

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

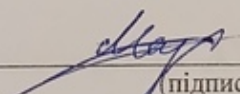
**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття освітнього ступеня магістр

на тему: Розробка лабораторного стенду для дослідження роботи шагового двигуна

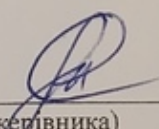
за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»

зі спеціальності: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Виконав: студент групи АТ2323 (968-М)

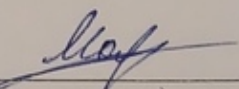
  
\_\_\_\_\_ / Олександр МАРАРЕНКО /  
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ

  
\_\_\_\_\_ / Тетяна СЕРДЮК /  
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень  
з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент

  
\_\_\_\_\_ (підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technology**

**Faculty of Computer Technologies and Systems**

**Department of Automation and Telecommunication**

## **Explanatory Note**

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Development of a laboratory stand for studying the operation of a stepper motor

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 0714 Electronics and automation (Automation, computer-integrated technologies and robotics)

Done by the student of the group: AT2323 (968-M) / Oleksandr MARARENKO/

Scientific Supervisor: Associate Professor / Tetiana SERDIUK /

**Dnipro – 2025**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем  
Кафедра: Автоматика та телекомунікації  
Рівень вищої освіти: Магістр  
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті  
Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

\_\_\_\_\_ Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу \_\_\_\_\_ магістра \_\_\_\_\_  
(ступінь вищої освіти)

студенту Мараренко, Олександр Дмитрович  
(Прізвище, Ім'я По батькові)

**1. Тема роботи:** \_\_\_\_\_ Розробка лабораторного стенду для дослідження роботи шагового двигуна \_\_\_\_\_

Керівник роботи: \_\_\_\_\_ Сердюк Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_  
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від \_\_\_\_\_ "18" 01 2024 р. № 62 ст

**2. Строк подання студентом роботи:** 15.01.2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** \_\_\_\_\_ гібридний шаговий двигун, що використовує \_\_\_\_\_  
Arduino Uno, драйвер двигуна L293D, рідкокристалічний дисплей (LCD)

**4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):**

4.1 Аналіз існуючих типів шагових двигунів і сфера їх застосування

4.2 Моделювання шагового двигуна

4.3. Лабораторний стенд для дослідження роботи шагового двигуна

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):** 1) Актуальність, мета, постановка задачі; 2) Класифікація шагових двигунів; 3) Алгоритм функціонування лабораторного стенду;

4) Лабораторного стенду для дослідження шагового двигуна

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Аналітична частина			
Основна частина			

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ (Актуальність. Мета роботи. Методи дослідження. Практична значення отриманих результатів)	16.09.2024	10%
2	Розділ 1. Аналіз існуючих типів шагових двигунів і сфера їх застосування	01.10.2024	20%
3	Розділ 2. Моделювання шагового двигуна	05.11.2024	25%
4	Розділ 3. Лабораторний стенд для дослідження роботи шагового двигуна	16.12.2024	25%
5	Висновки	15.01.2025	20%
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2025	100%

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр МАРАРЕНКО

\_\_\_\_\_

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Тетяна СЕРДЮК

\_\_\_\_\_

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:**

49 сторінок, 13 рисунків, 0 таблиць, 14 джерел літератури.

**Об'єкт розробки** – лабораторний стенд для дослідження гібридного шагового двигуна.

**Мета роботи** – моделювання шагового двигуна з метою розробки лабораторного стенду для дослідження його роботи.

**Методи дослідження** – закони електротехніки і електродинаміки, теорія електричних кіл і ліній.

У першому розділі проаналізовано існуючі типи шагових двигунів і сфера їх застосування.

У другому розділі здійснено моделювання роботи шагового гібридного двигуна з метою дослідження перехідних процесів за допомогою Matlab, Simulink.

В третьому розділі розроблено лабораторний стенд для дослідження роботи гібридного шагового двигуна.

Висновок. У результаті науково-дослідної роботи виконано моделювання роботи шагового двигуна і розроблено лабораторний стенд.

**Ключові слова:** ГІБРИДНИЙ ШАГОВИЙ ДВИГУН; МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ; ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>7</b>
<b>1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ШАГОВИХ ДВИГУНІВ І СФЕРА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Принцип дії та класифікація шагових двигунів .....	9
1.2 Основні характеристики та параметри шагових двигунів.....	20
1.3 Сфери застосування шагових двигунів.....	24
1.4 Огляд існуючих методів дослідження роботи шагових двигунів .....	25
1.5. Висновки за розділом.....	27
<b>2 МОДЕЛЮВАННЯ ШАГОВОГО ДВИГУНА .....</b>	<b>29</b>
2.1 Математична модель шагового двигуна .....	29
2.2. Результати моделювання.....	34
2.3. Висновки за розділом.....	41
<b>3 МОДЕЛЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ШАГОВИХ ДВИГУНІВ.....</b>	<b>42</b>
3.1 Вимоги до лабораторного стенду для дослідження шагових двигунів.	42
3.2. Схема керування шаговим двигуном на базі Arduino .....	43
3.3. Висновки за розділом.....	46
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>65</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>67</b>

## ВСТУП

**Актуальність.** Актуальність дослідження роботи і моделювання гібридного шагового двигуна (ШД) обумовлена сучасними тенденціями розвитку техніки та промисловості. Гібридні крокові двигуни знаходять застосування в різних галузях: робототехніка, точні системи керування, 3D-принтери, медичне обладнання, автоматизація виробничих процесів тощо. Основними аргументами, які підтверджують важливість цієї теми, є такі: потреба в точності й стабільності роботи; забезпечення енергозбереження; оптимізація конструкції та управління його роботою; дослідження умов адаптація до експлуатації в нових автоматизованих системах.

Гібридні крокові двигуни поєднують переваги постійного магнітного та змінного двигунів, забезпечуючи високу точність позиціонування, стабільну роботу на низьких швидкостях та низький рівень шуму. Їхня оптимізація через моделювання дозволяє знизити помилки кроку та забезпечити високу повторюваність. У зв'язку зі зростаючими вимогами до енергоефективності пристроїв, дослідження моделювання гібридних ШД дозволяє створювати моделі, які мінімізують втрати енергії під час роботи. Комп'ютерне моделювання дозволяє протестувати різні конструктивні рішення без створення фізичних прототипів, зменшуючи витрати часу та ресурсів. Розробка сучасних алгоритмів керування, таких як PWM чи модифіковані драйвери, підвищує ефективність роботи двигунів.

Інтеграція гібридних ШД в нові галузі потребує адаптації їхніх параметрів до специфічних умов експлуатації. Отже, моделювання і розроблений лабораторний стенд дозволяють оцінити вплив змінних факторів, таких як температура, навантаження та швидкість обертання. В умовах цифровізації виробництва моделювання гібридних ШД стає невід'ємною частиною систем автоматизації та прогнозування, підвищуючи їхню інтеграцію в сучасні "розумні" технології.

Таким чином, дослідження та моделювання роботи гібридного крокового двигуна має велике значення для розвитку високотехнологічних галузей та відповідає актуальним викликам сучасної науки і техніки, а тема дипломної роботи: «Розробка лабораторного стенду для дослідження роботи шагового двигуна» є актуальною і своєчасною..

**Мета роботи** – моделювання шагового двигуна з метою розробки лабораторного стенду для дослідження його роботи.

**Завдання:** проаналізувати існуючі типи шагових двигунів і вибрати об'єкт для моделювання і розробки лабораторного стенду; розробити математичну модель в Matlab, Simulink для дослідження перехідних процесів; розробити лабораторний стенд.

**Практична значимість** – описані методи дослідження застосовуються для дослідження роботи гібридного шагового двигуна.

Результати науково-дослідної роботи використовуються при викладанні в дисциплінах «Електричні кола і лінії залізничної автоматики і зв'язку», «Електроживлення систем автоматики», «Станційні системи автоматики».

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ШАГОВИХ ДВИГУНІВ І СФЕРА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

## 1.1 Принцип дії та класифікація шагових двигунів

Шагові двигуни (stepper motors) - це електромеханічні пристрої, завдання яких перетворювати електричні імпульси в рух вала двигуна на певний кут. На відміну від традиційних двигунів, шагові двигуни мають унікальні відмінності, які роблять їх винятковими при використанні в певних цілях. Шаговий двигун є безщітковим двигуном постійного струму. Як і інші безщіткові двигуни, шаговий двигун надзвичайно надійний і має тривалий термін служби за умови правильної експлуатації. Якщо порівнювати шагові двигуни з традиційними двигунами постійного струму, шаговий двигун потребує більш складних схем керування, які забезпечують правильне перемикання обмоток під час роботи двигуна. Головною перевагою шагового двигуна є можливість виконувати точне позиціонування та регулювання швидкості без використання датчиків у контурі зворотного зв'язку. Це твердження стосується лише додатків із постійним навантаженням і малими прискореннями.

При використанні шагових двигунів у системах зі змінним навантаженням і високими прискореннями зворотній зв'язок є важливою. Це пояснюється тим, що коли крутний момент навантаження, прикладений до шагового двигуна, дорівнює або перевищує максимальний крутний момент шагового двигуна при певній частоті обертання, шаговий двигун виходить із синхронізації, і інформація про положення ротора втрачається. У випадках, коли шаговий двигун розсинхронізується і втрачається інформація про положення ротора, необхідно ввести в систему зворотний зв'язок за допомогою певних типів датчиків. Конструкція певних систем вимагає вибору типу приводу. Шаговий привід зазвичай вибирають, коли потрібне точне позиціонування та контроль швидкості.

Для збільшення крутного моменту при використанні шагової передачі можливе використання редукторів. Однак слід зазначити, що редуктор не завжди підходить для шагових двигунів. На відміну від колекторних двигунів, шагові двигуни мають найбільший крутний момент на малих швидкостях і поступово зменшуються зі збільшенням частоти обертання ротора. Крім того, шагові двигуни зі стандартними схемами підключення досягають значно менших обертів вихідного вала, що також тягне за собою обмеження передавального числа.

Слід зазначити, що промисловість випускає вже готові шагові двигуни з вбудованими редукторами, які називають мотор-редукторами. Однак вони не є широко доступними і виробляються лише в обмежених кількостях. Ще одним важливим фактором, що обмежує використання редукторів разом з шаговим двигуном, є люфт в шестернях. Незважаючи на всі перераховані вище недоліки, шагові двигуни мають свою незамінну сферу застосування.

Конструктивно шагові двигуни складаються з статора на якому розташовані обмотки збудження і ротор виготовлений з немагнітного (феромагнітного) матеріалу або магнітотвердого (магнітного) матеріалу. Шагові двигуни з магнітними роторами забезпечують більш високий крутний момент і забезпечують фіксацію ротора, коли обмотки знеструмлені.

Гібридні двигуни поєднують у собі найкращі характеристики двигунів зі змінною реактивністю та двигунів з постійними магнітами.

