

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



**ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ  
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

Навчальний посібник

У 3 частинах

Частина 3

**ІНВЕРТОР ТА ЕЛЕКТРОДВИГУН ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2026

УДК 629.349-838:621.313.3

E50

*Рекомендовано вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка»  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
спеціальностей G3 Електрична інженерія та J8 Автомобільний  
транспорт  
(протокол № 14 від 23.04.2026)*

Рецензенти:

В.С. Федорейко, д-р техн. наук, проф. (Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка);

Л.І. Мазуренко, д-р техн. наук, проф. (Інститут електродинаміки НАН України).

Автори: О.С. Бешта, О.О. Бешта, С.С. Худолій, Т.О. Халаїмов.

**Електричне** обладнання електромобілів. Лабораторний практикум : навч. посіб. У 3 ч. Ч. 3. Інвертор та електродвигун електромобіля / О.С. Бешта, О.О. Бешта, С.С. Худолій, Т.О. Халаїмов ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2026. – 157 с.

Зміст посібника відповідає програмі навчальної дисципліни «Управління енергією та оптимізація руху електромобіля», його підготовлено на базі освітнього курсу компанії Lucas-Nuelle та з погляду на можливість використання лабораторного стенда UniTrain.

Подано характеристику електричного обладнання і систем електропривода електромобілів, а також висвітлено практичні аспекти діагностування та виявлення несправностей, у таких системах.

Розраховано на здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей G3 Електрична інженерія та J8 Автомобільний транспорт.

**УДК 629.349-838:621.313.3**

© О.С. Бешта, О.О. Бешта,  
С.С. Худолій, Т.О. Халаїмов, 2026.

©НТУ «Дніпровська політехніка», 2026

## Зміст

Список умовних позначень .....	5
Передмова .....	7
Вступ.....	8
6. Лабораторна робота № 4. Інвертор.....	9
6.1. ТЕМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	9
6.2. МЕТА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ .....	9
6.3. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	9
6.3.1. Функції, призначення та будова інвертора електричного транспортного засобу.....	9
6.3.2. Перетворення напруги в інверторі DC/AC .....	12
6.3.3. Керування IGBT-транзисторами інвертора.....	17
6.3.4. Принцип роботи інвертора. Формування вихідної напруги.....	19
6.3.5. Регулювання частоти обертання двигуна та крутного моменту	21
6.4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	25
6.4.1. Частина № 1. Дослідження інвертора .....	25
6.5. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	31
6.6. ФОРМУВАННЯ ЗВІТУ .....	32
6.6.1. Вимоги до оформлення звіту .....	32
7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун.....	34
7.1. ТЕМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	34
7.2. МЕТА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ .....	34
7.3. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	34
7.3.1. Функції та призначення електродвигуна.....	34
7.3.2. Принцип дії електродвигуна .....	36
7.3.3. Ротор електродвигуна.....	39

7.3.4. Статор електродвигуна.....	40
7.3.5. Електромагнетизм .....	44
7.3.6. Обертальне поле електродвигуна.....	52
7.3.7. Синхронні двигуни.....	57
7.3.8. Асинхронні двигуни.....	65
7.3.9. Схеми з'єднання обмоток електродвигунів .....	69
7.3.10. Давач положення двигуна .....	74
7.3.11. Діагностика електродвигуна .....	76
7.3.12. Регенерація енергії .....	78
7.4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	89
7.4.1. Частина № 1. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.....	89
7.4.2. Частина № 2. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.....	109
7.4.3. Частина № 3. Діагностика електродвигуна .....	124
7.4.4. Частина № 4. Дослідження рекуперації енергії .....	142
7.4.5. Частина № 5. Тестування .....	146
7.5. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ.....	148
7.6. ФОРМУВАННЯ ЗВІТУ .....	150
7.6.1. Вимоги до оформлення звіту .....	151
Глосарій.....	152
Список використаних джерел .....	158

## Список умовних позначень

HV – висока напруга (High voltage)

DC – постійний струм (Direct current)

AC – змінний струм (Alternating current)

LN – назва компанії виробника Lucas-Nuelle

LS – назва комплектного програмного забезпечення LN LabSoft

ПЗ – програмне забезпечення

PC – персональний комп'ютер (Personal computer)

s – секунди (seconds)

EDCV – назва освітнього курсу компанії Lucas-Nuelle «Electric drive in cars, commercial vehicles and two-wheelers» («Електропривод у легкових і комерційних автомобілях та двоколісних транспортних засобах»)

DM – тяговий двигун (drive motor)

PCB – друкована плата (Printed Circuit Board)

MOS-FET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (транзистор)

HV – гібридні транспортні засоби (hybrid vehicles)

EV – електромобілі (electric vehicles)

Li-ion – літій-іонні акумуляторні батареї (lithium-ion batteries)

NiMH – нікель-метал-гідридні акумуляторні батареї (nickel-metal hydride batteries)

LiFePO<sub>4</sub> – літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї (lithium iron phosphate batteries)

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння (IC – internal combustion engines)

## Список умовних позначень

Li-iron – літій-залізні акумуляторні батареї

EMVs – електромоторні транспортні засоби. Ті, що використовують електродвигун як основне або допоміжне джерело руху (Electric Motor Vehicles)

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту (Personal Protective Equipment)

СТО – станція технічного обслуговування

ТМ – тяговий двигун (traction motor)

BMS – система керування енергією (Battery Management System)

SMR – головні системні реле (System main relays)

IGBT – ізольований транзистор з біполярним затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor)

PMSM – синхронний двигун з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motor)

SPM – ротор із зовнішнім розташуванням магнітів (Surface Permanent Magnets)

IPM – ротор із внутрішнім розташуванням магнітів (Interior Permanent Magnets)

RPM – оберти за хвилину (Revolutions Per Minute)

## Передмова

У сучасних умовах стрімкого розвитку технологій електричний привід в автомобілях та комерційних транспортних засобах стає важливою складовою інноваційного прогресу транспортної галузі.

Освітній курс UniTrain «Electric Drive in Cars, Commercial Vehicles and Two-Wheelers» («Електропривод у легкових і комерційних автомобілях та двоколісних транспортних засобах»), розроблений компанією Lucas Nuelle, було створено з метою забезпечення якісного навчання та глибокого розуміння будови електропривода сучасних електричних і гібридних транспортних засобів, а також розгляду питань діагностики та виявлення несправностей у системі електропривода.

Матеріал посібника адаптовано до змісту зазначеного курсу з метою використання в освітньо-професійних програмах «Електромобільність та енергетична інфраструктура» та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» підготовки здобувачів спеціальності G3 «Електрична інженерія» НТУ «Дніпровська політехніка» та J8 Автомобільний транспорт.

Посібник подає теоретичні відомості, які доповнюються виконанням практичних завдань на лабораторному стенді компанії Lucas-Nuelle, що дозволяє студентам глибше зрозуміти й застосувати набуті навички в умовах, наближених до реальних.

Посібник є третьою із трьох частин видання, у якому здобувачі вивчають інвертор та електродвигун електромобіля.

## Вступ

Посібник створено на базі матеріалів навчального курсу UniTrain course "Electric drive in cars, commercial vehicles and two-wheelers" компанії Lucas-Nuelle [1].

У посібнику розглянуто й практично закріплено такі питання:

— принцип роботи, будова та функції інвертора електричного транспортного засобу;

— матеріал для виконання лабораторної роботи з дослідження роботи інвертора;

— будова, складові частини та функції асинхронних і синхронних електродвигунів;

— рекуперація енергії;

— матеріал для виконання лабораторної роботи з дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів, виявлення їх типових несправностей та дослідження процесу рекуперації енергії.

## **6. Лабораторна робота № 4. Інвертор**

### **6.1. Тема лабораторної роботи**

«Дослідження функцій і призначення інвертора електричного транспортного засобу»

### **6.2. Мета лабораторної роботи**

1. Визначення функцій, призначення та складу інвертора електричного транспортного засобу.
2. Дослідження принципів перетворення напруги в інверторі (DC/AC) та формування вихідної напруги для живлення двигуна.
3. Визначення принципів роботи транзисторних ключів і послідовності їх увімкнення в типовій мостовій схемі.
4. Визначення змінних, що впливають на регулювання швидкості обертання та крутного моменту двигуна під час руху електромобіля.
5. Отримання практичних навичок із вимірювання вхідної та вихідної напруги інвертора на стенді LN.

### **6.3. Теоретична частина**

#### **6.3.1. Функції, призначення та будова інвертора електричного транспортного засобу**

Основна функція інвертора – перетворення постійної напруги (DC), що надходить від високовольтної акумуляторної батареї на трифазну змінну напругу (AC). Типове місце розташування інвертора

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

в системі електропривода електричного транспортного засобу зображено на Рис. 7.1.

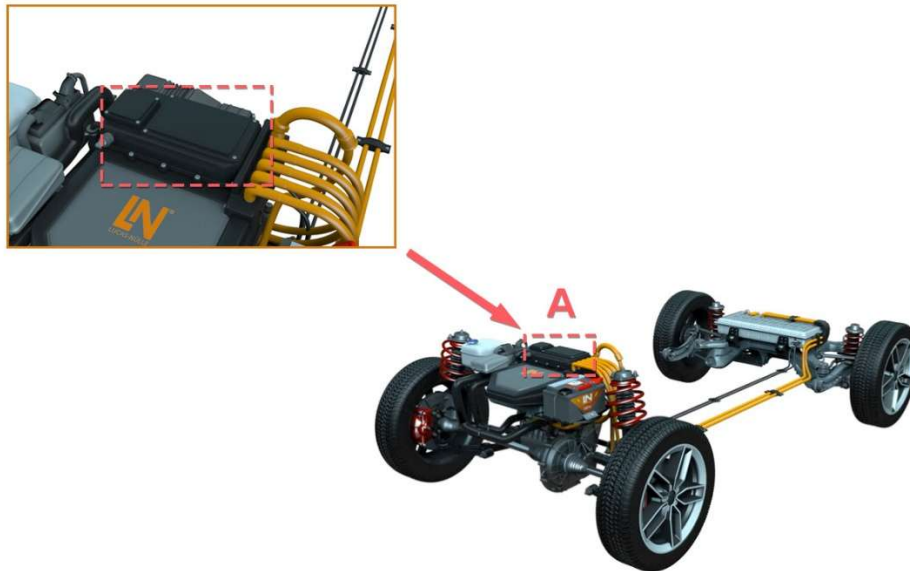


Рис. 7.1. Типове місце розташування інвертора (А) в електричному транспортному засобі

Інвертор складається із трьох мостових гілок (three bridge branches), кожна з яких складається із двох IGBT (силових **напівпровідникових/транзисторів** (semiconductors/transistors)) і двох діодів (diodes).

Проміжний ланцюг  $U_z$  (Рис. 7.2) – це електричний ланцюг, від якого напруга подається на силові напівпровідники.

Інвертор перетворює вхідну напругу, що надходить із проміжного ланцюга, у трифазну пульсуючу (three-phase, pulsating) за рахунок активації IGBT-ключів у певній послідовності. У результаті

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

чого струм має приблизно синусоїдальну форму, чого достатньо для здійснення безперебійної роботи електродвигуна.

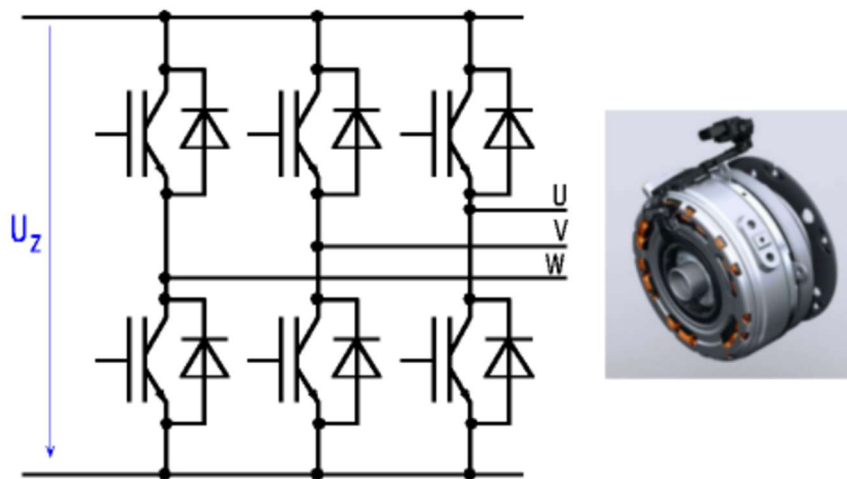


Рис. 7.2. Схема живлення інвертора

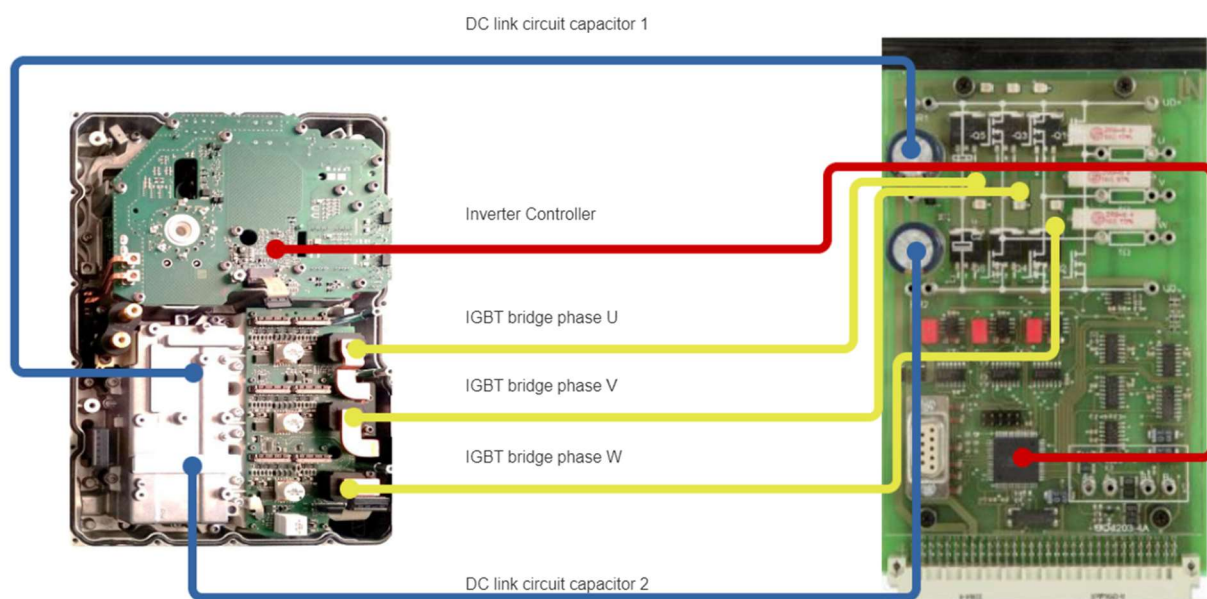


Рис. 7.3. Складові частини типового інвертора електричного транспортного засобу

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

На Рис. 7.3 можна побачити склад типового інвертора електричного транспортного засобу та встановити відповідність його складових частин модуля «Трифазний інвертор» стенда LN.

Типовий склад інвертора електромобіля:

1. Два конденсатори ланки постійного струму (DC Link circuit capacitor 1).
2. Контролер інвертора (Inverter Controller).
3. Силові мости IGBT на кожен із 3-х фаз U,V,W (IGBT bridge phase U,V,W).

Для більш детального ознайомлення зі складом інвертора необхідно скористатися плеєром перегляду на сторінці LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Inverter >> Set-up.

### 6.3.2. Перетворення напруги в інверторі DC/AC

Для більш детального ознайомлення із принципом перетворення напруги з постійної (DC або Digital) на змінну (AC або Analog) необхідно переглянути анімацію (Рис. 7.4) на сторінці LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Inverter >> DC/AC conversion. Дана анімація демонструє основний принцип роботи ШІМ (широтно-імпульсна модуляція), що являє собою метод регулювання вихідної напруги інвертора шляхом зміни ширини імпульсів постійної частоти для перетворення постійного струму (DC) у змінний (AC).

Як видно з анімації, значення фактичної вихідної напруги залежить від часу увімкнення імпульсу (pulse). Чим довше триває імпульс, тим вище напруга. Для живлення електродвигуна операція

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

перемикання повинна відбуватися приблизно 30 000 разів на секунду, що є необхідним для імітації дуже плавного сигналу змінного струму.

У Таблиця 7.1 показано процес генерації змінної напруги та струму на прикладі спрощеної однофазної схеми з перемикачами (S1–S2). Однак реальний контролер двигуна електричного транспортного засобу має 3 фази й IGBT-транзистори (замість перемикачів), що використовуються для виконання операцій комутації ланцюгів. Резистор R3 виступає у схемі в ролі навантаження, імітуючи обмотку однієї фази у статорі двигуна.

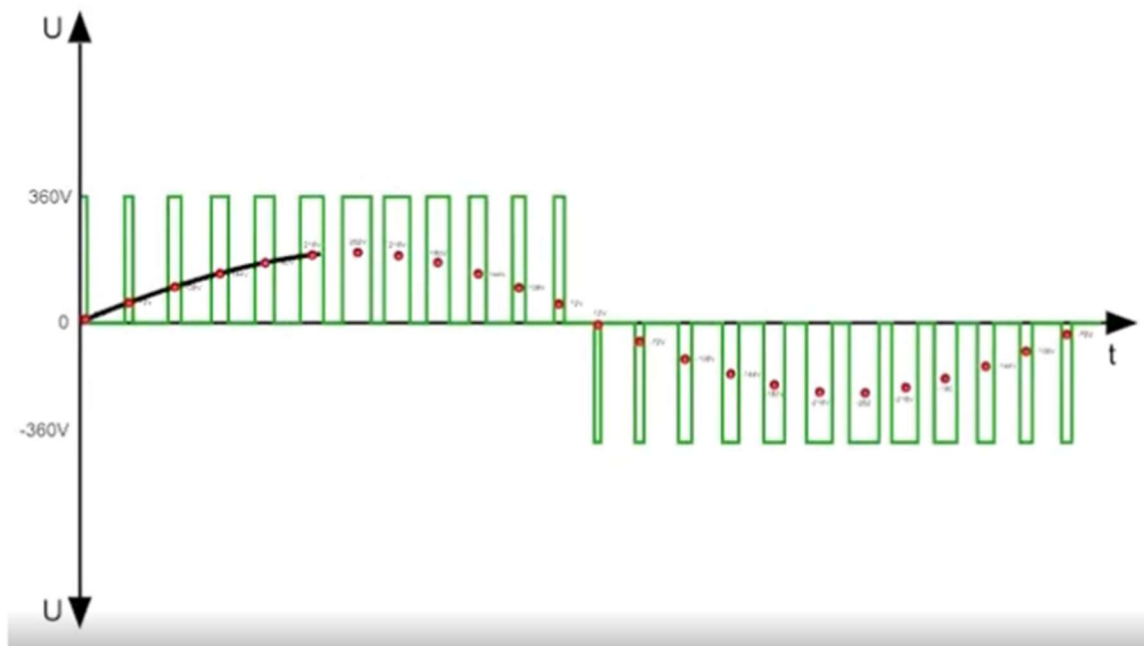
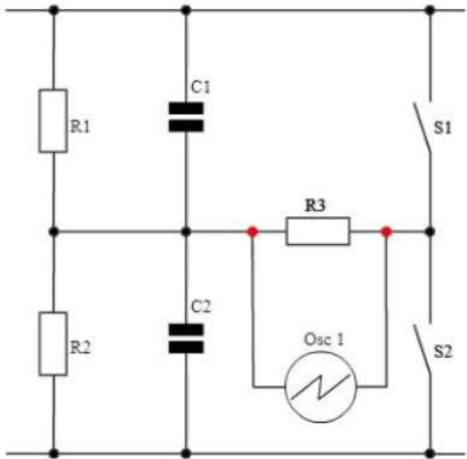
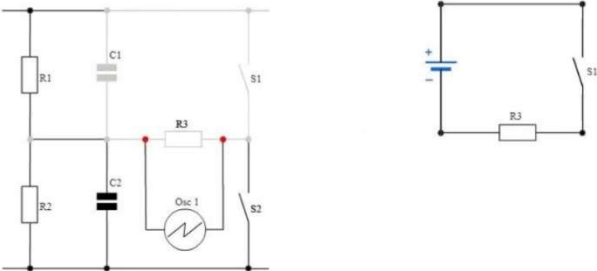


Рис. 7.4. Перетворення постійної напруги на змінну засобами ШІМ

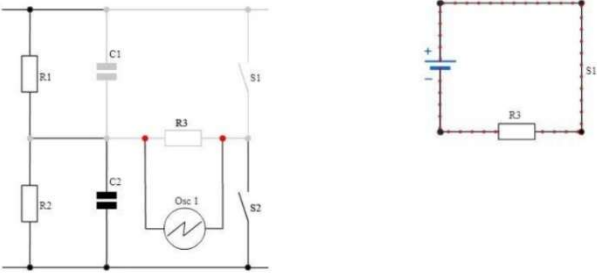
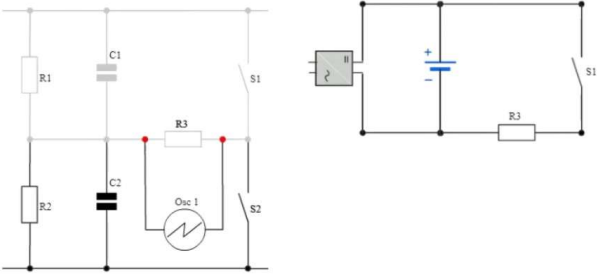
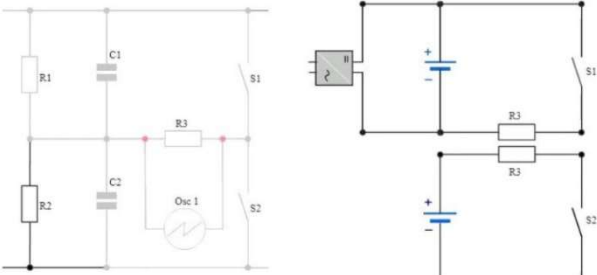
## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Таблиця 7.1. Процес генерації змінної напруги та струму в однофазній схемі

№	Схема	Пояснення
1		<p>У лівій частині ланцюга є лише ділянка напруги, який представлений двома резисторами R1 і R2 з однаковим номіналом, що з'єднані послідовно. Якщо на ланцюг подається напруга 15 В, напруга на середній точці ділянки дорівнює 7.5 В. У цьому прикладі R3 являє собою одну фазу статора двигуна</p>
<p>Для більш простого сприйняття схема розділена на кілька ланок</p>		
2		<p>У даній ланці конденсатор C1 у вихідному ланцюзі розглядається як джерело напруги, так що ланцюг можна представити як розімкнений перемикачем S1</p>

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

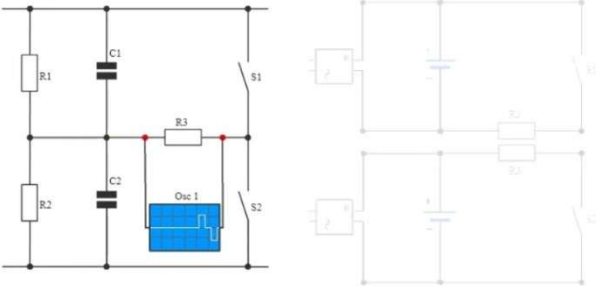
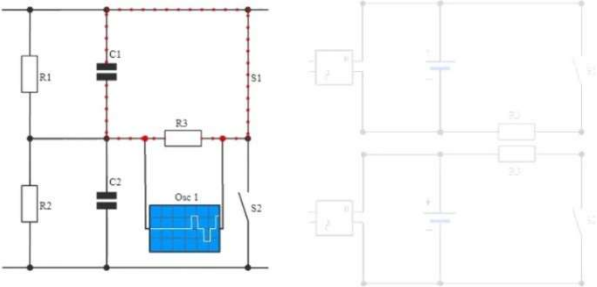
Продовження таблиці 7.1.

№	Схема	Пояснення
3		<p>У момент замикання перемикача S1 струм починає протікати через навантаження (резистор) R3. Напрямок протікання струму через навантаження – справа наліво</p>
4		<p>Для роботи схеми без обмежень часу необхідно подати зовнішнє живлення за допомогою зарядного пристрою (charger)</p>
5		<p>Нижню секцію схеми також можна представити у вигляді розімкнутого ланцюга перемикачем S2</p>

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Продовження таблиці 7.1.

№	Схема	Пояснення
6		<p>У момент замикання перемикача S2 струм починає протікати через навантаження R3 – зліва направо</p>
7		<p>Для роботи схеми без обмежень часу необхідно подати зовнішнє живлення на другу ланку за допомогою зарядного пристрою (charger)</p>
8		<p>Виконуючи послідовне перемикання ключів S1 і S2 та вимірюючи падіння напруги на резисторі R1, можна спостерігати формування змінної напруги. У даному випадку формується від'ємна частина (меандр) замиканням перемикача S2</p>

№	Схема	Пояснення
9		<p>Формування нульової точки. Перемикачі S1 і S2 розімкнені</p>
10		<p>У даному випадку формується додатна частина (меандр) замиканням перемикача S1</p>

### 6.3.3. Керування IGBT-транзисторами інвертора

У блоках управління потужністю (power control units) у вихідних каскадах (output stages) зазвичай використовуються біполярні транзистори з ізольованими затворами – IGBT. Вони являють собою електронні напівпровідникові компоненти, в яких польовий транзистор (FET – field effect transistor) активує біполярний транзистор. Управління транзисторами здійснюється через центральний процесор (ЦП або CPU – central processing unit).

