кутова швидкість або струм).

Далі у вікні NCD Output необхідно встановити обмеження на перехідний процес контрольованої величини (в даному випадку кутової швидкості). Вікно параметрів NCD Output показано на рис. 2.7. Для проведення оптимізації необхідно вказати початкові умови, тобто пропорційність регулятора та початкові значення інтегральних складових визначаються у вікні команд.

Також пропонується використовувати бібліотеку Simscape Electrical (раніше SimPowerSystems або SimElectronics). Ця бібліотека вміщує

компоненти для моделювання та імітації електронних, мехатронних та електричних систем живлення.

Нами пропонується створювати модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва на підставі використання векторного алгоритму. Термін «векторне управління» електродвигунами достатньо розповсюджений. При цьому за допомогою мікроконтролера можна керувати двигуном змінного струму. Нами запропонована структура системи векторного керування електродвигуном.

Створено нову модель із використанням бібліотек Motor Control Blockset та Simscape Electrical, яка представлена на рис. 3.3. Модель системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва складається із шести блоків, кожен із яких розглядали як окремі підсистеми.

Також нами розроблено модель підсистеми PMSM with Encoder. У пропонованій моделі енкодер представлено простим коефіцієнтом підсилення (кількістю міток на диску – кількість сформованих імпульсів на мітку) (рис. 3.5).

Запропоновано модель підсистеми Inverter with Current Sensors. У підсистемі Inverter with Current Sensors знаходяться блок Average-Value Inverter, на виході якого виходить усереднене значення вихідної напруги трифазного інвертора (рис. 3.6).

Розроблено моделі підсистем Phase Currents Computation та Position and Speed Computation. У підсистемі Phase Currents Computation виконуються зворотні перетворення: рівні АЦП перетворюються на фізичні сигнали струму. У підсистемі Position and Speed Computation на основі сигналів від енкодера обчислюються швидкість та положення ротора двигуна.

Розроблено моделі підсистем Current Loop та Speed Loop. Всі тригонометричні перетворення, регулятори струмового контуру та генератор ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) розташовані у підсистемі Current Loop. Регулятор швидкісного контуру знаходиться у підсистемі Speed Loop.

Для перевірки розробленої моделі вибрано електродвигун BLY171D-24V-4000 компанії Anaheim Automation, яким має характеристики, подані на рис. 3.9. На підставі проведеного моделювання нами було встановлено, що створена модель працює із належною точністю відхилення – 5,8%. На наступному етапі можна виконувати комп'ютерне моделювання трьохфазних електродвигунів аграрного виробництва ввівши до неї реальні параметри електродвигуна.

Для виконавців, які використовують системи керування трьохфазними електродвигунами аграрного виробництва, розроблено заходи безпеки, дотримання яких забезпечить безпечні умови праці.

Впровадження системи керування трьохфазними електродвигунами у базовому господарстві забезпечить економію коштів у розмірі 72966 грн/рік, а інвестиції в систему керування окупляться приблизно через 0,7 року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко Ю. Математичне моделювання електроприводів. Київ: Видавництво "Ліра-К", 2014. 245с.
2. Бондаренко М. П. Основи автоматичного управління: Навчальний посібник. К.: Видавничий центр «Академія», 2006. 320 с.
3. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с..
4. Герасимов В. Моделювання та аналіз систем керування електродвигунами. Київ: Видавництво "Київський університет", 2013. 238с.
5. Гоблик Н. М., Гоблик В. В. MATLAB в інженерних розрахунках. Комп'ютерний практикум [Текст] : навчальний посібник. НУ "Львівська політехніка", 2020. 190 с.
6. Гринь О.М., Іванов В.І., Кохан Б.А. Системи автоматичного управління: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 422 с.
7. Джерело І. І. Автоматизація технологічних процесів та виробництва: підручник. Х.: Видавництво «Фактор», 2011. 272 с.
8. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навчальний посібник. К.: Кондор, 2005. 408 с.
9. Курган Б.І., Калиниченко В.П. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва: Навчальний посібник. К.: Видавництво «Українські технології», 2010. 320 с.
10. Лагунова І.А., Кузьмін О.В., Цибульський Р.Б. Теорія автоматичного регулювання: підручник. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2013. 478 с.
11. Лемішка, О. М. Організація охорони праці в умовах автоматизації виробничих процесів : навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Слово», 2018. 256 с.