Статор гібридного двигуна також зубчастий, що забезпечує велику кількість еквівалентних полюсів, на відміну від основних полюсів, де розташовані обмотки. Зазвичай 4 основні полюси використовуються для двигунів 3,6 градусів, а 8 основних полюсів використовуються для двигунів від 1,8 до 0,9 градусів. Зубці ротора забезпечують менший опір магнітного кола в певних положеннях ротора, покращуючи статичний і динамічний крутний момент. Це

забезпечується відповідним розташуванням зубів, коли частина зубців ротора знаходиться навпроти зубців статора, а частина — між ними.

Ротор гібридного двигуна має зуби, розташовані в осьовому напрямку. Ротор розділений на дві частини, між якими знаходиться циліндричний постійний магніт. Таким чином, зубці на верхній половині ротора є північними полюсами, а зубці на нижній половині є південними полюсами. Крім того, верхня і нижня половини ротора повернуті відносно один одного на половину кута нахилу зубів. Кількість пар полюсів ротора відповідає числу зубів на одній з його половин. Як і статор, наконечники полюсів зубців ротора виготовлені з окремих пластин для зменшення втрат на вихрові струми.

Розрізняють наступні основні види шагових двигунів:

- шагові двигуни з постійними магнітами;
- шагові двигуни зі змінним магнітним опором;
- гібридні шагові двигуни.

Шагові приводи зі змінним магнітним опором.

Як випливає з назви, він не має власного джерела постійного поля; Крім того, його ротор виготовлений з магнітного матеріалу і має зубчасту форму. Через найближчі до статора контактні ділянки створюється ланцюг - з тяжінням до полюсів, що забезпечує дискретні переміщення. За своєю конструкцією він схожий на коробку передач, в якій обертальна сила створюється зустрічними парами і змінним струмом.

Вирішальною перевагою є те, що немає утримуючого моменту, оскільки поле, яке інакше могло б діяти на якір, просто відсутнє. Ви отримуєте синхронний блок, в якому ротор і статор обертаються одночасно і в спільному режимі.

З тими ж розмірами, що й інші варіанти, ці моделі розвивають менший крутний момент. Рух відбувається під кутом 5-15 градусів, і це відносно грубо і часто неточно. І цим пояснюється використання даного типу двигуна в

спеціалізованих станках, тобто для певних машин, де виробник виготовляє всі деталі самостійно.

З постійними магнітами

Тут також відразу помітно, що його особливістю є наявність власного джерела постійного поля, яке утворює основу рухомого елемента і містить два або більше полюсів. Останні забезпечують обертання ротора шляхом подачі напруги на обмотки та притягання/відштовхування.

Рух може бути як повністю перпендикулярним попередньому положенню, так і наполовину. Збільшуючи кількість пар магнітів, можна регулювати довжину і, відповідно, кількість окремих рухів, збільшуючи їх загальну кількість до 48 на повний оберт. Це дозволяє дуже точно монтувати інструмент у потрібному місці та є конкурентною перевагою агрегату.

Гібридні шагові двигуни.

Конструкція цього типу шагового двигуна була розроблена для поєднання переваг двох попередніх. Це циліндричне поздовжньо намагнічене джерело поля, тобто пара полюсів зі спеціальними поверхнями - з прикріпленими зубцями. Останні забезпечують відмінне зчеплення без зниження крутного моменту.

Переваги використання гібридних шагових двигунів для практики:

- мінімальний розмір шагу - 0,9-50 - дозволяє точно позиціонувати за допомогою великої кількості дискретних рухів (до 400 за один цикл);
- висока швидкість і плавність роботи.

Так, вони дорожчі за попередні два типи, тому що їх складніше виготовити, але це відносний недолік. Завдяки своїм перевагам гібридний шаговий двигун є найбільш розповсюдженим двигуном, який використовується в ЧПУ-станках, приладах сучасної робототехніки, на медичному та офісному обладнанні.

У шагових двигунах крутний момент створюється магнітними потоками статора і ротора, причому статор і ротор мають певну орієнтацію один щодо

одного. Статор виготовлений з матеріалів з високою магнітною проникністю і має певну кількість полюсів. Полюс — ділянка намагніченого тіла, в якій зосереджено магнітне поле. І статор, і ротор шагового двигуна мають полюси. Магнітопроводи зібрані з кількох окремих пластин, щоб зменшити втрати на вихрові струми. Крутний момент шагового двигуна залежить від напруженості магнітного поля, яке пропорційно числу витків і силі струму в обмотці. Намотуючи принаймні одну з обмоток шагового двигуна, ротор двигуна отримує певне положення, в якому він залишається, доки зовнішній крутний момент, прикладений до двигуна, не перевищить утримуючий момент цього шагового двигуна.

Сучасні шагові двигуни по суті є синхронними двигунами без пускової обмотки на роторі, тому це не асинхронний, а частотний пуск шагового двигуна. Ротори можуть бути збуджені (активні) і незбуджені (пасивні) Принцип дії найпростішого однофазного шагового двигуна розглянемо за допомогою його структури, яка дана на рис.1.1.

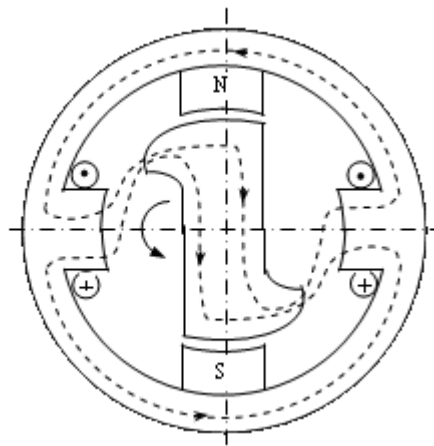


Рисунок 1.1– Найпростіший однофазний шаговий двигун

Чотириполюсний статор містить двополюсний ротор з магнітом з м'якої сталі з дзьобоподібними виступами (рис. 1.1). Одна пара полюсів складається з постійних магнітів, інша має керуючу обмотку. Поки в керуючих обмотках не тече струм, ротор орієнтований уздовж постійних магнітів і утримується біля

них з певною силою, яка визначається магнітним потоком полюсів Фпм. Коли на обмотку керування подається постійна напруга, магнітний потік  $\Phi_u$  приблизно вдвічі перевищує потік постійних магнітів. Під дією створюваної цим потоком електромагнітної сили ротор обертається, долаючи момент навантаження і момент, створюваний постійними магнітами, намагаючись зайняти співвісне положення з полюсами обмотки керування. Обертання відбувається в напрямку дзьобоподібних виступів, оскільки магнітний опір між статором і ротором у цьому напрямку менший, ніж у протилежному. Наступний керуючий імпульс вимикає напругу з обмотки керування і під дією потоку постійного магніту ротор повертається у бік дзьобоподібних виступів. Перевага однофазних шагових двигунів з постійними магнітами полягає в простоті конструкції і управління. Для фіксації ротора при знеструмленої обмотці управління не потрібно енерговитрат. Кут повороту зберігає своє значення навіть у разі припинення живлення. Його двигуни виробляють імпульси з частотою до 200-300 Гц. Їх недоліки - низький ККД і неможливість реверсу.

Реверсивні шагові двигуни працюють за наступним принципом. Для реверсування зуби статора і ротора шагового двигуна повинні бути симетричними (без дзьобоподібних виступів). Розглянемо роботу двофазного двополюсного шагового двигуна з активним ротором як постійним магнітом. Вважаємо, що намагнічуючі фазові сили (НС) розподілені за законом синусоїди. При включенні фази під постійну напругу (умовно позитивна полярність) вектор  $CP$  статора збігається з віссю фази А. Внаслідок взаємодії  $CP$  статора з полем постійного магніту ротора виникає синхронний момент

$$M_c = M_{\max} \sin q, \quad (1.1)$$

де  $q$  – кут між віссю ротора і вектором  $CP$ .

Без гальмівного моменту ротор приймає положення, в якому його вісь збігається з віссю фази А (рис. 2, перший такт). Якщо тепер ми вимкнемо фазу А і знову увімкнемо фазу, вектор NS і ротор повернуться до 90°. Якщо фаза А підключена до напруги зі зворотною полярністю, NS і ротор повертаються ще на 90° і т. д. Якщо момент навантаження подається на ротор ШД, ротор відстає від вектора NS на один при зміні фази на певний кут

$$\varphi_n = \arcsin(M_n / M_{\max}). \quad (1.2)$$

Залежно від типу електронного вимикача керування шаговим двигуном може бути: однополярним або багатополярним; симетричні або асиметричні; потенційним або імпульсним. При однополярному керуванні напруга в кожній фазі змінюється від 0 до +U, при багатополярному від -U до +U. Регулювання називається симетричним, якщо в кожному циклі перемикання використовується однакова кількість обмоток, і асиметричним, якщо воно різне. При управлінні потенціалом напруга на обмотках змінюється тільки при надходженні керуючих імпульсів. При відсутності керуючого сигналу активується обмотка або група обмоток і за полем обмоток визначається положення ротора. При імпульсному управлінні напруга подається на обмотки лише протягом кроку, після чого вона знімається, і ротор утримується в певному положенні або реактивним крутним моментом, або зовнішнім блокуючим пристроєм. Магнітоелектричні шагові двигуни можуть виготовлятися з кроком до 15°. Подальше скорочення ступенів обмежується технологічними труднощами виготовлення ротора у вигляді постійного магніту з числом пар полюсів більше шести.

Схему редукторного шагового двигуна показано на рис.1.2. Набагато менший крок (аж до часток градуса) можна досягти за допомогою редукторних (індукторних) шагових двигунів. Індукторні шагові двигуни виготовляються з

числом фаз  $m = 2-4$ . Вони мають зубчастий ротор з рівномірно розподіленими зубцями  $z_p$  і гребінчасті зони статора, зсунуті одна відносно одної на кут  $2p/(mz_p)$  (див. рис. 1.2).

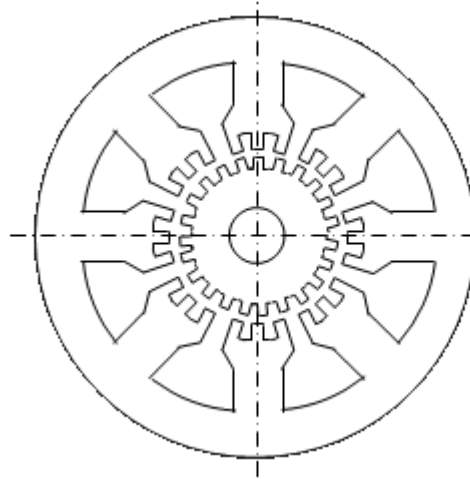


Рисунок 1.2 – Редукторний шаговий двигун

Кількість прорізів статора і ротора і їх геометричні розміри підбираються так, щоб забезпечити необхідну величину кроку і момент синхронізації для конкретного типу комутації струму. Основною особливістю асинхронних двигунів є те, що магнітне поле в зазорі містить постійну і змінну складові. Постійна складова поля збуджується або постійною складовою струму обмоток управління - в двигунах з самозбудженням, або спеціальною обмоткою збудження - в двигунах з незалежним збудженням, або постійними магнітами - в магнітоелектричних двигунах. Змінна частина магнітного поля створюється імпульсами струму обмоток керування, що надходять від електронного комутатора.