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Переваги застосування IGBT-транзисторів:

1. Низький опір у прямому напрямку, аналогічний біполярним транзисторам.
2. Низькі втрати потужності провідного стану.
3. Практично відсутні втрати потужності у фактичному стані (actual state).
4. Практично не потрібен струм для керування затвором.

Головний недолік IGBT-транзисторів полягає в обмеженні можливості блокування протікання струму у зворотному напрямку, тому разом з ними до схеми зазвичай включаються діоди вільного ходу (diodes with brief shutdown) з коротким часом відключення.

Ланка постійного струму, що є джерелом живлення для IGBT-транзисторів, є виходом перетворювача постійного струму (DC/DC). Щоб відстежити напрямок протікання струму від джерела живлення через IGBT-транзистори (Рис. 7.5) до формування синусоїдальної напруги для живлення двигуна, слід переглянути анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Inverter >> DC/AC conversion >> Controlling the inverter transistors.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

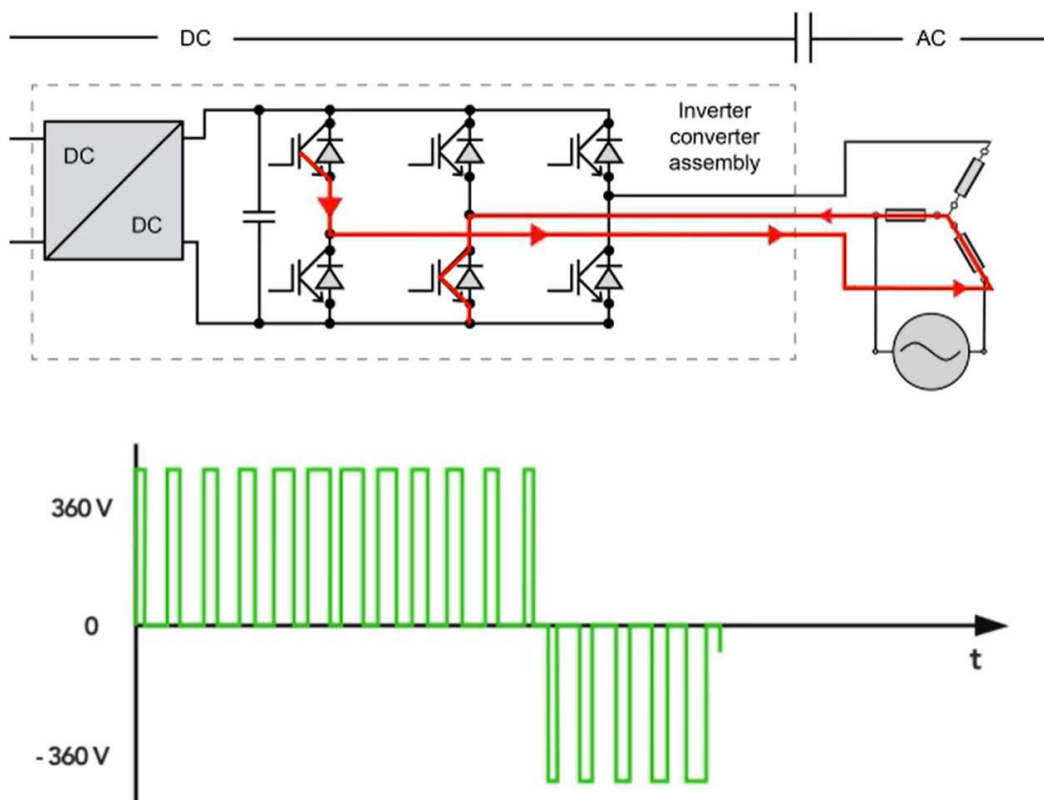


Рис. 7.5. Напрямок протікання струму через IGBT-транзистори для формування синусоїдального сигналу

### 6.3.4. Принцип роботи інвертора. Формування вихідної напруги

За рахунок розширення однофазної системи (Таблиця 7.1) до трьох напівмостів (half bridges) можна отримати трифазну систему. Найпростіший варіант схеми тут включає трифазне регулювання частоти (frequency control) або блокування комутації (block commutation). Три напівмости (half bridges) імітують трифазну систему, де кожен напівміст відповідає за одну фазу. Три фази зміщені на кут  $120^\circ$  або  $240^\circ$ . На Рис. 7.6 зображена послідовність перемикання транзисторів для формування трифазної системи напруг у випадку симетричного (збалансованого) навантаження.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

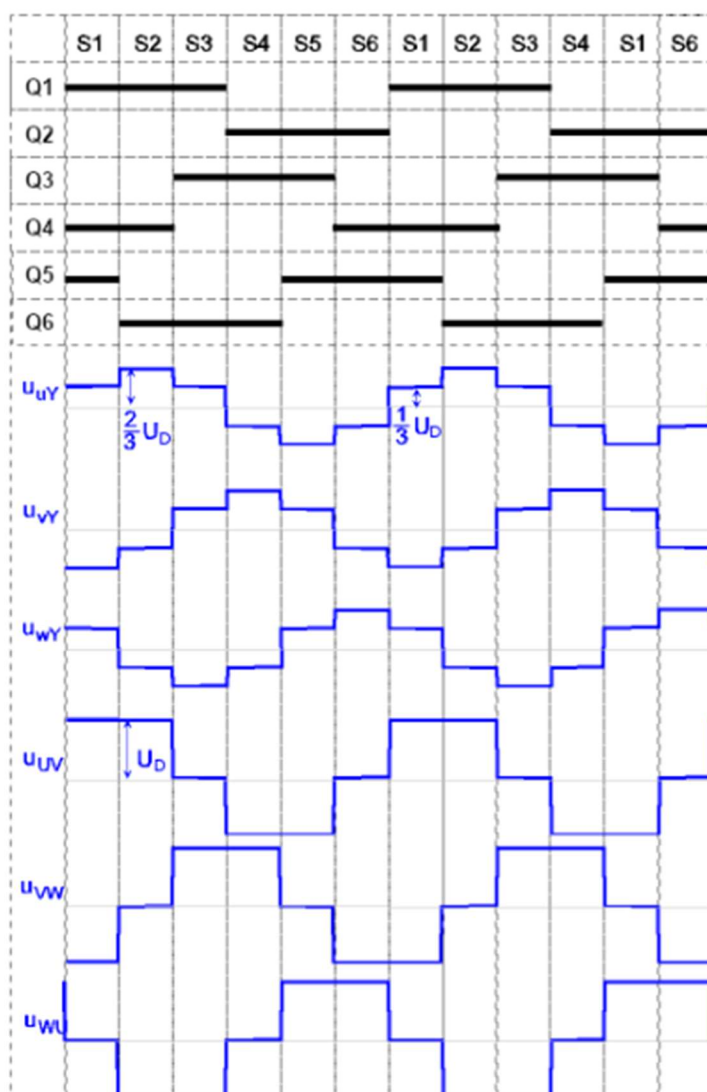
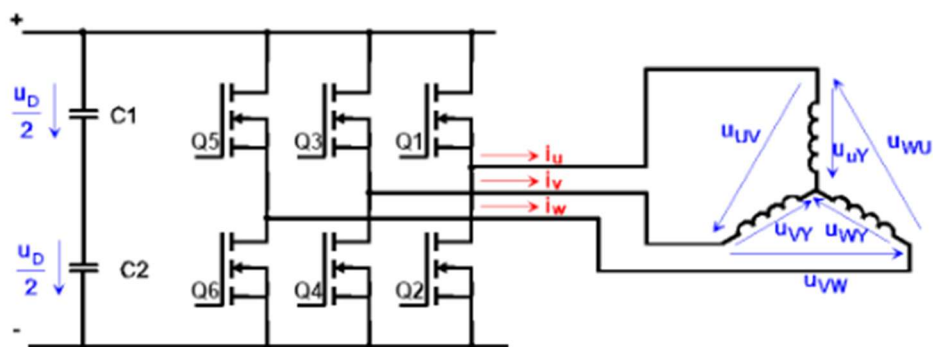


Рис. 7.6. Послідовність перемикання транзисторів для формування трифазної системи напруг у випадку симетричного (збалансованого) навантаження

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

### 6.3.5. Регулювання частоти обертання двигуна та крутного моменту

Для дослідження перехідних процесів, що виникають в одній із фаз двигуна змінного струму електричного транспортного засобу, необхідно виконати «запуск» електромобіля за допомогою інтерактивного вікна в LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Inverter >> DC/AC conversion >> Motor speed and torque control. Дане вікно має наступні елементи: вікно осцилографа, показчик поточного режиму руху (розгін (Acceleration), рух накатом (Coasting), гальмування (Deceleration)), спідометр, педалі (педаля газу (Accelerator pedal), педаль гальма (Brake pedal), кнопка Start/Stop.

Виконавши запуск системи за допомогою кнопки «Start/Stop», можна побачити зміни показів осцилографа, що підключений до гібридного автомобіля MG2 Toyota Prius 3-го покоління. Автомобіль на відео розганяється від 0 до 50 км/год і гальмує, повертаючись назад до 0 км/год. За допомогою Таблиця 7.2 можна відслідкувати повний процес від розгону до повного гальмування системи.

Проаналізувавши дані із Таблиця 7.2 і подивившись анімацію в LS, можна відмітити, що для керування швидкістю обертання двигуна та, як наслідок, зміни швидкості транспортного засобу, існують дві основні змінні:


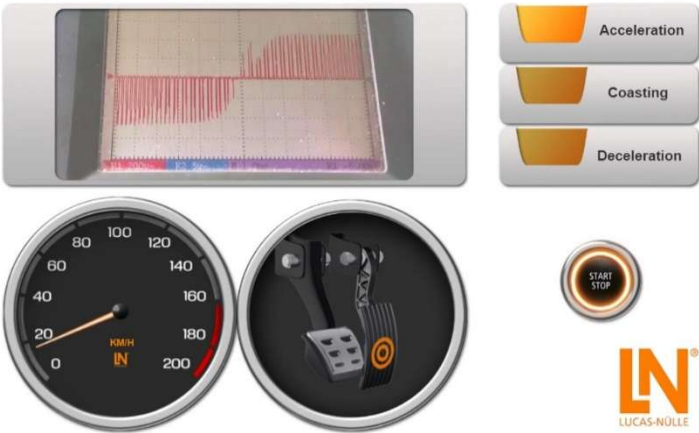
1. Частота напруги живлення. Зміною частоти можна досягти збільшення або зменшення частоти обертання двигуна.
2. Амплітуда напруги живлення. Змінюючи амплітуду, можна досягти збільшення або зменшення значення крутного моменту двигуна. У випадку, коли автомобіль рухається накатом,

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

амплітуда напруги складає близько 200 В (у даному випадку значення напруги акумуляторної батареї). При розгоні інвертор збільшує амплітуду до рівня 600 В.

Швидкість зміни значень обох змінних залежить від необхідної динаміки розгону, що задає водій інтенсивністю натискання на педаль газу (Acceleration)

Таблиця 7.2. Показники осцилографа під час руху гібрида MG2 Toyota Prius 3-го покоління

№	Схема	Пояснення
1		<p>Момент запуску системи натисканням кнопки «Start/Stop»</p>
2		<p>Натискання педалі газу (Acceleration). Розгін автомобіля до швидкості приблизно 18 км/год</p>

Продовження таблиці 7.2.

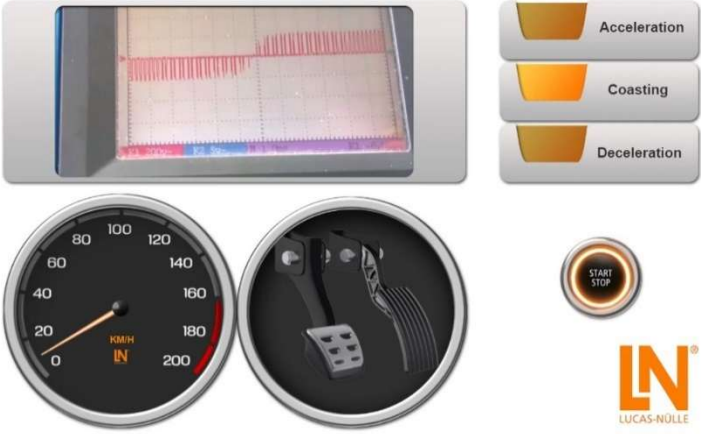
№	Схема	Пояснення
3		<p>Продовження розгону зі збільшенням швидкості до 35 км/год. На екрані осцилографа видно, що при збільшенні швидкості змінюються частота (по осі X) й амплітуда напруги живлення (вісь Y). Одна поділка шкали осцилографа дорівнює напрузі 200 В</p>
4		<p>Розгін до максимальної швидкості – 50 км/год. Спостерігаємо збільшення частоти й амплітуди напруги живлення. Далі відбувається перехід до руху накатом. Педаль газу відпущена</p>

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Продовження таблиці 7.2.

№	Схема	Пояснення
5		<p>При русі накатом разом зі швидкістю зменшуються частота й амплітуда напруги живлення</p>
6		<p>Момент натискання педалі гальма (Brake pedal). Спостерігаємо стрімке зниження частоти й амплітуди напруги живлення</p>
7		<p>Гальмування до швидкості 22 км/год. Спостерігаємо аналогічні процеси</p>

Продовження таблиці 7.2.

№	Схема	Пояснення
8		<p>Момент відпускання педалі гальма (Brake pedal). Рух накатом з поступовим зниженням швидкості до мінімальної</p>

## 6.4. Порядок виконання лабораторних робіт

### 6.4.1. Частина № 1. Дослідження інвертора

Перед виконанням даної частини лабораторної роботи необхідно ознайомитись із теоретичною частиною, що викладена в пунктах 7.3.1–7.3.5. Для безпосереднього виконання лабораторної роботи на стенді LN необхідно відкрити LS і перейти на сторінку виконання експерименту за наступною адресою: EDCV >> Inverter >> DC/AC conversion >> Measuring the input voltage.

#### 6.4.1.1. Експеримент № 1. Вимірювання вхідної напруги інвертора

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 7.7). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

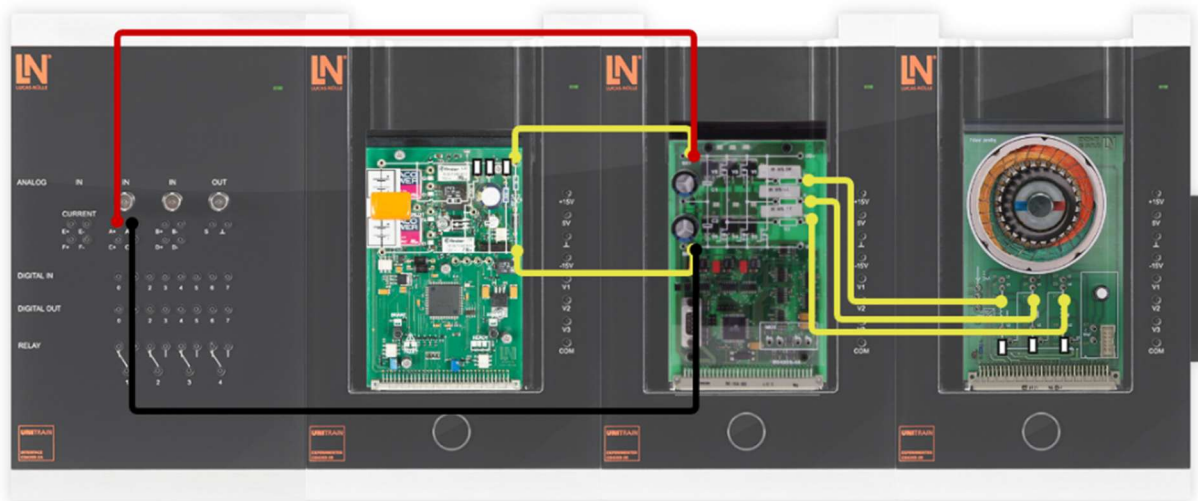


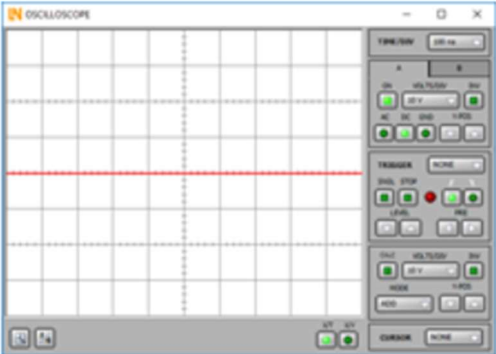
Рис. 7.7. Дослідження інвертора. Фінальна конфігурація схеми для вимірювання входної напруги інвертора експерименту № 1

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний осцилограф («OSCILLOSCOPE»), скориставшись указівками із Таблиця 7.3.

Відкрити віртуальний осцилограф можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Таблиця 7.3. Налаштування параметрів віртуального осцилографа

	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Channel A: 10 V/div; DC; Y-POS: 0</li><li>▪ Channel B: OFF/div; ; Y-POS:</li><li>▪ Time: 500 ms/div</li><li>▪ Mode: X-T</li><li>▪ Trigger: CHANNEL OFF; LEVEL: div; PRETRIGGER: div</li></ul>
---	---

Після налаштування віртуального осцилографа для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно осцилографа відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Зафіксувати показники осцилографа, створивши скріншот або скориставшись спеціальним вікном у LS, на сторінці поточного експерименту, натиснувши кнопку «Paste from clipboard».

### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Яка найвища вхідна напруга була зафіксована на інверторі?
  - а. найвища вхідна напруга на інверторі склала \_\_\_ В.
2. Який тип вимірюваної напруги?
  - а. постійна напруга (DC);
  - б. змінна напруга (AC).

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

### 6.4.1.2. Експеримент № 2. Вимірювання вихідної напруги інвертора

Для виконання даного експерименту на стенді LN необхідно відкрити LS і перейти на сторінку його виконання за наступною адресою: EDCV >> Inverter >> DC/AC conversion >> Measuring the output voltage.

Для проведення вимірювань необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 7.8). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на поточній сторінці експерименту в LS.

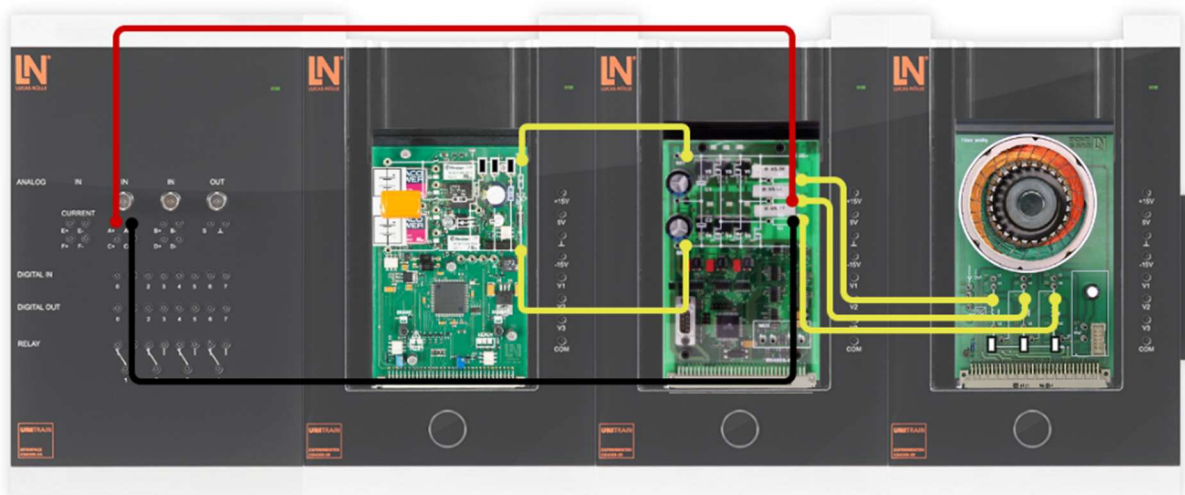


Рис. 7.8. Дослідження інвертора. Фінальна конфігурація схеми для вимірювання вихідної напруги інвертора експерименту № 2

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний осцилограф («OSCILLOSCOPE»), скориставшись указівками із Таблиця 7.3.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

Відкрити віртуальний осцилограф можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального осцилографа для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно осцилографа відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Відкрити інструмент «Inverter Control» на панелі віртуальних приладів (вкладка «Additional») або натиснувши на його зображення на сторінці експерименту в LS (Рис. 7.9).
4. Запустити інвертор кнопкою «Power» (Рис. 7.9) і по черзі натискати перемикачі поруч із першою парою транзисторів. Спостерігати напругу на осцилографі.
5. Увімкнути функцію «Auto» у вікні керування інвертором. Спостерігати зміни на екрані осцилографа.
6. Зафіксувати показники осцилографа, створивши скріншот або скориставшись спеціальним вікном у LS, на сторінці поточного експерименту, натиснувши кнопку «Paste from clipboard»

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

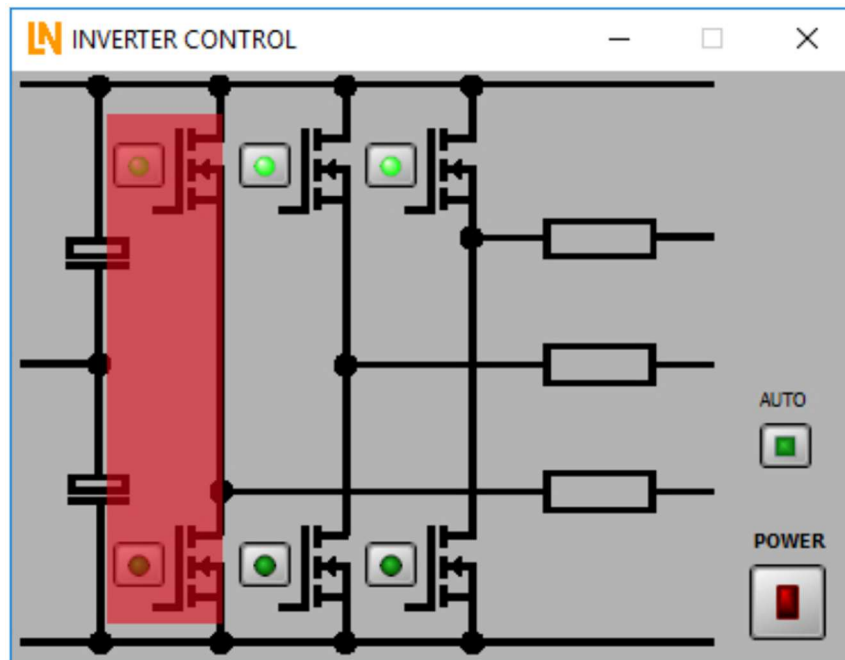


Рис. 7.9. Вікно керування інвертором «Inverter Control»

### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Чому дорівнює значення «позитивної» напруги на виході інвертора?
  - а. значення «позитивної» напруги складає \_\_\_.
2. Чому дорівнює значення «негативної» напруги на виході інвертора?
  - а. значення «негативної» напруги складає \_\_\_.
3. Який час транзистор залишається відкритим (transistor conductive)?
  - а. транзистор залишається відкритим протягом \_\_\_ms.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

### 6.4.1.3. Тест № 1. Дослідження інвертора

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яке призначення має інвертор?
  - a. постійна напруга, що подається від високовольтної батареї, згладжується в інверторі;
  - b. інвертор перетворює змінну напругу, що подається від високовольтної батареї, у трифазну постійну напругу;
  - c. інвертор перетворює постійну напругу, що подається від високовольтної батареї, у трифазну змінну напругу.
2. Яким чином зміна частоти інвертора впливає на управління двигуном?
  - a. швидкість обертання двигуна змінюється із частотою;
  - b. швидкість обертання двигуна завжди залишається незмінною.
3. Яким чином впливає зміна амплітуди рівня вхідної напруги в інверторі на управління двигуном?
  - a. швидкість обертання двигуна змінюється зі зміною амплітуди;
  - b. амплітуда використовується для збільшення або зменшення величини крутного моменту.

### 6.5. Контрольні питання

1. Яке призначення інвертора в електричному транспортному засобі?
2. Які типи ключів використовуються в сучасних автомобільних інверторах та у чому їх переваги?
3. Яка кількість транзисторних напівмостів є достатньою для роботи двигуна змінного струму?

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

4. Яким чином відбувається перетворення постійної напруги від акумуляторної батареї електромобіля на змінну?
5. Яким чином впливає час відкриття ключа на значення середньої напруги в конкретний момент часу?
6. Яким чином можна сформувати АС напругу для однієї фази двигуна?
7. Який додатковий елемент встановлюється в парі з IGBT-транзисторами у схемі інвертора?
8. На який кут зміщені фази у трифазній системі живлення двигуна електромобіля?
9. Як змінюється форма напруги живлення двигуна під час розгону, гальмування й руху накатом в електричному транспортному засобі?
10. Зміна якого параметра напруги живлення впливає на збільшення крутного моменту електромобіля?
11. Чи дорівнює максимальна вихідна напруга інвертора напрузі акумуляторної батареї електромобіля?

### 6.6. Формування звіту

Кожен здобувач повинен отримати допуск до захисту роботи шляхом особистого або групового виконання лабораторної роботи № 4 за стендом Lucas-Nuelle та формування звіту.

## 6. Лабораторна робота № 4. Інвертор

### 6.6.1. Вимоги до оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи формується з використанням універсального інтерактивного шаблону у форматі PDF, що надається викладачем.

