


## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
"Електричні машини"  
(для студентів спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка першого  
(бакалаврського) рівня вищої освіти)

*Рекомендовано Науково-методичною  
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 5 від «03» травня 2024 р.)  
Обов'язково до розміщення в репозиторії*



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини» (для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка першого (бакалаврського) рівня вищої освіти) / Уклад. А.В. Рухлов. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 91 с.


Методичні вказівки включають тематику лабораторних робіт відповідно до робочої програми навчальної дисципліни. Складаються з теоретичної та практичної частини, містять критерії оцінювання та детальний хід виконання лабораторних робіт, а також контрольні питання для самоперевірки знань здобувачів.

Рекомендовано для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

*Самостійне електронне текстове мережеве видання*

Затверджено на засіданні кафедри  
автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
(протокол № 8 від «30» квітня 2024 р.)

Узгоджено:  
Секретар Редакційної ради

  
\_\_\_\_\_ Малій Х.В.  
"01" травня 2024 р.

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
...«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



## ЗМІСТ

### ВСТУП

Лабораторна робота №1	Ознайомлення з обладнанням віртуальної лабораторії електричних машин Virtual Labs
Лабораторна робота №2	Дослідження навантажувальних характеристик шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №3	Дослідження характеристик намагнічування шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №4	Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола якоря на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №5	Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола збудження на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №6	Регулювання швидкості двигуна постійного струму за методом Уорда-Леонарда на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №7	Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням за допомогою пакету Matlab Simulink
Лабораторна робота №8	Дослідження двигуна постійного струму з послідовним збудженням за допомогою пакету Matlab Simulink
Лабораторна робота №9	Дослідження однофазного трансформатора за допомогою пакету Matlab Simulink
Лабораторна робота №10	Реалізація дослідів холостого ходу та короткого замикання однофазного трансформатора на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №11	Дослідження трифазного трансформатора за допомогою пакету Matlab Simulink
Лабораторна робота №12	Регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором на платформі Virtual Labs
Лабораторна робота №13	Дослідження синхронного генератора за допомогою пакету Matlab Simulink
Лабораторна робота №14	Дослідження синхронного двигуна за допомогою пакету Matlab Simulink
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	



## ВСТУП

Лабораторний практикум з дисципліни "Електричні машини" спрямований на закріплення набутих здобувачем теоретичних знань і практичних навичок щодо застосування основних методів та засобів вирішення завдань, які постають при аналізі та синтезі різноманітних електричних машин постійного та змінного струмів, а також трансформаторів. Обов'язковим для виконання лабораторних робіт є наявність базових знань з теоретичних основ електротехніки.

Під час виконання лабораторних робіт студенти самостійно здійснюють лабораторні дослідження за допомогою персональних ЕОМ, аналізують отримані результати досліджень, формулюють висновки щодо умов забезпечення оптимальних режимів роботи та параметрів електричних машин.

### ***Правила виконання лабораторних робіт:***

1. Лабораторні роботи виконуються згідно із затвердженим семестровим графіком, який викладається в Moodle.

2. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які завчасно ознайомилися із її змістом і методикою виконання, та які вивчили відповідні розділи теоретичного курсу.

3. Роботи виконуються в послідовності, поданої в методичних вказівках. Прикінцевими етапами кожної роботи є обробка і аналіз отриманих результатів, формулювання висновків і рекомендацій.

4. У разі виконання роботи до закінчення заняття здобувачі приступають до оформлення звіту.

5. Звіт про виконання лабораторної роботи прикріплюється здобувачем до відповідного завдання у Moodle наприкінці поточної або перед початком наступної лабораторної роботи. Викладач перевіряє та оцінює звіт відповідно до наведених критеріїв оцінювання.

6. За необхідності (наприклад, у разі спірної оцінки звіту або бажання здобувача її підвищити) проводиться захист лабораторної роботи, під час якого здобувач має продемонструвати знання щодо основних теоретичних положень даної роботи, вміти обґрунтувати висновки з отриманих результатів лабораторних досліджень.

### ***Зміст звіту з лабораторної роботи:***

- Титульний аркуш;
- Зміст;
- Тема та мета лабораторної роботи;
- Короткий зміст виконаних лабораторних досліджень;
- Отримані результати досліджень та їх аналіз;
- Висновки;
- Перелік використаних джерел.



### ***Загальні відомості про лабораторну платформу Virtual Labs***

Проект "Віртуальні лабораторії" (Virtual Labs) є ініціативою Міністерства освіти та Уряду Індії під егідою Національної місії з освіти за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій (NMEICT). Цей проект є консорціумною діяльністю дванадцяти інститутів-учасників, а Institute of Information Technology (м. Делі) є координуючим інститутом. Це зміна парадигми в освіті на основі інформаційно-комунікаційних технологій. В рамках проекту "Віртуальні лабораторії" було створено понад 100 віртуальних лабораторій, що складаються з приблизно 700+ експериментів, доступних через Інтернет для дистанційного проведення та перегляду.

Безпосередньо у галузі електричної інженерії платформа пропонує понад 15 циклів лабораторних робіт з різних дисциплін, таких як електричні машини, електропривод, електропостачання тощо.


Віртуальні лабораторії є безкоштовними та не потребують додаткової інфраструктури для проведення експериментів у приміщеннях користувачів. Доступ до експериментів на основі симуляцій можна отримати віддалено через Інтернет.

### ***Загальні відомості про програмне середовище Matlab Simulink***

Пакет Simulink створений в середовищі MATLAB і працює з використанням його функцій. Simulink призначений для роботи з моделями, які можна зобразити у вигляді блок-схем. Моделювання проводиться в графічному інтерфейсі користувача (GUI) для побудови моделі як структурної схеми з використанням миші.

Пакет Simulink включає повний комплект блоків, необхідних для створення моделей, пристрої відображення і генератори сигналів, дискретні лінійні та нелінійні компоненти та блоки з'єднань. Цінність Simulink полягає в широкій, відкритій для вивчення бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела дій сигналів з практичнолюбими часовими залежностями, масштабні, лінійні і нелінійні перетворювачі з різними формами передавальних характеристик, пристрої квантування, інтегральні і диференціальні блоки тощо.

Пакет лабораторних робіт з електроенергетичних систем (EE 3033 Electrical Power Systems Labs) розробив у 2021 р. Douglas Jussaume, співробітник кафедри електричної та комп'ютерної інженерії університету Тулси (University of Tulsa). Як каже сам розробник: "Ефективність запропонованих віртуальних лабораторних робіт буде залежати від розуміння, яке студент отримає, запускаючи симуляцію кілька разів для різних налаштувань, а потім перевіряючи результати лабораторної роботи за допомогою ручних розрахунків. Я глибоко переконаний, що студент отримає більше розуміння, симулюючи модель багато разів і порівнюючи результати з ручними розрахунками, ніж під час виконання однієї "апаратної" лабораторної роботи. Для мене це перший досвід



розробки моделей та симуляцій, а також перший досвід роботи з MATLAB / Simulink / Simscape. Шкода, що у мене не було такої можливості на початку моєї кар'єри".

Пакет лабораторних робіт є безкоштовним для навчальних цілей та не потребує додаткової інфраструктури для проведення експериментів, окрім безпосередньо встановлених програмних продуктів.

### ***Встановлення програмного середовища Matlab Simulink***

Студенти Метінвест Політехніки мають можливість безкоштовного встановлення та використання актуальної ліцензійної версії пакету MATLAB / Simulink. Для цього необхідно перейти за посиланням

<https://www.mathworks.com/academia/tah-portal/technical-university-metinvest-polytechnic-31696462.html>

та зареєструватися у середовищі MATLAB з використанням університетської електронної пошти з доменом @mipolytech.education.

Далі на стартовій сторінці MATLAB під зареєстрованим профілем

<https://matlab.mathworks.com/>

необхідно встановити потрібні пакети MATLAB, натиснувши кнопку "Install MATLAB" у правому верхньому куті. Процес встановлення стандартний, тривалість залежить від характеристик комп'ютера або ноутбука користувача. Звертаю увагу, що рекомендовано використовувати систему Windows 64 bit та достатньо місця на жорсткому диску (тільки рекомендовані пакети займають приблизно 8 ГБ пам'яті).

Під час встановлення рекомендується обрати такі пакети:

1. Matlab;
2. Simulink;
3. Motor control blockset;
4. Simscape;
5. Simscape Electrical.

## Лабораторна робота №1

### Ознайомлення з обладнанням віртуальної лабораторії електричних машин Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо визначення характеристик основного обладнання віртуальної лабораторії електричних машин Virtual Labs.

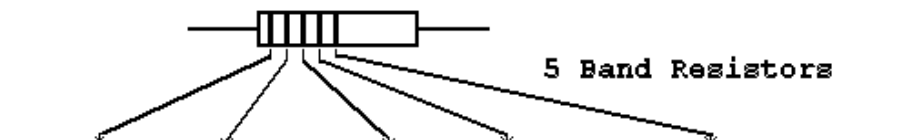
*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

#### Теоретичні засади виконання роботи

##### 1) Резистор (Resistor)

Опір можна визначити як протидію струму, спричинену резистором. Опір  $R$  в омах ( $\Omega$ ) дорівнює напрузі  $U$  у вольтах (В), поділений на силу струму  $I$  в амперах (А). На рис. 1.1 наведений помічник з визначення параметрів резистора.



**5 Band Resistors**


BAND 1	BAND 2	BAND 3	BAND 4 MULTIPLIER	BAND 5 TOLERANCE
0 BLACK	0 BLACK	0 BLACK		NONE + or - 20%
1 BROWN	1 BROWN	1 BROWN	BLACK X 1	SILVER + or - 10%
2 RED	2 RED	2 RED	BROWN X10	GOLD + or - 5%
3 ORANGE	3 ORANGE	3 ORANGE	RED X 100	RED + or - 2%
4 YELLOW	4 YELLOW	4 YELLOW	ORANGE X 1,000	BROWN + or - 1%
5 GREEN	5 GREEN	5 GREEN	YELLOW X 10,000	
6 BLUE	6 BLUE	6 BLUE	GREEN X 100,000	
7 VIOLET	7 VIOLET	7 VIOLET	BLUE X 1,000,000	
8 GRAY	8 GRAY	8 GRAY	SILVER X .01	
9 WHITE	9 WHITE	9 WHITE	GOLD X .1	

Example: Yellow - Violet - BLACK - BLACK - Brown  
4 + 7 + 0 x 1 = 470 Ohms 1% Tolerance

**Рисунок 1.1 – Помічник з визначення параметрів резистора**

##### 2) Конденсатор (Capacitor)

Конденсатор – це пасивний двоконтактний електричний компонент, що використовується для електростатичного зберігання енергії в електричному полі. Форми практичних конденсаторів широко варіюються,



але всі вони містять щонайменше дві електричні обкладинки (пластини), розділені діелектриком (тобто ізолятором). Пластинами можуть бути тонкі плівки металу, алюмінієва фольга, диски тощо. "Непровідний" діелектрик слугує для збільшення ємності конденсатора. Діелектриком може бути скло, кераміка, пластикова плівка, повітря, папір, слюда тощо. Конденсатори широко використовуються як елементи електричних ланцюгів у багатьох поширених електричних пристроях. На відміну від резистора, конденсатор не розсіює енергію. Замість цього, конденсатор зберігає енергію у вигляді електростатичного поля між його пластинами.

Ідеальний конденсатор характеризується постійною ємністю  $C$ , у фарадах в системі одиниць СІ, яка визначається як відношення позитивного або негативного заряду  $Q$  на кожній обкладинці до напруги  $U$  між ними:  $C = Q/U$ .