Щодо класифікації шагових двигунів за різними критеріями, то її можна розділити за наступними ознаками:

За кількістю фаз для збудження двигуна поділяють на однофазні, тобто такі, які використовують одну обмотку статора, двофазні, тобто такі де кожна з обмоток збуджує магнітне поле, яке забезпечує поступовий рух ротора, двигуни

з такою кількістю фаз є найбільш поширеними. Та трифазні або багатofазні, які забезпечують плавніший рух та більшу потужність, проте вимагає складнішу систему керування, як наслідок двигуни с таким типом збудження використовуються у високоточних системах.

За способом керування поділяють на повнокрокове керування, тобто ситуація коли на кожному етапі активується одна або кілька фаз обмотки, що забезпечує рух на повний крок, є найпростішим методом. При напівкроковим керуванні чергується активація однієї та двох фаз, що зменшує крок і забезпечує більш плавний рух. Мікрокрокове керування використовують найскладніші схеми керування, яке дозволяє ділити повний крок на багато дрібних частин.

В залежності від конструкції статора виокремлюють двигуни з класичним зубчастим статором, які забезпечують кращу фіксацію ротора в певному положенні, та беззубчасті, що використовуються в пристроях із великою швидкістю обертання та із низькою вібрацією.

За типом збудження поділяють на двигуни постійного та змінного струму.

Основними перевагами шагових двигунів є висока точність позиціонування, простота управління та надійність. До недоліків можна віднести обмежену швидкість обертання і можливість виникнення резонансних явищ на певних частотах.

Режими роботи шагових двигунів.

Тип руху ротора шагового двигуна визначається частотою і типом зміни керуючих імпульсів. Залежно від цього розрізняють такі режими роботи шагових двигунів: - статичний; квазістатичний; що було встановлено; перехідний. Статичний режим — режим, при якому через обмотки статора протікає постійний струм, створюючи в просторі стаціонарне магнітне поле, а ротор не обертається. Під дією навантаження ротор відхиляється від положення  $M = 0$  лише на кут  $\varphi$ . Основною особливістю цього режиму є залежність

статичного синхронного моменту від кута перекоосу  $M = f(q)$ . Квазістатичний режим — це режим відпрацювання окремих кроків, при якому повністю скасовуються перехідні процеси з попереднього циклу перемикання і частота обертання ротора дорівнює нулю на початку наступного кроку. Використовується в механізмах старт-стоп, натяг ременя та інших механізмах, де ротор необхідно фіксувати після кожного кроку. Гранична частота імпульсів керування при збереженні квазістатичного режиму визначається часом електромагнітних і зокрема електромеханічних перехідних процесів, тобто часом коливань ротора.

Для зменшення або повного усунення коливань ротора в кінці кроку використовуються різні прийоми. При екстремому гальмуванні після того, як керуючий імпульс передається від першої обмотки або групи обмоток до другої, через певний проміжок часу, протягом якого ротор виконує частину кроку і накопичує певну кількість кінетичної енергії, керуючий імпульс знову передається на першу обмотку. На ротор починає діяти гальмівний момент. При правильному виборі часу і сили гальмівного моменту ротор зупиняється в кінці кроку, після чого керуючий імпульс передається на другу обмотку і ротор фіксується в заданому положенні в майже безвібраційному положенні. після завершення кроку. При природному гальмуванні шагове відновлення відбувається в два етапи: на першому етапі ротор рухається завдяки позитивному збільшенню крутного моменту, який виникає, коли СР статора зміщується на частину повного кроку; на другому етапі - за допомогою кінетичної енергії, накопиченої ротором у негативному (гальмівному) моменті. Коли ротор досягає заданого положення, СР переміщується на частину сходинок, що залишилася, і фіксує ротор у цьому положенні. Природне гальмування можливе лише з шаговими двигунами, які мають повний крок і можуть бути розділені на кілька елементарних кроків.

Збільшити граничну частоту квазістатичного режиму можна шляхом збільшення кількості обмоток статора або кількості циклів перемикачів. У всіх цих випадках кут руху і кінетична енергія ротора зменшуються, що призводить до зменшення його тенденції до коливань. Фіксований режим — режим, що відповідає постійній частоті проходження керуючих імпульсів. При частоті керуючих імпульсів  $f_1$ , меншій за частоту власних коливань двигуна  $f_0$ , рух ротора має коливальний характер, що збільшує динамічну похибку розрахунку заданого руху. Для малих збурень частота коливань ротора становить, де  $M_{\max}$  — максимальний статичний синхронний момент;  $J_r$ ,  $J_n$  — момент інерції ротора та навантаження, що прикладається до валу двигуна;  $p$  — кількість пар полюсів. При значних збуреннях частоти керуючих імпульсів  $f_1 = f_0/k$ , де  $k$  - ціле число, виникає явище електромеханічного резонансу, який при слабкому демпфуванні коливань може призвести до порушення нормального руху ротора. і його синхронізація. При  $f_1 > f_0$  виникають вимушені коливання з частотою керуючих імпульсів; їх амплітуда монотонно зменшується зі збільшенням частоти. Для стабільної роботи шагового двигуна необхідно, щоб  $M_n/M_{\max} < 0,3-0,5$  і  $J_n/J_r < 1-2$ . Перехідний режим є основним режимом роботи шагового двигуна. Він включає пуск, реверс, гальмування та перехід від однієї частоти керування до іншої. Фізичні процеси в перехідному режимі визначаються як параметрами двигуна і його навантаженням, так і початковими умовами, за яких починається перехідний процес. Основна вимога до шагового двигуна в перехідному режимі залежить від втрати кроку, тобто збереження синхронності при будь-якому типі зміни керуючих імпульсів. З нерухомого положення ротора, яке він займає при заданих в обмотках струмах, шаговий двигун приводиться в робоче положення раптовим збільшенням частоти керуючих імпульсів від нуля. Ротор спочатку відстає від поля, потім при розгоні досягає частоти обертання поля, обганяє його і знову сповільнюється за рахунок

негативного синхронного моменту. Завдяки амортизації коливання швидкості швидко спадають і встановлюється заданий режим.

Максимальна частота керуючих імпульсів, при якій можливий старт без втрати кроку, називається частотою прийому  $f_{пр}$ . Частота прийому зростає зі збільшенням максимального моменту синхронізації, зменшенням кроку, зменшенням постійного часу обмоток, навантаження та моменту інерції. У сучасних ШД  $f_{пр} = 100-1000$  Гц гальмування шагового двигуна відбувається за рахунок раптового зниження частоти керуючих імпульсів від робочого значення до нуля. Частота зрізу, на якій ротор зупиняється без втрати кроку, зазвичай вища за частоту відгуку, що пояснюється внутрішнім демпфуванням - електромагнітним гальмівним моментом, моментом опору навантаження та тертям в резисторах. Реверсування шагового двигуна відбувається шляхом зміни порядку перемикання струмів в обмотках, що призводить до зміни напрямку обертання магнітного поля. Гранична частота керуючих імпульсів, при якій реверсування відбувається без втрати кроку, завжди нижче частоти прийому і становить  $(0,2-0,5) f_{пр}$ .

## 1.2 Основні характеристики та параметри шагових двигунів

Особливості конструкції шагових двигунів і різноманітність режимів їх роботи зумовлюють необхідність оцінки цих двигунів за такими параметрами:

- частота власних кругових коливань;
- електромагнітна постійність часу;
- коефіцієнт внутрішнього демпфування та властивості – механічна межа та динамічна межа.

Частота його кругових коливань - це кругова частота коливань ротора в стійкому положенні без моменту навантаження. Це узагальнений параметр, який залежить від моменту інерції  $J$ , амплітуди максимального синхронного моменту  $M_{тах}$  і кількості пар полюсів  $p$ . Внутрішнім еталоном часу може бути

період власних кругових коливань, який відповідає  $1/\omega_0$ . Власне, момент інерції  $J$  визначає інерційність двигуна і механізму, амплітуда максимального синхронного моменту  $M_{\max}$  характеризує шаговий двигун як перетворювач енергії, кількість пар полюсів  $p$  визначає ступінь електромеханічного зменшення кута. обертання і швидкість обертання. Співвідношення  $M_{\max}/J$  вказує на теоретичне максимальне прискорення ротора шагового двигуна.

Електромагнітна постійна обмотки керування  $T_{em} = L/R$  характеризує швидкість електромагнітних перехідних процесів. Часто зниження теми послідовно з обмоткою управління передбачає додатковий опір. Необхідно зменшити постійну часу, оскільки чим вона більша, тим менший приріст струму під час імпульсу напруги, тим менший синхронний момент  $i$ , отже, менший допустимий момент опору.

Коефіцієнт внутрішнього демпфування визначається відношенням амплітуди потокозчеплення ротора з фазою обмотки статора до його активного опору. Цей параметр дійсний тільки для шагових двигунів з активним ротором, оскільки його фізичний зміст полягає в утворенні електромагнітного гальмівного моменту, викликаного взаємодією поля ротора з індукованим цим полем струмом статора і замкнутим джерелом струму статора. схема. При цьому в активних опорах обмоток статора механічна енергія коливального ротора перетворюється в електричну, а потім в теплову.

Механічна гранична характеристика - це залежність допустимого моменту опору від частоти імпульсів керування в робочому режимі. Зі збільшенням частоти спостерігається затримка зростання струму через індуктивності обмоток. При певній граничній частоті момент двигуна наближається до нуля. Динамічна гранична характеристика - це залежність приймальної частоти від моменту опору і моменту інерції вантажу.

Шагові двигуни характеризуються рядом параметрів, що визначають їх продуктивність і область застосування. Основними характеристиками є:

-кут нахилу ( $\theta$ ): Визначає кутове переміщення ротора за один імпульс. Типові значення  $1,8^\circ$  (200 кроків на оберт) або  $0,9^\circ$  (400 кроків на оберт). Вибір кута залежить від необхідної точності позиціонування;

-крутний момент (Т): утримуючий момент: сила, яку двигун може чинити на вал, щоб утримувати ротор нерухомим;

- стартовий момент: крутний момент, який двигун розвиває при запуску.;

- робочий момент: крутний момент, який виникає при роботі на певній частоті імпульсів. Робочий момент зменшується зі збільшенням швидкості за рахунок індуктивності обмоток;

- частота кроків: максимальна кількість імпульсів за секунду, яку може обробити двигун без втрати синхронізації. Це залежить від конструкції двигуна та параметрів керування;

- напруга живлення: визначає швидкість, з якою сила струму в обмотках двигуна досягає номінального значення. Зазвичай для зменшення індуктивного ефекту та збільшення швидкості використовується більш висока напруга;

- опір і індуктивність обмоток: визначати електричні характеристики двигуна та впливати на його динамічні характеристики. Менший опір і індуктивність забезпечують більш швидкий відгук, але вимагають більш точного керування;

- інерція ротора: визначає здатність двигуна швидко змінювати оберти. Менша інерція сприяє кращій динаміці;

- ефективність: співвідношення між спожитою електричною потужністю та корисною механічною роботою. Більшість шагових двигунів мають ККД 70-90% в залежності від режиму роботи.