Шаблон містить текстові поля та поля для вставлення зображень, що забезпечує послідовне структурування звіту за результатами проведених експериментів, а також для надання відповідей на контрольні запитання.

Зміст і структура звіту визначаються формою наданого PDF-шаблону. Під час виконання лабораторної роботи здобувач вищої освіти повинен фіксувати процес виконання на фото для подальшого додавання відповідних матеріалів до звіту.

Звіт подається викладачу у друкованому або електронному вигляді (способи подання є рівноцінними). Надсилати електронний звіт здобувач повинен виключно із власної корпоративної пошти Outlook на корпоративну пошту викладача, який проводить курс лабораторних робіт. Формуючи лист, здобувач повинен обов'язково вказати тему листа, що має наступні складові: «Лабораторна робота № 1, «Назва дисципліни (аббревіатура)», «Прізвище та ініціали здобувача», «номер академічної групи». Лист повинен бути складений в офіційно-діловому стилі й містити чіткий опис суті звернення. Зокрема, це може бути: звіт для перевірки, питання щодо виконання лабораторної роботи (із детальним описом питання), повторна подача звіту, технічне питання тощо.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.1. Тема лабораторної роботи

«Дослідження функцій і призначення електродвигуна в електричних транспортних засобах»

### 7.2. Мета лабораторної роботи

1. Визначення функцій, призначення та принципу дії електродвигуна в електромобілях.
2. Дослідження будови асинхронних і синхронних електродвигунів.
3. Визначення відмінностей у способах підключення обмоток електродвигунів.
4. Визначення способів вимірювання швидкості й положення ротора електродвигуна.
5. Дослідження типових несправностей, що виникають в електродвигунах, та способів їх діагностики.
6. Дослідження питання рекуперації енергії в електромобілях.
7. Отримання практичних навичок вимірювань і діагностики систем, що пов'язані з електродвигунами на стенді LN.

### 7.3. Теоретична частина

#### 7.3.1. Функції та призначення електродвигуна

Електродвигун — це пристрій, який перетворює електричну енергію в механічну роботу на основі взаємодії магнітного поля й електричного струму в обмотках, що створює обертальний рух ротора. Основна функція електродвигуна в електромобілі полягає в

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

перетворенні електричної енергії, що зберігається в батареї, у механічну енергію, необхідну для руху транспортного засобу. Електродвигун приводить у дію колеса автомобіля, забезпечуючи плавне й ефективне прискорення, а також можливість рекуперативного гальмування, що дозволяє відновлювати частину енергії під час гальмування та зберігати її в батареї.

Типове місце розташування електродвигуна в системі електропривода електричного транспортного засобу зображено на Рис. 8.1.

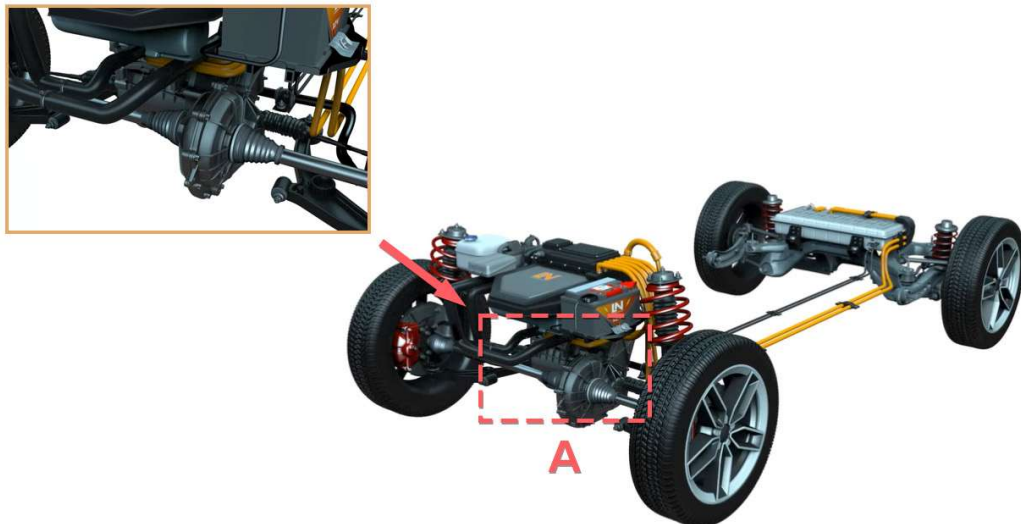


Рис. 8.1. Типове місце розташування двигуна (А) в електричному транспортному засобі

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.3.2. Принцип дії електродвигуна

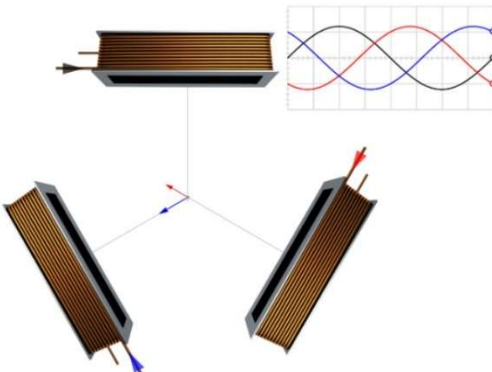
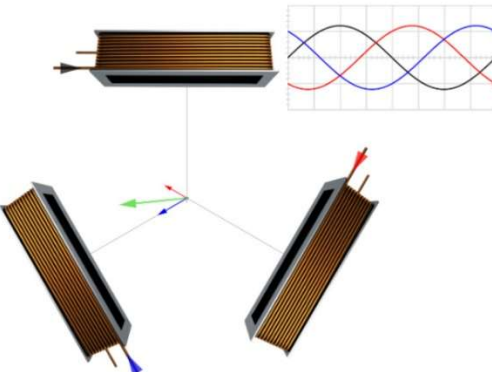
Для обертання трифазного двигуна необхідно, щоб у його статорі утворювалось обертальне магнітне поле, що досягається шляхом живлення обмоток статора трифазною змінною напругою. Струм, проходячи через обмотку кожної із фаз, створює змінні магнітні поля, що зсунуті один відносно одного на кут 120 градусів. У результаті взаємодії цих полів утворюється обертальне магнітне поле, що впливає на ротор двигуна, змушуючи його обертатися.

Для більш детального поетапного відстежування принципу роботи електродвигуна необхідно скористатися плеєром у LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Function. Даний процес також можна відслідкувати, скориставшись Таблиця 8.1.

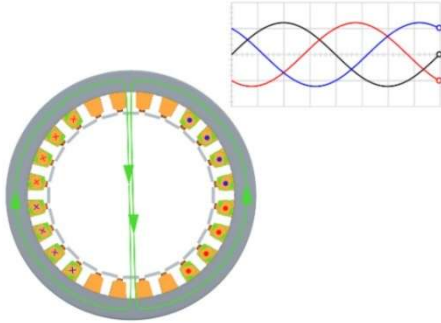
Таблиця 8.1. Принцип роботи електродвигуна

№	Зображення	Пояснення
1		Загальний вигляд статора електродвигуна змінного струму

№	Зображення	Пояснення
Обмотки статора електродвигуна		
2	 <p>The diagram shows a cylindrical stator winding with two electrical leads. To its right is a graph of a sine wave on a grid, representing the current flowing through the winding. A vertical arrow points downwards from the winding, indicating the direction of the magnetic field vector.</p>	<p>Через одну з котушок (обмоток) статора протікає синусоїдальний струм. У результаті чого утворюються магнітний потік і магніторушійна сила, що пропорційні струму. Сила магнітного поля при цьому також змінюється синусоїдально. Амплітуда й напрямок магнітного поля позначені тут за допомогою вектора, що постійно змінює свою довжину, але зберігає положення. Знак поля вказується напрямком вектора</p>
3	 <p>The diagram shows two stator windings. The first is horizontal with a black sine wave graph. The second is tilted at an angle with a red sine wave graph. A 3D perspective view of the second winding is shown below, with a red arrow indicating its orientation. A vertical arrow points downwards from the first winding, and a red arrow points downwards from the second winding.</p>	<p>Фаза струму, що протікає через другу котушку (червоний вектор), зсунута на <math>120^\circ</math> електричних градусів відносно фази струму в першій котушці. Однак друга котушка також розташована під кутом <math>120^\circ</math> у просторі по відношенню до першої. Вектор магнітного поля, що генерується другою котушкою, також зсунений на <math>120^\circ</math> відносно вектора першої котушки. Оскільки котушка сама по собі орієнтована під цим кутом, положення вектора, що представляє магнітне поле, також повернуте на <math>120^\circ</math></p>

№	Зображення	Пояснення
4		<p>Фаза струму третьої котушки відстає на <math>240^\circ</math> від фази першої. Третя котушка розташована під кутом <math>240^\circ</math>, у просторі, відносно першої. Вектор, що представляє магнітне поле, створене третьою котушкою, змінюється із фазовим зсувом на <math>240^\circ</math> відносно вектора, створеного першою котушкою. Оскільки котушка розташована під цим кутом, положення вектора, що представляє магнітне поле, також обертається під кутом <math>240^\circ</math>. У результаті маємо три окремих вектори, що змінюють свою довжину, але не змінюють своє положення</p>
5		<p>Три магнітні поля накладаються всередині статора та складаються в одне загальне магнітне поле. Результируючий вектор, що представляє це загальне магнітне поле, завжди зберігає однакову довжину, але його положення у просторі змінюється. Таким чином, утворюється обертальне магнітне поле</p>

Продовження таблиці 8.1.

№	Зображення	Пояснення
6	 <p>The diagram shows a cross-section of a stator core with multiple windings. A green arrow indicates the direction of the magnetic field. To the right, a vector diagram shows three sinusoidal waveforms (red, blue, and black) representing the magnetic fields of the individual windings, which are summed to form a single resultant magnetic field.</p>	<p>Таким чином, кожна обмотка генерує змінне магнітне поле, що відображено векторами. Результуюче поле, що утворюється внаслідок векторного додавання полів окремих обмоток, обертається за годинниковою стрілкою. Це поле проходить через ламіновані пластини сердечника статора У точці, де магнітні силові лінії накладаються, результуюче поле виходить із ламінованих пластин сердечника статора і проходить через ротор. Магнітні силові лінії повертаються в сердечник статора точно навпроти точки, де вони виходили із нього</p>

### 7.3.3. Ротор електродвигуна

Ротор є обертальною частиною електродвигуна, що взаємодіє з магнітним полем статора, перетворюючи електричну енергію в механічну. Ротор може бути короткозамкненим, містити обмотки або магніти, що розташовані на його валу, який обертається всередині статора. Ротор створює обертальний момент завдяки індукції електричних струмів або магнітних полів, що виникають у відповідь на змінне магнітне поле статора, який у подальшому передається на робочий орган механізму. Конструкція й тип ротора визначають ефективність і характеристики електродвигуна (трифазної машини).

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Ротори бувають декількох видів:

1. З обмотками й без (With and without windings).
2. З контактними кільцями й без (With and without slip-rings).
3. Короткозамкненим ротором (Біляча клітка (Squirrel-cage rotor)).
4. З постійними магнітами (Permanent magnet).

У лабораторній установці LN використовуються три види роторів: ротор із постійними магнітами, короткозамкнений ротор, ротор з обмоткою (Coil-winding rotor). Їх зовнішній вигляд показано на Рис. 8.2.

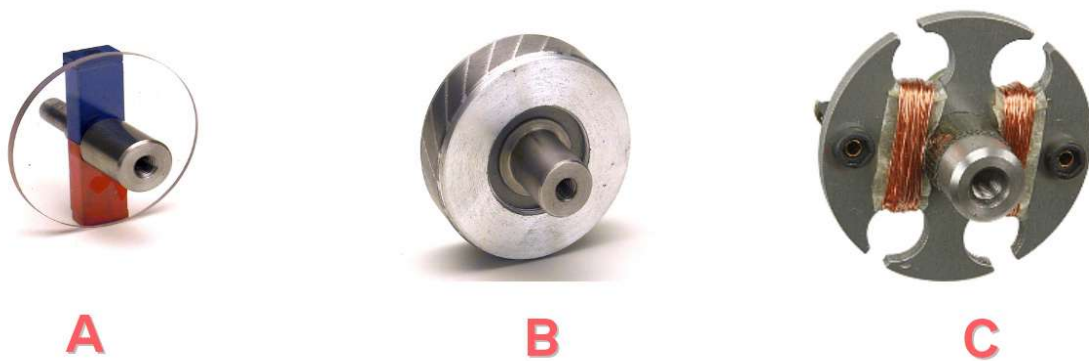


Рис. 8.2. Ротори, що використовуються в навчальному стенді LN: А – ротор із постійними магнітами (Permanent magnet rotor); В – короткозамкнений ротор (біляча клітка (Squirrel-cage rotor)); С – ротор з обмоткою (Coil-winding rotor)

### 7.3.4. Статор електродвигуна

Статор електродвигуна – нерухома частина електричної машини, що містить обмотки, через які проходить змінний струм, утворюючи магнітне поле. Це магнітне поле взаємодіє з ротором, викликаючи його

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

обертання. Статор, зазвичай, складається з ламінованих сталевих пластин, що знижують втрати на вихрові струми.

Статор станда LN модуля «Двигун» містить 24 полюсні деталі (pole pieces) й канавки (grooves), що виготовлені зі штампованого листового металу (stamped sheet metal), який зварений разом, утворюючи сердечник статора (stator core). Обмотки виконуються з мідного дроту, що вкладається у спеціальні пази (Рис. 8.3). Обмотки мають кольорове маркування (Рис. 8.4) зеленим, червоним і прозорим лаком. Обмотки (windings) та листовий метал (sheet metal) інтегровані в корпус статора, що часто також оснащений ребрами охолодження для кращого розсіювання тепла.

У центрі статора встановлена обойма на кулькопідшипниках (ball-bearing race), що підтримує ротор. У машинах промислового типу ротори підтримуються кулькопідшипниками із двох сторін.



Рис. 8.3. Магнітопровід статора

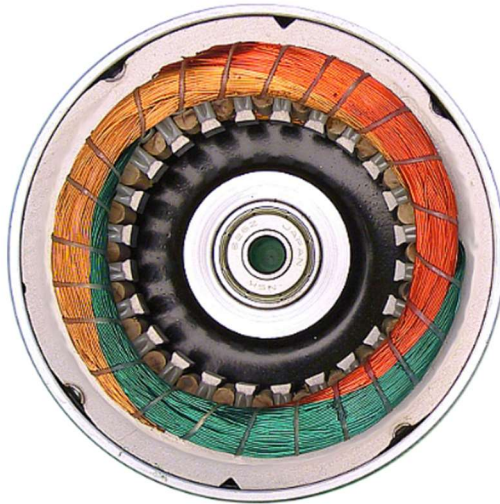


Рис. 8.4. Зовнішній вигляд статора модуля «Двигун»

Зображення, вид зверху, залізного осердя статора демонструє, як розміщуються три обмотки у статорі (Рис. 8.5). Обмотки розташовані у шаховому порядку в металевих пазах (metal grooves). Для їх укладання необхідно  $2 \times 4$  паза (по 4 з кожної сторони).

Кожна з обмоток фаз являє собою котушку, кожна з яких має один початок і кінець. Для утворення магнітного поля важливі лише частини обмотки, що знаходяться в металевих пазах магнітопроводу, позначені точкою (початок обмотки) або хрестом (кінець обмотки) (Рис. 8.5). Дроти, що зображені вигнутими лініями, які проходять через центральну частину статора, зазвичай, не показуються на схемах розгортки обмоток статора (петльової обмотки), а зображують лише початок і кінці провідників.

Оскільки розташування обмоток у статорі, що проходять через його центральну частину, неможливе через наявність ротора, необхідно звільнити простір у середині. Для цього збільшується вигин і довжина обмоток з метою їх вкладання уздовж верхньої й нижньої

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

частин залізного осердя статора. Випираючі залишки обмотки, утворені окремими проводами, називають виступаючими витками обмоток. На Рис. 8.4 можна впізнати виступаючі витки обмоток експериментального двигуна модуля «Двигун» за трьома зв'язаними пучками мідних проводів різних кольорів.

Для візуального відстежування процесу вкладання обмоток у статорі, слід подивитись анімацію зі схемою вкладання витків (Рис. 8.6), відкривши сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Stator >> Stator winding set-up.

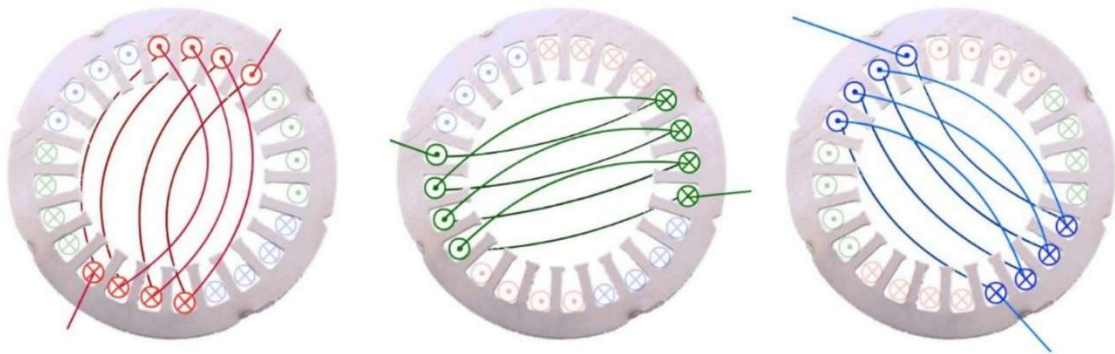


Рис. 8.5. Розміщення (вкладання) обмоток статора

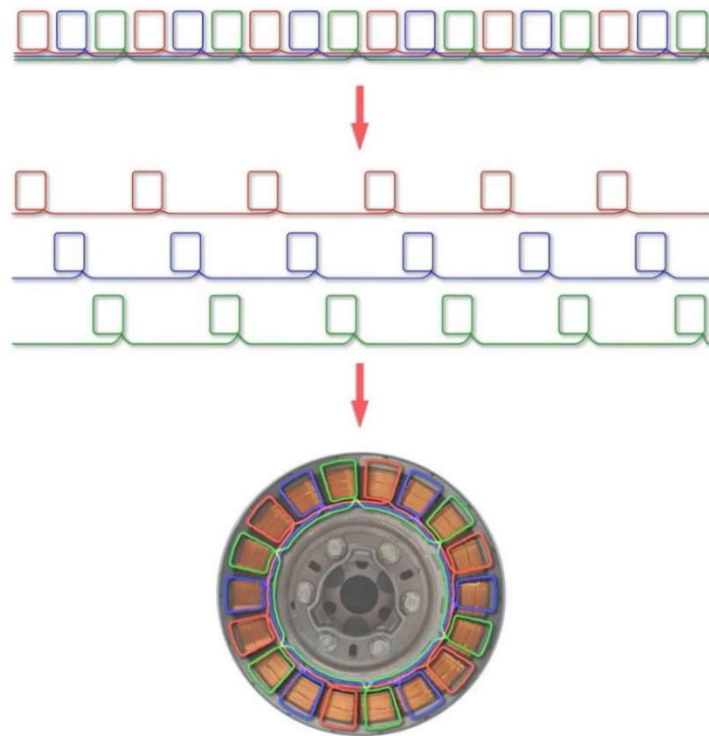


Рис. 8.6. Схемах розгортки обмоток статора (петльової обмотки)

### 7.3.5. Електромагнетизм

Обов'язковою умовою функціонування всіх асинхронних машин є наявність обертового магнітного поля. Магнітне поле (magnetic field), що індукує котушка, схоже на магнітне поле стрижневого магніту (bar magnet). Лінії поля (field lines) всередині котушки приблизно паралельні й рівновіддалені одні від одних. Магнітне поле (magnetic field) в котушці однорідне, на відміну від поля поза нею.

Північний полюс (north pole) магнітного поля утворюється там, де лінії магнітного поля виходять із котушки, а південний полюс (south pole) утворюється в місці, де лінії знову входять у котушку. Сила магнітного поля (stronger the magnetic field) котушки визначається

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

величиною електричного струму, що протікає через неї, та числом її витків.

Електрорушійною силою ( $F$ ) (electric magnetic force, e.m.f) називають добуток сили струму  $I$  на число витків  $N$ . Наявність e.m.f. є причиною виникнення магнітного потоку. Дані величини можна порівняти наступним чином.

Для відстежування напрямку протікання струму в котушці (Рис. 8.7) слід подивитись анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Electromagnetism >> Electric loading.

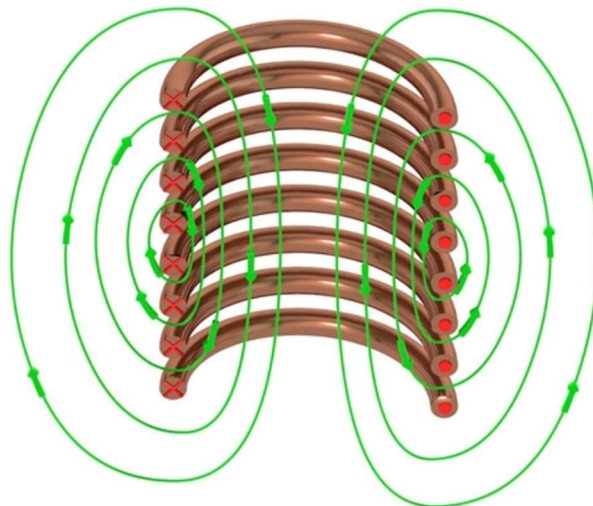


Рис. 8.7. Напрямок протікання струму в котушці

На магнітний ефект (magnetic effect) вирішальним чином впливає концентрація магнітної енергії (magnetic energy). Концентрація магнітної енергії зростає зі збільшенням e.m.f. або в міру того, як лінії в середині поля стають коротшими. Концентрація магнітної енергії позначається терміном «напруженість магнітного поля»  $H$  (magnetic

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

field strength). Напруженість магнітного поля – це відношення між e.m.f.  $F$  і середньою довжиною  $l_m$  ліній поля.

Напруженість магнітного поля визначається як (8.1) і вимірюється в  $\frac{A}{m}$  (8.2).

$$H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{IN}{l_m}; \quad 8.1$$

$$[H] = \frac{A}{m}. \quad 8.2$$

Для відстежування напрямку протікання струму в магнітопроводі (Рис. 8.8) слід подивитись анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Electromagnetism >> Magnetic field strength.

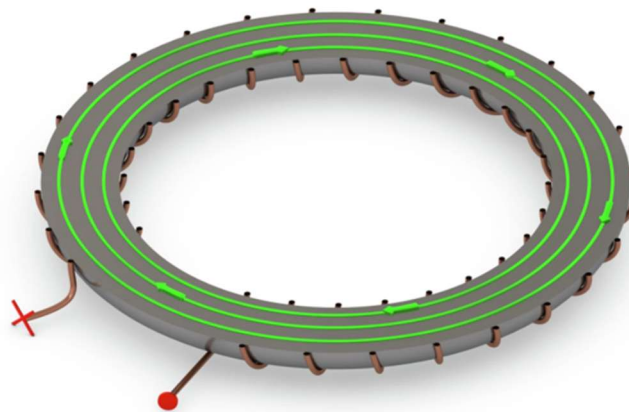


Рис. 8.8. Відстеження напрямку протікання струму в магнітопроводі

Сукупність ліній магнітного поля котушки під напругою або постійного магніту називається магнітним потоком  $\Phi$  (magnetic flux),

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

що служить мірою магнітної сили та вимірюється у вольт-секундах ( $V_s$ ) або веберах ( $Wb$ ). При порівнянні магнітних та електричних величин магнітний потік буде відповідати електричному струму.

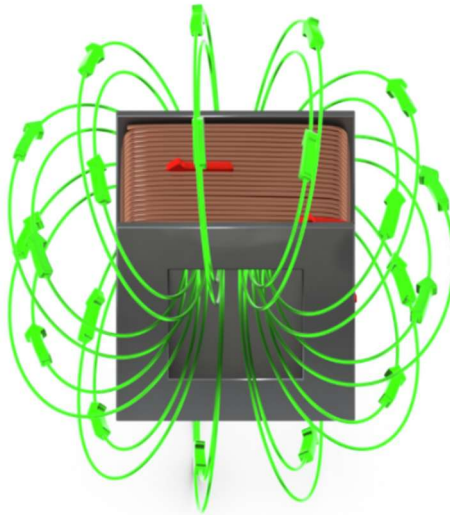


Рис. 8.9. Напрямок протікання магнітного потоку в котушці з магнітопроводом

Сила, що діє на котушку під напругою або постійний магніт, збільшується в міру того, як малюнок лінії поля стає щільнішим, а область пронизаного випромінювання зменшується. Зі збільшенням магнітного потоку  $\Phi$  або зменшенням пронизаної площі магнітний ефект зростає.

Густина магнітного потоку  $B$  є відношенням між магнітним потоком  $\Phi$  і площею  $A$  та вимірюється в одиницях тесла (Т).