### 3) Котушка індуктивності (Inductor)


Котушка індуктивності, яку також називають дроселем, є ще одним електричним компонентом пасивного типу, що складається з котушки дроту, призначеної для використання переваг цього взаємозв'язку шляхом індукції магнітного поля в ній самій або в її осердді в результаті струму, що протікає через котушку дроту. Формування дротяної котушки в котушку індуктивності призводить до створення набагато сильнішого магнітного поля, ніж те, яке створюється простою котушкою дроту. Котушки індуктивності формуються з дроту, щільно обмотаного навколо твердого центрального осердя, яке може бути як прямим циліндричним стрижнем, так і безперервною петлею або кільцем, щоб сконцентрувати магнітний потік.

### 4) Реостат (Rheostat)

Реостат, або регульований резистор, використовується в додатках, які вимагають регулювання струму або зміни опору в електричному ланцюзі. Реостат може регулювати характеристики генератора, приглушувати світло, запускати або контролювати швидкість двигунів. Залежно від застосування, його елементом опору може бути металевий дріт або стрічка, вугілля або струмопровідна рідина. Для середніх струмів найбільш поширений металевий тип, для дуже малих струмів використовується вугільний тип, а для великих струмів – електролітичний тип, в якому електроди розміщені в провідній рідині.

### 5) Вольтметр (Voltmeter)

Вольтметр, також відомий як вимірювач напруги, – це прилад, що використовується для вимірювання різниці потенціалів або напруги між двома точками в електричному або електронному ланцюзі. Деякі вольтметри призначені для використання в ланцюгах постійного струму (DC); інші призначені для ланцюгів змінного струму (AC). Базовий аналоговий вольтметр складається з чутливого гальванометра (вимірювача струму), з'єданого послідовно з високим опором. Внутрішній опір вольтметра повинен бути високим. В іншому випадку він буде



споживати значний струм, і тим самим порушувати роботу ланцюга, що тестується. Чутливість гальванометра і величина послідовного опору визначають діапазон напруг, які може показувати вимірювач.

#### 6) Амперметр (Ammeter)

Вимірювач, який використовується для вимірювання струму, називається амперметром. Струм – це потік електронів, одиницею виміру якого є ампер. Тому прилад, який вимірює струм в амперах, називається амперметром. Ідеальний амперметр має нульовий внутрішній опір. Але практично амперметр має невеликий внутрішній опір. Від величини опору залежить діапазон вимірювання амперметра. Гальванометр можна перетворити на амперметр, підключивши паралельно гальванометру низький опір, який називається шунтовим опором.

#### 7) Реле (Relay)


Реле – це пристрій, який розмикає або замикає контакти, щоб викликати роботу іншого електричного керування. Воно виявляє небезпечний або небажаний стан у визначеній зоні і дає команду автоматичному вимикачу відключити уражену ділянку. Таким чином захищає систему від пошкодження. Реле працює за принципом електромагнітного притягання: коли ланцюг реле відчуває струм короткого замикання, воно заряджає електромагнітне поле, яке створює тимчасове магнітне поле. Це магнітне поле переміщує якір реле для розмикання або замикання контактів. Реле малої потужності має лише один контакт, а реле великої потужності має два контакти для розмикання вимикача. Реле має залізне осердя, на яке намотана котушка керування. Живлення подається на котушку через контакти навантаження і вимикача керування. Струм, що протікає через котушку, створює навколо неї магнітне поле. Завдяки цьому магнітному полю верхнє плече магніту притягує нижнє плече. Таким чином замикається ланцюг, що змушує струм протікати через навантаження. Якщо контакт вже замкнений, то він рухається в протилежному напрямку і, отже, розмикається.

#### 8) Автоматичний вимикач (Circuit Breaker)

Автоматичний вимикач – це комутаційний пристрій, який перериває аномальний струм або струм короткого замикання. Це механічний пристрій, який перериває потік струму великої величини (аварійного) і, крім того, виконує функцію вимикача. Вимикач в основному призначений для замикання або розмикання електричного кола, таким чином захищаючи електричну систему від пошкоджень.

#### 9) Автотрансформатор (Auto transformer)

Автотрансформатор – це трансформатор з однією обмоткою, намотаною на багатошаровий сердечник. Автотрансформатор схожий на двообмотковий трансформатор, але відрізняється способом з'єднання первинної та вторинної обмоток. Частина обмотки є спільною як для первинної, так і для вторинної сторони. При навантаженні частина струму навантаження отримується безпосередньо від джерела живлення, а інша



частина – за рахунок дії трансформатора. Автотрансформатор працює як стабілізатор напруги.

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Ознайомлення з обладнанням лабораторії електричних машин", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/lab-equipment-familiarization/index.html>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено "Ознайомити студентів з електрообладнанням, яке часто використовується".

На панелі зліва ми бачимо меню "**Theory**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

### ***Проведення лабораторних дослідів***

1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

*Крок 1:* Шляхом почергового натискання на кнопки назви (*Name of equipment*), позначення (*Symbol*) та функції (*Function*) ознайомитися із відповідним обладнанням.

*Крок 2:* Натисніть "Далі" (*Next*).

*Крок 3:* Перетягніть компонент/тип обладнання з першого рядка у відповідне поле другого рядка на основі наданого опису.

*Крок 4:* Шляхом почергового натискання на кнопки назви (*Name of equipment*), позначення (*Symbol*) та функції (*Function*) ознайомитися із відповідним обладнанням.

*Крок 5:* Натисніть "Далі" (*Next*).

*Крок 6:* Перетягніть компонент/символ з першого рядка у відповідне поле другого рядка на основі наданого опису.




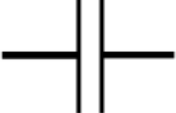




Крок 7: Натисніть "Відправити" (*Submit*).

2. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні досліді відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має отримати перелік основного лабораторного обладнання у вигляді таблиці, частина якої наведена на рис. 1.2.

#### Familiarization of the electrical machine laboratory apparatus:

S.No.	Name of the Equipment	Image	Symbol	Function
1.	Resistor			To control the flow of current to other components in a circuit.
2.	Capacitor			To store the electrical energy and give this energy again to the circuit when necessary.
3.	Inductor			To block AC while allowing DC to pass.
4.	Voltmeter			An instrument used for measuring electrical potential difference between two points in an electric circuit.

**Рисунок 1.2 – Приклад переліку основного лабораторного обладнання як результат виконання роботи**

Здобувачу рекомендується ретельно вивчити матеріал у таблиці, який буде використаний у подальших віртуальних лабораторних роботах на платформі Virtual Labs.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.



У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".

### **Контрольні запитання**

1. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення резистору?
2. Як визначити величину опору та похибку резистору за його маркуванням?
3. Як позначається на схемах конденсатор? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?
4. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення котушки індуктивності?
5. Як позначається на схемах реостат? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?
6. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення вольтметра?
7. Як позначається на схемах амперметр? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?
8. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення електромагнітного реле?
9. Як позначається на схемах автоматичний вимикач? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?
10. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення лабораторного автотрансформатора?
11. Як позначається на схемах асинхронний двигун з короткозамкненим ротором? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?
12. Ви можете відтворити умовне позначення та визначити призначення асинхронного двигуна з фазним ротором?
13. Як позначається на схемах двигун постійного струму? Яке його основне функціональне призначення, на Вашу думку?

## Лабораторна робота №2

### Дослідження навантажувальних характеристик шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо побудови та аналізу навантажувальних характеристик шунтового генератора постійного струму.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

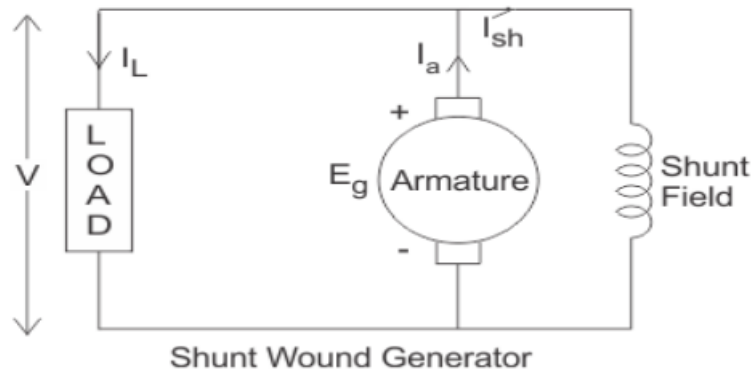
#### **Теоретичні засади виконання роботи**

##### *Вступ*

У шунтовому генераторі обмотка збудження підключається паралельно обмотці якоря так, що напруга генератора подається через неї. Шунтова обмотка збудження має багато витків тонкого дроту з високим опором. Тому тільки частина струму якоря протікає через обмотку збудження (Shunt Field), а решта – через навантаження (Load). На рис. 1 показано підключення генератора з шунтовою (паралельною) обмоткою збудження. Струм якоря  $I_a$  розділяється на дві частини – невелика частина  $I_{sh}$  протікає через шунтову обмотку збудження, а основна частина  $I_L$  йде на зовнішнє навантаження.

##### *Внутрішня характеристика*

Крива внутрішньої характеристики являє собою залежність між напругою, що генерується,  $E_g$  і струмом навантаження  $I_L$ . Коли генератор навантажений, то напруга, що генерується, зменшується через реакцію якоря (Armature Reaction Drop). Таким чином, напруга, що генерується, буде нижча за ЕРС, що генерується без навантаження. На рис. 2.1 нижче крива AD показує криву напруги без навантаження, а АВ – внутрішню характеристику генератора (Internal Characteristic).

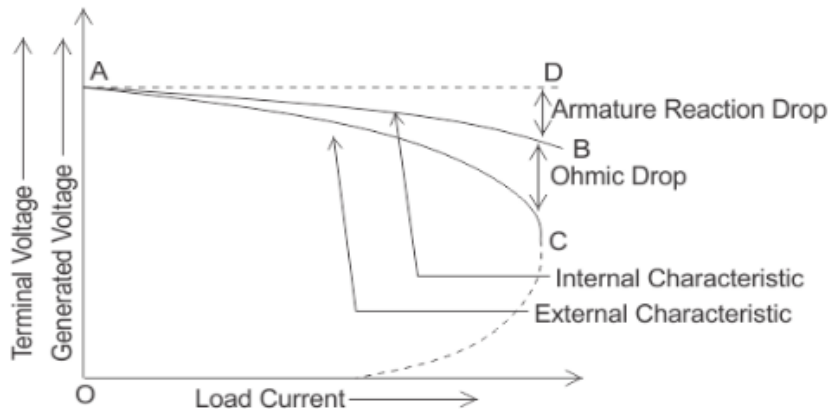


**Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема шунтового генератора постійного струму для отримання навантажувальних характеристик**

*Зовнішня характеристика*

Крива AC (рис. 2.2) показує зовнішню характеристику (External Characteristic) генераторів постійного струму з шунтовою обмоткою. Вона показує зміну напруги на затискачах (Terminal Voltage) в залежності від струму навантаження. Активні втрати (омічне падіння або Ohmic Drop) через опір якоря дає меншу напругу на клеммах, ніж згенерована напруга (Generated Voltage). Саме тому крива лежить нижче внутрішньої характеристичної кривої.

$$V = (E_g - I_a R_a) = E_g - (I_L + I_{sh})R_a.$$



**Рисунок 2.2 – Характеристики шунтового генератора постійного струму**

Коли опір навантаження шунтового генератора постійного струму зменшується, то струм навантаження генератора збільшується, як показано на рис. 2.2. Але струм навантаження може бути збільшений до певної межі (точки C) при зменшенні опору навантаження. Після цієї точки характеристика змінюється на протилежну. Подальше будь-яке зменшення опору навантаження призводить до зменшення струму  $i$ , як наслідок, крива зовнішньої характеристики повертається назад, як показано пунктирною лінією, та напруга на затискачах стає нульовою. Хоча деяка напруга зберігається через залишковий магнетизм. Тепер ми



знаємо, що коли  $I_L$  збільшується, напруга на клемі зменшується. Після певної межі, через великий струм навантаження і збільшення омичного падіння, напруга на клемі різко зменшується. Це різке зниження напруги на навантаженні призводить до падіння струму навантаження, хоча в цей час навантаження велике або опір навантаження низький. Ось чому опір навантаження машини повинен підтримуватися належним чином. Точка, в якій генератор видає максимальний вихідний струм, називається *точкою переламу* (точка С на рис. 2.2).