- температурні характеристики: максимальна робоча температура визначає робочі межі двигуна в залежності від умов навколишнього середовища;

- резонансні частоти: шагові двигуни мають власні резонансні частоти, що може призвести до нерівномірних рухів і втрат кроку. Щоб компенсувати це, використовуються спеціальні алгоритми управління або демпфери.

Знання цих характеристик допоможе вибрати оптимальний шаговий двигун для конкретного застосування, забезпечуючи при цьому необхідну точність, швидкість і надійність.

Для шагових двигунів характерні такі особливості:

- кут повороту ротора залежить від кількості пускових імпульсів, що подаються на двигун;

- у режимі зупинки шаговий двигун розвиває максимальний крутний момент, коли потрібні обмотки двигуна.

- висока точність позиціонування і повторюваності, оскільки якісні шагові двигуни мають точність не менше 2,5% від розміру кроку, при цьому ця похибка не накопичується на наступних кроках;

- шаговий двигун може швидко запускатися, зупинятися та повертатися назад.

- хороша надійність мотора за рахунок відсутності щіток, при цьому ресурс мотора обмежений тільки ресурсом підшипників;

- завдяки чіткому зв'язку між кутом повороту ротора і кількістю вхідних імпульсів (у стандартних режимах роботи) можливе позиціонування без зворотного зв'язку.

- забезпечує надзвичайно низьку швидкість вала двигуна для навантаження, безпосередньо підключеного до вала двигуна, без використання редуктора;

- працюють в широкому діапазоні швидкостей, оскільки швидкість безпосередньо залежить від кількості вхідних імпульсів.

Недоліки шагових двигунів:

- шаговий двигун демонструє явище резонансу;

- можливий варіант, коли двигун виходить з синхронізації і в результаті втрачається інформація про положення під час роботи ланцюга зворотного зв'язку;
- при стандартних схемах підключення енергоспоживання в режимі простою не зменшується.
- труднощі управління при роботі на високих швидкостях (фактично ефективна робота шагового двигуна можлива на високих швидкостях);
- мала питома потужність шагового приводу;
- для забезпечення ефективного керування шаговим двигуном необхідна дуже складна схема керування.

### **1.3 Сфери застосування шагових двигунів**

У машинобудуванні найбільш широко використовуються двофазні гібридні шагові двигуни з високим крутним моментом. Електродвигуни з кутовим переміщенням  $1,8^\circ/\text{крок}$  (200 кроків/оберт) або  $0,9^\circ/\text{крок}$  (400 кроків/оберт). Точність установки кроку визначається якістю механічної обробки ротора і статора електричного двигуна. Виробники сучасних електродвигунів гарантують точність налаштування кроку без навантаження 5% від розміру кроку.

Дискретність кроку створює значні вібрації, які в деяких випадках можуть призвести до зниження крутного моменту і механічних резонансів у системі. Рівень вібрації можна зменшити, збільшивши число фаз.

Реалізований режим ступінчастого зниження (мікрошаговий) з незалежним регулюванням струму обмоток шагового двигуна. Контролюючи коефіцієнт струму в обмотках, можна зафіксувати ротор в проміжному положенні між ступенями. Таким чином вдається підвищити плавність обертання ротора і досягти високої точності позиціонування. Якість виготовлення сучасних шагових двигунів дозволяє підвищити точність позиціонування в 10-20 разів.

Шагові двигуни стандартизовані відповідно до монтажних розмірів і розміру фланця: NEMA 17, NEMA 23, NEMA 34, ... – розмір фланця 42 мм, 57 мм, 86 мм і 110 мм. Шагові двигуни NEMA 23 можуть створювати крутний момент до 30 кгс\*см, NEMA 34 до 120 кгс\*см і до 210 кгс\*см для двигунів з фланцем 110 мм.

Шаговий двигун з вбудованим контролером

Шагові двигуни виробляють відносно високий крутний момент на низьких швидкостях. Зі збільшенням швидкості крутний момент значно зменшується. Однак динамічні характеристики двигуна можна істотно поліпшити, використовуючи драйвери на основі стабілізації струму ШІМ.

Шагові двигуни застосовуються в приводах машин і механізмів, що працюють в режимі пуск-стоп, або в приводах безперервного руху, де керуюча дія досягається послідовністю електричних імпульсів, наприклад у верстатах ЧПУ. На відміну від сервоприводів шагові приводи забезпечують точне позиціонування без зворотного зв'язку від датчиків кутового положення.

Шагові двигуни з постійними магнітами можна використовувати як датчики повороту, оскільки при обертанні ротора на обмотках виникає електрорушійна сила.

#### **1.4 Огляд існуючих методів дослідження роботи шагових двигунів**

Вивчення того, як працюють шагові двигуни, має вирішальне значення для забезпечення їх ефективного використання в автоматизованих системах. Сучасні аналітичні методи можна розділити на кілька основних категорій, які охоплюють як теоретичні, так і практичні підходи.

До теоретичних методів дослідження відносять математичне моделювання, оскільки створення математичні моделі, що описують електромагнітні процеси, що відбуваються в двигуні, і динамічну поведінку системи статор-ротор є важливим моментом дослідження шагових двигунів. Найважливішими

інструментами для опису динаміки є рівняння Максвелла, закони електромеханічної індукції та рівняння Лагранжа. Шляхом моделювання процесів намагнічування обмоток, наприклад, можна оцінити вплив індуктивності на швидкість і крутний момент.

Аналітичний розрахунок параметрів, як кут випередження, крутний момент і максимальна швидкість, розраховуються на основі геометричних і електричних властивостей двигуна використовується на етапі проектування системи і також дає інформацію про працездатність системи.

До методів моделювання системи та моделювання алгоритмів керування входять використання програмних пакетів таких як MATLAB/Simulink де можна змоделювати динамічні процеси і тестування алгоритмів керування. Створюючи моделі, ви можете моделювати поведінку двигуна в різних умовах, включаючи явища резонансу.

LabVIEW - інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами для створення стендів та автоматизованих експериментів.

ANSYS - аналіз теплових і магнітних полів у двигуні, які впливають на його роботу.

Експериментальні методи дослідження включають в себе аналіз параметрів двигуна, вимірювання крутного моменту в різних режимах роботи. Дослідження залежності між частотою імпульсів і частотою обертання ротора. Дослідження енергетичних властивостей вимірювання споживаної електроенергії та аналіз її зв'язку з механічною роботою. Оцінка впливу підвищеної напруги на швидкість намотування. Резонансні дослідження, визначення резонансних частот, що призводять до коливань і втрат кроку. Використання демпферів та оптимізація алгоритмів для їх компенсації.

Лабораторні стенди дозволяють моделювати різні умови роботи двигуна, включаючи зміни напруги, частоти та алгоритмів керування. Оснащення

стендів датчиками (крутного моменту, швидкості, струму) гарантує точну реєстрацію даних випробувань.

Порівняльний метод аналізу, тобто комплексний метод дослідження роботи шагового двигуна. Теоретичні методи та методи моделювання дають змогу прогнозувати результати та оптимізувати конструкцію двигуна. Експериментальні дослідження служать для практичної перевірки моделей і уточнення параметрів. Лабораторні стенди є універсальним інструментом, який дозволяє поєднати теоретичний аналіз з практичними дослідженнями.

Тому розробка лабораторного стенду є необхідним кроком для поглибленого вивчення шагових двигунів. Це дозволяє не тільки перевіряти їх у різних умовах, але й покращує методи контролю та оптимізує робочі параметри для конкретних застосувань

### **1.5 Висновки за розділом**

Розробки лабораторного стенду для дослідження гібридного крокового двигуна обумовлена потребою у створенні ефективних засобів навчання, тестування та оптимізації таких двигунів, які активно використовуються в промислових і наукових застосуваннях. Основні причини актуальності цього питання: освітні потреби для набуття практичного досвіду; дослідження ефективності та оптимізації гібридних шагових двигунів; розробка та тестування сучасних систем керування; індустрія 4.0 та автоматизація технологічних процесів з обслуговування елементів залізничного транспорту.

Лабораторний стенд дозволяє студентам і дослідникам вивчати принципи роботи гібридних крокових двигунів у реальних умовах. Практичний досвід із налаштуванням і тестуванням електромеханічних систем є важливим для підготовки кваліфікованих спеціалістів у галузі електротехніки, мехатроніки та автоматизації.

Лабораторний стенд дозволяє оцінювати ефективність роботи двигуна за різних умов, включаючи різні режими навантаження, температурні параметри та швидкісні режими; дає можливість тестування алгоритмів керування та моделювання різних конструктивних рішень двигунів; виконувати випробування нових підходів до керування кроковими двигунами, таких як мікрокрокування, регулювання струму або частоти імпульсів; створювати та впроваджувати нових драйверів або програмного забезпечення для роботи з гібридними кроковими двигунами; моделювати інтеграцію гібридного ШД у автоматизовані системи промислового виробництва. Це сприяє підвищенню енергоефективності та надійності механізмів, що відповідає сучасним стандартам Індустрії 4.0.

Використання лабораторного стенду і моделювання його роботи дозволяє досліджувати поведінку двигуна без потреби у створенні дорогих реальних прототипів, що знижує загальні витрати на дослідження.

Лабораторний стенд є ефективним інструментом для навчання персоналу, який працює з кроковими двигунами в промислових системах.

Таким чином, розробка лабораторного стенду для гібридного крокового двигуна є важливим етапом у розвитку технічної освіти, досліджень і промислових технологій. Це сприяє вдосконаленню існуючих рішень у галузі мехатроніки, автоматизації та цифрових технологій.

З виконаного огляду було поставлено такі задачі для подальшого дослідження з метою модернізації пристроїв залізничної автоматики:

- дослідити конструкцію гібридних шагових двигунів, які використовуються на Укрзалізниці;
- змоделювати роботу шагового двигуна за допомогою Matlab, Simulink;
- розробити лабораторний стенд для дослідження роботи шагового двигуна.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ШАГОВОГО ДВИГУНА

### 2.1. Математична модель шагового двигуна

В інженерній практиці найважливішу роль у розробці систем і комплексів відіграють пакети прикладних програм для математичного моделювання: MATLAB з пакетом розширення Simulink, Mathcad, Scilab, Proteus та ін. Їх використання при вирішенні задач аналізу та синтезу дискретного електроприводу, особливо на основі шагового двигуна гібридного типу, передбачає наявність простої і водночас достатньо точної математичної моделі цієї електричної машини. Різні аспекти його створення розглядаються в ряді робіт. Після оглядового аналізу цих джерел можна визначити фундаментальну математичну модель на основі рівнянь Лагранжа-Максвелла, яка описує основні моменти процесу електромеханічного перетворення енергії.