Для відстежування напрямку протікання магнітного потоку (Рис. 8.10) слід подивитись анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Electromagnetism >> Magnetic field strength.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

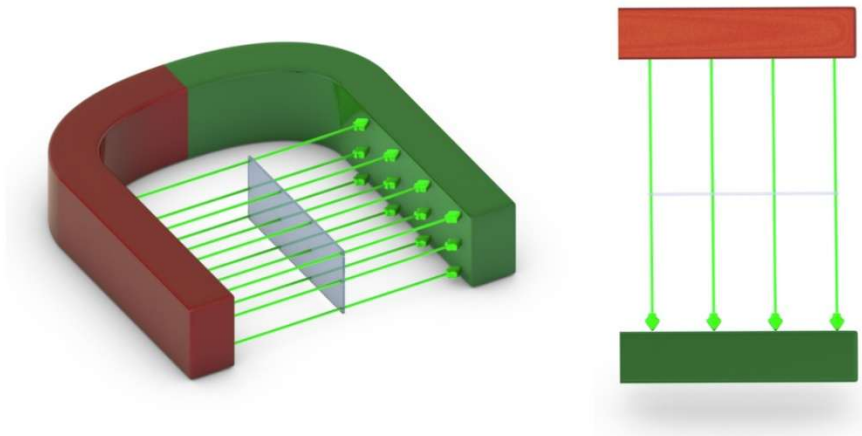


Рис. 8.10. Напрямок протікання магнітного потоку у стрижневому магніті

Коли електричний провідник переміщується в магнітному полі або магнітне поле рухається відносно провідника, у ньому індукується напруга. Чим більша кількість провідників переміщається через магнітне поле, тим вище індукована напруга. На практиці використовується не один провідник, а один або кілька провідникових петель (conductor loops). Кілька послідовних контурів провідників утворюють котушку.

Чим більше число ліній магнітного поля, що перетинаються за одиницю часу, тим вище напруга, що індукується в контурі провідника. Відповідно, індукована напруга максимізується, якщо контур провідника переміщується перпендикулярно по відношенню до ліній магнітного поля. Якщо петля рухається паралельно лініям магнітного поля, то жодна з них не перетинається, напруга не індукується.

Для відстежування процесу індукування напруги при перетинанні провідником магнітного поля (Рис. 8.11) слід подивитись

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Electromagnetism >> Magnetic field strength.

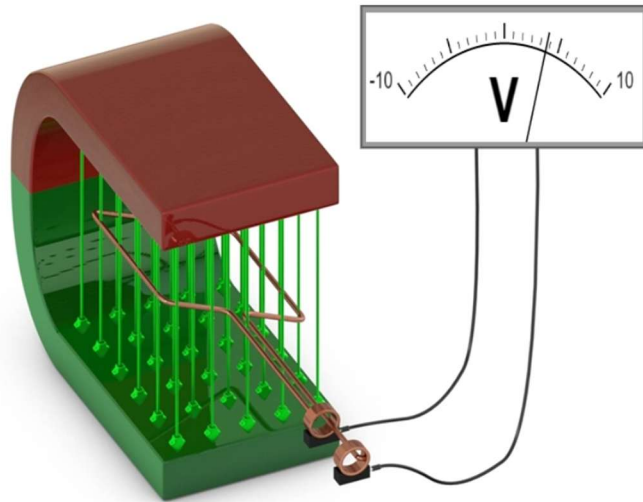


Рис. 8.11. Процес індукування напруги при перетинанні провідником магнітного поля магніту

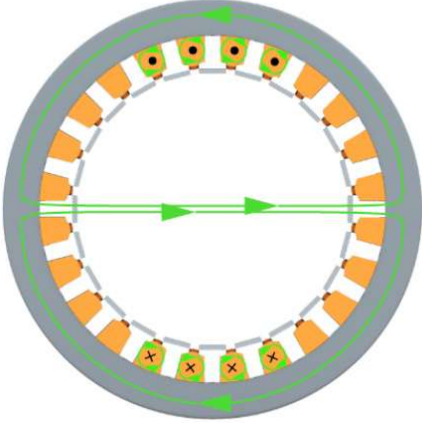
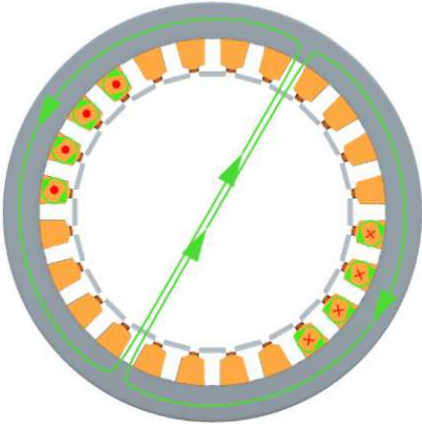
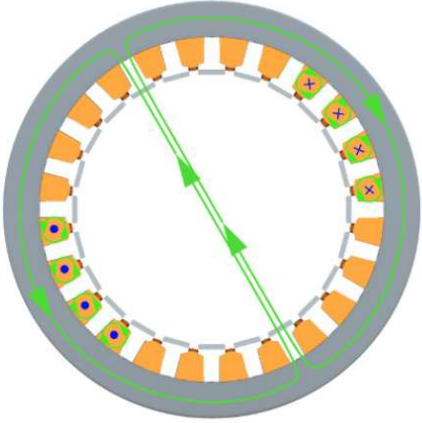
Коли постійний струм протікає через обмотку, це створює магніторухливу силу й потік, що утворюють магнітне поле з певною орієнтацією. Виникають північний і південний магнітні полюси.

Оскільки три обмотки машини змінного струму зміщені на 120 градусів, струм, що протікає у цих обмотках, генерує по одному магнітному полю, що мають різну орієнтацію (направленість). Направленість можна впізнати за лініями магнітного потоку (Таблиця 8.2), що відповідно змінюють свої напрямки.

Для відстежування напрямку протікання магнітного потоку (Таблиця 8.2) слід подивитись анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Electromagnetism >> Static magnetic field.

Таблиця 8.2. Напрямок магнітного поля

№	Напрямок магнітного потоку
1	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Step 1: Winding 1 +</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3...</p> <p>Step 4: Winding 1 -</p> <p>Step 5: Winding 2...</p> <p>Step 6: Winding 3 -</p> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;"> </div> </div>
2	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Step 1: Winding 1...</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3...</p> <p>Step 4: Winding 1 -</p> <p>Step 5: Winding 2...</p> <p>Step 6: Winding 3 -</p> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;"> </div> </div>
3	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Step 1: Winding 1...</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3 +</p> <p>Step 4: Winding 1 -</p> <p>Step 5: Winding 2...</p> <p>Step 6: Winding 3 -</p> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;"> </div> </div>

№	Напрямок магнітного потоку
4	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>Step 1: Winding 1...</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3...</p> <p style="background-color: #FFD700;">Step 4: Winding 1 -</p> <p>Step 5: Winding 2...</p> <p>Step 6: Winding 3 -</p> </div>  </div>
5	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>Step 1: Winding 1...</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3...</p> <p>Step 4: Winding 1 -</p> <p style="background-color: #FFD700;">Step 5: Winding 2 +</p> <p>Step 6: Winding 3 -</p> </div>  </div>
6	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>Step 1: Winding 1...</p> <p>Step 2: Winding 2 -</p> <p>Step 3: Winding 3...</p> <p>Step 4: Winding 1 -</p> <p>Step 5: Winding 2...</p> <p style="background-color: #FFD700;">Step 6: Winding 3 -</p> </div>  </div>

### 7.3.6. Обертальне поле електродвигуна

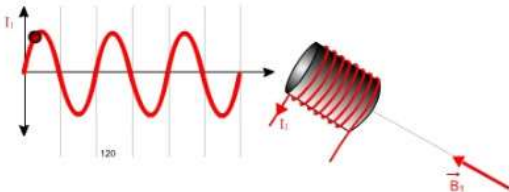
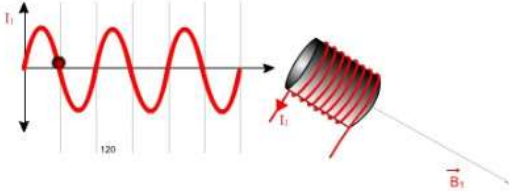
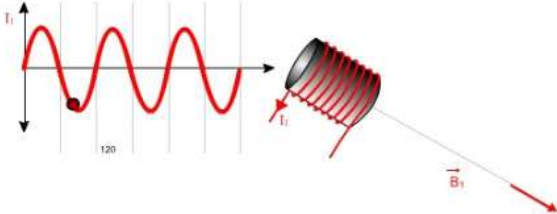
Для обертання 3-фазного електродвигуна змінного струму всередині статора має створюватись обертальне магнітне поле (rotating magnetic field), яке в подальшому утягне за собою ротор. При проходженні струму через першу фазну обмотку всередині статора виникає коливальне магнітне поле, що залежить від поточного значення змінного струму.

Оскільки обмотки статора з'єднані міжфазно, усередині статора створюється симетричне обертальне магнітне поле. Це поле обертається з тією ж частотою, що і вхідна напруга живлення.

Для відстежування залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму живлення кожної із фаз необхідно переглянути анімації в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Rotating field of an electric motor. Із цими процесами можна також ознайомитися, використовуючи Таблиця 8.3.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.3. Візуалізація залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму живлення

№	Зображення	Пояснення
1 Фаза		
1	 <p>The diagram shows a sine wave graph of current <math>I_1</math> on the left. The vertical axis is labeled <math>I_1</math> and the horizontal axis has a '120' mark. A red dot is placed at the first positive peak of the sine wave. To the right of the graph is a 3D representation of a coil. A red arrow labeled <math>I_1</math> points into the front face of the coil, and another red arrow labeled <math>B_1</math> points horizontally to the right, along the axis of the coil.</p>	<p>Візуалізація залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму однієї фази. Вектор магнітного потоку змінює свою довжину й напрямок уздовж осі, що проходить перпендикулярно виткам котушки</p>
2	 <p>The diagram shows the same sine wave graph of current <math>I_1</math>. A red dot is placed at the first negative peak of the sine wave. The coil is shown with a red arrow labeled <math>I_1</math> pointing into the front face. The magnetic flux vector <math>B_1</math> is now a red arrow pointing horizontally to the left, opposite to the direction in diagram 1.</p>	
3	 <p>The diagram shows the same sine wave graph of current <math>I_1</math>. A red dot is placed at the first positive peak of the sine wave. The coil is shown with a red arrow labeled <math>I_1</math> pointing into the front face. The magnetic flux vector <math>B_1</math> is a red arrow pointing horizontally to the right, the same direction as in diagram 1.</p>	

№	Зображення	Пояснення
2 Фази		
4		<p>Візуалізація залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму двох фаз. Вектор напрямку магнітного потоку обох фаз (червоний і синій колір) змінює свою довжину й напрямок уздовж відповідної осі, що проходить перпендикулярно виткам котушки</p>
5		
6		

№	Зображення	Пояснення
<b>3 Фази</b>		
7		<p>Візуалізація залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму трьох фаз. Вектор напрямку магнітного потоку трьох фаз (червоний, синій і зелений кольори) змінює свою довжину й напрямок уздовж відповідної осі, що проходить перпендикулярно виткам котушки</p>
8		
9		

№	Зображення	Пояснення
Результуюче обертальне магнітне поле		
10		<p>Візуалізація залежності напрямку густини магнітного потоку від синусоїди змінного струму трьох фаз.</p>
11		<p>Вектор напрямку магнітного потоку обох фаз (червоний, синій і зелений кольори) змінює свою довжину й напрямок уздовж відповідної осі, що проходить перпендикулярно виткам котушки.</p>
12		<p>Результуюче обертальне магнітне поле зображено жовтим кольором</p>

### 7.3.7. Синхронні двигуни

Синхронний двигун – тип електричного двигуна змінного струму, ротор якого обертається зі швидкістю, що синхронізована із частотою змінного струму живлення. Іншими словами, швидкість обертання ротора відповідає швидкості обертання магнітного поля статора, що досягається за відсутності ковзання, яке характерне для асинхронних двигунів.

Принцип роботи синхронного двигуна базується на взаємодії магнітних полів статора та ротора. Магнітне поле статора створюється за допомогою трифазної системи обмоток, що розташовані під певним кутом одна до одної. При подачі змінного струму ці обмотки генерують обертальне магнітне поле. Ротор може бути оснащений постійними магнітами або обмотками збудження, що живляться постійним струмом, створюючи власне магнітне поле. Взаємодія між обертальним полем статора й полем ротора призводить до синхронного обертання ротора зі швидкістю обертання магнітного поля статора.

Синхронні двигуни знаходять широке застосування у промислових установках, де важлива постійна швидкість обертання незалежно від змін навантаження. Вони використовуються в таких галузях, як: виробництво електроенергії; нафтогазова промисловість; водопостачання й вентиляція. Завдяки високій ефективності, точності контролю швидкості та здатності працювати при високих навантаженнях, синхронні двигуни є незамінними у критично важливих і високонавантажених системах.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

В автомобільній промисловості, частіше за все, використовуються двигуни, що мають постійні магніти, вбудовані у вузол ротора.

Синхронні двигуни можна розділити на два основні типи:

1. Синхронний двигун з обмоткою збудження (Electromagnets synchronous motors) – у даного типу двигунів на роторі розташовується додаткова обмотка, що називається «обмоткою збудження». Дана обмотка створює постійне магнітне поле на роторі. Це магнітне поле взаємодіє з обертальним магнітним полем статора, що забезпечує синхронне обертання ротора. Живлення даної обмотки, зазвичай, здійснюється за допомогою контактних кілець, що живляться від окремого джерела постійного струму. Даний тип двигунів практично не використовується в автомобільній сфері.
2. Синхронний двигун із постійними магнітами (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) – у даному типі машин постійні магніти створюють постійне магнітне поле в роторі. Статор, що живиться змінним струмом, формує обертальне магнітне поле. Як тільки двигун досягає синхронної швидкості, полюси ротора захоплюються обертальним магнітним полем, забезпечуючи стабільну роботу двигуна.

Постійні магніти, як правило, виготовляються зі сплаву неодиму, заліза й бору або самарій-кобальту. PMSM-двигуни дорожчі у виготовленні через наявність рідкоземельних елементів, проте їх ККД становить близько 96 %.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Одним із обмежень рідкоземельних магнітів є те, що їх температуру необхідно контролювати. Якщо температура досягає певної межі (близько 150 °C для неодиму (neodymium)), магніти можуть почати розмагнічуватися. Як правило, для роботи синхронного двигуна потрібно від 1 до 2 кг магнітів.

Для PMSM-двигунів використовуються два типи безщіткових роторів із постійними магнітами:

- із зовнішнім розташуванням магнітів (SPM – Surface permanent magnets) (Рис. 8.12);
- внутрішнім розташуванням магнітів (IPM – Interior permanent magnets) (Рис. 8.13).

У більшості гібридних та електричних транспортних засобів використовуються синхронні двигуни (із постійними магнітами), але все більшої популярності набувають асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (КЗ ротором).

Зміна частоти обертання синхронного двигуна здійснюється за допомогою зміни частоти напруги живлення, що подається на статор від інвертора. Збільшення або зменшення частоти призводить до відповідної зміни частоти обертання ротора, а отже й швидкості транспортного засобу (Рис. 8.16).

Для відстежування процесу розгону й гальмування синхронного двигуна необхідно переглянути анімацію в LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous motors >> Accelerating/Decelerating of an electric motor. Із цими процесами можна також ознайомитися, використовуючи Таблиця 8.6.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

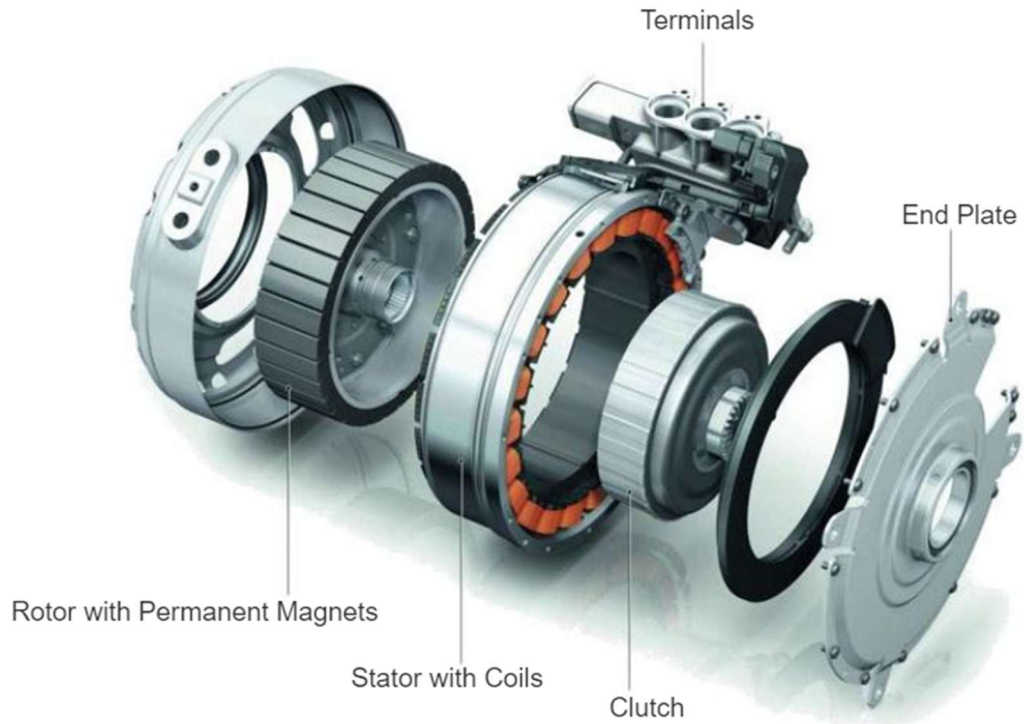


Рис. 8.12. Ротор із зовнішнім розташуванням магнітів (SPM)

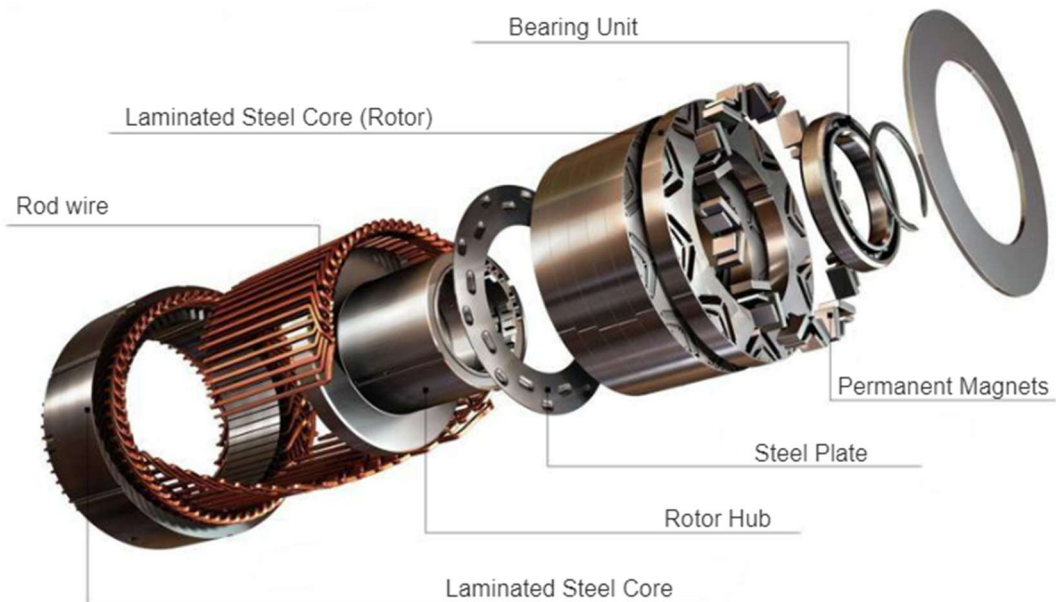


Рис. 8.13. Ротор із внутрішнім розташуванням магнітів (IPM)

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.4. Переваги й недоліки синхронних двигунів із постійними магнітами в порівнянні з асинхронними двигунами із КЗ ротором


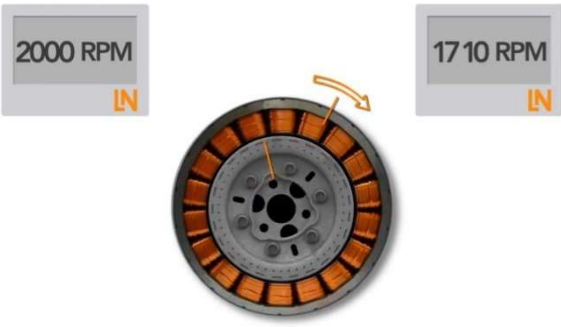
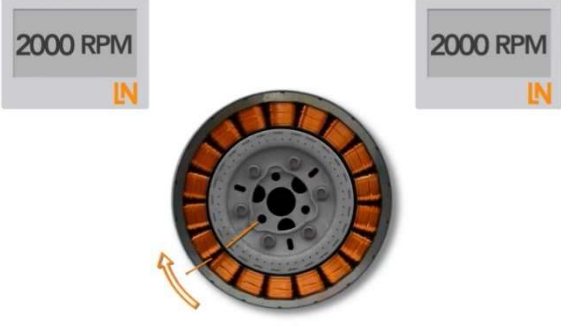
Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Вища ефективність</li> <li>- Відсутність ковзання. Частота обертання ротора знаходиться в прямій залежності від частоти трифазного змінного струму</li> <li>- Менший перегрів. На відміну від асинхронного двигуна, під час рекуперативного гальмування, у роторі не індукується висока напруга, через що зменшується нагрів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання рідкоземельних мінералів у конструкції. Магніти двигуна з постійним збудженням виготовлені із рідкоземельних елементів неодиму й диспрозію, що збільшує вартість двигуна</li> </ul>

Таблиця 8.5. Процеси, що виникають у двигуні під час прискорення та уповільнення синхронного двигуна


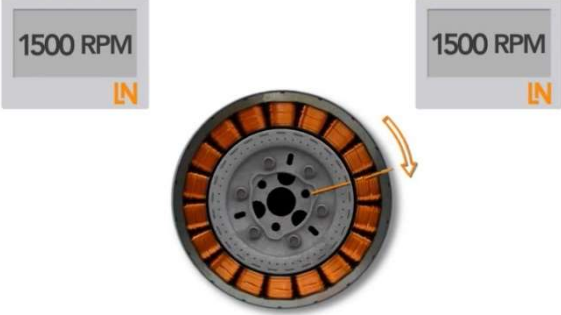
Прискорення	Уповільнення
<p>Під час розгону магнітне поле статора обертається зі швидкістю 500 об/хв. Через інерційність ротора він відстає від магнітного поля до тих пір, поки не досягне тієї ж швидкості. Така поведінка зберігається до тих пір, поки магнітне поле статора не досягне кінцевої швидкості обертання і ротор його не наздожене</p>	<p>Для уповільнення магнітне поле необхідно сповільнити, щоб уповільнити ротор. Потім ротор також сповільнюється й намагається наздогнати магнітне поле статора. Зверніть увагу, що магнітне поле статора зберігає напрямок обертання</p>

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.6. Процесу розгону й гальмування синхронного двигуна

№	Зображення	Пояснення
1		<p>Рух з усталеною швидкістю 1500 об/хв (RPM)</p>
2		<p>Зміна завдання на швидкість (лівий показчик) до 2000 об/хв – початок розгону. Швидкість магнітного поля ротора (правий показчик) починає незначною мірою відставати від магнітного поля статора. Швидкість магнітного поля ротора поступово збільшується, наздоганяючи поле статора</p>
3		<p>Момент досягнення бажаного завдання під час розгону. Магнітні поля статора й ротора обертаються синхронно</p>

Продовження таблиці 8.6.

№	Зображення	Пояснення
4		<p>Зміна завдання на швидкість до рівня 1500 об/хв – початок гальмування. Швидкість магнітного поля статора встановлюється миттєво, а швидкість ротора починає поступово падати, намагаючись знову наздогнати поле статора</p>
5		<p>Момент досягнення бажаного завдання під час гальмування. Магнітні поля статора й ротора обертаються синхронно</p>

На Рис. 8.14 можна побачити комбінацію мотор-генератор (motor-generator) автомобіля Toyota Prius, а на Рис. 8.15 – мотор-генератор від Honda. Обидві системи побудовані на базі синхронного двигуна.

7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.14. Мотор-генератор Toyota Prius



Рис. 8.15. Мотор-генератор від Honda

### 7.3.8. Асинхронні двигуни

Асинхронний двигун, або індукційний двигун, є типом електричного двигуна, що перетворює електричну енергію в механічну за допомогою взаємодії обертального магнітного поля статора з індуктованим магнітним полем ротора. В основі його роботи лежить принцип електромагнітної індукції: змінний струм в обмотках статора створює обертальне магнітне поле, що індукує струм у короткозамкнених провідниках ротора або фазних обмотках. Це магнітне поле, що обертається, взаємодіє з магнітним полем ротора, створюючи обертальний момент.

В асинхронному двигуні ротор завжди обертається із частотою, що є меншою від частоти обертання магнітного поля статора. Таке відставання називають терміном «ковзанням» (slip). Даний параметр визначає ефективність перетворення енергії та характеристики двигуна. Асинхронні двигуни характеризуються простотою конструкції, надійністю та низькими витратами на обслуговування, оскільки не потребують комутаторів чи щіток, що робить їх популярним вибором для промислових і побутових застосувань.

Зазвичай в асинхронних двигунах використовується короткозамкнений ротор (біляча клітка (squirrel-cage)), що складається із циліндричного сталевого або алюмінієвого барабана, усередині якого розташовані паралельні провідні стрижні, з'єднані із двома кільцями на кінцях ротора.