*Примітка.* Із зовнішньої характеристики видно, що зміна напруги на затискачах від холостого ходу до повного навантаження невелика. Напруга на клемі завжди може підтримуватися постійною за допомогою автоматичного регулювання реостата обмотки збудження R.

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Дослідження навантажувальних характеристик шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/load-characteristics-dc-shunt/index.html>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено *"Дослідити навантажувальні характеристики шунтового генератора постійного струму. Намалювати внутрішні та зовнішні характеристики при різних умовах навантаження"*.

На панелі зліва ми бачимо меню **"Theory"**, наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню **"Pretest"**. Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

### ***Проведення лабораторних дослідів***

1. У меню **"Procedure"** необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

Крок 1. Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 2.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

Крок 2. Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

Крок 3. Якщо підключення виконано правильно, вимикач МСВ ввімкнеться.

Крок 4. Виберіть кількість ламп (**Bulbs**) у секції "Лампове навантаження" (**Lamp Load**).

From	R	R	B	B	A2	L	F	A	L2	A4	Z4	I	J	H	H
To	C	E	G	A2	Z2	D	Z1	A1	A4	Z4	K	J	L1	A3	Z3

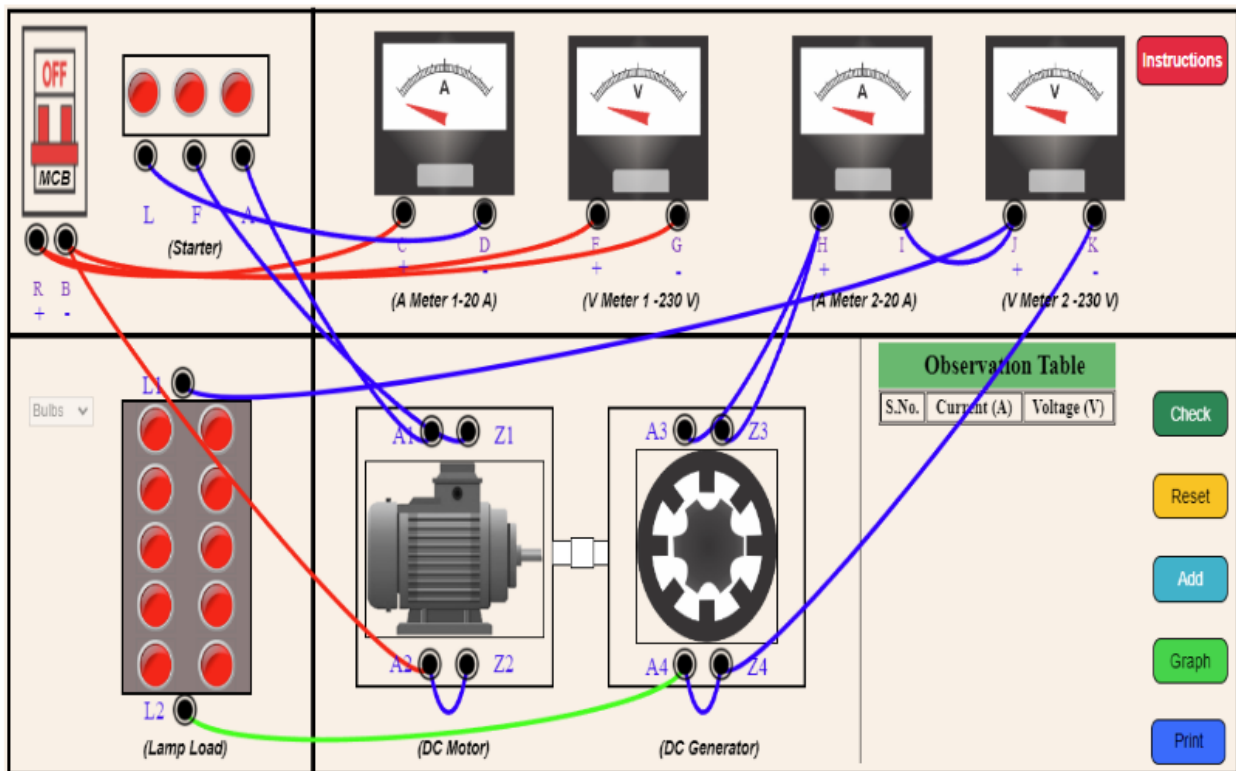


Рисунок 2.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду

Крок 5. Натисніть кнопку "Додати" (**Add**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

Крок 6. Додайте різні значення до таблиці, збільшуючи лампове навантаження від 1 до 10 ламп.

Крок 7. Натисніть кнопку "Графік" (**Graph**), щоб побудувати відповідні графічні залежності.

Крок 8. Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

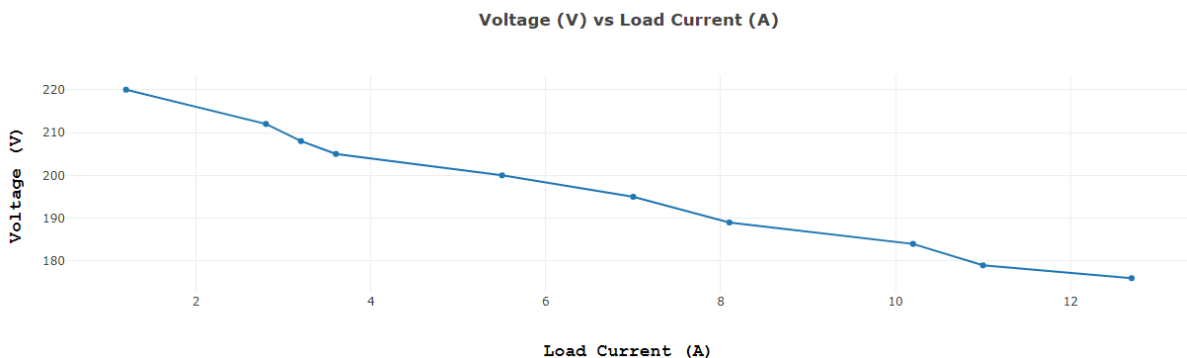
Крок 9. Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні досліді відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має побудувати навантажувальну характеристику генератору постійного струму (рис. 2.4).



**Рисунок 2.4 – Приклад навантажувальної характеристики генератору постійного струму як результат виконання роботи**

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману навантажувальну характеристику та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".



## **Контрольні запитання**

1. Де застосовуються генератори постійного струму?
2. Як класифікуються генератори постійного струму?
3. Пояснити принцип самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження.
4. Пояснити принцип дії генератора постійного струму.
5. Відтворити основні конструктивні елементи генератора постійного струму.
6. Порівняйте зовнішні характеристики генераторів із різними способами збудження.
7. Порівняйте регульовальні характеристики генераторів із різними способами збудження.
8. Що являє собою внутрішня характеристика генератора постійного струму?
9. Чи може напруга під час роботи шунтового генератора постійного струму дорівнювати нулю та чому?



## **Лабораторна робота №3**

### **Дослідження характеристик намагнічування шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs**

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо побудови та аналізу характеристик намагнічування шунтового генератора постійного струму.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

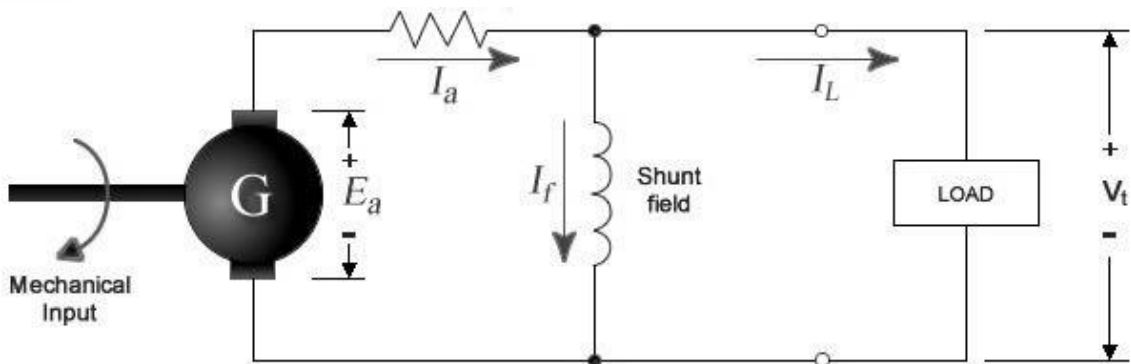
### ***Теоретичні засади виконання роботи***

#### ***Вступ***

Генератор постійного струму, схематична еквівалентна схема якого показана на рис. 3.1, – це електрична машина, яка перетворює механічну енергію первинного рушія (наприклад, двигуна постійного струму, асинхронного двигуна змінного струму або турбіни) в постійну електричну енергію. Обмотки збудження підключаються паралельно якорю, тому його називають шунтовим генератором постійного струму. Генератор, зображений на рис. 3.1, є самозбуджувальним. Він використовує напругу  $E_a$ , що генерується машиною, для створення струму збудження  $I_f$ , який, у свою чергу, породжує потік магнітного поля  $\Phi$ . Коли обмотка якоря обертається в цьому магнітному полі, щоб перетинати потік, в якорі індукуються напруга  $E_a$ . Ця напруга зазвичай називається електрорушійною силою якоря або ЕРС. Індукована ЕРС пропорційна швидкості перетину магнітного потоку і визначається за формулою:

$$E_a = (pZ/60a) n \Phi,$$

- де  $\Phi$  – магнітний потік у Веберах;  
 $n$  – частота обертання якоря в об/хв;  
 $Z$  – загальна кількість провідників якоря;  
 $p$  – кількість полюсів;  
 $a$  – кількість паралельних гілок обмотки.



**Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема шунтового генератора постійного струму для отримання характеристик намагнічування**

Магнітне поле, необхідне для роботи генератора, може створюватися за допомогою:

- а) постійних магнітів;
- б) електромагнітів, які отримують струм збудження від зовнішнього джерела;
- в) електромагнітів, які збуджуються струмом, отриманим від самого генератора.

Використання постійних магнітів обмежується дуже малими генераторами. Електромагнітні збудження, перераховані в пунктах (б) і (в) вище, призводять до виникнення генераторів з дещо іншими типами характеристик.

У випадку складного генератора (зі змішаним збудженням) послідовна і паралельна обмотка збудження можуть бути з'єднані таким чином, щоб допомагати одна одній, тобто магнітні потоки, що створюються кожною з них, будуть додаватися.