Для всіх типів шагових двигунів за допомогою електронного комутатора виробляються імпульси напруги, які подаються на обмотки керування, які рощташовані на статорі шагового двигуна. При цьому кожен імпульс забезпечує поворот ротора на певний кут, який залежить від конструкції шагового двигуна.

Для синтезу законів керування розглянемо ШД із зубчастим передавальним механізмом на валу двигуна. За допомогою цього механізму обертаючий рух ротора двигуна перетворюється в поступальний рух механізмів.

При дії одиничного імпульсу на ШД із посаженою на валу його ротора шестерней з радіусом  $R$ , одиничний кутовий шаг повороту ротора перетворює в поступальний рух шестерни на відстань яка дорівнює:

$$L_{ш} = \Delta\alpha \cdot R, \quad (2.1)$$

де  $a$  – кут повороту ротора ШД при подачі одиничного імпульса;

$L_{ш}$  – величина лінійного шара шестерні при дії одного імпульсу на ШД.

Так як в шаговому двигуні повороти здійснюються в дискретні моменти часу, то математичний опис положення можна описати наступним виразом:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + n_k \cdot \Delta\alpha, \quad (2.2)$$

де  $\varphi_k$  – кутове положення ротора шагового двигуна у момент часу  $k$ ;

$n_k$  – кількість керуючих імпульсів які подаються на ШД в момент часу від  $k$  до  $k+1$ ;

$\varphi_{k+1}$  – кутове положення ротора шагового двигуна в момент часу  $k+1$ .

Обмотку шагового двигуна можна представити на схемі заміщення у вигляді послідовно з'єднаних індуктивності та резистора. Крім того при обертанні ротора у обмотках виникає ЕРС. Тому еквівалентна схема заміщення ШД продемонстрована на рис. 2.1.

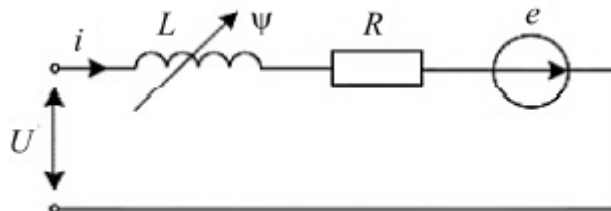


Рисунок 2.1 – Схема заміщення обмотки шагового двигуна

За початок відліку кута положення, при якому вісь полюса ротора співпадає з віссю першої фази. При цьому  $L_1=L_2+L$ ;  $R_1=R_2=R$ ;  $U_1=U_2=U$ .

Для описання динамічних режимів роботи шагового двигуна необхідно скласти рівняння електричної рівноваги для напруги контурів струму, рівняння моментів, які впливають на ротор, а також рівняння електромеханічного перетворення енергії.

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_2}{dt} - E_1 \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} - E_2 \end{cases} \quad (2.3)$$

де  $U$  – напруга фаз;

$R$  – активний опір фаз;

$I_1, I_2$  – струми фаз;

$M_{12}$  – взаємна індукція обмоток фаз;

$E_1, E_2$  – наведені ЕРС в катушках фаз.

Наведена ЕРС в катушці 1 визначається виразом:

$$E_1 = \omega \cdot p \cdot \Psi_m \sin(p \cdot \theta), \quad (2.4)$$

де  $\omega = dQ/dt$  – кутова швидкість оберту ротора;

$p$  – число зубців ротора;

$\Psi_m$  – максимальне потокозчеплення;

$Q$  – положення ротора.

Аналогічно для фази 2;

$$E_2 = \omega \cdot p \cdot \Psi_m \sin(p \cdot \theta - \lambda), \quad (2.5)$$

де  $\lambda$  – кут зсуву фаз.

Виходячи з попередніх виразів можна записати рівняння електричного балансу:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \Psi_m \sin(p\theta) \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \Psi_m \cos(p\theta) \end{cases} \quad (2.6)$$

Електромагнітний момент, який створюється обмотками фаз статора визначають наступним виразом:

$$M_{\text{эм}} = -\Psi_m \cdot I_1 \cdot \sin(p\theta) + \Psi_m \cdot I_2 \cdot \cos(p\theta). \quad (2.7)$$

Для визначення потокозчеплення можна використати рівняння руху ротора та паспортні дані на машину. Тоді система рівнянь математичної моделі шагового електродвигуна в жинамічному режимі можуть бути записані в наступному вигляді:

$$\begin{cases} U_A = i_A R_A + L \frac{di_A}{dt} + \omega p \Psi \sin(p\theta) \\ U_B = i_B R_B + L \frac{di_B}{dt} - \omega p \Psi \cos(p\theta) \\ M_E = p \Psi (i_B \cos(p\theta) - i_A \sin(p\theta)) - M_{cm \max} \sin(2p\theta) \\ J_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{Э}} - M_C - M_{cm} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (2.8)$$

Математична модель включає в свою структуру:

- рівняння напруги кожної фази, отримані за еквівалентною схемою обмотки;
- вираз для електромагнітного моменту, отриманий з рівняння потужності кожної обмотки;
- рівняння руху ротора двигуна під дією електромагнітного моменту та статичного моменту опору.

В формулі (2.8)  $U$ ,  $i$ ,  $R$ ,  $\Psi$  - значення напруги, струму, опору та амплітуди фазового потокозчеплення;  $\theta$ ,  $\omega$ ,  $J_{\text{дв}}$ ,  $p$  - кут повороту, кутова частота

обертання ротора, момент інерції ротора, кількість пар полюсів ротора;  $M_E$  – повний електромагнітний момент;  $M_{st\ max}$  – амплітудне значення статичного моменту закріплення, що визначається постійними магнітами ротора;  $M_C$  – статичний момент опору валу двигуна.

У цьому випадку застосовується така система прийому: магнітопровід електричної машини лінійний, насичення магнітопровода не враховано, магнітне падіння напруги відсутнє; жили вважаються гладкими, робочий зазор рівномірним. Враховуються тільки основні гармоніки струму, магніторушійна сила (МРС), потік і електрорушійна сила. Взаємною індуктивністю обмоток знехтуємо.

Вплив вихрових струмів у магнітопроводі не враховано. Чисельний розрахунок моделі потребує знання значень відповідних коефіцієнтів, правильне визначення яких є самостійним завданням і вимагає окремого розгляду.

В ході роботи з цією моделлю був сформульований і апробований наступний підхід до цього розрахунку.

По-перше, відповідні коефіцієнти необхідно розділити на 3 групи:

- зазначені в паспортних даних;
- розраховується за відомими проектними параметрами;
- визначено в результаті експерименту.

Як приклад розглянемо гібридний 2-фазний шаговий двигун з наявними паспортними даними, складальними кресленнями, схемою підключення обмоток і схемою напруги живлення.

Вихідні дані – модельні коефіцієнти з паспортних даних:

- напруга живлення фаз  $U_A$  і  $U_B$ ;
- номінальний струм статора  $i_A$  та  $i_B$ ;
- опір обмотки статора  $R_A$  і  $R_B$ ;
- індуктивність обмотки  $L$ ;

- амплітудне значення статичного фіксуючого моменту  $M_{стмакс}$ .

Коефіцієнти моделі, визначені шляхом аналізу проектної документації:

- кількість пар полюсів ротора  $p$ ;
- момент інерції ротора  $J_{дв}$ .

Звичайно, кількість пар полюсів також можна визначити шляхом прямого аналізу будівельної документації.

Момент інерції ротора можна розрахувати за відомими залежностями, аналізуючи складальні

Експериментально визначений коефіцієнт моделі є амплітудним значенням потокозчеплення фази двигуна.

Методика експериментальних досліджень:

- ротор обертається примусово і без напруги живлення зі швидкістю  $\omega = \text{const}$ ;
- вимірюється напруга однієї з фаз (значення від електрорушійної сили обертання  $E$ );

На підставі отриманих результатів вимірювань і рівнянь для напруг фаз двигуна можна розрахувати амплітудне значення потокозчеплення фази ротора за залежністю :

$$\Psi \approx \frac{E}{\omega p} . \quad (2.10)$$

За відсутності експериментальних досліджень величину амплітудного значення потокозчеплення в першому наближенні можна визначити залежністю:

$$\Psi \approx Li . \quad (2.11)$$



## 2.2. Результати моделювання

Отримані за допомогою підсистеми (див. рис. 2.3) вхідні сигнали фаз А, В моделі при заданій частоті живлення 10 Гц представлені на рис. 2.4.

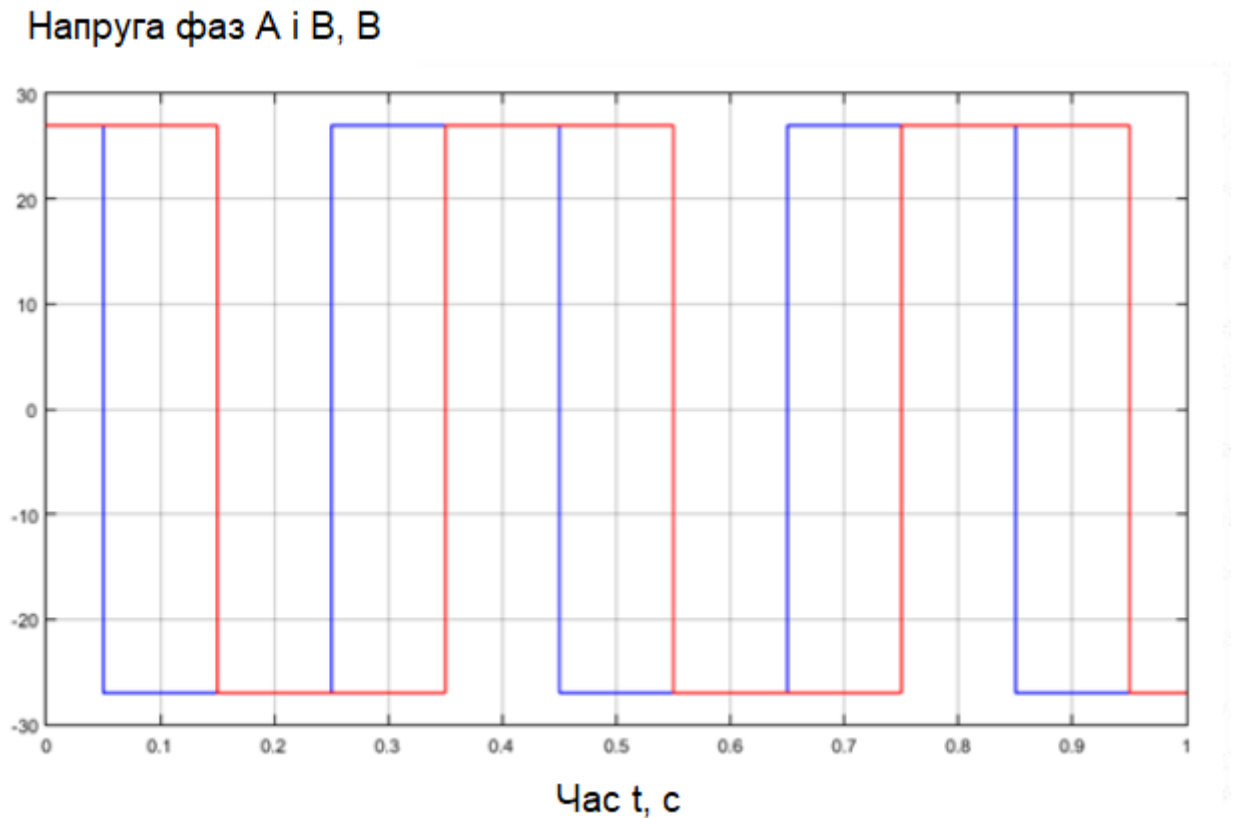


Рисунок 2.4 – Формування напруж вхідних сигналів фаз А і В за допомогою Matlab, Simulink

Перехідний процес моделі в залежності від кута повороту при частоті вхідного сигналу 10 Гц представлений на рис. 2.5. Результати експерименту зі зняттям перехідного процесу в залежності від кута ротору шагового двигуна дано на рис. 2.6.