При протіканні струму через статор утворюється обертальне магнітне поле. Що, у свою чергу, індукує ЕРС (електрорушійну силу (electromotive force)) в роторі, генеруючи власне магнітне поле.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Поле реагує на магнітне поле в статорі, що змушує двигун обертатися. Це явище називається «взаємною індукцією» (mutual induction). Між статором і ротором виникає ковзання, яке, як правило, становить близько 5 % при повній ефективності. При збільшенні навантаження на двигун ротор сповільнюється, водночас ковзання збільшується. Таким чином, назва «асинхронний» відноситься до відсутності синхронізації між полем статора й ротора. Даний тип двигуна іноді називають «безщітковим» (brushless motors) через те, що для його роботи не потрібні додаткові обмотки постійного струму в колі ротора.

Для відстежування впливу напрямку густини магнітного потоку відносно синусоїди змінного струму на обертання короткозамкненого ротора асинхронного двигуна необхідно переглянути анімацію в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor >> Asynchronous motors. Із цими процесами можна також ознайомитися, використовуючи Таблиця 8.7.

Незважаючи на те, що асинхронний двигун має такі недоліки, як наявність ковзання (slip), менша ефективність на низьких обертах (lower RPM – Revolutions Per Minute) і знижена швидкість при додаткових навантаженнях, він має переваги у вигляді можливості самозбудження (self-excitation) й самозапуску (self-start). Оскільки для його роботи не використовуються постійні магніти, це дає можливість зменшити витрати на його виробництво.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.7. Вплив напрямку густини магнітного потоку відносно синусоїди змінного струму на обертання короткозамкненого ротора асинхронного двигуна

№	Зображення	Пояснення
1		
2		<p>Струм, що протікає в трьох обмотках, змушує обертатись короткозамкнений ротор асинхронного двигуна. Результуючий вектор магнітного поля ротора зображено помаранчевим кольором (B)</p>
3		

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Короткозамкнений ротор навчального стенда LN модуля «Двигун» (Рис. 8.16) складається із трьох основних компонентів:

1. Пресований якір динамо-шарування (pressed armature of dynamo laminations), які взаємно ізольовані і мають заздалегідь виготовлені порожнини (у даному випадку 22) для розміщення стрижнів ротора.
2. Алюмінієві форми, що складаються зі стрижнів ротора й коротких кілець.
3. Вал.



Рис. 8.16. Зовнішній вигляд короткозамкненого ротора стенда LN модуля «Двигун»

У незавершеному роторі, що зображено праворуч (Рис. 8.16), можна помітити кінці 22 алюмінієвих стрижнів (aluminium rods), які утворюються шляхом заливки розплавленого алюмінію в канавки. Таким же чином формуються алюмінієві кільця на верхній і нижній сторонах ротора. Після процесу лиття в отриману заготовку вставляється вал двигуна. На завершальному етапі проводиться додаткова зовнішня обробка для приведення ротора до потрібних розмірів.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Ліворуч (Рис. 8.16) зображено повністю зібраний короткозамкнений ротор, на прикладі якого можна побачити як алюмінієві стрижні провідників, так і алюмінієві кільця з короткозамкненою кліткою.

### 7.3.9. Схеми з'єднання обмоток електродвигунів

У трифазних двигунах кінці й початки обмоток можуть бути з'єднані в різних конфігураціях або групах. У більшості випадків доступні конфігурації з'єднання зіркою (star) або трикутником (delta).

У трифазних електродвигунах для початку фазної обмотки використовуються стандартні позначення  $U_1$ ,  $V_1$ ,  $W_1$ , а для кінців обмотки  $U_2$ ,  $V_2$ ,  $W_2$ . У випадку конфігурації зірка (Рис. 8.17) кінці обмоток фаз з'єднані в загальну середню точку. Оскільки трифазні машини мають симетричне навантаження, то немає необхідності з'єднувати середню точку з нульовим провідником.

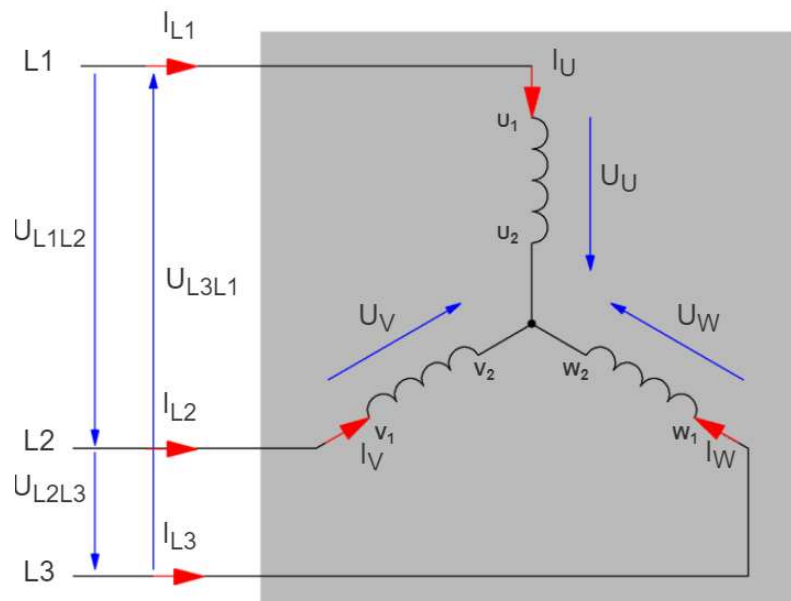


Рис. 8.17. Схема з'єднання фазних обмоток по схемі «зірка»

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Тому при підключенні двигунів часто говорять про параметри фази (phase) та лінії (line). Параметри лінії відносяться до сторони живлення двигуна ( $U_{L1L2}, U_{L2L3}, U_{L3L1}$ ), тоді як параметри фази відносяться до обмоток двигуна ( $U_V, U_U, U_W$ ). У з'єднанні зіркою напруги обмоток менші, ніж напруги між окремими фазами.

Між даними параметрами виникають наступні залежності

$$U_{L1L2} = \sqrt{3}U_U; \quad 8.3$$

$$U_{L2L3} = \sqrt{3}U_V; \quad 8.4$$

$$U_{L3L1} = \sqrt{3}U_W; \quad 8.5$$

$$I_{L1} = I_U; \quad 8.6$$

$$I_{L2} = I_V; \quad 8.7$$

$$I_{L3} = I_W. \quad 8.8$$

Співвідношення лінійних і фазних напруг у випадку з'єднання обмоток зіркою

$$U_L = \sqrt{3}U_{str}, \quad 8.9$$

де  $U_L$  – лінійна напруга;  $U_{str}$  – фазна напруга.

Співвідношення струмів

$$I_L = I_{str}, \quad 8.10$$

де  $I_L$  – лінійний струм;  $I_{str}$  – фазний струм.

Із наведених вище рівнянь можна зробити висновок, що при схемі з'єднання зіркою напруги обмоток двигуна нижчі, ніж у випадку

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

з'єднання по схемі трикутник. У результаті цього потужність двигуна при з'єднанні зіркою буде менше, ніж при з'єднанні трикутником.

У випадку з'єднання обмоток по схемі трикутник (Рис. 8.18) кінцеві точки однієї обмотки з'єднуються з початковими точками наступної обмотки. На відміну від схеми з'єднання зіркою, у даному випадку відсутня нульова точка, тому відсутня можливість підключення нульового провідника.

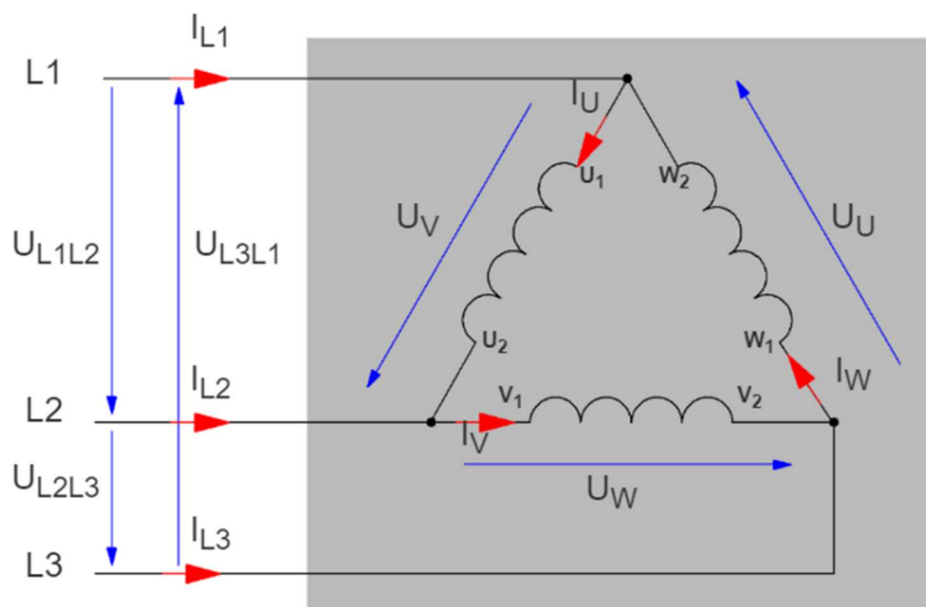


Рис. 8.18. Схема з'єднання фазних обмоток по схемі «трикутник»

Залежність між параметрами напруги живлення та обмотками двигуна

$$U_{L1L2} = U_U; \quad 8.11$$

$$U_{L2L3} = U_V; \quad 8.12$$

$$U_{L3L1} = U_W; \quad 8.13$$

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

$$I_{L1} = \sqrt{3}I_U; \quad 8.14$$

$$I_{L2} = \sqrt{3}I_V; \quad 8.15$$

$$I_{L3} = \sqrt{3}I_W. \quad 8.16$$

Співвідношення лінійних і фазних напруг у випадку з'єднання обмоток зіркою

$$U_L = U_{str}, \quad 8.17$$

де  $U_L$  – лінійна напруга;  $U_{str}$  – фазна напруга.

$$I_L = \sqrt{3}I_{str}, \quad 8.18$$

де  $I_L$  – лінійний струм;  $I_{str}$  – фазний струм.

При з'єднанні трикутником напруги на обмотках двигуна вищі, ніж при з'єднанні по схемі зірка. У результаті потужність двигуна при з'єднанні трикутником більше, ніж при з'єднанні зіркою.

Струми, що протікають через стрижні короткозамкненого ротора, створюють сили  $F$ . Окремі сили, що діють на стрижні ротора, складаються разом і створюють крутний момент на плечі важеля. Утворений момент не є постійним на всьому можливому діапазоні швидкостей електродвигуна. Залежність між швидкістю та крутним моментом можна описати графічно за допомогою механічної характеристики.

На Рис. 8.19 зображена типова механічна характеристика асинхронного двигуна. Дана характеристика має наступні ключові точки:

1. Пусковий крутний момент.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

2. Номінальний крутний момент (pull-up torque).
3. Критичний момент (pull-out torque).

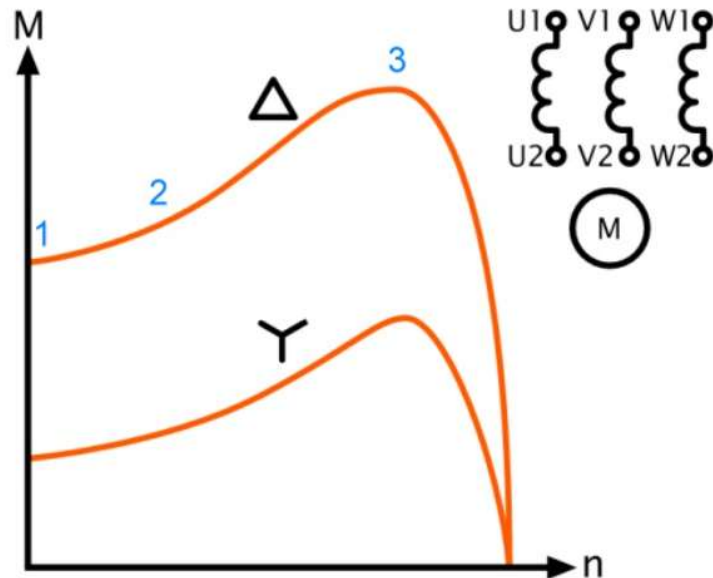


Рис. 8.19. Механічна характеристика. Залежність значення крутного моменту ( $M$ ) від швидкості обертання двигуна ( $n$ )

Із даної характеристики видно, що, до переходу в область критичного моменту, швидкості та крутний момент двигуна збільшуються. Після переходу момент починає стрімко падати та виникає моменту пробою. Після чого машина зупиняється.

Зв'язок між крутним моментом і потужністю двигуна становить

$$P = \omega_m M = \frac{2\pi n}{60} M; \quad 8.19$$

$$M = 9,55 \frac{P}{n}, \quad 8.20$$

де  $n$  – об/хв.

### 7.3.10. Давач положення двигуна

Для оптимальної роботи електродвигуна система керування повинна постійно отримувати зворотний зв'язок, відстежуючи швидкість і положення ротора двигуна. У залежності від вимірних параметрів, контролер двигуна здійснює керування, ініціюючи перехід у режими прискорення, рекуперативного гальмування або руху назад.

Для контролю положення та швидкості двигуна використовуються резольвери та енкодери (resolvers and encoders). На Рис. 8.20 показано резольвер, що є складовою частиною конструкції двигуна. Він складається із давача (інтегрованого в корпус двигуна) та релюкторного кільця (reluctor ring), яке зв'язане з ротором.



Рис. 8.20. Розміщення резольвера в електродвигуні: 1 – давач; 2 – релюкторне кільце

На резольвер подається високочастотна змінна напруга (2–10 кГц).

$$U_r = A \sin(\omega t). \quad 8.21$$

Релюктор  $U_r$  (Рис. 8.21), показаний у вигляді котушки синього кольору, є частиною ротора та обертається з тією ж швидкістю, що і сам ротор. Напруга  $U_r$  – це напруга збудження, яка індукується в ньому зовнішнім джерелом (резольвером), що керується контролером двигуна. Коли релюктор обертається, він індукує напругу в інших 2-х обмотках датчика  $U_{S1}$  і  $U_{S2}$  (червоного й зеленого кольору), що зміщені одна відносно одної на  $90^\circ$ .

Для відстежування зміни сигналу з релюктора необхідно переглянути анімації в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Electric motor Motor position sensors (resolvers and encoders). Як видно з анімації, контролер двигуна може визначити положення та швидкість двигуна, порівнюючи амплітуду й частоту сигналів  $U_{S1}$  і  $U_{S2}$ . Слід зазначити, що сигнали з датчика передаються навіть за відсутності обертання валу двигуна (як це виконано в індуктивних давачах), оскільки його живлення ( $U_r$ ) контролюється контролером двигуна й подається незалежно.

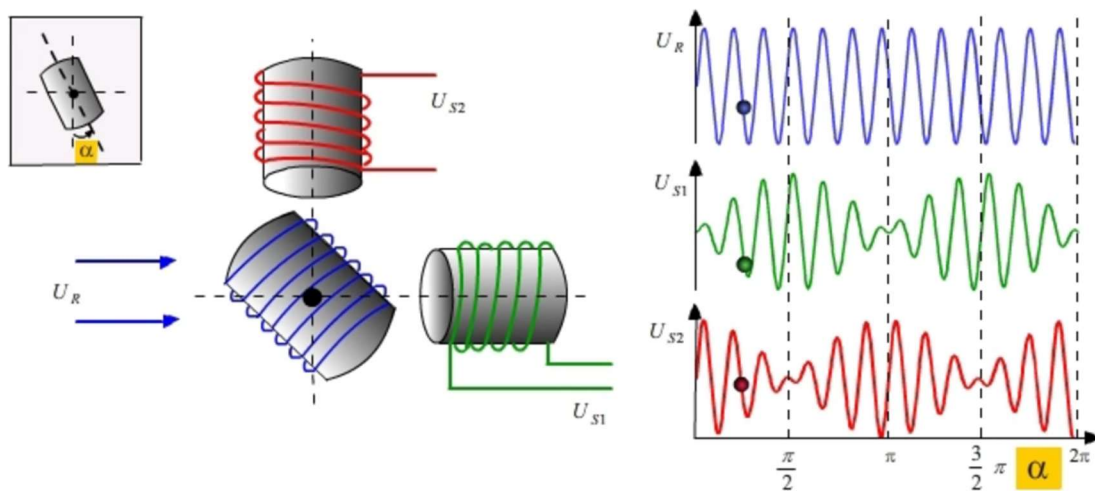


Рис. 8.21. Діаграма сигналів з резольвера та релюктора

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.3.11. Діагностика електродвигуна

Загалом проблеми з електродвигуном можна поділити на три категорії:

- непрацездатний (Inoperative);
- наявність шуму або вібрацій;
- перегрів.

Непрацездатність двигуна може бути наслідком проблем з електрикою або результатом механічних пошкоджень:

- вилучені компоненти;
- несправні елементи електричного керування або блоку живлення;
- внутрішні несправності у двигуні.

Шум, вібрація та перегрів можуть виникати через:

- механічні пошкодження, що виникають через вихід із ладу компонентів або відсутність обслуговування;
- внутрішні несправності у двигуні.

Діагностика приводного двигуна або трансмісії вимагає розуміння принципу роботи конкретної системи автомобіля й дотримання чіткої процедури діагностики. При проведенні діагностики слід дотримуватись наступних принципів:

1. Починати діагностику будь-якого вузла слід із перевірки від найпростішого для тестування випадку поломки до найскладнішого.
2. Слід обов'язково перевіряти рівень мастила в системах автомобіля. Відсутність його належного рівня або погіршення

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

стану (збільшена густина, забруднення) може призвести до виникнення значних проблем. У технічній документації на автомобіль завжди є інформація щодо частоти проведення технічного обслуговування.

3. Перед початком будь-яких діагностичних або ремонтних робіт слід переглянути надані виробником бюлетені технічного обслуговування (TSB – Technical Service Bulletins). Документацію на сучасні моделі автомобілів можна знайти в інтернеті на офіційних сторінках виробника.
4. Також завжди слід перевіряти коди несправностей автомобіля (DTCs – Diagnostic Trouble Codes) за допомогою спеціальних сканерів, які, частіше за все, підключаються до бортової системи електромобіля через OBD2-роз'єм.

На Рис. 8.22 можна побачити один із випадків несправності електромобілів, що пов'язаний з перегоранням обмоток статора. Перегорання обмоток статора синхронної або асинхронної машини може статися через кілька причин: перевантаження двигуна, що призводить до надмірного нагрівання обмоток; коротке замикання між витками або фазами обмотки; проблеми з ізоляцією через старіння матеріалів, вологість або механічні пошкодження; проблеми із системою охолодження, що призводять до перегрівання. Перегорання обмоток статора можна діагностувати за допомогою вимірювання опору обмоток (омметром), термовізійного аналізу (для виявлення гарячих точок), а також перевірки наявності коротких замикань за

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

допомогою спеціалізованих приладів, от-як мегометри чи тестери ізоляції.



Рис. 8.22. Зовнішній вигляд несправності, що пов'язана з перегоранням обмотки статора

### 7.3.12. Регенерація енергії

Рекуперативне гальмування в електромобілях – процес, за якого кінетична енергія транспортного засобу перетворюється зворотно в електричну енергію під час гальмування. Замість того щоб розсіюватися у вигляді тепла, як це відбувається у традиційних гальмівних системах, ця енергія повертається до акумуляторної батареї, де вона може бути збережена для подальшого використання. Під час рекуперативного гальмування електродвигун починає функціонувати як генератор, уповільнюючи рух автомобіля.

Такий процес не лише підвищує загальну енергоефективність електромобіля, але й сприяє збільшенню запасу ходу за рахунок

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

зменшення потреби в зовнішньому зарядженні. Ба більше, рекуперативне гальмування знижує зношування традиційних гальмівних механізмів, оскільки частина гальмівного зусилля переноситься на електродвигун, що зменшує навантаження на механічні компоненти системи.

Рекуперативне гальмування є важливою особливістю електричних транспортних засобів у порівнянні із класичними. Дана особливість, а також високий ККД електричних двигунів, є основною причиною високої ефективності електричних транспортних засобів.

Контроль гальмівної системи (brake system control) регулює взаємодію між фрикційним гальмом (friction brake) і рекуперативним гальмівним моментом (regenerative braking torque). Поведінка автомобіля при уповільненні та відчуття педалі ідентичні звичайним гальмівним системам. Перехід між двома системами навіть не помічається.



Гальмівний момент автоматично розподіляється між фрикційними гальмами й генератором, ураховуючи аспекти безпеки, комфорту та ефективності. Рекуперативне гальмування може збільшити запас ходу електромобіля на 10–25 %, що також позитивно впливає на термін служби батареї. Глибина циклу батареї (Cycle depth of the battery) зменшується, а гальмівні колодки й диски служать довше.



Для відстежування зміни значення струму в системі електромобіля під час руху необхідно подивитись відео в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Regeneration. Із цим процесом можна також ознайомитися за допомогою Таблиця 8.8.




## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.8. Зміна значення струму в системі електромобіля під час руху

№	Етапи
1	 <p>Початковий момент часу. Система електромобіля знаходиться в режимі «READY». Автомобіль не рухається. До кабеля живлення, що йде від акумуляторної батареї, підключено (неінвазійним методом) датчик струму з ефектом Холла (червоного кольору). Даний датчик під'єднано до мультиметра. Миттєві значення струму можна відстежувати за допомогою його екрану, де <math>1\text{mV} = 1\text{ A}</math>. Наявність струму в системі обумовлене споживанням внутрішніх систем електромобіля</p>
2	 <p>Початок руху електромобіля. Автомобіль трохи зрушив з місця та рухається невеликим накатом</p>

№	Етапи
3	 <p>Vehicle accelerating</p> <p>052.66 mV</p> <p>1mV = 1A</p> <p>Початок розгону електромобіля. Можна спостерігати значне збільшення струму в системі. Напрямок протікання струму від акумуляторної батареї до двигуна (додатне значення струму на екрані мультиметра)</p>
4	 <p>Vehicle decelerating (no brakes)</p> <p>037.66 mV</p> <p>1mV = 1A</p>

№	Етапи
	 <p>Vehicle decelerating (no brakes)</p> <p>Гальмування електромобіля засобами рекуперативного гальмування без натискання педалі гальма. Зміна напрямку протікання струму на зворотній (від'ємне значення на екрані мультиметра)</p>
5	 <p>Vehicle accelerating</p> <p>Повторний розгін електромобіля</p>

№	Етапи
6	  <p data-bbox="336 1375 1315 1417">Різде (інтенсивне) гальмування з натисканням педалі гальма</p>
7	 <p data-bbox="608 1957 1040 2000">Повна зупинка автомобіля</p>

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

На Рис. 8.23 зображено графік залежності сил гальмування від часу. Із графіку видно, що на початку гальмування (відрізок 1–2) основний гальмівний момент створюється за рахунок сили рекуперативного гальмування (Regenerative Braking Force – рекуперативного гальмівного моменту). У разі невеликого зниження швидкості автомобіля (відрізок 2–3) починає збільшуватися частка сили, що створюється за рахунок фрикційного гальма (Hydraulic Braking Force – гідравлічних гальм автомобіля). Під час досягнення точки 3, завдання на гальмування, яке формує водій (Driver`s Intention), стає максимальним, що означає повне натискання педалі гальма. У разі подальшого зниження швидкості (відрізок 3–4) спостерігається значне, відносно фрикційних гальм, збільшення частки рекуперативного гальмівного моменту, що досягає максимуму й діє протягом відрізка між токами 4–5. Під час максимального зниження швидкості автомобіля (відрізок 5–6), до моменту повної зупинки (точка 7), спостерігається суттєве зменшення частки гальмівного моменту рекуперативного гальмування та максимальне задіяння фрикційних гальм.

Проаналізувавши графік, можна зробити наступні висновки:

1. Гальмівний потенціал у режимі рекуперативного гальмування залежить від швидкості приводу двигуна.
2. За низьких обертів двигуна досягається максимальний гальмівний момент рекуперативного гальмування (відрізок 4–5).
3. На відносно високій (відрізок 1–3) та низькій (відрізок 5–6) швидкостях достатній гальмівний момент рекуперативного

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

гальмування не може бути забезпечений, тому існує необхідність застосування фрикційних гальм.