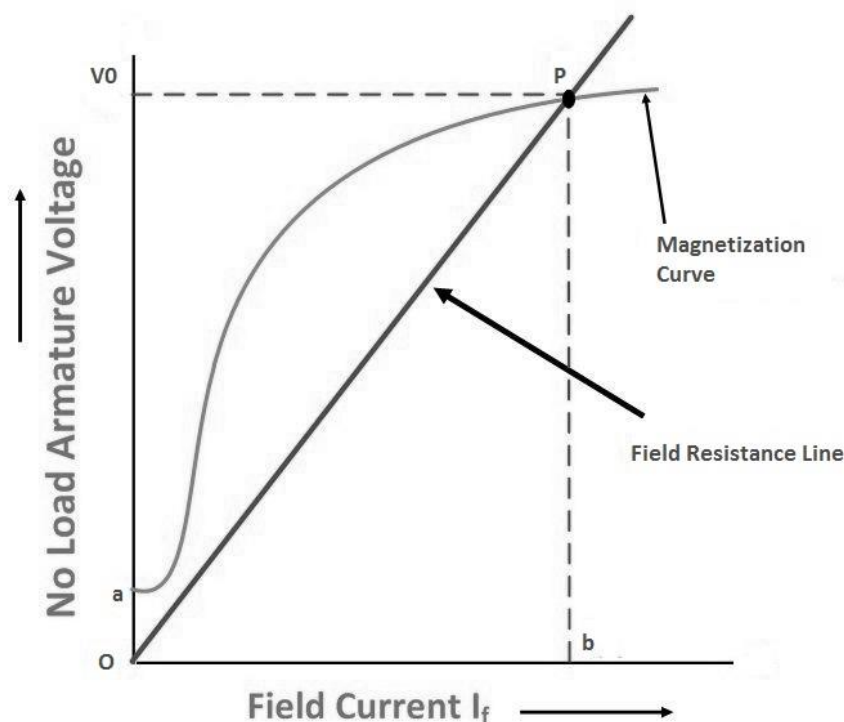
Збільшення сумарного потоку генерує більшу ЕРС. Таке з'єднання називається *кумулятивним*. Якщо ж паралельна і послідовна обмотки з'єднані так, що потік, створений однією з них, протидіє іншій, то індукована ЕРС буде меншою. Такий тип з'єднання називається *диференціальним*.

#### *Критичний опір кола збудження*

Це те значення опору кола збудження, при якому шунтовий генератор постійного струму не зможе збудитися. Це та швидкість, для якої заданий опір паралельної обмотки збудження стає критичним опором. Його значення отримують, побудувавши вольт-амперну характеристику (ВАХ) як на рис. 3.2 (характеристику неробочого ходу генератора – **No Load Armature Voltage**), і визначивши тангенс кута нахилу дотичної до лінійного положення кривої від початку координат.

Через залишковий магнетизм в полюсах генерується невелика кількість ЕРС навіть при  $I_f = 0$ , тому крива намагнічування (**Magnetization Curve**) починається трохи вище 0 (точка а). Невелике викривлення на нижньому кінці пояснюється магнітною інерцією. Видно, що перша частина кривої практично пряма. Отже, магнітний потік  $i$ , відповідно,

генерована ЕРС прямо пропорційні струму збудження. Однак при більших густинах потоку, де він малий, магнітний опір "залізного шляху" стає помітним і прямим. За рахунок залишкового магнетизму генерується деяка початкова ЕРС і, отже, деякий струм. Цей струм, проходячи через котушки збудження, посилює магнетизм полюсів. Це призведе до збільшення магнітного потоку полюсів, що ще більше збільшить згенеровану ЕРС. Подальше збільшення ЕРС і магнітного потоку триває до тих пір, поки не буде досягнута рівновага між  $I_f$  і  $E_g$  в певній точці графіка Р (точка перетину кривої намагнічування та прямої опору кола збудження – **Field Resistance Line**). Подальше самозбудження генератора неможливе.



**Рисунок 3.2 – Характеристики намагнічування (самозбудження) шунтового генератора постійного струму**

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Дослідження характеристик намагнічування шунтового генератора постійного струму на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/magnetization-characteristics-dcshunt/index.html>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено *"Дослідити характеристики намагнічування шунтового генератора постійного*



струму. Побудувати графік залежності між напругою на якорі та струмом збудження".

На панелі зліва ми бачимо меню "**Theory**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

### **Проведення лабораторних дослідів**

1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

**Крок 1.** Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 3.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

**Крок 2.** Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

**Крок 3.** Увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

**Крок 4.** Тепер пересуньте повзунок на реостаті, щоб зняти показання вольтметра та амперметра.

**Крок 5.** Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

**Крок 6.** Повторіть кроки 4-5 для різних значень напруги та струму (рекомендується використати усі положення реостату).

**Крок 7.** Натисніть кнопку "Графік" (**Graph**), щоб побудувати відповідні графічні залежності.

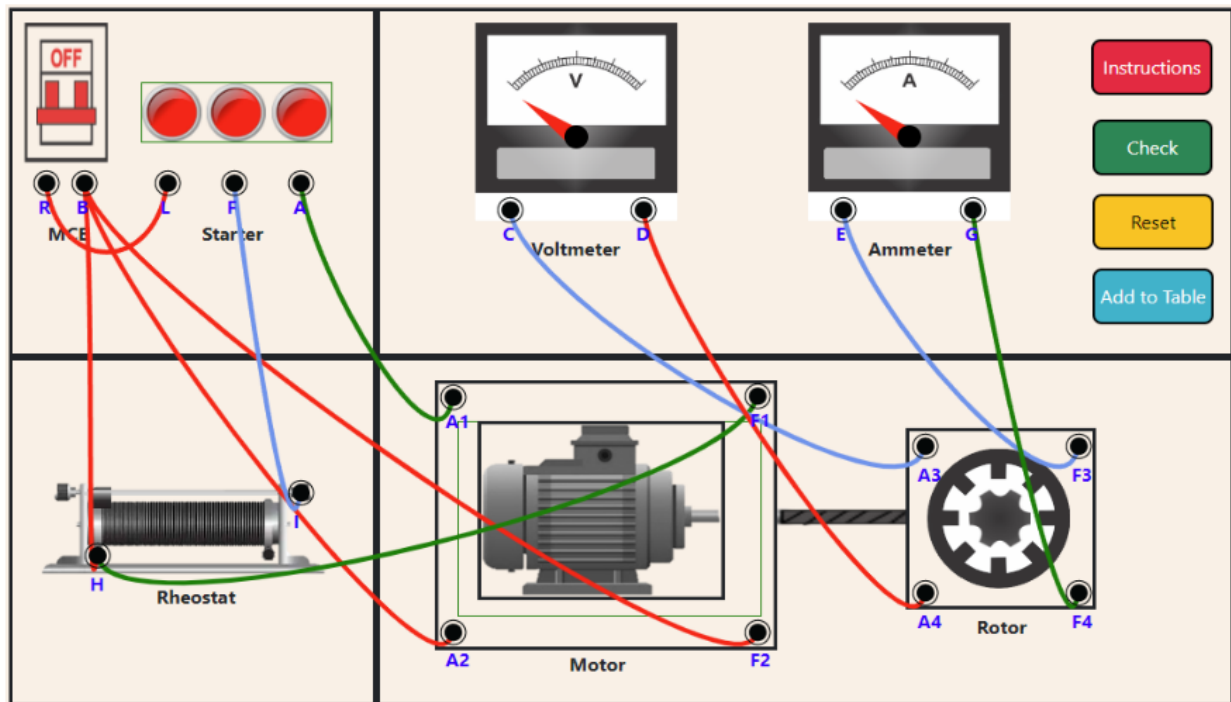
**Крок 8.** Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

**Крок 9.** Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні досліді відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

From	R	B	B	B	F	A	H	C	D	E	G
To	L	H	A2	F2	I	A1	F1	A3	A4	F3	F4



**Рисунок 3.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду**

ПРИМІТКА: Якщо дріт під'єднано неправильно, натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дріт.

### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має побудувати характеристику намагнічування генератору постійного струму паралельного збудження (рис. 3.4).

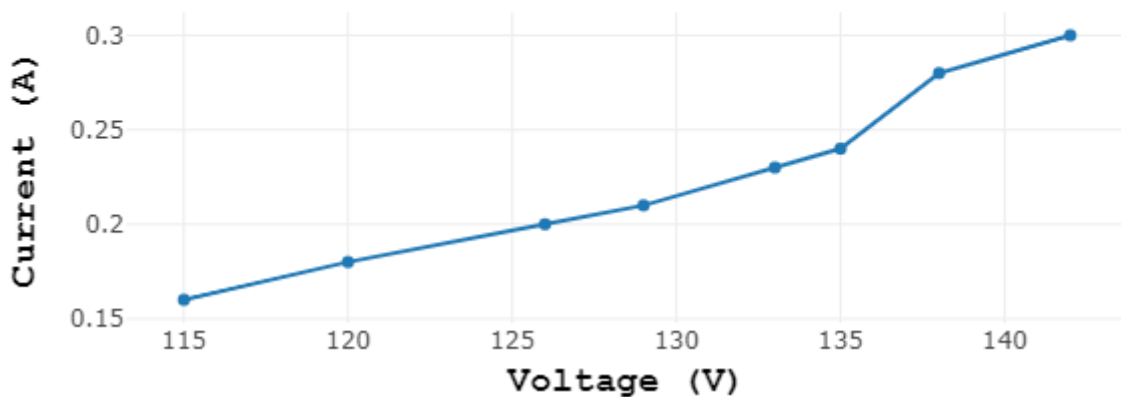
Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману характеристику намагнічування та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

Current (A) vs Voltage (V)



**Рисунок 3.4 – Приклад характеристики намагнічування генератору постійного струму як результат виконання роботи**

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".

### **Контрольні запитання**

1. Де застосовуються генератори постійного струму?
2. Як класифікуються генератори постійного струму?
3. Пояснити принцип самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження.
4. Пояснити принцип дії генератора постійного струму.
5. Відтворити основні конструктивні елементи генератора постійного струму.
6. Порівняйте зовнішні характеристики генераторів із різними способами збудження.
7. Порівняйте регульовальні характеристики генераторів із різними способами збудження.
8. Чому генератор паралельного збудження називають шунтовим?
9. Від яких параметрів залежить ЕРС якоря шунтового генератора постійного струму?
10. Пояснити поняття критичного опору кола збудження.



## Лабораторна робота №4

### Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола якоря на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму шляхом зміни опору кола якоря.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослідях/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

#### **Теоретичні засади виконання роботи**

##### *Вступ*

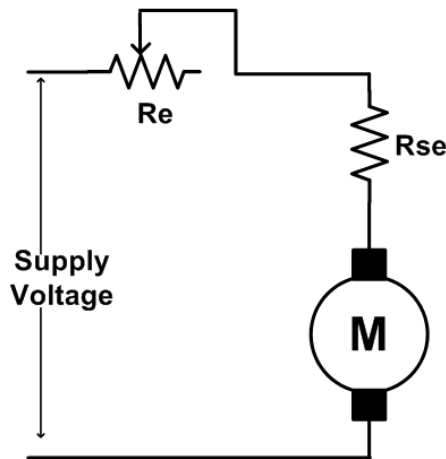
Ми знаємо, що у загальному випадку частота обертання двигуна постійного струму (ДПС) визначається за формулою:

$$n = (V_a - I_a R_a) / k\Phi,$$

де  $V_a$  – напруга, прикладена до якоря;  $k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна;  $\Phi$  – магнітний потік, пропорційний струму збудження  $I_f$ .