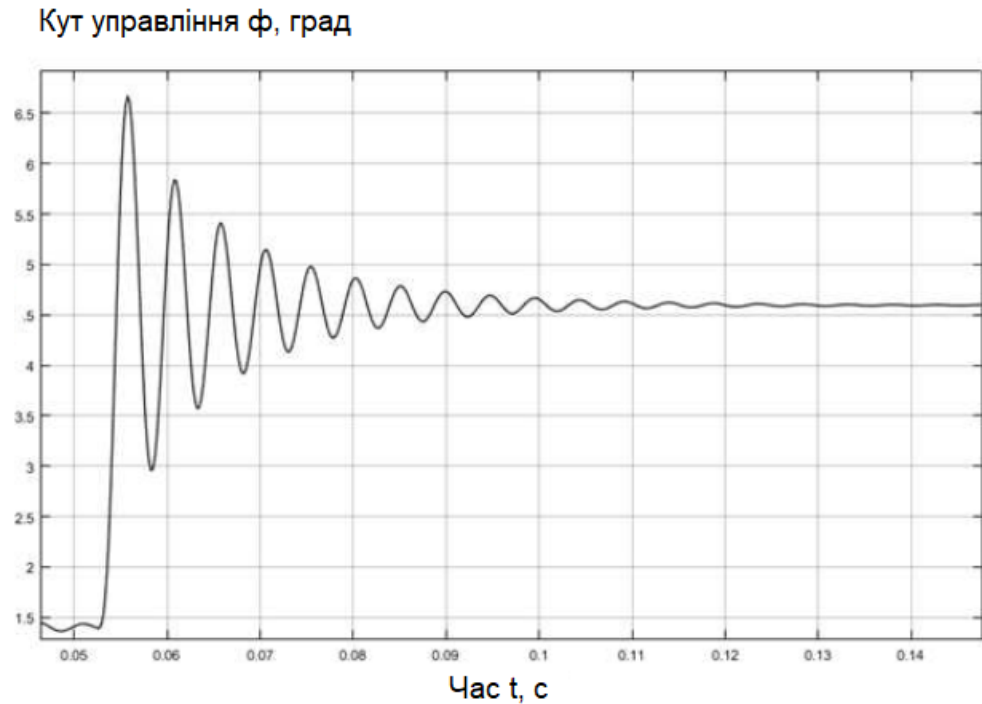


Рисунок 2.5 – Дослідження перехідного процесу за допомогою моделі побудованої в Matlab, Simulink за кутом повороту ротору щоговго двигуна при частоті вхідного сигналу 10 Гц

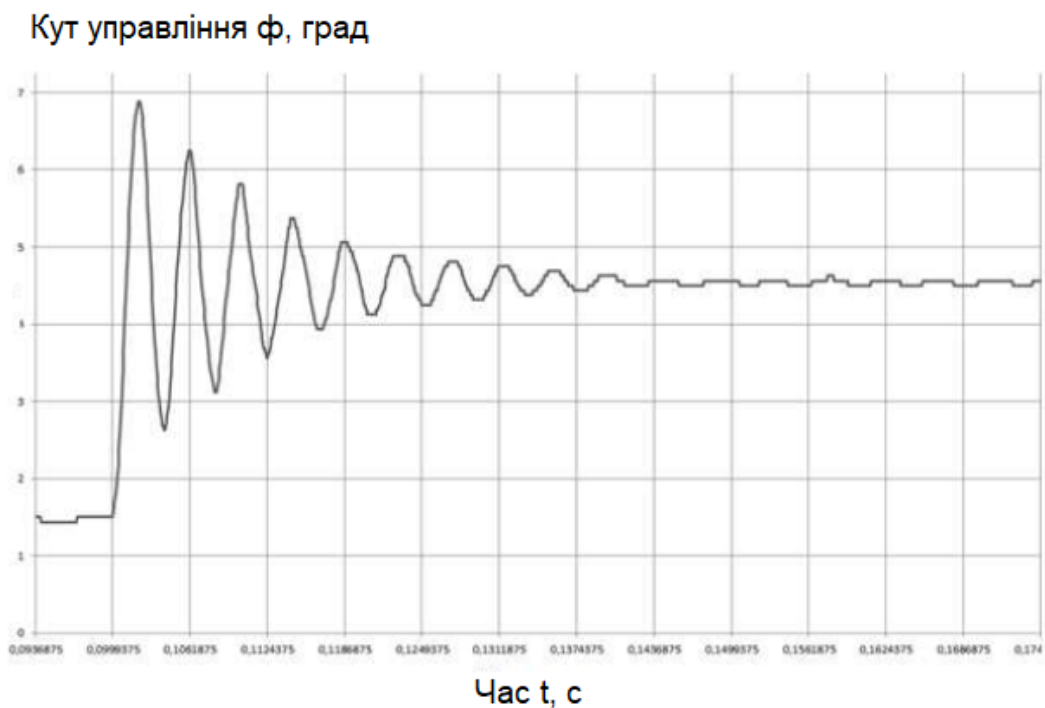


Рисунок 2.6 –Результати експериментального дослідження перехідного процесу за кутом повороту при частоті вхідного сигналу 10 Гц

Результати моделювання кута повороту валу для моделі без інерційного навантаження при частоті живлення 100 Гц дано на рис. 2.7. Експериментальні дослідження перехідного процесу за кутом повороту валу двигуна без інерційного навантаження за частоти живлення 100 Гц дано на рис.2.8.

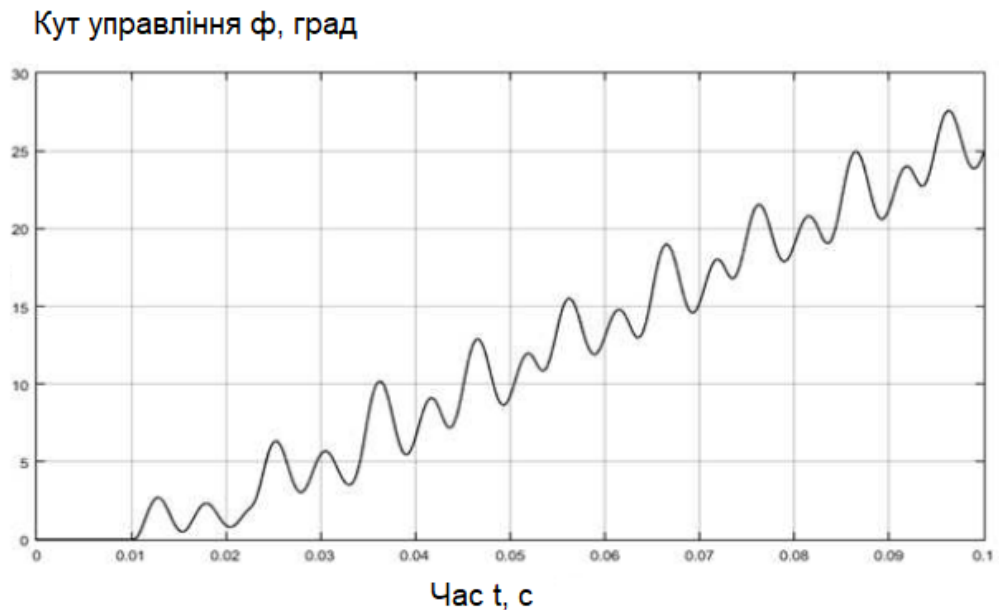


Рисунок 2.7 – Результати моделювання кута повороту валу для моделі без інерційного навантаження при частоті живлення 100 Гц

Система рівнянь математичної моделі на основі еквівалентних схем заміщення електричного та магнітного кіл має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_A(\theta) = (2i_A w + H_{\text{кф}} I_m) w G_A(\theta); \\ \psi_B(\theta) = (2i_B w + H_{\text{кф}} I_m) w G_B(\theta); \\ L_A(\theta) = w^2 G_A(\theta); \\ L_B(\theta) = w^2 G_B(\theta); \\ U_A = i_A R_A + L_A(\theta) \frac{di_A}{dt} + \omega p \psi_A(\theta) \sin(p\theta); \\ U_B = i_B R_B + L_B(\theta) \frac{di_B}{dt} - \omega p \psi_B(\theta) \cos(p\theta); \\ M_{\text{э}} = \psi_B(\theta) p i_B \cos(p\theta) - \psi_A(\theta) i_A \sin(p\theta) - \\ - M_{\text{ст max}} \sin(2p\theta); \\ J_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{э}} - M_{\text{с}} - M_{\text{ст}}. \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{A_{\text{экв}}}(\theta) = \frac{h_{\text{заз}}}{((b_{\text{зр}}/2) + \theta) l_{\text{зр}} \mu_{\text{v}}}; \\ R_{B_{\text{экв}}}(\theta) = \frac{h_{\text{заз}}}{((b_{\text{зр}}/2) + \theta) l_{\text{зр}} \mu_{\text{v}}}; \\ G_A(\theta) = \frac{1}{\sum R_{A_{\text{экв}}}(\theta)}; \\ G_B(\theta) = \frac{1}{\sum R_{B_{\text{экв}}}(\theta)}. \end{array} \right. \quad (2.13)$$

З аналізу рівнянь (2.8) та (2.12), (2.13) випливає, що модель дозволяє варіювати наступні конструктивні параметри двигуна: висоту повітряного зазору  $h_{\text{заз}}$ , ширину зубця ротора  $b_{\text{зр}}$ , довжину зубця ротора  $l_{\text{зр}}$ , число витків обмотки однієї фази  $w$ , параметри постійного магніту ротора  $H_{\text{кф}}$  та  $I_m$ .