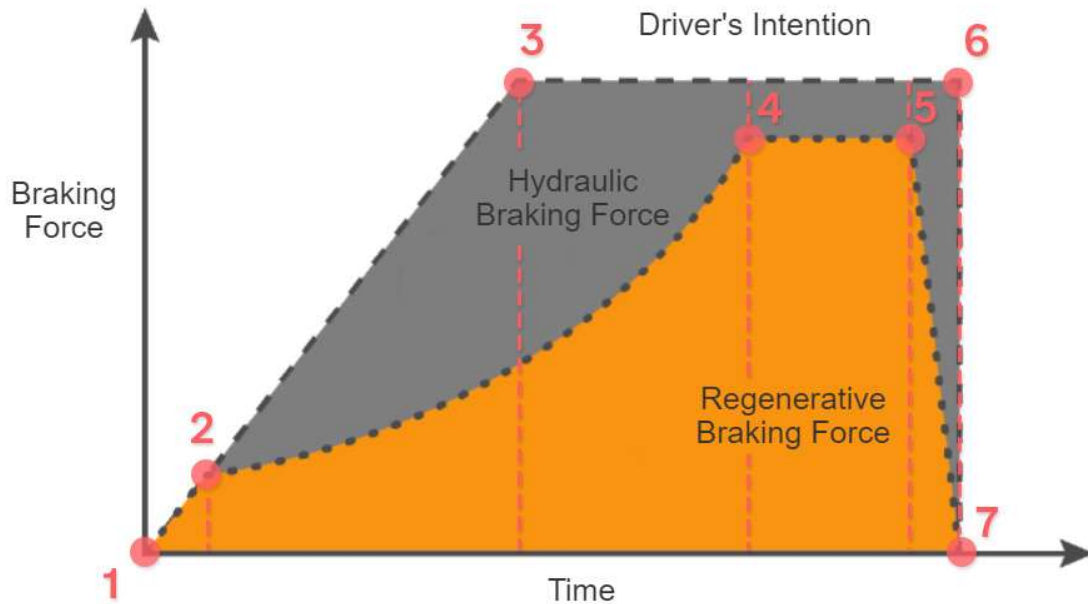


Рис. 8.23. Графік залежності сили гальмування від часу: сірий колір – сила гідравлічних гальм автомобіля; помаранчевий – сила, що діє під час рекуперативного гальмування (рекуперативний гальмівний момент)

Нижче наведені основні обмеження системи рекуперативного гальмування незалежно від конкретного електричного транспортного засобу:

1. Максимальний момент рекуперативного гальмування визначається максимальним гальмівним моментом генератора. Екстремне гальмування (максимальна гальмівна сила), зазвичай, виконується фрикційними гальмами.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

2. Гальмівний момент від генератора доступний лише тоді, коли SoC (State of Charge) високовольтної батареї знаходиться нижче приблизно на 80 %. Точний відсоток залежить від виробника.
3. При швидкостях, що близькі до нуля, гальмівний момент електродвигуна падає до нуля через низьку електрорушійну силу двигуна. Це означає, що на дуже низьких швидкостях і під час зупинки необхідно використовувати фрикційні гальма.
4. У разі несправності електроніки транспортного засобу, він все одно має бути в змозі зупинитися, тобто фрикційні гальма повинні працювати завжди.
5. Якщо транспортний засіб стає «нестабільним», він, зазвичай, сповільнюється виключно за допомогою фрикційних гальм, оскільки потрібне задіяння додатково ABS (Anti-lock Braking System) або ESP (Electronic Stability Program) систем.

Транспортні засоби з переднім приводом можуть досягати більшого моменту рекуперативного гальмування відносно автомобілів із заднім приводом, оскільки до передніх коліс можна прикладати більше зусилля, ніж до задніх. Якщо можна припустити співвідношення гальмівної сили 70/30, то 70 % енергії потенційно може бути рекуперовано в передньопривідних транспортних засобах, тоді як у задньопривідних транспортних засобах доступно лише 30 %.

На Рис. 8.24 зображена блок-схема застосування рекуперативного гальмування та фрикційних гальм у залежності від необхідного гальмівного моменту (НГМ) й параметра SoC.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

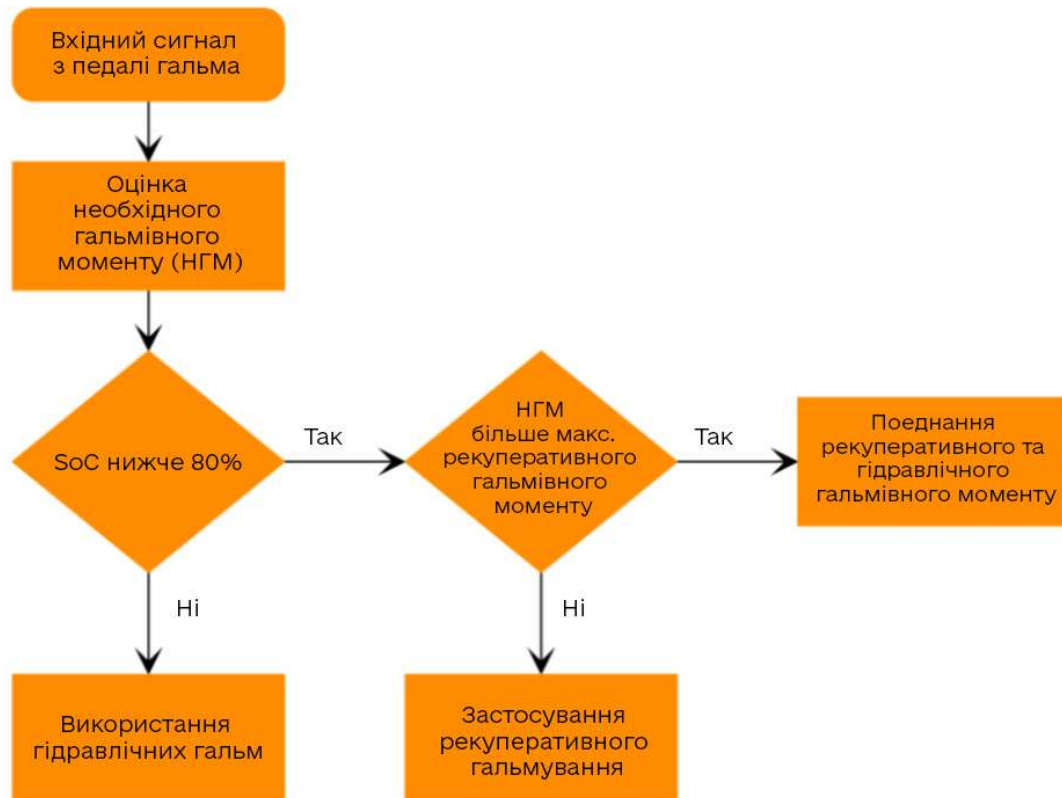


Рис. 8.24. Блок-схема застосування рекуперативного гальмування та фрикційних гідравлічних гальм

Для контролювання величини необхідного гальмівного моменту необхідно контролювати магнітне поле у статорі аналогічним чином, як і для процесу прискорення.

Двигун/генератор виробляє електроенергію, коли його ротор обертається зі швидкістю більшою, ніж швидкість обертального магнітного поля статора. У більшості EV або HEV швидкість ротора пропорційна швидкості автомобіля як при використанні асинхронних, так і синхронних (із постійними магнітами) двигунів/генераторів. Для досягнення необхідного рівня гальмівного моменту сила й швидкість магнітного поля весь час контролюються блоком керування інвертора. Ротор, рухаючись через магнітне поле статора, індукує напругу на всіх

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

обмотках ланки постійного струму всередині інвертора (windings in the DC link inside the inverter). Індукована напруга стає вищою за рівень напруги акумуляторної батареї, змушуючи струм протікати в її напрямку (повертатись назад). У той же час кінетична енергія транспортного засобу, що продовжує рухатися вперед завдяки своїй інерції, перетворюється в електричну енергію під час гальмування. Деякі електричні транспортні засоби здатні змінювати амплітуду напруги статора, що може «збільшити» гальмівний момент.

Для детального ознайомлення із процесом збільшення напруги статора під час гальмування слід виконати «запуск» електромобіля за допомогою інтерактивного вікна в середовищі LS, перейшовши за адресою: EDCV >> Regeneration >> Regeneration: Measurement on the vehicle. Після виконання запуску, користуючись кнопкою «Start/Stop», необхідно відслідкувати момент часу натискання педалі гальм (Deceleration). Інтерактивне вікно перегляду аналогічне тому, що було показано в Таблиця 7.2.

Ротор, що вільно обертається всередині статора без впливу зовнішнього магнітного поля, створить набагато менший гальмівний момент. Це також впливає на можливість керування ротором. У даному випадку можливість керування буде відсутня. У разі використання асинхронного двигуна (із КЗ ротором) керування ускладнюється, оскільки ротор не має власного магнітного поля. Для утворення магнітного поля йому потрібна зовнішня індукційна напруга (induction voltage), без якого ротор буде вільно обертатись у статорі та не буде здатен створювати гальмівний момент.

## 7.4. Порядок виконання лабораторної роботи

### 7.4.1. Частина № 1. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів

Перед виконанням даної частини лабораторної роботи необхідно ознайомитись із теоретичною частиною, що викладена в пунктах 8.3.1–8.3.12. Для безпосереднього виконання лабораторної роботи на стенді LN необхідно відкрити LS та перейти на сторінку виконання експерименту за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous motors>> Starting motor with permanent magnet rotor.

#### 7.4.1.1. Експеримент № 1. Запуск двигуна з ротором із постійними магнітами

У даному експерименті проводиться дослідження пускової реакції двигуна з ротором із постійними магнітами.

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.25). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.9.

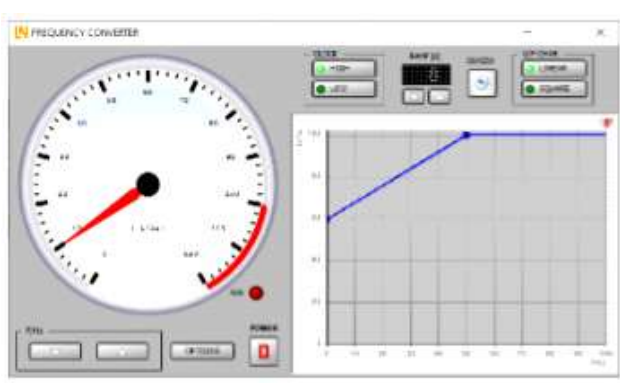
Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.25. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для запуску двигуна з ротором із постійними магнітами

Таблиця 8.9. Налаштування віртуального перетворювача частоти

	Instrument:	FREQUENCY CONVERTER
	Frequency:	0 Hz
	CLOCK	HIGH
	Ramp:	8 s
	U Start	60 %

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

3. Запустити перетворювач частоти кнопкою «Power» і збільшити частоту до 1 Гц.
4. Спостерігати за реакцією двигуна.
5. Зафіксувати налаштування вікна з конфігурацією перетворювача частоти, зробивши скріншот.

### Надайте відповідь на наступне запитання:

1. Якою була реакція системи на запуск?
  - a. ротор взагалі не реагував;
  - b. поштовхи ротора;
  - c. ротор плавно запустився.

### 7.4.1.2. Експеримент № 2. Запуск двигуна з короткозамкненим ротором

У даному експерименті проводиться дослідження пускової реакції двигуна з короткозамкненим ротором. Для його виконання необхідно перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Asynchronous motors >> Starting a motor with squirrel-cage rotor.

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.26). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.9.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.



Рис. 8.26. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.

Фінальна конфігурація схеми для запуску двигуна з короткозамкненим ротором

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити перетворювач частоти кнопкою «Power» і збільшити частоту до 1 Гц.
4. Спостерігати за реакцією двигуна.
5. Зафіксувати налаштування вікна з конфігурацією перетворювача частоти, зробивши скріншот.

**Надайте відповідь на наступне запитання:**

1. Якою була реакція системи на запуск?
  - a. ротор взагалі не реагував;
  - b. поштовхи ротора;
  - c. ротор плавно запустився.

#### **7.4.1.3. Експеримент № 3. Запуск двигуна з ротором з обмоткою**

У даному експерименті проводиться дослідження пускової реакції двигуна з ротором з обмоткою. Для його виконання необхідно перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Asynchronous motors >> Starting a motor with rotor and coils.

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.27). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.9.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

3. Запустити перетворювач частоти кнопкою «Power» і збільшити частоту до 1 Гц.
4. Спостерігати за реакцією двигуна.
5. Зафіксувати налаштування вікна з конфігурацією перетворювача частоти, зробивши скріншот.

**Надайте відповідь на наступне запитання:**

1. Якою була реакція системи на запуск?
  - а. ротор взагалі не реагував;
  - б. поштовхи ротора;
  - с. ротор плавно заустився.



Рис. 8.27. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для запуску двигуна з ротором з обмоткою

### 7.4.1.4. Експеримент № 4. Самозапуск двигуна з різними типами роторів

У даному експерименті проводиться дослідження самозапуску двигуна з короткозамкненим ротором. Для його виконання необхідно перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous or asynchronous motor?>> Self-starting behaviour (comparison).

Для проведення першого досліду в рамках експерименту необхідно прокрутити поточну сторінку до пункту «**Experiment 1**» і сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.28). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.10.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити перетворювач частоти кнопкою «Power» і збільшити частоту до 60 Гц.
4. Тримати ротор нерухомо рукою 2 секунди, а потім відпустити його.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

5. Спостерігати за реакцією двигуна.
6. Зафіксувати налаштування вікна з конфігурацією перетворювача частоти, зробивши скріншот.



Рис. 8.28. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.

Фінальна конфігурація схеми для самозапуску двигуна з короткозамкненим ротором

Таблиця 8.10. Налаштування віртуального перетворювача частоти

	Instrument:	FREQUENCY CONVERTER
	Frequency:	0 Hz
	CLOCK	HIGH
	Ramp:	8 s

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Якою була реакція системи на запуск?

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- a. ротор почав обертатися;
  - b. мотор зупинився;
  - c. ротор змінив напрямок обертання.
2. Якою буде реакція системи, якщо у випадку відсутності руху ротора прокрутити його рукою?
- a. ротор почне обертатися;
  - b. ротор не буде обертатися;
  - c. ротор змінить напрямок обертання.
3. Як можна пояснити відсутність руху ротора?
- a. відсутністю магнітного поля;
  - b. маса ротора занадто велика, що не дозволяє йому обертатися в полі статора, що швидко обертається;
  - c. порушене обертальне поле статора.

### 7.4.1.5. Експеримент № 5. Вимірювання швидкості обертання двигуна

У даному експерименті проводиться вимірювання швидкості обертання двигуна за допомогою стробоскопа UniTrain CO4203-2G (Помилка! Джерело посилання не знайдено.).

На Рис. 8.29 зображено зовнішній вигляд вікна стробоскопа, де:

- SPEED [RPM] – показує частоту обертання (об/хв);
- FREQUENCY [HZ] – індикатор частоти обертання (Гц), що змінюється за допомогою кнопок, які розташоване під ним;
- BRIGHT – при натисканні кнопки збільшується яскравість стробоскопа (слід використовувати лише короткочасно);
- POWER – кнопка, що вмикає й вимикає стробоскоп.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

У рамках експерименту це означає, що при спрацюванні стробоскопа один раз на секунду світло блимає 60 разів/хв, а, у свою чергу, електродвигун з обертальним полем 1 Гц здійснює 60 об/хв.

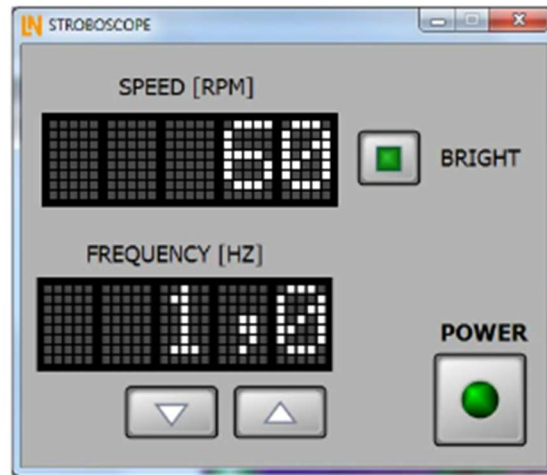


Рис. 8.29. Зовнішній вигляд вікна стробоскопа

Для виконання експерименту необхідно відкрити середовище LS і перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous or asynchronous motor? >> Stroboscope.

Для проведення експерименту необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.30). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.10.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.30. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для вимірювання швидкості обертання  
двигуна за допомогою стробоскопа

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Підключити стробоскоп до виходу «"ANALOG OUT" UniTrain».
2. Відкрити віртуальний вимірювальний прилад «STROBOSCOPE» в розділі віртуальних приладів.
3. Нанести маркування на ротор з постійними магнітами (Рис. 8.31) та вставити його у двигун.
4. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
5. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
6. Запустити перетворювач частоти кнопкою «Power».
7. Увімкнути лампочку стробоскопа кнопкою «POWER» вікна керування стробоскопом (Рис. 8.29).

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

8. Установити однакову частоту на двигуні та стробоскопі в наступному порядку: 20, 40 і 60 Гц. Навести спалах стробоскопа на мітку (Рис. 8.32).
9. Спостерігати за зміною значень вікна стробоскопа.

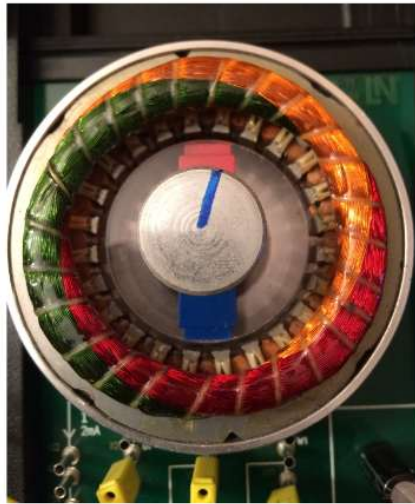


Рис. 8.31. Нанесення маркування на вал ротора

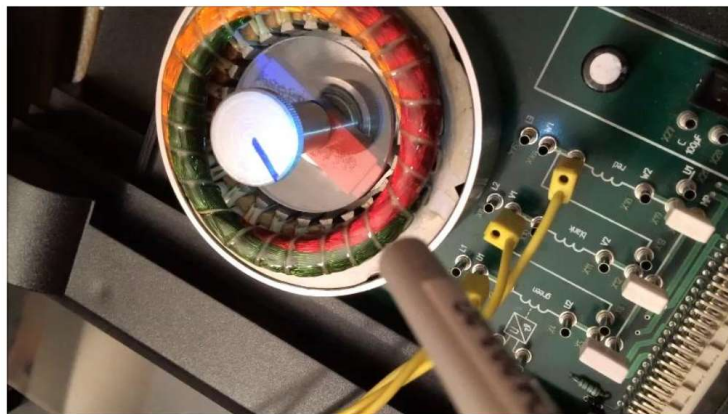


Рис. 8.32. Вимірювання швидкості за допомогою мітки на роторі  
двигуна

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Яке явище можна спостерігати за однакових частот на стробоскопі й перетворювачі частоти?
  - a. поле, що обертається, вимкнено;
  - b. складається враження, що ротор стоїть на місці.
2. Яку швидкість обертання має ротор з постійними магнітами за частоти 20 Гц?
  - a. 900 об/хв;
  - b. 1000 об/хв;
  - c. 1100 об/хв;
  - d. 1200 об/хв;
  - e. 1300 об/хв;
  - f. 1400 об/хв.
3. Яку швидкість обертання має ротор з постійними магнітами за частоти 40 Гц?
  - a. 900 об/хв;
  - b. 1200 об/хв;
  - c. 1600 об/хв;
  - d. 1800 об/хв;
  - e. 2000 об/хв;
  - f. 2200 об/хв;
  - g. 2400 об/хв;
  - h. 2600 об/хв.
4. Яку швидкість обертання має ротор з постійними магнітами за частоти 60 Гц?

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- a. 500 об/хв;
- b. 2700 об/хв;
- c. 3000 об/хв;
- d. 3300 об/хв;
- e. 3600 об/хв;
- f. 3900 об/хв;
- g. 4400 об/хв;
- h. 4600 об/хв.

### 7.4.1.6. Експеримент № 6. Вимірювання обертового магнітного поля й швидкості обертання двигуна

Із попередніх пунктів відомо, що різниця швидкостей обертання між магнітним полем статора та валом (ротором) електродвигуна визначається параметром ковзання. В асинхронній машині для створення крутного моменту необхідно, щоб швидкість обертання ротора була нижча, ніж швидкість обертового магнітного поля статора. У синхронній машині швидкість обертання повинна бути майже такою ж (або рівною) швидкості обертового магнітного поля статора.

Для виконання експерименту необхідно відкрити середовище LN і перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous or asynchronous motor? >> Measurement of rotating magnetic field and rotation speed (stator and rotor).

Для проведення експерименту необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.33). Із процесом покрокової

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.



Рис. 8.33. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.

Фінальна конфігурація схеми для вимірювання обертового магнітного поля та швидкості обертання двигуна

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.10.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Нанести маркування у вигляді смужки на ручку ротора з постійними магнітами (Рис. 8.13).

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

2. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
3. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
4. Запустити частотний перетворювач і збільшити частоту до 60 Гц.
5. Підключити стробоскоп до виходу «"ANALOG OUT" UniTrain».
6. Відкрити вікно стробоскопа й встановити частоту (FREQUENCY) рівною 59 Hz.
7. Натиснути кнопку «POWER» вікна керування стробоскопом, підсвітити ним ротор і почати повільно зменшувати частоту (стробоскопа), поки не буде досягнуто нерухоме зображення. Під світлом стробоскопа повинно здаватися, що ротор і маркування на ньому нерухомі.
8. Підтримувати двигун увімкненим, спостерігаючи реакцію системи.
9. Вимкнути двигун, натиснувши кнопку «POWER» перетворювача частоти.
10. Встановити замість ротора з постійними магнітами короткозамкнений ротор і нанести на нього позначку.
11. Знову запустити двигун за допомогою перетворювача частоти й направити на нього стробоскоп.
12. Відрегулювати частоту до того стану, поки маркування на роторі не буде стояти на місці.

### **Надайте відповідь на наступне запитання:**

1. Що можна побачити під час проведення експерименту з різними видами ротора?

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- a. ШІМ-сигнал живлення двигуна;
- b. синусоїдальний струм;
- c. ковзання між оберतालними полями статора й ротора в асинхронному двигуні.

### 7.4.1.7. Експеримент № 7. Дослідження зсуву фаз в асинхронному двигуні

У даному експерименті буде здійснене порівняння форм струму двох фаз асинхронного двигуна із КЗ ротором у разі зсуву фаз.

Для виконання експерименту необхідно відкрити середовище LS і перейти за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Synchronous or asynchronous motor? >> Phase shift.

Для проведення експерименту необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.34). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний осцилограф («OSCILLOSCOPE»), скориставшись указівками із Таблиця 8.11.

Відкрити віртуальний осцилограф можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Наступним кроком слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.9.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

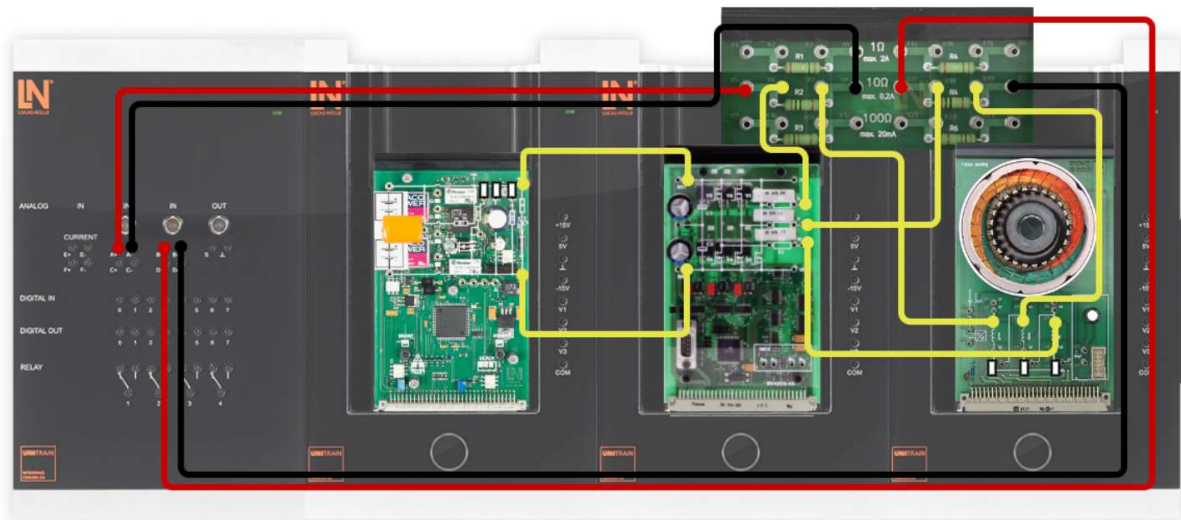
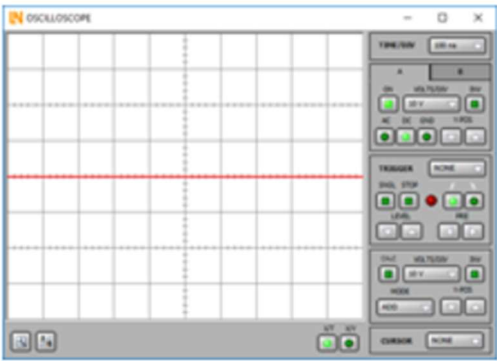


Рис. 8.34. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для дослідження фазового зсуву в асинхронному двигуні

Таблиця 8.11. Налаштування параметрів віртуального осцилографа

	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Channel A: 2 V/div; DC; Y-POS:</li><li>▪ Channel B: 2 V/div; DC; Y-POS:</li><li>▪ Time: 5 ms/div</li><li>▪ Mode: X/T</li><li>▪ Trigger: CHANNEL A; rising_edge; LEVEL: 10 % div; PRETRIGGER: div</li></ul>
---	--

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Після налаштування віртуальних приладів для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна осцилографа й перетворювача частоти відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити перетворювач частоти за допомогою кнопки «Power» і збільшити частоту до 30 Гц.
4. Зафіксувати показники осцилографа, створивши скріншот або скориставшись спеціальним вікном у LS, на сторінці поточного експерименту, натиснувши кнопку «Paste from clipboard».

### **Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яке розташування двох досліджуваних фаз відносно одна одної?
  - a. обидві фази знаходяться одна над одною. Це означає, що немає фазового зсуву;
  - b. обидві фази зсунуті у часі. Це означає, що присутній фазовий зсув.
2. Наскільки великим є фазовий зсув (якщо такий виявлено), мс?
  - a. 1 мс;
  - b. 5 мс;
  - c. 10 мс;
  - d. 15 мс.