12. Лут М.Т., Синявський О.Ю. Зниження втрат енергії в асинхронних електроприводах. Енергетика і автоматика, №3, 2013. С. 144-149.
13. Марченко В. Електропривід сільськогосподарських машин. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2017. 421с.
14. Методичні вказівки з охорони праці при використанні автоматизованих систем управління : посібник. Відп. за вип. М. М. Ковальов, А. М. Савченко. Харк. політехн. ін-т, Каф. АСУ. Харків : ХПІ, 2010. 52 с.
15. Методичні рекомендації з охорони праці при автоматизації технологічних процесів: навчальний посібник. Укр. держ. ун-т харчових технологій ; уклад. О. Ю. Гончар, В. О. Лабунець, О. І. Лембіна та ін. Київ : Українська державна академія харчових технологій, 2016. 104 с.
16. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / О. С. Марченко, О. В. Дацишин, Ю. М. Лавріненко та ін.; За ред. О. С. Марченка. К.: Урожай, 1995. 416 с.
17. Нормативно-правові акти з охорони праці при автоматизації та впровадження інформаційних технологій [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0266-10>
18. Острроверхов М. Я., Пижов В. М. Моделювання електромеханічних систем в Simulink: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів. Київ: ВД «Стилос», 2008. 528 с.
19. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. К. : НАУ, 2017. 392с.
20. Самойленко А. Електропривід. Моделювання, аналіз, синтез. Київ: Видавництво "Техніка", 2011. 145с.
21. Сарага М.М., Душка Р.В., Васьків А.Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами в АПК: Підручник. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2014. 542 с.
22. Синюк Г.М. Основи автоматизації технологічних процесів: Підручник. К.: Видавничий центр «Академія», 2008. 354 с.

23. Сліпченко, М. В. Охорона праці та безпека життєдіяльності при автоматизації виробничих процесів : навчальний посібник. Київ : Центр навчальної літератури, 2017. 336 с.
24. Степанов В. Моделювання систем керування електродвигунами на основі алгоритму сільського господарства. Київ: Видавництво "Наукова думка", 2012. 236с.
25. Трофимов В. Є., Підлісний О. М. Охорона праці при автоматизації технологічних процесів : навчальний посібник. Житомир : ЖДТУ, 2014. 312 с.
26. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем: Підручник. Кременчук, 2001. 410 с.
27. Чумак І. Системи автоматизованого електроприводу: підручник. Київ: Видавництво "Ліра-К", 2015. 325с.
28. Boldea I., Nasar S. Vector control of AC drives. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. 145p.
29. Chakraborty K., Mukherjee V., Bhattacharya S. Modeling, simulation and control of electric drives. Гобокен, Нью-Джерсі: John Wiley & Sons, 2018. 336p.
30. Gayev Ye.A., Azarskov V.M. Educational "Own Discoveries" Method by an easy MATLAB-Programming for Engineers. [http://meeting2018.enginsoft.it/posteraward/PosterAward\\_2018\\_finalists%2038.pdf](http://meeting2018.enginsoft.it/posteraward/PosterAward_2018_finalists%2038.pdf)
31. Krishnan R. Electric Motors: Modeling, Analysis and Control. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001. 147p.
32. Marian P. Kazmerkowski, Leopoldo G. Frankelo, Jose Rodriguez, Marcelo A. Perez, Jose I. Leon. High Performance Motor Drives: IEEE Industrial Electronics, Vol. 5, No. 3, P. 6-26.
33. MATLAB & Simulink User's Guide. The MathWorks, Inc. 1995-2015. 390 pp.
34. Motor Control Blockset. Design and implement motor control algorithms. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/products/motor-control.html>