Наведена вище формула показує, що швидкість залежить від напруги живлення  $V$ , опору кола якоря  $R_a$  і потоку збудження  $\Phi$ , який створюється струмом збудження. На практиці для регулювання швидкості використовують зміну цих трьох параметрів, тобто існує три основні способи регулювання швидкості ДПС (рис. 4.1):

1. Зміна опору в колі якоря. Цей метод називається регулюванням опору якоря або реостатним регулюванням;
2. Зміна потоку збудження  $\Phi$ . Цей метод називається регулюванням потоку збудження.
3. Зміна прикладеної напруги (**Supply Voltage**). Цей метод також називається регулюванням напруги якоря.



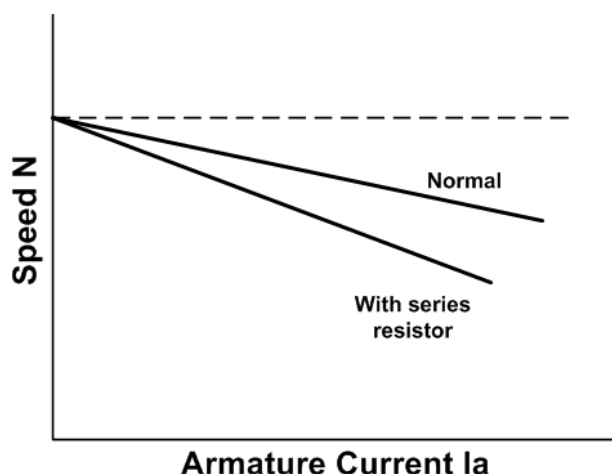
**Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема для керування ДПС зміною опору кола якоря**

*Регулювання швидкості шляхом зміни опору кола якоря*

У цьому методі в коло якоря послідовно вмикається змінний резистор  $R_e$ . Обмотка збудження  $R_{se}$  безпосередньо підключена до джерела живлення і тому магнітний потік  $\Phi$  не залежить від зміни  $R_e$ . У цьому випадку на струм  $i$ , отже, на потік впливає зміна опору кола якоря. Падіння напруги на  $R_e$  зменшує напругу, прикладену до якоря,  $i$ , отже, швидкість двигуна зменшується.

Нахил характеристики  $n = f(I_a)$  або  $n = f(T_e)$ , тобто електромагнітного моменту, можна змінювати, навмисно підключаючи зовнішній опір  $R_e$  в коло якоря. Можна отримати сімейство кривих залежностей  $n = f(I_a)$  для різних значень  $R_e$ . З цих характеристик можна пояснити, як досягається керування швидкістю. Припустимо, що момент навантаження  $T_L$  є постійним і струм збудження також підтримується постійним (рис. 4.2).

Отже, оскільки для роботи в сталому режимі потрібно, щоб  $T_e = T_L$ , то  $T_e = k \Phi I_a$  (де  $k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна) також буде залишатися постійним, а це означає, що струм якоря  $I_a$  не зміниться. Припустимо, що  $R_e = 0$ , тоді при номінальному моменті навантаження робоча точка буде в точці С і швидкість двигуна буде  $n$ . Якщо в ланцюг якоря ввести додатковий опір  $R_{e1}$ , то нова ustalена робоча швидкість буде  $n_1$ , що відповідає робочій точці D. Таким чином, можна отримати швидкість  $n_2$ , що відповідає робочій точці E, коли в ланцюг якоря ввести  $R_{e2}$ . Цей самий момент навантаження забезпечується з різною швидкістю. Зміна швидкості відбувається плавно, і швидкість буде плавно зменшуватися при збільшенні  $R_e$ . Очевидно, що цей метод підходить для керування швидкістю нижче базової швидкості та для забезпечення постійного номінального моменту навантаження, який завжди забезпечує номінальний струм якоря. Хоча цей метод забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні (від базової швидкості до нульової), він має серйозний недолік, оскільки значні втрати енергії відбуваються в зовнішньому опорі  $R_e$ , що знижує загальний ККД двигуна.



**Рисунок 4.2 – Залежність швидкості (Speed) від струму якоря (Armature Current) ДПС**

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола якоря на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/dcshunt-motor-armature-control/index.html>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено "Дослідити регулювання швидкості двигуна постійного струму методом керування опором якоря. Побудувати графік залежності між напругою на якорі та швидкістю двигуна, змінюючи напругу на якорі".

На панелі зліва ми бачимо меню "**Theory**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

## Проведення лабораторних дослідів

1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

**Крок 1.** Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 4.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

**Крок 2.** Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

**Крок 3.** Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дрід, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

From	R	B	B	B	F	A	G	I	C	A1	K
To	L	D	A2	F2	E	J	H	F1	A1	K	C

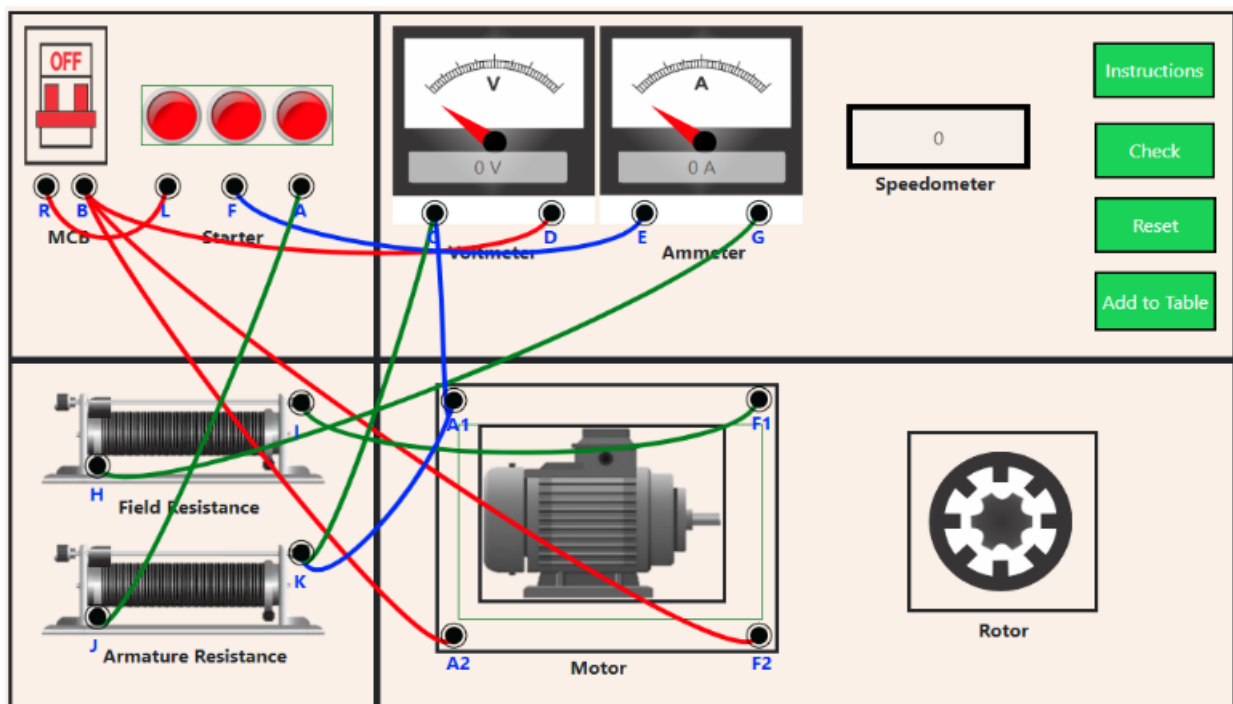


Рисунок 4.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду

**Крок 4.** Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

**Крок 5.** Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

**Крок 6.** За допомогою нижнього повзунка (**Armature Resistance**) встановіть наступне значення напруги на якорі.

Крок 7. Повторіть кроки 5-6 для різних значень напруги на якорі (рекомендується використати усі положення реостату).

Крок 8. Натисніть кнопку "Графік" (**Graph**), щоб побудувати відповідні графічні залежності.

Крок 9. Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

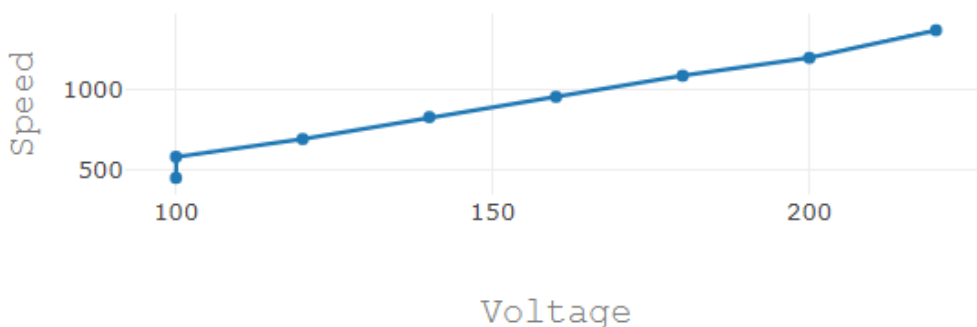
Крок 10. Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні досліді відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має побудувати характеристику двигуна постійного струму при керуванні його швидкістю за рахунок зміни опору кола якоря, тобто зміни напруги на якорі (рис. 4).



**Рисунок 4.4 – Приклад залежності  $n = f(U_a)$  ДПС як результат виконання лабораторної роботи**

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману залежність швидкості ДПС від напруги на якорі та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.



У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".

### **Контрольні запитання**

1. Яка роль статора машини постійного струму?
2. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
3. Яку конструкцію має якор машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має щітковий апарат?
5. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
6. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
7. Де застосовуються двигуни постійного струму?
8. Як класифікуються двигуни постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Які характеристики ДПС називають робочими?
11. Як отримати сімейство механічних характеристик ДПС при його регулюванні за рахунок зміни опору кола якоря?



## Лабораторна робота №5

### Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола збудження на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму шляхом зміни опору кола збудження.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

#### **Теоретичні засади виконання роботи**

##### *Вступ*

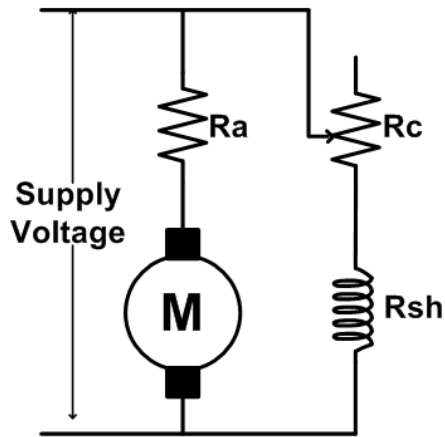
Ми знаємо, що частота обертання шунтового двигуна постійного струму (ДПС з паралельним збудженням) визначається формулою:

$$N = (V_a - I_a R_a) / k\Phi,$$

де  $V_a$  – напруга, прикладена до якоря;  $k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна;  $\Phi$  – магнітний потік, пропорційний струму збудження  $I_f$ . Як відомо, струм якоря  $I_a$  визначається механічним навантаженням на валу. Тому, змінюючи  $V_a$  і  $I_f$ , ми можемо змінювати  $N$ . При фіксованій напрузі живлення і шунтовому ДПС ми можемо змінювати  $V_a$ , керуючи зовнішнім опором, підключеним послідовно з якорем. Також  $I_f$ , звичайно, можна змінювати, керуючи зовнішнім опором кола збудження  $R_c$ , підключеним послідовно до обмотки збудження із опором  $R_{sh}$  (рис. 5.1).