Результати моделювання перехідного процесу за електромагнітним моментом та кутом повороту ротора при частоті живлення 10 Гц дано на рис. 2.9, 2.10.

Кут управління  $\varphi$ , град

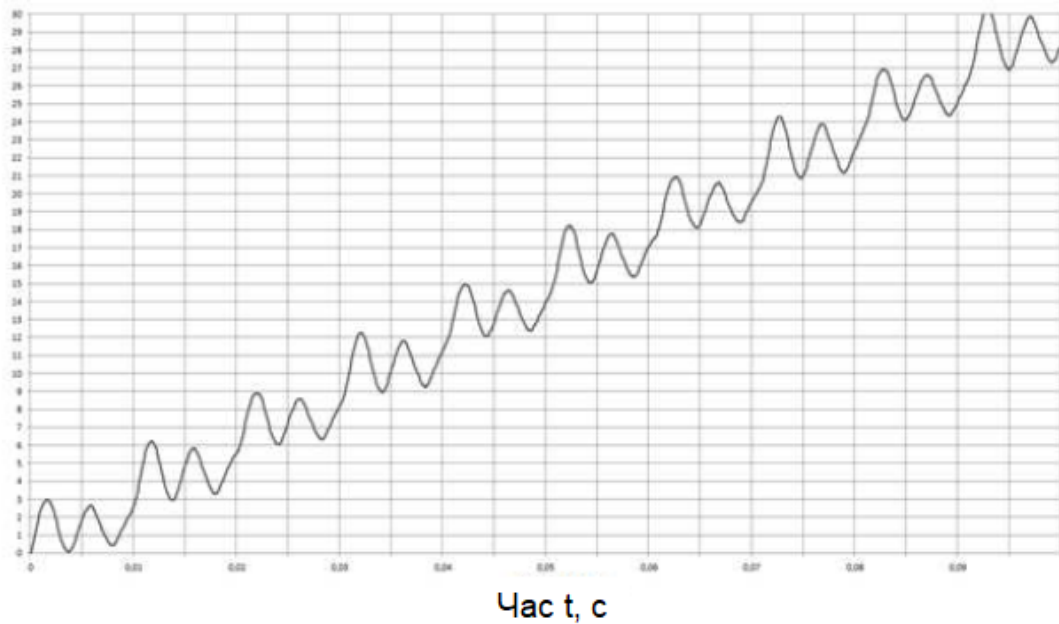


Рисунок 2.8 – Результати експериментального дослідження перехідних процесів за кутів повороту валу шагового двигуна без інерційного навантаження при частоті живлення 100 Гц

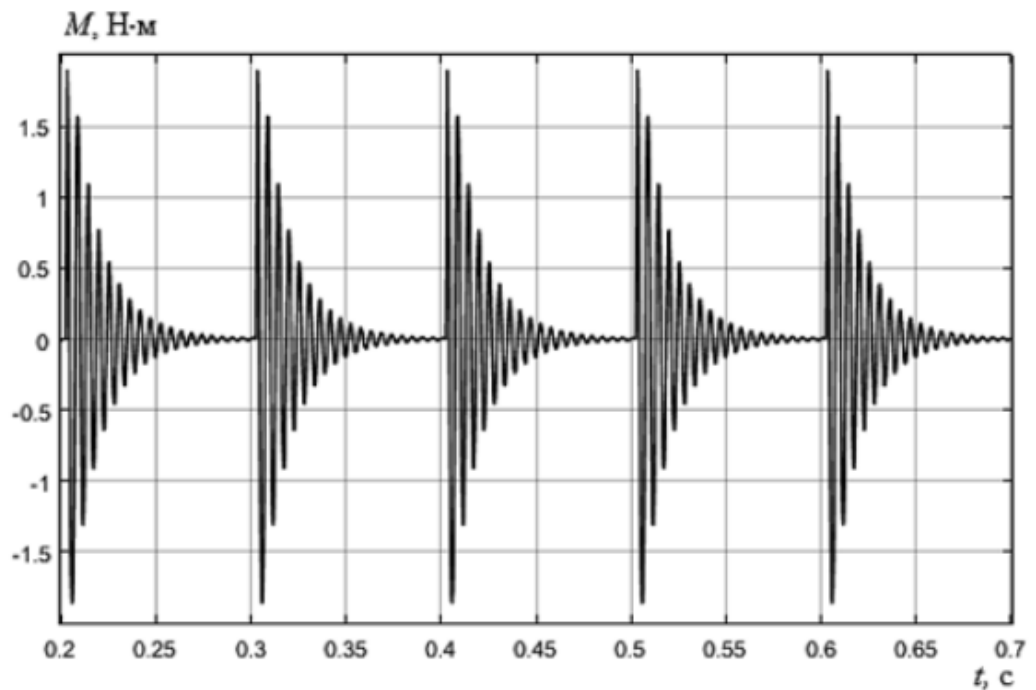


Рисунок 2.9 – Результати моделювання перехідного процесу за електромагнітним моментом при частоті живлення 10 Гц

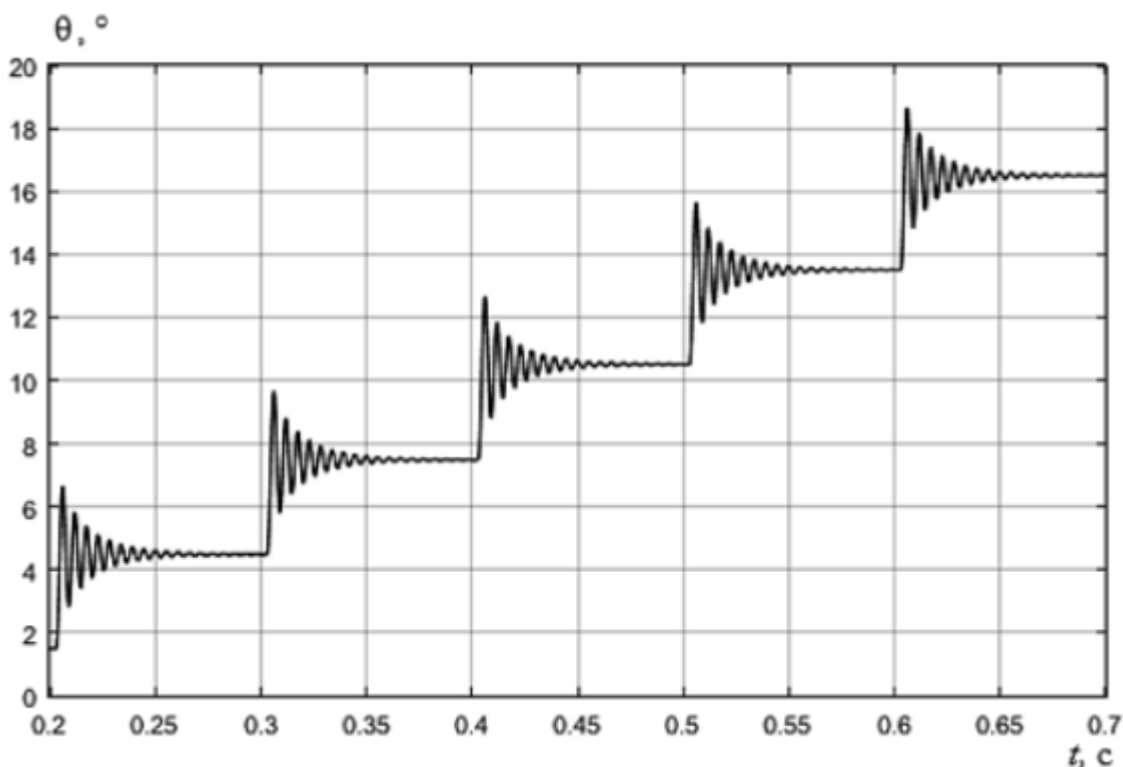


Рисунок 2.10 – Результати моделювання перехідного процесу за кутом повороту ротора при частоті живлення 10 Гц

### 2.3. Висновки за розділом

Розроблена математична модель гібридного двохфазного шагового двигуна за допомогою Matlab, Simulink. Результати досліджень було представлено на міжнародній конференції і опубліковані в [12].

Виконуючи порівняльний аналіз рис. 2.4 – 2.8, можна зробити висновок про якісну та кількісну збіжність результатів моделювання та експериментальних даних. Величина відхилень параметрів, розрахованих чисельно та отриманих у ході експерименту, не перевищує 5%. Це інженерна точність.

Відповідно до розглянутої математичної моделі гібридного крокового двигуна у поєднанні із запропонованою методикою підбору та розрахунку її коефіцієнтів може бути використана як для аналізу статичних та динамічних характеристик даної електричної машини, так і для вирішення широкого кола задач аналізу та синтезу систем дискретного електроприводу на її основі.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ШАГОВИХ ДВИГУНІВ

#### 3.1. Вимоги до лабораторного стенду для дослідження шагових двигунів

Розробка лабораторного стенду для вивчення того, як працює шаговий двигун, вимагає чіткого визначення цілей, вимог і обмежень. Основним завданням стенду є створення умов для вивчення характеристик двигуна, відпрацювання методів контролю та проведення експериментів у реальних робочих умовах.

Основна мета стенду є забезпечення можливості проведення експериментальних досліджень шагових двигунів для аналізу їх характеристик, перевірки ефективності різних методів керування та дослідження впливу параметрів живлення та навантаження на роботу двигуна.

Лабораторний стенд повинен мати підтримку різних типів шагових двигунів (різна конструкція, кількість фаз і спосіб управління).

Можливість аналізувати ключові характеристики двигуна, такі як кут тангажу, крутний момент, швидкість, енергоефективність тощо.

Забезпечення точного контролю параметрів живлення (напруги, струму) і частоти імпульсів управління.

До розробки апаратної частини лабораторного стенду належить вибір та інтеграція основних компонентів: шаговий двигун, керуючий драйвер, вимірювальні датчики (момент, швидкість, струм, температура). Розробка мікроконтролерної системи для генерації керуючих сигналів і збору даних. Можливість підключення додаткових датчиків і модулів для розширення функціональності.

Розробка програмного забезпечення являє собою реалізацію алгоритмів керування (повний крок, півкроку, мікрокрок). Розробка інтерфейсу для

взаємодії користувача зі стендом через ПК або мобільний пристрій. Забезпечення зручної візуалізації експериментальних даних у реальному часі.