### 7.4.1.8. Тест № 1. Дослідження асинхронних і синхронних електродвигунів

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Що відбудеться у випадку, якщо в асинхронній машині швидкості обертання поля статора й ротора будуть однаковими?
  - a. мотор зупиниться;
  - b. двигун працюватиме нормально;
  - c. двигун зупиниться, потім знову запусниться, знову зупиниться та знову запусниться.
2. Що відбудеться у випадку, якщо в синхронній машині швидкості обертання поля статора й ротора будуть однаковими?
  - a. мотор зупиниться;
  - b. двигун працюватиме нормально;
  - c. двигун зупиниться, потім знову запусниться, знову зупиниться та знову запусниться.
3. Що відбудеться у випадку, якщо в асинхронній машині швидкості обертання поля статора й ротора будуть різними?
  - a. мотор зупиниться;
  - b. двигун працюватиме нормально;
  - c. двигун зупиниться, потім знову запусниться, знову зупиниться та знову запусниться.
4. Що відбудеться у випадку, якщо в синхронній машині швидкості обертання поля статора й ротора будуть сильно відрізнятись?
  - a. мотор зупиниться;
  - b. двигун працюватиме нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

с. двигун зупиниться, потім знову запусниться, знову зупиниться та знову запусниться.

### 7.4.2. Частина № 2. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів

Перед виконанням даної частини лабораторної роботи необхідно ознайомитись із теоретичною частиною, що викладена в пункті 8.3.9. Для безпосереднього виконання лабораторної роботи на стенді LN необхідно відкрити LS і перейти на сторінку виконання експерименту за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Connection configurations >> Current consumption in star configuration.

#### 7.4.2.1. Експеримент № 1. Дослідження з'єднання обмоток асинхронного двигуна зіркою

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.35). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.12.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

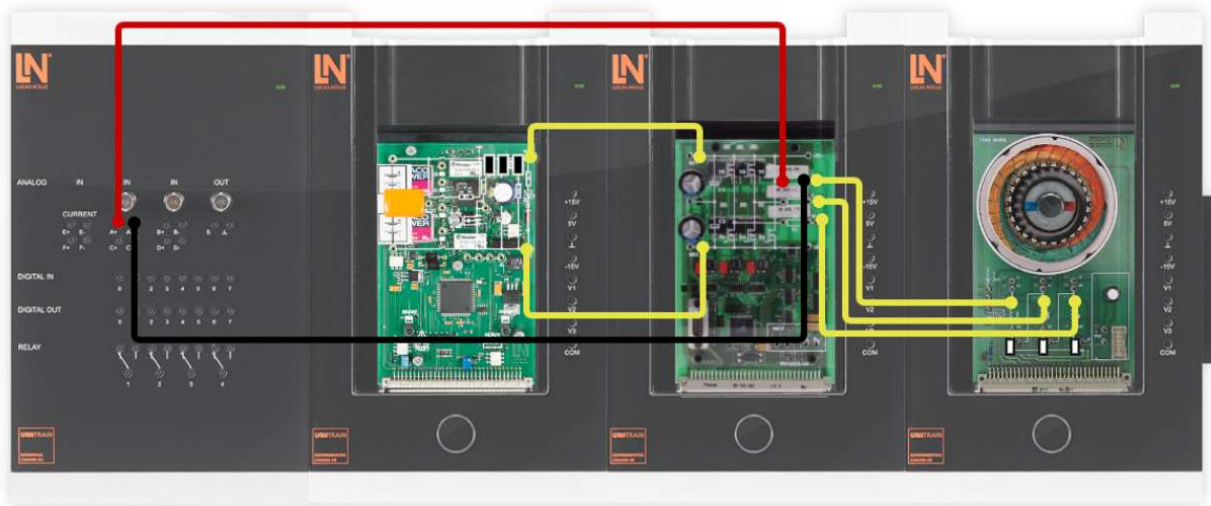


Рис. 8.35. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для дослідження з'єднання обмоток асинхронного двигуна зіркою

Таблиця 8.12. Налаштування віртуального перетворювача частоти


	Instrument :	FREQUENC Y CONVERTE R
	Start frequency:	0 Hz
	End frequency:	45 Hz
	Start value:	60 %
	CLOCK:	HIGH
	Ramp:	8 s

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Наступним кроком необхідно налаштувати віртуальний амперметр каналу А (AMPERMETR A), скориставшись указівками із Таблиця 8.13.

Відкрити віртуальний амперметр можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту LS.

Таблиця 8.13. Налаштування віртуального амперметра каналу А

	<p>Встановіть наступні параметри для амперметра каналу А</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ RANGE: 10 V</li><li>▪ MODE: RMS</li><li>▪ DC</li><li>▪ SHUNT: 1 Ohm</li></ul>
--	--

Після налаштування віртуальних приладів для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Виконати запуск перетворювача частоти й повільно збільшувати частоту від 0 до 45 Гц.
4. Встановити вимірювальний резистор на амперметрі значенням в 1 Ом і вибрати режим роботи «RMS».
5. Розрахувати значення струму/спостерігати значення струму на амперметрі.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Надайте відповідь на наступне запитання:

1. Чому дорівнює значення струму  $I_{R1}$ ?
  - а. значення струму дорівнює \_\_\_ А.

### 7.4.2.2. Експеримент № 2. Дослідження з'єднання обмоток асинхронного двигуна трикутником

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Connection configurations >> Current consumption in delta configuration.

Далі необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.36). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

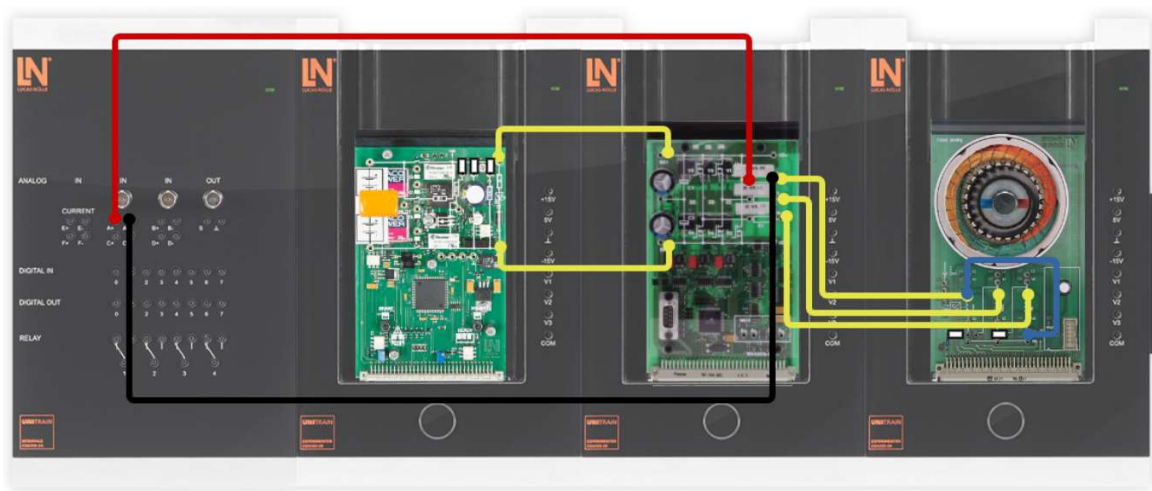


Рис. 8.36. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.

Фінальна конфігурація схеми для дослідження з'єднання обмоток асинхронного двигуна трикутником

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.12.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Наступним кроком необхідно налаштувати віртуальний амперметр каналу А (AMPERMETR A), скориставшись указівками із Таблиця 8.13.

Відкрити віртуальний амперметр можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту LS.

Після налаштування віртуальних приладів для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Виміряти значення струму за допомогою віртуального амперметра. Наявність значної індуктивної складової можуть викликати стрибки струму, що може спровокувати помилку та увімкнення індикатора OVR. У рамках даного експерименту його можна проігнорувати.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

**Надайте відповідь на наступне запитання:**

1. Чому дорівнює значення струму  $I_{R1}$ ?
  - a. значення струму дорівнює \_\_\_ А.

### 7.4.2.3. Експеримент № 3. Зміна напрямку обертання двигуна. Спосіб підключення № 1

У рамках даного експерименту буде досліджене питання зміни напрямку обертання двигуна за одного зі способів підключення. Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Rotation reversal >> Rotation reversal experiment 1.

Далі необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.37). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

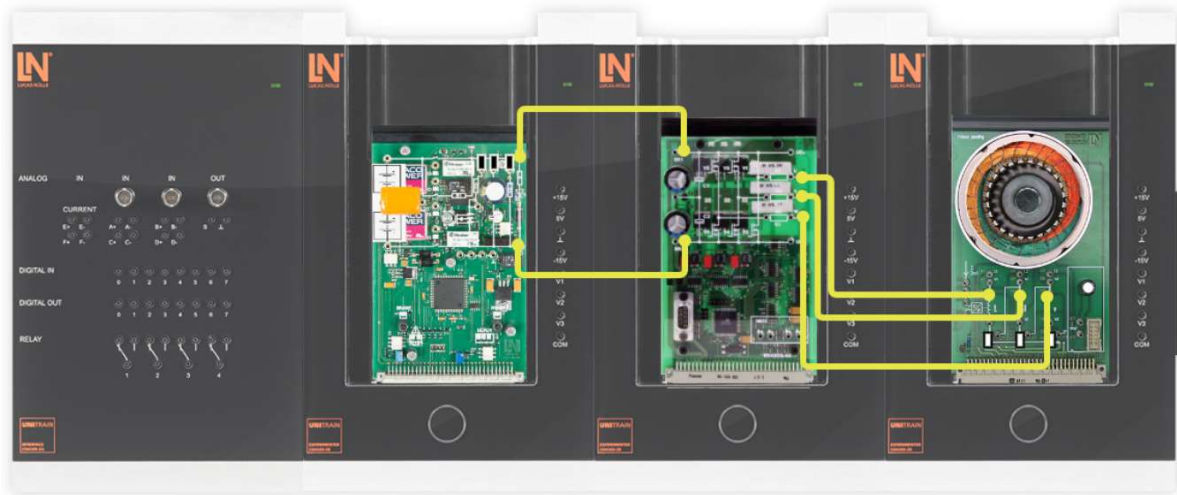


Рис. 8.37. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для зміни напрямку обертання двигуна.

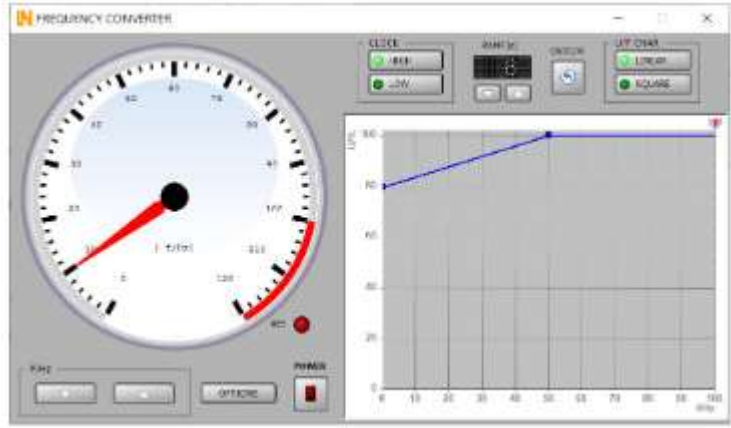
### Спосіб підключення № 1

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.14.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Таблиця 8.14. Налаштування віртуального перетворювача частоти

	Instrument :	FREQUENC Y CONVERTE R
	Frequency:	45 Hz
	Start value:	60 %
	CLOCK:	HIGH
	Ramp:	8 s

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити двигун, натиснувши кнопку «Power» вікна віртуального перетворювача частоти.
4. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
5. Вимкнути систему.

**Надайте відповідь на наступне запитання:**

1. Яким є напрямок обертання ротора електродвигуна?
  - а. за годинниковою стрілкою;
  - б. проти годинникової стрілки.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.4.2.4. Експеримент № 4. Зміна напрямку обертання двигуна. Спосіб підключення № 2

У рамках даного експерименту буде досліджене питання зміни напрямку обертання двигуна за одного зі способів підключення. У даному випадку змінюється порядок підключення обмоток V і W двигуна. Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Rotation reversal >> Rotation reversal experiment 2.

Далі необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.38). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.14.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле K1 і K3.
3. Запустити двигун, натиснувши кнопку «Power» вікна віртуального перетворювача частоти.
4. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
5. Вимкнути систему.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.38. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для зміни напрямку обертання двигуна.

### Спосіб підключення № 2

#### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Яким є напрямок обертання ротора електродвигуна?
  - a. за годинниковою стрілкою;
  - b. проти годинникової стрілки.
2. Чому змінюється напрямок обертання?
  - a. тому що напрямок обертання ротора можливий тільки у цьому напрямку;
  - b. тому що напрямок обертання на старті довільний;
  - c. коли дві фази міняються місцями, напрямок обертання оберального поля змінюється на протилежний.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.4.2.5. Експеримент № 5. Зміна напрямку обертання двигуна. Спосіб підключення № 3

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Rotation reversal >> Rotation reversal experiment 3.

Далі необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.39). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.14.

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити двигун, натиснувши кнопку «Power» вікна віртуального перетворювача частоти.
4. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
5. Натиснути кнопку CW/CCW на перетворювачі частоти. Водночас повинен увімкнутися світлодіод REV.
6. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
7. Вимкнути систему.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.39. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для зміни напрямку обертання двигуна.

### Спосіб підключення № 3

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яким є напрямок обертання ротора електродвигуна?
  - a. за годинниковою стрілкою;
  - b. проти годинникової стрілки.
2. Чому змінюється напрямок обертання?
  - a. тому що зміна управління має такий же ефект, як і зміна двох фаз;
  - b. тому що напрямок обертання на старті довільний;
  - c. тому що можна запустити ротор тільки у цьому напрямку.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.4.2.6. Експеримент № 6. Зміна напрямку обертання двигуна. Спосіб підключення № 4

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Rotation reversal >> Rotation reversal experiment 4.

Далі необхідно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.40). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

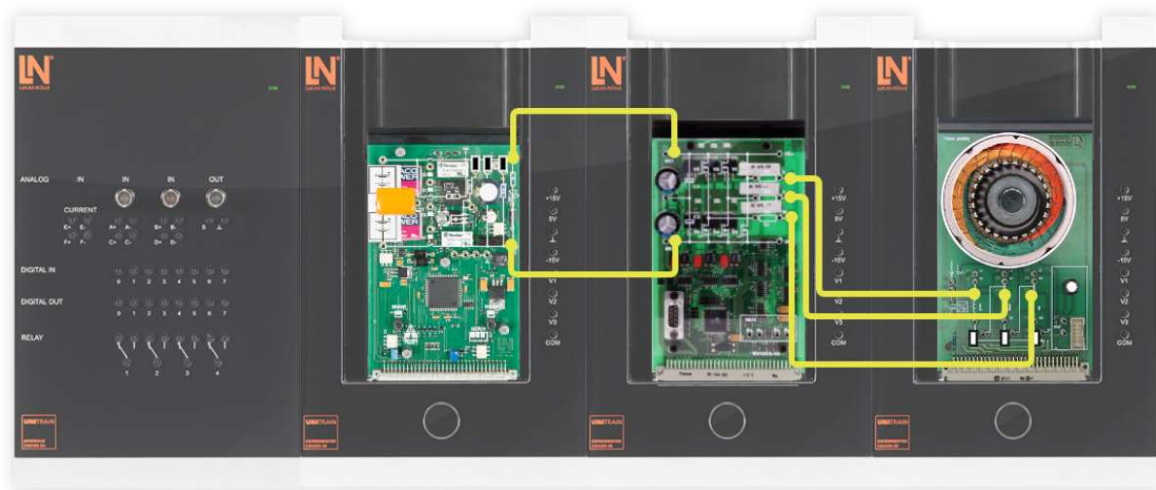


Рис. 8.40. Дослідження типів підключення обмоток електродвигунів.  
Фінальна конфігурація схеми для зміни напрямку обертання двигуна.

#### Спосіб підключення № 4

Після успішної конфігурації системи слід налаштувати віртуальний перетворювач частоти («FREQUENCY CONVERTER»), скориставшись указівками із Таблиця 8.14.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Відкрити віртуальний перетворювач частоти можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту в LS.

Після налаштування віртуального перетворювача частоти для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікно перетворювача частоти відкритим.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Запустити двигун, натиснувши кнопку «Power» вікна віртуального перетворювача частоти.
4. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
5. За допомогою вікна перетворювача частоти встановити частоту зі знаком «-». Водночас індикатор REV повинен увімкнутися.
6. Спостерігати за напрямком обертання двигуна.
7. Вимкнути систему.

### **Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Чому змінюється напрямок обертання?
  - a. тому що зміна управління має такий же ефект, як і зміна двох фаз;
  - b. тому що напрямок обертання на старті довільний;
  - c. тому що можна запустити ротор саме у цьому напрямку.
2. Оберіть правильну відповідь
  - a. на напрямок обертання можуть впливати випадкові (довільні) параметри;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- b. напрямок обертання можна змінити, змінивши місцями дві фази на двигуні;
- c. встановлення негативної частоти може викликати зміну напрямку обертання двигуна проти годинникової стрілки;
- d. взаємодія між частотою та з'єднаними фазами впливає на напрямок обертання двигуна;
- e. активувавши кнопку CW/CCW, можна змінити напрямок обертання на інший;
- f. змінюючи керування виходами інвертора за допомогою кнопок CW/CCW, можна змінити напрямок обертання двигуна на протилежний;
- g. для зміни напрямку обертання не має значення, які дві фази з'єднання із двигуном змінити місцями;
- h. щоб змінити напрямок обертання, ротор можна просто штовхнути в іншу сторону;
- i. відповіді a, e, g, h є вірними;
- j. відповідь a, c, f, g, h не є вірними;
- k. відповідь b, d, e, f, g є вірними.

### 7.4.3. Частина № 3. Діагностика електродвигуна

Перед виконанням даної частини лабораторної роботи необхідно ознайомитись із теоретичною частиною, що викладена в пункті 8.3.11. Для безпосереднього виконання лабораторної роботи на стенді LN необхідно відкрити LS і перейти на сторінку виконання експерименту

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Electric motor diagnostics >> Determining the electrical variables of the motor.

### 7.4.3.1. Експеримент № 1. Вимірювання електричних параметрів електродвигуна

У даному експерименті будуть виміряні опори фаз електродвигуна при схемі з'єднання «Зірка» (Рис. 8.41). Значення опору обмоток стенда LN модуля «Двигун» становить

$$R_{uvw} = 20 \text{ Ом} \pm 10 \text{ Ом.} \quad 8.22$$

Для проведення експерименту слід послідовно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.42, Рис. 8.35), змінюючи конфігурацію по ходу виконання. Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Спостерігати за роботою двигуна.
4. Відключити, ізолювати (плеєр у LS) й підготувати систему до вимірювання опорів. Переконавшись, що лінії живлення електродвигуна від модуля «Трифазний інвертор» відключені.
5. Виміряти опір на клеммах з'єднання обмоток і порівняти отримані дані з параметрами, що вказані виробником (Таблиця 8.15).
6. Провести вимірювання опору між клеммами  $U_1/V_1/W_1$  (Рис. 8.43).

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

7. Виміряти значення опору величини ізоляції обмотки  $R_{insu}$  по відношенню до металевого корпусу статора, урахувавши, що вказане виробником значення опору  $R_{insu} \Rightarrow 10 \text{ МОм}$ .

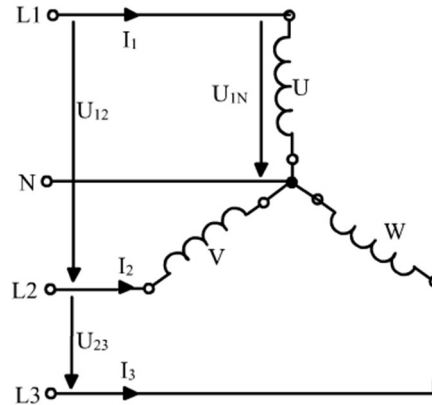


Рис. 8.41. Зхема з'єднання двигуна зірка



Рис. 8.42. Діагностика електродвигуна. Фінальна конфігурація схеми для вимірювання електричних параметрів електродвигуна

Таблиця 8.15. Значення опору зазначені виробником

RL1(U1) до RL2(V1)	40 Ом +/- 15 Ом
RL2(V1) до RL3(W1)	40 Ом +/- 15 Ом
RL3(W1) до RL1(U1)	40 Ом +/- 15 Ом

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

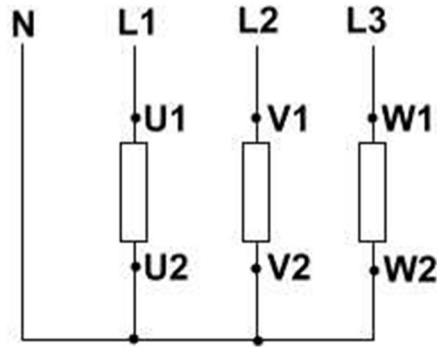


Рис. 8.43. Схема під'єднання обмоток модуля «Двигун»

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яке значення опору було виміряно між  $U_1$  і  $V_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
  - a. значення опору між  $U_1$  і  $V_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
2. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $U_1$  і  $V_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
  - a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
3. Яке значення опору було виміряно між  $V_1$  і  $W_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $V_1$  і  $W_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
4. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $V_1$  і  $W_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
- b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
- c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
- d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
- e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
- f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
- g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
- h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
5. Яке значення опору було виміряно між  $W_1$  і  $U_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $W_1$  і  $U_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
6. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $W_1$  і  $U_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
7. Порівняйте величину виміряного опору між клемми обмоток і металевим корпусом статора відносно даних, що були надані виробником ( $R_{insu}$ ).
- a. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 1 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - b. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - c. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - d. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 1 кОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - e. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- f. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника.

### 7.4.3.2. Експеримент № 2. Усунення несправності в електродвигуні. Випадок № 1

У даному експерименті досліджується спосіб виявлення та усунення несправності в електродвигуні. Несправність проявляється у вигляді зниження потужності електродвигуна.

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Electric motor diagnostics>> Troubleshooting on electric motor 1.

Далі необхідно послідовно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.44), змінюючи конфігурацію по ходу виконання. Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитись на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Спостерігати за роботою двигуна.
4. Відключити, ізолювати (плеєр у LS) й підготувати систему до вимірювання опорів. Переконавшись, що лінії живлення електродвигуна від модуля «Трифазний інвертор» відключені.
5. Виміряти опір на клеммах з'єднання обмоток і порівняти отримані дані з параметрами, що вказані виробником (Таблиця 8.16).

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

6. Провести вимірювання опору між клемми  $U_1/V_1/W_1$  (Рис. 8.43).
7. Виміряти значення опору величини ізоляції обмотки  $R_{insu}$  по відношенню до металевого корпусу статора, урахувавши, що вказане виробником значення опору  $R_{insu} \Rightarrow 10 \text{ МОм}$ .



Рис. 8.44. Діагностика електродвигуна. Фінальна конфігурація схеми для усунення несправності в електродвигуні. Випадок № 1

Таблиця 8.16. Значення опору зазначені виробником

RL1(U1) до RL2(V1)	40 Ом
RL2(V1) до RL3(W1)	40 Ом
RL3(W1) до RL1(U1)	40 Ом

### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Порівняйте величину вимірюваного опору між клемми  $U_1$  і  $V_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
  - а. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - б. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - с. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
2. Яке значення опору було виміряно між  $V_1$  і  $W_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $V_1$  і  $W_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
3. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $V_1$  і  $W_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
4. Яке значення опору було виміряно між  $U_1$  і  $V_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $U_1$  і  $V_1$  дорівнює \_\_\_МОм.
5. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $W_1$  і  $U_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
- b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
- c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
- d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
- e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
- f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
- g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
- h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
6. Порівняйте величину виміряного опору між клемми обмоток і металевим корпусом статора відносно даних, що були надані виробником ( $R_{insu}$ ).
- a. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 1 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- b. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
- c. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
- d. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 1 кОм, що відповідає специфікаціям виробника;
- e. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
- f. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника.

### 7.4.3.3. Експеримент № 3. Усунення несправності в електродвигуні. Випадок № 2

У даному експерименті досліджується спосіб виявлення й усунення несправності в електродвигуні. Несправність проявляється у вигляді зниження потужності електродвигуна.

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Electric motor diagnostics>> Troubleshooting on electric motor 2.

Далі необхідно послідовно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.45), змінюючи конфігурацію по ходу виконання. Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.45. Діагностика електродвигуна. Фінальна конфігурація схеми для усунення несправності в електродвигуні. Випадок № 2

Після успішної конфігурації системи слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Спостерігати за роботою двигуна.
4. Відключити, ізолювати (плеєр у LS) й підготувати систему до вимірювання опорів. Переконайтеся, що лінії живлення електродвигуна від модуля «Трифазний інвертор» відключені.
5. Виміряти опір на клеммах з'єднання обмоток і порівняти отримані дані з параметрами, що вказані виробником (Таблиця 8.16).
6. Провести вимірювання опору між клеммами  $U_1/V_1/W_1$  (Рис. 8.43).
7. Виміряти значення опору величини ізоляції обмотки  $R_{insu}$  по відношенню до металевого корпусу статора, урахувавши, що вказане виробником значення опору  $R_{insu} \Rightarrow 10 \text{ МОм}$ .