Таким чином, для шунтового двигуна ми маємо по суті два способи регулювання швидкості, а саме:

1. Зміною опору якоря;
2. Зміною опору кола збудження.



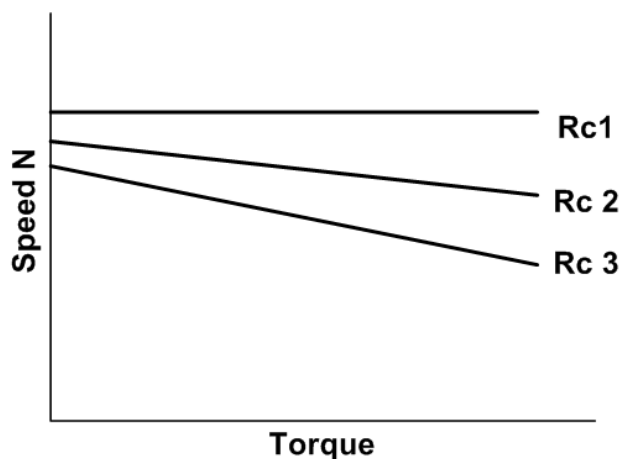
**Рисунок 5.1 – Еквівалентна схема для керування збудженням двигуна постійного струму**

*Регулювання швидкості шляхом зміни струму збудження*

У цьому методі опір кола збудження змінюється для керування швидкістю шунтового двигуна постійного струму. Нагадаємо основне рівняння для розуміння методу:

$$N = (V_a - I_a R_a) / k\Phi.$$

Якщо ми будемо змінювати струм збудження  $I_f$ , потік  $\Phi$  буде змінюватися, отже швидкість також варіюватиметься. Для зміни  $I_f$  послідовно з обмотками збудження підключають зовнішній опір  $R_c$ . Цей опір називається шунтовим регулятором збудження. Обмотка збудження створює номінальний магнітний потік, коли зовнішній опір не підключений і на обмотку збудження подається номінальна напруга. Слід розуміти, що зменшити потік від номінального значення можна лише додаванням зовнішнього опору. Таким чином, швидкість двигуна буде зростати, коли ми зменшуємо струм збудження, і буде досягнуто регулювання швидкості вище базової швидкості. Залежність швидкості (**Speed N**) від моменту (**Torque**) показана нижче (рис. 5.2).



**Рисунок 5.2 – Моментно-швидкісні характеристики ДПС**

## **Підготовка до виконання роботи**

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Регулювання швидкості двигуна постійного струму зміною опору кола збудження на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/dcmotor-field-resistance-control/>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено "Дослідити керування швидкістю двигуна постійного струму за допомогою регулювання опору кола збудження. Побудувати графік залежності струму якоря від швидкості двигуна при зміні опору кола збудження".

На панелі зліва ми бачимо меню "**Theory**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

## **Проведення лабораторних дослідів**

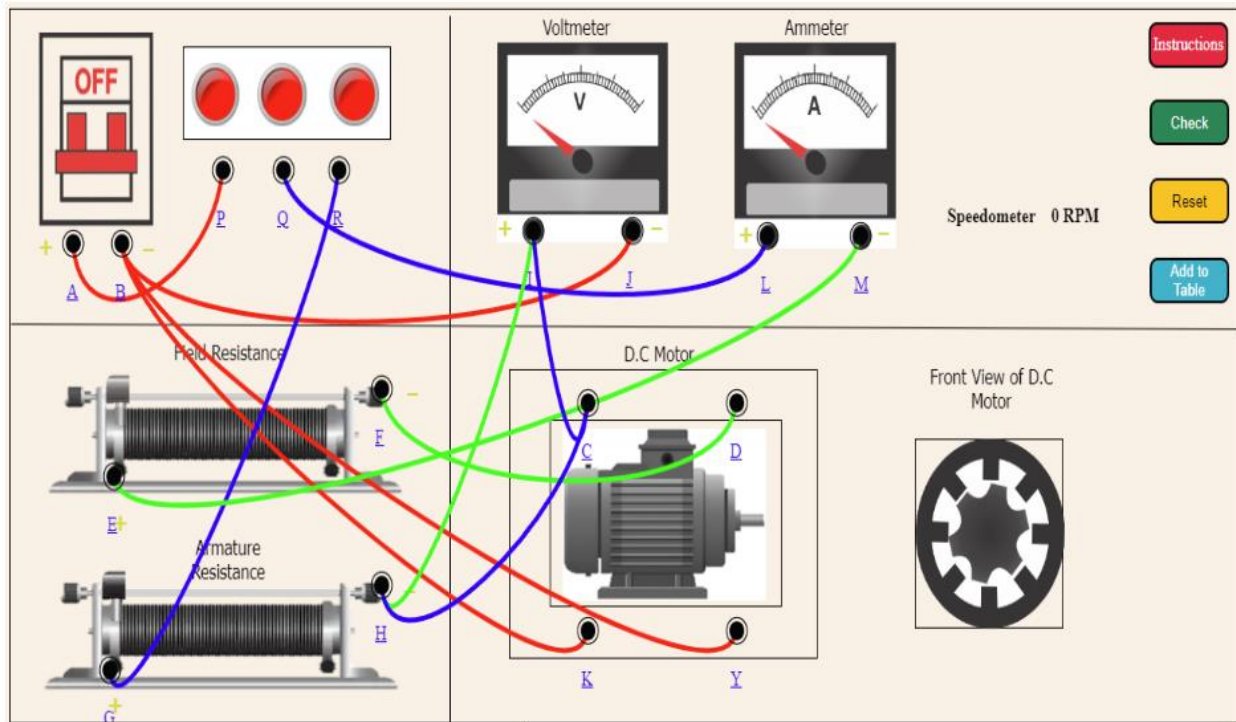
1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

*Крок 1.* Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 5.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

*Крок 2.* Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

*Крок 3.* Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дріт, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

From	A	B	B	B	Q	G	E	F	H	I	C
To	P	K	Y	J	L	R	M	D	I	C	H



**Рисунок 5.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду**

**Крок 4.** Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

**Крок 5.** Встановіть напругу 220 В на вольтметрі за допомогою нижнього повзунка (**Armature Resistance**).

**Крок 6.** Тепер перемістіть перший повзунок (**Field Resistance**), щоб отримати відповідні значення амперметра та спідометра.

**Крок 7.** Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

**Крок 8.** Повторіть кроки 6-7 для різних значень струму кола збудження (рекомендується використати усі положення реостату).

**Крок 9.** Натисніть кнопку "Побудувати графік" (**Plot Graph**), щоб побудувати відповідні графічні залежності.

**Крок 10.** Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

**Крок 11.** Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні дослідження відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

## Аналіз отриманих результатів

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має побудувати механічну характеристику двигуна постійного струму паралельного збудження при керуванні його швидкістю за рахунок зміни опору кола збудження (рис. 5.4).

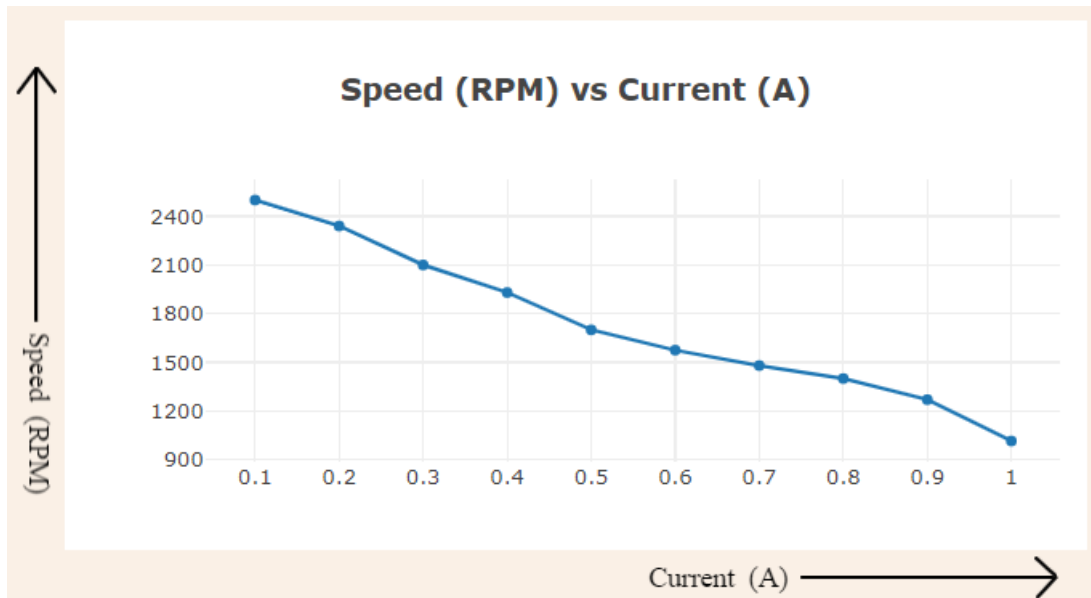


Рисунок 5.4 – Приклад механічної характеристики шунтового ДПС як результат виконання лабораторної роботи

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману механічну характеристику та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

## Завершення роботи

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".



## **Контрольні запитання**

1. Яка роль статора машини постійного струму?
2. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
3. Яку конструкцію має якір машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має щітковий апарат?
5. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
6. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
7. Де застосовуються двигуни постійного струму?
8. Як класифікуються двигуни постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Які характеристики ДПС називають робочими?
11. Що Ви розумієте під шунтовим регулятором збудження?



## Лабораторна робота №6

### Регулювання швидкості двигуна постійного струму за методом Уорда-Леонарда на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму за методом Уорда-Леонарда.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### **Теоретичні засади виконання роботи**

#### *Вступ*

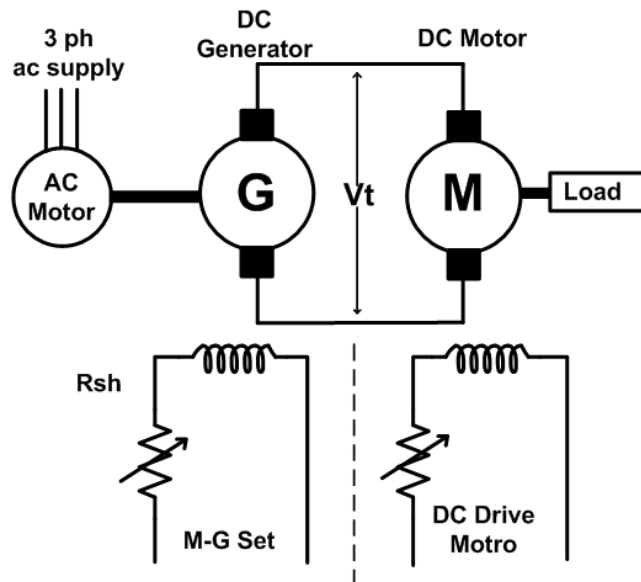
У методі Уорда-Леонарда регулювання швидкості двигуна постійного струму (ДПС) можна отримати шляхом зміни напруги, що подається на якор. У цьому методі М – це основний двигун постійного струму (**DC Motor**), швидкість якого потрібно регулювати, а G – це генератор постійного струму з окремим збудженням (**DC Generator**), який приводиться в дію 3-фазним асинхронним двигуном (**AC Motor**, рис. 6.1). Поєднання приводного двигуна змінного струму і генератора постійного струму називається мотор-генераторною установкою (**M-G Set**).