До лабораторного стенду пред'являють перелік технічних вимог серед яких модульність, надає можливість легко замінити або додати компоненти (драйвери, датчики, двигуни). Підтримка стандартних протоколів передачі даних (UART, USB, I2C, CAN) для інтеграції з ПК та іншими пристроями. Забезпечення стабільної роботи при тривалих експериментах і наявність систем захисту від перевантажень. Зменшення розміру підставки для більш зручного використання в лабораторних умовах. Обмеження вартість компонентів: вибирайте економічно ефективні компоненти без значного компромісу щодо якості. Врахування технічних характеристик існуючих двигунів і драйверів. Обмеження енергоспоживання для забезпечення роботи зі стандартними джерелами живлення. Лабораторний стенд, повинен провести повний цикл дослідження роботи шагового двигуна: від підготовки до аналізу отриманих результатів. Можлива розробка рекомендацій щодо оптимізації керування та підвищення ККД шагових двигунів.

Загальний порядок розробки лабораторного стенду це насамперед визначення цілей, характеристик та функцій цього стенду. Підбір компонентів та поєднання їх в одну систему. Перевірка її працездатності та розробка посібника для користувачів.

### **3.2. Схема керування шаговим двигуном на базі Arduino**

На рис. 3.1 показано систему керування шаговим двигуном, що використовує Arduino Uno, драйвер двигуна L293D, рідкокристалічний дисплей (LCD) для відображення інформації та шаговий двигун. Детальний опис кожного компонента та способу їх підключення:

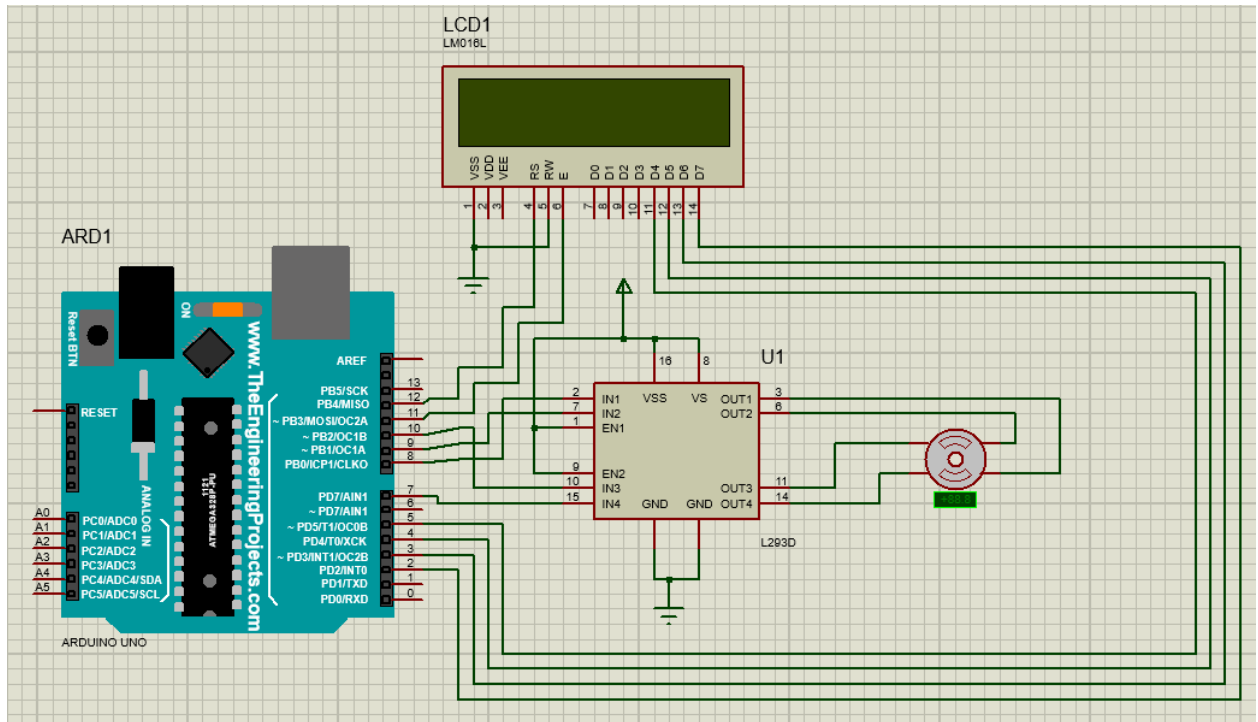


Рисунок 3.1 – Схема керування шаговим двигуном реалізована в Proteus

Arduino Uno є основним мікроконтролером, який генерує керуючі сигнали для драйвера L293D і обробляє дані, що відображаються на РК-дисплеї. У схемі використовуються такі піни:

Цифрові входи 2, 3, 4, 5, 6 використовуються для керування сигналами обмотки двигуна через драйвер L293D.

Цифрові входи 7, 8, 9, 10, 11, 12 використовуються для передачі даних та сигналів керування на рідкокристалічний дисплей.

Сигнали 5В і GND використовуються для живлення та заземлення мікросхеми відповідно.

РК-модуль (наприклад, LM016L) використовується для відображення інформації про стан системи, такої як поточний кут або швидкість двигуна. Він підключається до Arduino наступним чином:

Вивід V0 підключається через потенціометр для регулювання контрастності дисплея.

RS(Вибір реєстру): підключено до цифрового контакту 7 Arduino.

E(Увімкнено): підключено до цифрового контакту 8.

Контакти D4, D5, D6, D7 дисплея підключені до контактів 9, 10, 11, 12 Arduino.

L293D — чотириканальний драйвер шагового двигуна. Його завдання полягає в тому, щоб забезпечити достатній струм і напругу для роботи двигуна. На схемі: VSS(Живлення логіки): підключено до 5В. VS(Живлення двигуна): підключіть до зовнішнього джерела живлення (зазвичай 12 В для двигуна).

GND: підключено до загальної шини GND.

Контрольні сигнали IN1, IN2, IN3, IN4 отримують сигнали від контактів 2, 3, 4, 5 Arduino. Ці сигнали визначають, які обмотки двигуна активуються.

EN1 і EN2: під'єднані до 5 В для активації відповідних каналів.

Вихідні контакти OUT1, OUT2, OUT3, OUT4: підключається до обмоток шагового двигуна.

Шаговий двигун підключається до вихідних контактів OUT1, OUT2, OUT3, OUT4 драйвера. Його обмотки активуються в певному порядку, який визначає напрямок і швидкість обертання.

Потенціометр підключається до контакту V0 РК-дисплея для регулювання контрастності символів, що відображаються.

Arduino отримує живлення через USB або зовнішнє джерело через порт VIN.

Шаговий двигун живиться від VS драйвера L293D, який підключається до зовнішнього джерела (зазвичай 12 В).

РК-дисплей і драйвер живляться від Arduino через контакти 5 В і GND.

Принцип роботи: Arduino генерує сигнали для драйвера L293D на основі програми, яка реалізує керування двигуном.

Драйвер підсилює сигнали і перемикає струм на відповідні обмотки двигуна.

Arduino також передає дані на РК-дисплей і відображає інформацію про поточний стан двигуна (наприклад, положення ротора або швидкість).

Контрастність дисплея регулюється вручну за допомогою потенціометра.

### **3.3 Висновки за розділом**

Розроблено лабораторний стенд для дослідження роботи гібридного шагового двигуна в Proteus а основі Arduino. Використано спеціальний драйвер L293D, який дозволяє підсилювати сигнали і перемикає струм на відповідні обмотки двигуна. Величина напруги живлення 5 В. Arduino отримує живлення через USB порт або зовнішнє джерело через порт VIN.

## ВИСНОВКИ

В результаті дипломного проектування виконано критичний аналіз типів крокових двигунів, сфери їх застосування, конструктивні особливості і перспективи використання..

Розроблено математично модель за допомогою Matlab, Simulink для симуляції роботи двохфазного гібридного шагового з метою дослідження перехідних процесів за кутів повороту ротору при частоті живлення 10 і 100 Гц. Здійснено порівняння отриманих змодельованих значень і експериментальних досліджень

Розроблено еквівалентне схему заміщення магнітного кола та сформовано уточнену систему рівнянь (2.8), (2.12), (2.13) математичної моделі ГШД Представлено імітаційну модель дискретного електроприводу у програмному пакеті Simulink, за допомогою якої виконано розрахунок перехідних процесів по куту повороту ротора та електромагнітному моменту двигуна та проведено аналіз впливу одного з конструктивних властивостей машини на частоту своїх коливань ротора.

Розроблено лабораторний стенд для дослідження роботи гібридного шагового двигуна на базі Arduino в Proteus.

Результати науково-дослідної роботи на здобуття ОКР «магістр» були апробовані на XVI Міжнародної науково-практичної конференції, Дніпро, 14-15 грудня 2022 р. Опубліковано тези [14].

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Austin Hughes. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications. Third edition. Published by Elsevier Ltd, 2006.
2. Binglin Lu, Yanliang Xu. Presentation and Performance Evaluation of a Novel Stator-Permanent-Magnet Hybrid Stepper Motor. College of Electrical Engineering, Shandong University. Jinan. China, 2015.
3. Chirila A., Deaconu I., Navrapescu V., Albu M., Ghita C. On the model of a Hybrid Stepper Motor // Proc IEEE international conference on industrial electronics. 2008. P. 496—501.
4. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: [Текст] / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
5. Augie Hand. Electric Motor Maintenance and Troubleshooting. 2011. McGraw-Hill. P.:432.
6. V.V. Athani. Stepper Motors: Fundamentals, Applications and Design. 1997. New Age International. P.:201
7. Paul Acarnley. Stepping Motors: A guide to theory and practice. 2002. The Institution of Engineering and Technology; 4th edition. P.: 172
8. Paul Acarnley. Stepping Motors: A guide to theory and practice. 2002. IET. P.: 159
9. Костенко К.Л. Роботизація діагностики систем залізничної автоматики та зв'язку [Текст] / К.Л. Костенко, Т.М. Сердюк, В.В. Скалько // Журнал "Наука і прогрес транспорту", №3 – Д.: ДІТ, 2023.
10. Костенко К. Л. Використання роботехніки в системах залізничної автоматики та зв'язку [Текст] Костенко К.Л., Сердюк Т. М.// “Наука і сталий розвиток транспорту 2023”: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених, Том II. Секція «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології» (Дніпро, 27 жовтня 2023 р.) – Д.: ДІТ, 2023. – с. 67.

11. Типи електродвигунів та їх використання: URL: <https://tmmotor.ua/ua/news/typy-elektrovdigatelej-i-ih-ispolzovanie?srsltid=afmboor-mj-5b4y9scb3fgwumvvimu406qjohrx8qtuha4cbpp-cprnu>

12. А.В. Ємельянов, А.М. Шилін. Шагові двигуни: навчальний посібник. 2005. РПК «Політехнік». С.: 48

13. Кроковий двигун РМ VS Гібридний кроковий двигун: URL: <https://ua.sitmotors.com/news/pm-stepper-motor-vs-hybrid-stepper-motor-74470678.html>

14. Сердюк Т.М., Костенко К.Л., Скалько В.В., Невідома В.С., Мараренко О.Д., Терещенко О.В.. Математична модель гібридного шагового двигуна / Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVI Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 12-13 грудня 2024 р.). – Д.: ДІТ, 2024. – С.34.