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яке значення опору було виміряно між  $U_1$  і  $V_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
  - a. значення опору між  $U_1$  і  $V_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
2. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $U_1$  і  $V_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
  - a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
3. Яке значення опору було виміряно між  $V_1$  і  $W_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
  - a. значення опору між  $V_1$  і  $W_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
4. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $V_1$  і  $W_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
  - a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
5. Яке значення опору було виміряно між  $W_1$  і  $U_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $W_1$  і  $U_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
6. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $W_1$  і  $U_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
7. Порівняйте величину виміряного опору між клемми обмоток і металевим корпусом статора відносно даних, що були надані виробником ( $R_{insu}$ ).
- a. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 1 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - b. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - c. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора вище 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - d. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 1 кОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - e. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - f. опір ізоляції між обмотками котушки й корпусом статора нижче 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника.

### 7.4.3.4. Експеримент № 4 Усунення несправності в електродвигуні.

#### Випадок № 3

У даному експерименті досліджується спосіб виявлення й усунення несправності в електродвигуні. Несправність проявляється у вигляді зниження потужності електродвигуна

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

Для проведення експерименту необхідно перейти на сторінку в LS за наступною адресою: EDCV >> Electric motor >> Electric motor diagnostics>> Troubleshooting on electric motor 3.

Далі необхідно послідовно сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.46), змінюючи конфігурацію по ходу виконання. Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитися на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішної конфігурації системи слід виконати наступний порядок дій:

1. Виконати запуск системи, зберігаючи вікна віртуальних приладів відкритими.
2. Дочекатися спрацювання системних реле К1 і К3.
3. Спостерігати за роботою двигуна.
4. Відключити, ізолювати (плеєр у LS) й підготувати систему до вимірювання опорів. Переконайтеся, що лінії живлення електродвигуна від модуля «Трифазний інвертор» відключені.
5. Виміряти опір на клеммах з'єднання обмоток і порівняти отримані дані з параметрами, що вказані виробником (Таблиця 8.16).
6. Провести вимірювання опору між клеммами  $U_1/V_1/W_1$  (Рис. 8.43).
7. Виміряти значення опору величини ізоляції обмотки  $R_{insu}$  по відношенню до металевого корпусу статора, ураховуючи, що вказане виробником значення опору  $R_{insu} \Rightarrow 10 \text{ МОм}$ .

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун



Рис. 8.46. Діагностика електродвигуна. Фінальна конфігурація схеми для усунення несправності в електродвигуні. Випадок № 3

### Надайте відповідь на наступні запитання:

1. Яке значення опору було виміряно між  $U_1$  і  $V_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
  - a. значення опору між  $U_1$  і  $V_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
2. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $U_1$  і  $V_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
  - a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
3. Яке значення опору було виміряно між  $V_1$  і  $W_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $V_1$  і  $W_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.
4. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $V_1$  і  $W_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
5. Яке значення опору було виміряно між  $W_1$  і  $U_1$  при з'єднанні обмотки зіркою?
- a. значення опору між  $W_1$  і  $U_1$  дорівнює \_\_\_ Ом.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

6. Порівняйте величину виміряного опору між клемми  $W_1$  і  $U_1$  відносно даних, що були надані виробником (Таблиця 8.15).
- a. значення опору становить приблизно 20 Ом, це нормально;
  - b. значення опору становить приблизно 30 Ом, це нормально;
  - c. значення опору становить приблизно 40 Ом, це нормально;
  - d. значення опору становить приблизно 0 Ом, це не нормально;
  - e. значення опору становить приблизно 20 Ом, це не нормально;
  - f. значення опору становить приблизно 30 Ом, це не нормально;
  - g. значення опору становить приблизно 40 Ом, це не нормально;
  - h. значення опору знаходиться в діапазоні МОм, це не нормально.
7. Порівняйте величину виміряного опору між клемми обмоток і металевим корпусом статора відносно даних, що були надані виробником ( $R_{insu}$ ).
- a. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 1 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - b. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - c. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора вище 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
  - d. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 1 кОм, що відповідає специфікаціям виробника;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- e. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 5 МОм, що відповідає специфікаціям виробника;
- f. опір ізоляції між обмотками котушки і корпусом статора нижче 10 МОм, що відповідає специфікаціям виробника.

### 7.4.4. Частина № 4. Дослідження рекуперації енергії

Перед виконанням даної частини лабораторної роботи необхідно ознайомитись із теоретичною частиною, що викладена в пункті 8.3.12. Для безпосереднього виконання лабораторної роботи на стенді LN необхідно відкрити LS і перейти на сторінку виконання експерименту за наступною адресою: EDCV >> Regeneration>> Experiment on regeneration (energy recovery).

#### 7.4.4.1. Експеримент № 1. Вимірювання рекуперації енергії

Для проведення експерименту слід сконфігурувати стенд за наведеною нижче схемою (Рис. 8.47). Із процесом покрокової конфігурації стенда можна ознайомитись на відкритій сторінці експерименту в LS.

Після успішного виконання підключення слід налаштувати віртуальні вимірювальні прилади. Для цього експерименту необхідно налаштувати віртуальний вольтметр каналу А (VOLTMETER A), скориставшись указівками із Таблиця 8.17.

Відкрити віртуальний вольтметр можна за допомогою меню віртуальних приладів або натиснувши на його зображення в таблиці з конфігурацією на панелі експерименту LS.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

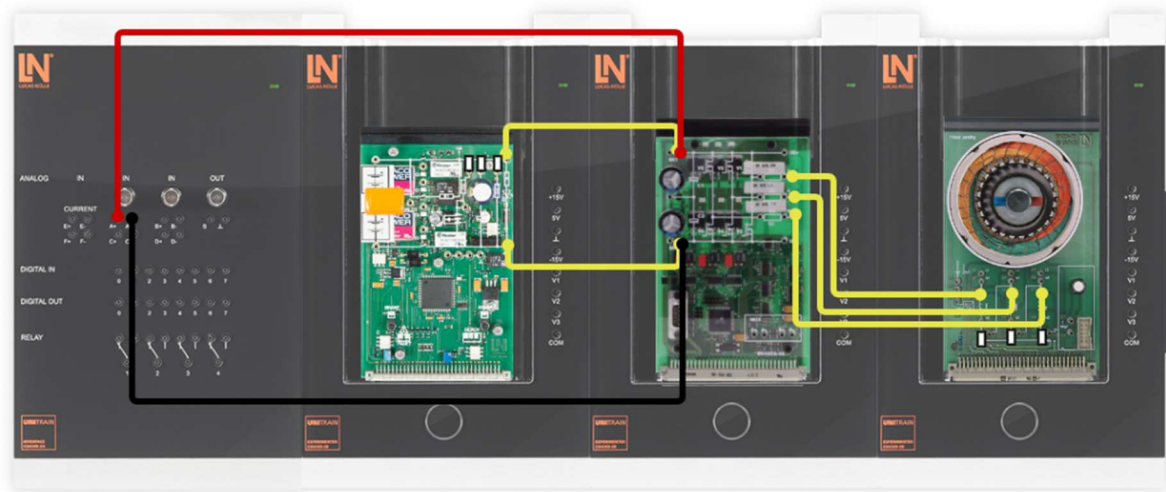


Рис. 8.47. Дослідження рекуперації енергії. Фінальна конфігурація схеми для вимірювання рекуперації енергії

Таблиця 8.17. Налаштування віртуального вольтметра канал А

	<p>Установіть наступні параметри для вольтметра каналу А:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ RANGE: 10 V</li><li>▪ MODE: AV</li><li>▪ DC</li></ul>
--	---

Після налаштування віртуального приладу для виконання експерименту слід виконати наступний порядок дій:

1. Прокрутити рукою ротор з постійними магнітами.
2. Спостерігати дані на екрані віртуального вольтметра.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яке значення індукованої напруги спостерігалось на вольтметрі?
2. Індукована напруга залежить від швидкості обертання та становить приблизно \_\_\_ В.

### 7.4.4.2. Тест № 1. Дослідження рекуперації енергії

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Яким терміном визначається поняття «відновлення енергії»?
  - a. регенерація;
  - b. очищення;
  - c. реанімація;
  - d. реформація.
2. Процес рекуперативного гальмування в електромобілі завжди починається із застосування фрикційних гальм. Лише тоді повільно створюється регенеративний гальмівний момент.
  - a. так;
  - b. ні.
3. Системи допомоги водієві, такі як ABS, можуть бути замінені системою рекуперативного гальмування.
  - a. так;
  - b. ні.
4. Інвертор може так керувати електричною машиною, що магнітне поле ротора буде впливати на зменшення або збільшення гальмівного моменту?
  - a. ні, магніти на роторі, що обертається всередині статора, створюють статичний опір, який сповільнює автомобіль;

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- b. так, магнітне поле статора можна регулювати для забезпечення більшої або меншої гальмівної сили;
  - c. так, магнітне поле ротора можна регулювати для забезпечення більшої або меншої гальмівної сили.
5. Якою частиною системи рекуперативного гальмування керує блок керування?
- a. тільки ротором;
  - b. обмотками статора й ротора;
  - c. тільки обмотки статора.
6. Технік А стверджує, що механічну енергію можна перетворити на електричну. Технік В стверджує, що електричну енергію можна перетворити на механічну. Який технік має рацію?
- a. технік А;
  - b. технік Б;
  - c. обидва техніки;
  - d. жоден із техніків.
7. Двигуни/генератори працюють однаково?
- a. так;
  - b. ні.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.4.5. Частина № 5. Тестування

#### 7.4.5.1. Тест № 1. Електродвигун

**Надайте відповідь на наступні запитання:**

1. Продовжити твердження. Для обертання трифазного електродвигуна в його статорі...
  - a. має бути створене обертальне магнітне поле;
  - b. повинна бути вироблена напруга постійного струму.
2. Які типи роторів зазвичай використовуються у трифазних машинах?
  - a. короткозамкнений ротор (Squirrel-cage rotor);
  - b. ротор з постійними магнітами (Permanent magnet rotor);
  - c. фазний ротор (Coil wound rotor);
  - d. ротори з контактними кільцями й без них (Rotors with and without slip-rings);
  - e. варіант а та b;
  - f. варіант а, b, c;
  - g. варіант а, b, c, d.
3. З яких матеріалів виготовляють трифазний двигун?
  - a. магнітно-ламінований сердечник з алюмінієвими стрижнями;
  - b. ламінований статор, що оснащений котушками;
  - c. статор чавунно-формований, що оснащений котушками;
  - d. ламінований алюмінієвий сердечник статора й постійні магніти.
4. Оберіть правильне твердження:

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

- a. у котушці, що проводить струм, електрична енергія перетворюється в механічний обертальний рух;
  - b. у котушці, що проводить струм, магнітна енергія перетворюється в обертальний рух;
  - c. у котушці, що проводить струм, електрична енергія перетворюється в магнітну.
5. Що було б, якби в асинхронній машині швидкість обертового поля статора та частота обертання ротора були однаковими?
- a. мотор би зупинився;
  - b. двигун би працював нормально;
  - c. двигун би зупинився, потім знову запустився, знову зупинився та знову запустився.
6. Що було б, якби швидкість обертового поля та частота обертання ротора були однаковими в синхронній машині?
- a. мотор би зупинився;
  - b. двигун би працював нормально;
  - c. двигун би зупинився, потім знову запустився, знову зупинився та знову запустився.
7. У трифазних двигунах кінці й початки обмоток можуть бути з'єднані в різних конфігураціях або групах. Які із конфігурацій з'єднання є стандартними?
- a. з'єднання зіркою;
  - b. синусоїдальне з'єднання;
  - c. з'єднання трикутником;
  - d. відповідь а та b;
  - e. відповідь b та c.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

8. Як можна здійснити реверс обертання у трифазному двигуні?
- трифазний двигун переважно завжди обертається в одному напрямку;
  - змінюючи управління трифазним роторним полем;
  - змінивши місцями клеми підключення двох фаз;
  - відповідь а та б;
  - відповідь б та с.

### 7.5. Контрольні питання

- Які основні функції та призначення електродвигуна в електромобілі?
- На скільки градусів зміщенні обмотки статора асинхронного електродвигуна із КЗ ротором у просторі відносно одна одної?
- Які основні типи роторів використовуються в машинах змінного струму?
- Які типи роторів використовуються в рамках проведення експериментів на стенді LN?
- Що таке статор електродвигуна?
- Яка відмінність у конструкції ротора синхронної та асинхронної машини змінного струму?
- Які особливості будови (які елементи відсутні) статора модуля «Двигун» у порівнянні із класичним виконанням електричних машин?
- Які частини обмотки статора створюють основне магнітне поле?
- Яким чином укладаються обмотки статора асинхронного двигуна?
- Що називається магнітним полем?

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

11. У чому полягає основна відмінність між асинхронним і синхронним електродвигунами?
12. Синхронні машини з яким типом ротора найчастіше використовуються при побудові електромобіля?
13. Чи можна здійснювати регулювання магнітного потоку ротора PMSM двигуна?
14. З якого сплаву виробляються магніти в роторах синхронних електродвигунів із постійними магнітами?
15. Яким терміном позначається ступінь відхилення швидкості обертання магнітного поля ротора від магнітного поля статора?
16. Який тип ротора частіше за все використовується у класичних асинхронних двигунах, яка його будова?
17. Які типи схем з'єднання обмоток електродвигуна є найбільш розповсюдженими? Яке співвідношення між фазними й лінійними напругами в них?
18. Чи залежить максимальне значення крутного моменту електродвигуна від схеми під'єднання обмоток? Якщо так, то як саме?
19. Яке призначення датчика положення ротора електродвигуна в системі електропривода електромобіля?
20. Чи існує можливість вимірювати положення ротора електродвигуна електромобіля за допомогою резольвера й релюктора, коли двигун не обертається? Пояснити свою відповідь.
21. Які основні види несправностей можуть виникати в електродвигунах?

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

22. Якими документами регламентується порядок виконання діагностики в електромобілях?
23. Які існують способи діагностики перегорання обмоток статора?
24. Для чого використовується режим рекуперативного гальмування в електромобілі?
25. Як відбувається процес рекуперативного гальмування?
26. Чи може електромобіль гальмувати до повної зупинки за рахунок режиму рекуперативного гальмування?
27. Яке співвідношення між силами фрикційних гальм і рекуперативного гальмування під час зниження швидкості транспортного засобу до повної зупинки?
28. Який напрямок протікання енергії під час рушійного режиму й режиму рекуперативного гальмування?
29. На якій швидкості досягається максимальний гальмівний момент при гальмуванні засобами рекуперативного гальмування?
30. Чи використовується режим рекуперативного гальмування при значенні SoC у 85 %?

### 7.6. Формування звіту

Кожен здобувач повинен отримати допуск до захисту роботи шляхом особистого або групового виконання лабораторної роботи № 5 за стендом Lucas-Nuelle та формування звіту.

## 7. Лабораторна робота № 5. Електродвигун

### 7.6.1. Вимоги до оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи формується з використанням універсального інтерактивного шаблону у форматі PDF, що надається викладачем.

Шаблон містить текстові поля та поля для вставлення зображень, що забезпечує послідовне структурування звіту за результатами проведених експериментів, а також для надання відповідей на контрольні запитання.

Зміст і структура звіту визначаються формою наданого PDF-шаблону. Під час виконання лабораторної роботи здобувач вищої освіти повинен фіксувати процес виконання на фото для подальшого додавання відповідних матеріалів до звіту.

Звіт подається викладачу у друкованому або електронному вигляді (способи подання є рівноцінними). Надсилати електронний звіт здобувач повинен виключно із власної корпоративної пошти Outlook на корпоративну пошту викладача, який проводить курс лабораторних робіт. Формуючи лист, здобувач повинен обов'язково вказати тему листа, що має наступні складові: «Лабораторна робота № 1, «Назва дисципліни (аббревіатура)», «Прізвище та ініціали здобувача», «номер академічної групи». Лист повинен бути складений в офіційно-діловому стилі й містити чіткий опис суті звернення. Зокрема, це може бути: звіт для перевірки, питання щодо виконання лабораторної роботи (із детальним описом питання), повторна подача звіту, технічне питання тощо.

## Глосарій

**Plug-in (штекерний)** – тип електричного з'єднання, що дозволяє легко підключати й відключати різні електронні компоненти або модулі до друкованої плати (PCB) без потреби в пайці.

**Connectable (Під'єднуваний)** – термін, що використовується для опису окремого елемента або компонента, який може бути підключений до системи або пристрою ззовні без необхідності постійного з'єднання.

**Powertrain (Силова частина електромобіля)** – сукупність компонентів електромобіля, що забезпечують його рух. Включає електродвигун, акумуляторну батарею, інвертор, систему передачі та інші допоміжні системи, що відповідають за генерування, передачу й управління енергією для руху транспортного засобу.

**Знижуючий (buck) конвертер** – тип DC/DC конвертера, що знижує вхідну постійну напругу до нижчого рівня на виході.

**Підвищуючий (boost) конвертер** – тип DC/DC конвертера, що підвищує вхідну постійну напругу до вищого рівня на виході.

**Main relay (Головне реле)** – електромеханічний компонент, що управляє підключенням і відключенням високовольтної частини системи електромобіля, включаючи акумуляторну батарею й інші критично важливі елементи.

**Pre-charge (Попереднє зарядження)** – процес попереднього зарядження конденсаторів у системі електромобіля перед увімкненням головного реле.

**Positive relay** (Позитивне реле) – реле, яке управляє підключенням або відключенням позитивної (плюсової) сторони електричного кола.

**Negative relay** (Негативне реле) – реле, яке управляє підключенням або відключенням негативної (мінусової) сторони електричного кола.

**Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor** (MOS-FET транзистор) – тип польового транзистора, що використовує електричне поле для контролю струму через напівпровідниковий матеріал.

**Drive motor** (Тяговий двигун) – електричний двигун, що забезпечує рух транспортного засобу, перетворюючи електричну енергію в механічну.

**Traction batteries** (Тягові акумулятори) – акумулятори, призначені для забезпечення енергії, необхідної для руху електричних транспортних засобів, таких як: електровелосипеди (e-bikes), електричні скутери, мопеди та інше. Діапазон напруги зазвичай знаходиться в межах 24–96 В постійного струму (DC). Вони характеризуються високою енергоємністю та здатністю витримувати великі цикли заряд-розряд.

**HV batteries** (Високовольтні акумулятори) – акумулятори, які працюють за напруги, що значно перевищує стандартні значення для низьковольтних систем, зазвичай понад 60 В (DC). Використовуються в електромобілях і гібридних транспортних засобах для живлення як основних, так і допоміжних систем, забезпечуючи ефективну передачу енергії.

**Discharge rate** (Струмовіддача) – здатність акумулятора віддавати електричний струм за певний проміжок часу. Вимірюється в амперах (A) або як частка від ємності акумулятора (наприклад,  $1C$ , де  $C$  – ємність акумулятора в ампер-годинах). Визначає, з якою швидкістю акумулятор може віддавати енергію без шкоди для своєї продуктивності й терміну служби.

**Thermal runaway** (Термічний розгін) – неконтрольоване самозігрівання літій-іонного акумулятора, яке виникає внаслідок внутрішніх хімічних реакцій, що призводять до швидкого підвищення температури. Цей процес може спричинити плавлення або займання матеріалів акумулятора, вивільнення горючих газів, а в найгірших випадках – вибух або пожежу.

**EMVs** (Electric Motor Vehicles) – транспортні засоби, що використовують електродвигун як основне або допоміжне джерело руху. Це можуть бути як повністю електричні транспортні засоби (electric vehicles, EVs), так і гібридні транспортні засоби (hybrid vehicles), що поєднують електродвигун із двигуном внутрішнього згоряння.

**Cells** (Елементи або комірки) – базові складові акумуляторної батареї, кожен з яких являє собою окрему електрохімічну комірку, що може зберігати й віддавати електричну енергію. Кілька з'єднаних між собою елементів утворюють акумуляторну батарею, що забезпечує необхідну напругу та ємність для роботи електронних пристроїв або транспортних засобів. Елементи можуть бути з'єднані послідовно або паралельно для досягнення потрібних електричних характеристик.

**Interlock/pilot** (Блокування/керування) – система безпеки та управління, що використовується в електромобілях для забезпечення правильного й безпечного підключення та відключення компонентів високовольтної системи. Лінія блокування (interlock) запобігає випадковому включенню або відключенню системи під час технічного обслуговування або зарядки, а лінія керування (pilot) здійснює контроль за процесом зарядки та з'єднання. В електромобілях компанії Toyota ця лінія вбудована в перемикач сервісного роз'єму, забезпечуючи додатковий рівень безпеки й ефективності.

**Active discharge** (Активне розрядження) – процес цілеспрямованого зниження залишкової напруги у високовольтній системі електромобіля після вимкнення або під час обслуговування. Цей процес здійснюється за допомогою спеціального резистора активного розрядження (active discharge resistor), що швидко й безпечно розряджає акумулятор або конденсатори, знижуючи напругу до безпечного рівня для запобігання ураження електричним струмом та інших небезпек.

**Passive (constant) discharge circuit** (Пасивне (стабільне) розрядження) – це електрична схема, що використовує пасивні компоненти, такі як резистори, для поступового зниження напруги в системі. Використовується для безпечного розрядження конденсаторів або інших енергозберігаючих компонентів, коли немає необхідності у швидкому зниженні напруги.

**OEM procedure** (Original Equipment Manufacturer (Процедура виробника оригінального обладнання)) – стандартні операційні процедури, розроблені й затверджені виробником оригінального

## Глосарій

обладнання для обслуговування, ремонту або модифікації транспортного засобу чи його компонентів. Ці процедури забезпечують відповідність усім технічним вимогам і стандартам якості, установленим виробником.

**Меандр** – форма сигналу або графіка, що має серію прямокутних або схожих хвильоподібних піків і спадів. У контексті електроніки та сигналів, меандр використовується для позначення сигналу із чітко визначеними рівнями напруги, які змінюються на постійні відрізки часу, що забезпечує його використання в різних цифрових і аналогових системах.

**ABS** (Anti-lock Braking System) – система, що запобігає блокуванню коліс під час гальмування, дозволяючи підтримувати керованість автомобіля та скорочувати гальмівний шлях на слизьких поверхнях. ABS автоматично регулює гальмівний тиск на кожному колесі, щоб запобігти їх блокуванню.

**ESP** (Electronic Stability Program) – система електронної стабілізації, що допомагає зберігати стійкість і керованість автомобіля під час критичних маневрів, таких як раптове ухилення або поворот. ESP здійснює контроль над кожним колесом індивідуально, коригуючи гальмівний тиск і крутний момент двигуна для запобігання заносу чи ковзанню автомобіля.

**SoC** (State of Charge) – відсотковий показник, що визначає рівень заряду акумуляторної батареї в електромобілі або іншому пристрої з акумуляторним живленням. SoC відображає співвідношення між фактичною кількістю енергії, що зберігається в батареї, та її максимальною ємністю.

## Глосарій

**SoH** (State of Health) – показник, що визначає загальний стан і продуктивність акумуляторної батареї в порівнянні з її початковим станом. SoH оцінює, наскільки ефективно батарея може зберігати й віддавати енергію, відображає ступінь деградації батареї із часом і використанням.

## Список використаних джерел

1. Bongartz B., Brown D., Klingler C., Schulz S. UniTrain course “Electric drive in cars, commercial vehicles and two-wheelers”. Kerpen (Sindorf), Germany : Lucas-Nülle GmbH, 2021. Course CO4204-6N.
2. Lucas Nülle — UniTrain Interface with virtual instruments. URL:<https://www.lucas-nuelle.us/2776/pid/32482/apg/17354/UniTrain-Interface-with-virtual-instruments-basic-VI-.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
3. Lucas Nülle — UniTrain Experimenter. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2776/pid/33250/apg/17850/UniTrain-Experimenter.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
4. Lucas Nülle — Course: HV Battery with Smart Relays. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/35267/apg/18891/Course:-HV-Battery-with-Smart-Relays.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
5. Lucas Nülle — UniTrain measurement accessories, shunts and connection cables. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2776/pid/32483/apg/17354/UniTrain-measurement-accessories,-shunts-and-connection-cables.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
6. Lucas Nülle — Composite Insulating Gloves, Class 0. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/31793/apg/16537/Composite-Insulating-Gloves,-Class-0.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
7. Lucas Nülle — Two-pole voltage tester, 12–690 V AC/DC CAT III 690 V, CAT IV 600 V. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/33182/apg/17780/Two-pole-voltage-tester,-12-690V-AC-DC-CAT-III-690V,-CAT-IV-600V.htm> (дата звернення: 10.07.2024).

## Список використаних джерел

8. Lucas Nülle — Multi13S digital multimeter. URL: <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/1703/apg/1161/Multi13S-digital-multimeter.htm> (дата звернення: 10.07.2024).
9. Electrical Tester | Fluke T110 Voltage and Continuity Tester. URL: <https://www.fluke.com/en-gb/product/electrical-testing/basic-testers/fluke-t110> (дата звернення: 23.07.2024).

Навчальне видання

**Бешта** Олександр Степанович  
**Бешта** Олександр Олександрович  
**Худолій** Сергій Сергійович  
**Халаїмов** Тарас Олександрович

**ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ  
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

Навчальний посібник

У 3 частинах

Частина 3  
**ІНВЕРТОР ТА ЕЛЕКТРОДВИГУН ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

Видано в авторській редакції

Відповідальний за випуск Т.О. Халаїмов

м. Дніпро