#### *Регулювання швидкості шляхом зміни опору якоря*

Швидкість двигуна постійного струму прямо пропорційна зворотній ЕРС і обернено пропорційна чистому магнітному потоку на полюс  $\Phi$ . Якщо нехтувати падінням напруги на щітковому контакті, то

$$N = (V_a - I_a R_a) / k\Phi,$$

де  $V_a$  – напруга, прикладена до якоря;  $I_a$  – струм якоря;  $R_a$  – опір кола якоря;  $k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна;  $\Phi$  – магнітний потік, пропорційний струму збудження  $I_f$ .



**Рисунок 6.1 – Еквівалентна схема регулювання швидкості ДПС за методом Уорда-Леонарда**

Таким чином, швидкість ДПС можна змінювати будь-яким з наступних способів:

1. Зміна магнітного потоку на полюс  $\Phi$  шляхом регулювання струму збудження;
2. Зміною зовнішнього опору у колі якоря.
3. Зміною прикладеної напруги  $V$  (метод регулювання швидкості Уорда-Леонарда).

#### *Система Уорда-Леонарда*

Ця система використовується там, де потрібне надзвичайно широке і дуже точне регулювання швидкості, наприклад, для шахтних підйомників, електричних екскаваторів, ліфтів і головних приводів на сталеливарних заводах, а також на фарбувальних і паперових фабриках. М – це основний двигун, для якого потрібне регулювання швидкості. Обмотка збудження цього двигуна постійно підключена через лінії живлення постійного струму. Двигун змінного струму AC Motor безпосередньо з'єднаний з генератором G. Цей двигун працює з приблизно постійною швидкістю. Вихідна напруга генератора G безпосередньо подається на головний двигун M (рис. 6.1).

У цьому методі регульована напруга, яка подається на якір двигуна, отримується від додаткового генератора постійного струму з незалежним збудженням, а керований двигун також працює як двигун з незалежним збудженням. Наведене вище рівняння показує, що якщо збудження двигуна постійне, а прикладена напруга  $V$  змінюється, швидкість буде майже прямо пропорційна напрузі на якорі.

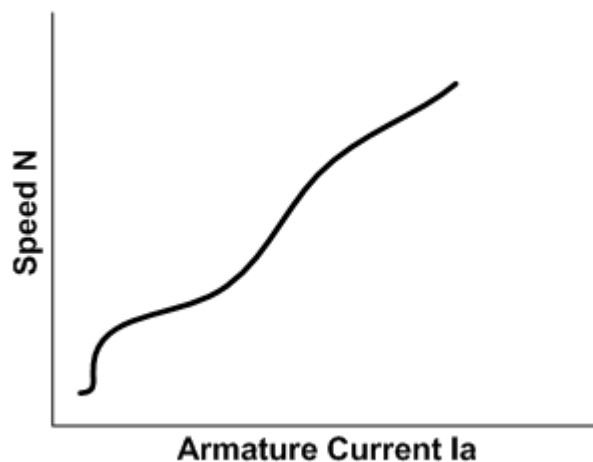
Система може бути більш пристосована для роботи двигуна як в прямому, так і в зворотному напрямку обертання шляхом зміни полярності напруги, що подається на його якір. Цього можна досягти, змінивши напрямок струму збудження генератора регульованої напруги з

незалежним збудженням. Такий генератор в системі Уорда-Леонарда приводиться в дію 3-фазним асинхронним двигуном з постійною швидкістю.

Якщо постійна напруга для збудження недоступна іншим способом, її можна отримати від збудника постійної напруги, з'єданого з мотор-генераторним агрегатом. Напрямок струму збудження генератора регульованої напруги можна змінити наступними способами:

1. За допомогою реверсивного перемикача в колі збудження;
2. Підключенням двох потенціометричних реостатів через рухомі клеми генератора впоперек обмотки збудження генератора.

На побудованому графіку швидкість ДПС прямо пропорційна напрузі (струму) на якорі (рис. 6.2).



**Рисунок 6.2 – Залежність швидкості обертання від напруги (струму) якоря ДПС**

*Переваги використання методу Уорда-Леонарда:*

1. Це дуже плавна система регулювання швидкості в широкому діапазоні (від нуля до номінальної швидкості двигуна);
2. Швидкість можна легко регулювати в обох напрямках обертання двигуна;
3. Двигун може працювати з рівномірним прискоренням.
4. Цьому методу притаманна властивість рекуперативного гальмування.

*Недоліки методу Уорда-Леонарда:*

1. Вища початкова вартість через використання двох додаткових машин тієї ж потужності, що і основний двигун постійного струму;
2. Більший розмір і вага системи, відповідно потребує більшої площі та дорогого фундаменту;
3. Необхідне часте технічне обслуговування;
4. Нижча енергетична ефективність через більші втрати;
5. Приводна система створює більше шуму.

## **Підготовка до виконання роботи**

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Регулювання швидкості двигуна постійного струму за методом Уорда-Леонарда на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/dcmotor-ward-leonard/index.html>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено "Здійснити регулювання швидкості двигуна постійного струму за методом Уорда-Леонарда. Побудувати графік залежності напруги на якорі від швидкості двигуна".

На панелі зліва ми бачимо меню "**Theory**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

## **Проведення лабораторних дослідів**

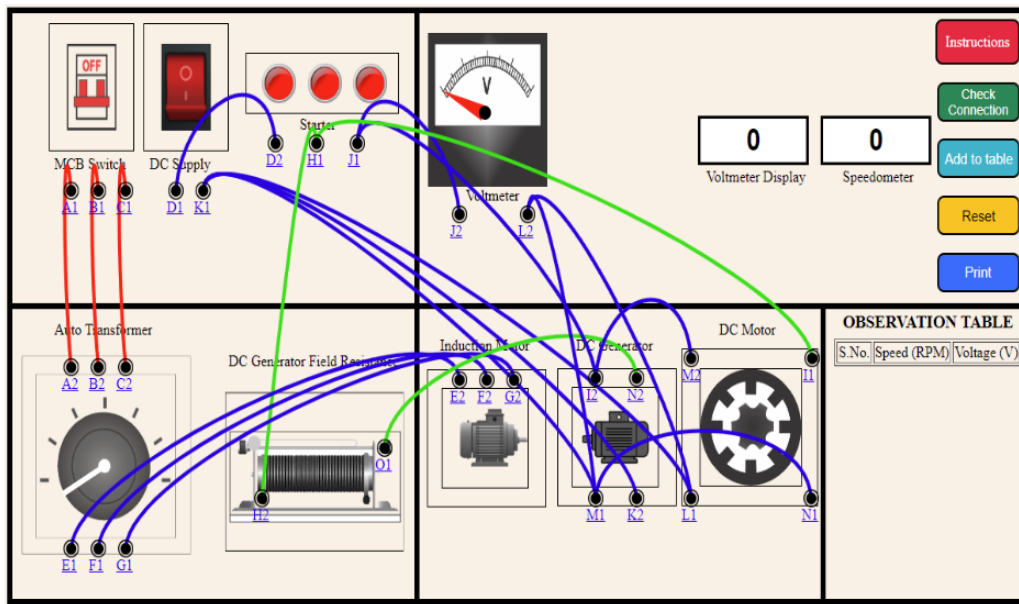
1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

*Крок 1.* Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 6.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

*Крок 2.* Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

*Крок 3.* Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дріт, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

From	A1	B1	C1	E1	F1	G1	D1	K1	K1	K1	H1	H1	J1	J1	I2	M1	N2	L1	L2
To	A2	B2	C2	E2	F2	G2	D2	M1	K2	L1	H2	I1	J2	I2	M2	N1	O1	L2	M1



**Рисунок 6.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду**

**Крок 4.** Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

**Крок 5.** Потім натисніть на ручку автотрансформатора (**Auto Transformer**).

**Крок 6.** Тепер посуňte ручку реостата. На дисплеї з'являться показання вольтметра (**Voltmeter Display**) та обертів (**Speedometer**).

**Крок 7.** Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

**Крок 8.** Повторіть кроки 6-7 для різних значень прикладеної напруги (рекомендується використати усі положення реостату).

**Крок 9.** Відповідна графічна залежність буде побудована автоматично.

**Крок 10.** Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

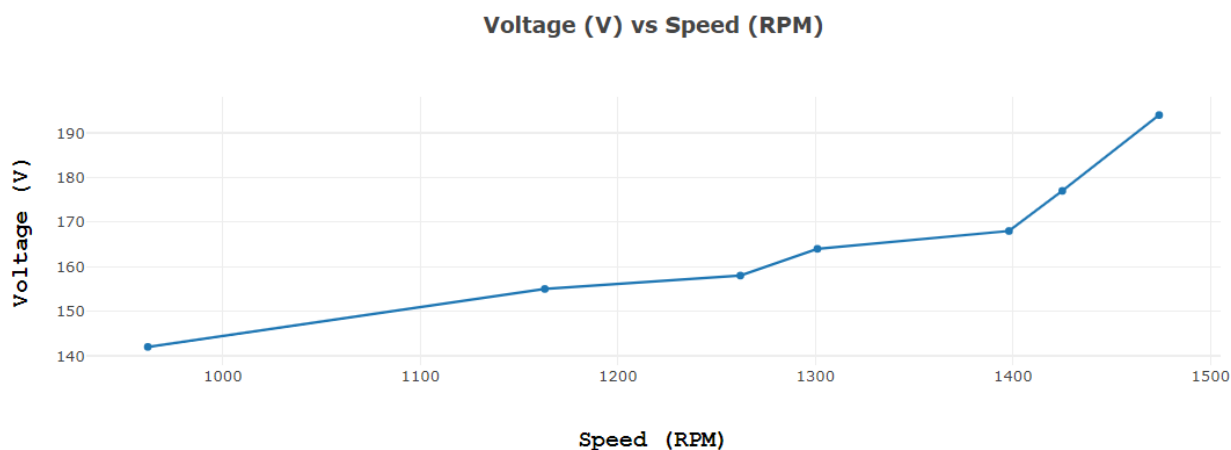
**Крок 11.** Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні дослідження відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

## Аналіз отриманих результатів

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має побудувати залежність  $n = f(U_a)$  двигуна постійного струму незалежного збудження при керуванні його швидкістю за методом Уорда-Леонарда (рис. 6.4).



**Рисунок 6.4 – Приклад отриманої характеристики ДПС як результат виконання лабораторної роботи**

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману графічну залежність та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

### Завершення роботи

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".



## **Контрольні запитання**

1. Яка роль статора машини постійного струму?
2. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
3. Яку конструкцію має якір машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має щітковий апарат?
5. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
6. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
7. Де застосовуються двигуни постійного струму?
8. Як класифікуються двигуни постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Які характеристики ДПС називають робочими?
11. У чому полягає суть методу регулювання швидкості ДПС Уорда-Леонарда?
12. З яких основних елементів складається система Уорда-Леонарда?
13. За рахунок чого можна змінити напрямок струму збудження генератору регульованої напруги?



## **Лабораторна робота №7**

### **Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням за допомогою пакету Matlab Simulink**

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

*Зміст звіту з лабораторної роботи:*

- Титульний аркуш;
- Зміст;
- Тема та мета лабораторної роботи;
- Короткий зміст виконаних досліджень;
- Отримані результати та їх аналіз;
- Висновки;
- Перелік використаних джерел.


### ***Теоретичні засади виконання роботи***

#### ***Вступ***

Двигун постійного струму (ДПС) живиться постійним струмом, який він перетворює на механічну енергію. Механічна енергія створює обертальний рух всередині двигуна. Двигуни постійного струму бувають різних розмірів: від найменшого, 20 000 об/хв., 3,7 В та 11,4 мм завдовжки, що використовується в медичних пристроях, до найбільшого – 101 МВт, який використовується для живлення надзвукової аеродинамічної труби. Двигун постійного струму був винайдений на початку 1800-х років британським вченим Вільямом Стердженом, який розробив перший колекторний ДПС. Американець Томас Девенпорт продовжив роботу Стерджена і, як кажуть, офіційно винайшов працюючий двигун постійного струму, запатентований у 1837 році.

Існує чотири основних типи двигунів постійного струму:

- *ДПС з постійними магнітами:* використовує постійний магніт для створення магнітного потоку збудження – забезпечує великий пусковий



момент з хорошим регулюванням швидкості – крутний момент обмежений, тому використовується в пристроях з низькою потужністю;

- *ДПС з послідовним збудженням (серієсний)*: обмотка збудження з'єднана послідовно з обмоткою якоря та пропускає весь струм якоря, створюючи великий пусковий момент – погане регулювання швидкості і може бути пошкоджений при роботі без навантаження;

- *ДПС з паралельним збудженням (шунтовий)*: обмотка збудження з'єднана паралельно (шунт) з обмоткою якоря – забезпечує чудове регулювання швидкості – відомий як двигун з постійною швидкістю;

- *ДПС зі змішаним збудженням (компаундний)*: має дві обмотки збудження – одна з'єднана послідовно з обмоткою якоря, а друга – паралельно з обмоткою якоря.

Двигун постійного струму оцінюється за трьома основними характеристиками: крутний момент-швидкість, крутний момент-струм якоря та потужність-швидкість. Вони надають інженеру необхідну інформацію щоб визначити, який двигун найкраще підходить для конкретного застосування.

Причиною проведення лабораторних робіт з дослідження шунтового та серієсного двигунів постійного струму є використання дуже схожих машин постійного струму для обох робіт, тому студент-інженер зможе побачити, як за допомогою паралельного або послідовного з'єднання обмотки збудження можна досягти дуже різних робочих характеристик.

*Опис моделі шунтового двигуна постійного струму*

Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС складається з трьох підсистем, описаних нижче:

- *Шунтовий двигун постійного струму*: номінальна потужність 10 к.с. / 1750 об/хв;

- *Блок живлення постійної напруги*: регульована напруга постійного струму, 0 - 300 В постійного струму;

- *Механічний момент навантаження*: регульований механічний момент навантаження 0 - 200 Н·м;

- *Панель*, яка дозволяє користувачеві:

- Змінювати за допомогою блока живлення постійну напругу, що подається на шунтовий ДПС;

- Змінювати механічний момент навантаження, що подається на шунтовий ДПС;

- Відображає напругу на затискачах, струми навантаження, якоря та збудження, момент навантаження та індукований момент, а також вхідну, перетворену, вихідну потужності та втрати у міді.

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**3 - DC Shunt Motor Lab**".

Як бачимо, конкретними цілями цієї лабораторної роботи за думкою автора є:

- Набути досвіду в моделюванні шунтового ДПС;
- Застосувати концепції шунтового ДПС для перевірки ручними розрахунками результатів лабораторної роботи – порівняти параметри моделі та еквівалентної схеми;
- Побудувати характеристики, що включають залежність крутного моменту від швидкості, крутного моменту від струму якоря та потужності від швидкості;
- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками шунтового двигуна постійного струму.

У теці ми бачимо Word файл "**DCShuntMotorLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

### **Проведення лабораторних дослідів**

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**DCShuntMotorLab**".

2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 7.1).

3. Виконайте наступні завдання:

- **Завдання 1:** Відрегулюйте напругу на джерелі живлення постійного струму (**DC Terminal Voltage Input**), щоб досягти вихідної потужності  $\approx 10$  к.с. (1 к.с. = 746 Вт) (**Output Power**) при  $\approx 1750$  об/хв (**Motor RPM**). Рекомендується встановити механічний момент навантаження на рівні  $\approx 40$  Н·м (**Mechanical Load Torque Input**) та час моделювання (**Stop Time**) 5 с. Для моделювання необхідно натиснути зелену кнопку "Виконати" (**Run**) на панелі зверху. Для підбраного значення напруги на затискачах двигуна (**Terminal Voltage**) зафіксувати всі інші технічні параметри ДПС.

- **Завдання 2:** Підтримуйте напругу на джерелі живлення постійного струму, визначену в завданні 1, а потім змінюйте вхідний механічний момент навантаження в діапазоні від 0 до 200 Н·м (**Mechanical Load Torque Input**). Рекомендується скористатися шагом у 20 Н·м. Для кожного вимірювання фіксувати у таблицю (рекомендується скористатися

Microsoft Excell) струм якоря (**Armature Current**), швидкість (**Motor RPM**) та вихідну потужність (**Output Power**).

- **Завдання 3:** Відрегулюйте напругу на джерелі живлення постійного струму на 10-20% нижче напруги постійного струму, визначеної у завданні 1, а потім повторіть досліди із завдання 2.

- **Завдання 4:** Налаштуйте напругу на джерелі живлення постійного струму на 10-20% вище напруги постійного струму, визначеної в завданні 1, а потім знову повторіть досліди із завдання 2.

EE 3033 Electric Power Systems DC Shunt Motor Lab  
 Developed Summer2020  
 University of Tulsa Electrical and Computer Engineering

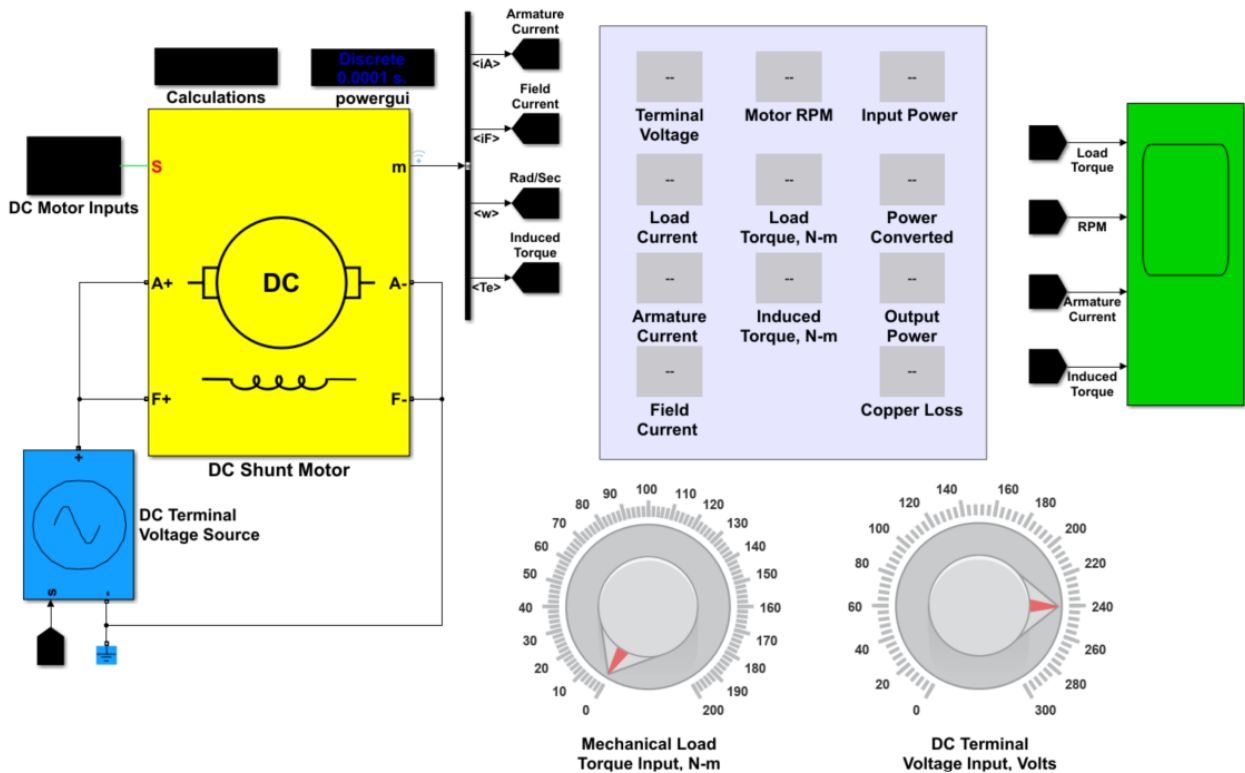



Рисунок 7.1 – Схема лабораторного стенду

### Аналіз отриманих результатів

Тепер у вашій команді є дані (багато даних), які демонструють, як працює ДПС з паралельним збудженням. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб підкреслити і продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** У одній системі координат побудуйте три криві "крутний момент – швидкість" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.



• **Завдання 2:** У одній системі координат побудуйте три криві "крутний момент – струм якоря" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.

• **Завдання 3:** У одній системі координат побудуйте три криві "вихідна потужність – швидкість" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.

• **Завдання 4:** У якості самостійної роботи, використовуючи початкові умови щодо потужності (10 к.с.) та швидкості (1750 об/хв) двигуна, розрахуйте втрати електроенергії, вхідну, перетворену та вихідну потужності. Співставте отримані значення із виміряними у завданні 1 п. 2.2.

### **Контрольні запитання**

1. Яка роль статора машини постійного струму?
2. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
3. Яку конструкцію має якор машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має щітковий апарат?
5. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
6. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
7. Де застосовуються двигуни постійного струму?
8. Як класифікуються двигуни постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Які характеристики ДПС називають робочими?
11. Чи допомагає еквівалентна схема шунтового двигуна у перевірці параметрів та втрат двигуна?



## **Лабораторна робота №8** **Дослідження двигуна постійного струму з послідовним збудженням за допомогою пакету Matlab Simulink**

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів двигуна постійного струму з послідовним збудженням.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – дослід/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у дослід/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### ***Теоретичні засади виконання роботи***

#### *Вступ*

Двигун постійного струму (ДПС) живиться постійним струмом, який він перетворює на механічну енергію. Механічна енергія створює обертальний рух всередині двигуна. Двигуни постійного струму бувають різних розмірів: від найменшого, 20 000 об/хв., 3,7 В та 11,4 мм завдовжки, що використовується в медичних пристроях, до найбільшого – 101 МВт, який використовується для живлення надзвукової аеродинамічної труби. Двигун постійного струму був винайдений на початку 1800-х років британським вченим Вільямом Стердженом, який розробив перший колекторний ДПС. Американець Томас Девенпорт продовжив роботу Стерджена і, як кажуть, офіційно винайшов працюючий двигун постійного струму, запатентований у 1837 році.

Існує чотири основних типи двигунів постійного струму:

- *ДПС з постійними магнітами:* використовує постійний магніт для створення магнітного потоку збудження – забезпечує великий пусковий момент з хорошим регулюванням швидкості – крутний момент обмежений, тому використовується в пристроях з низькою потужністю;

- *ДПС з послідовним збудженням (серієсний):* обмотка збудження з'єднана послідовно з обмоткою якоря та пропускає весь струм якоря, створюючи великий пусковий момент – погане регулювання швидкості і може бути пошкоджений при роботі без навантаження;



- ДПС з паралельним збудженням (шунтовий): обмотка збудження з'єднана паралельно (шунт) з обмоткою якоря – забезпечує чудове регулювання швидкості – відомий як двигун з постійною швидкістю;

- ДПС зі змішаним збудженням (компаундний): має дві обмотки збудження – одна з'єднана послідовно з обмоткою якоря, а друга – паралельно з обмоткою якоря.

Двигун постійного струму оцінюється за трьома основними характеристиками: крутний момент-швидкість, крутний момент-струм якоря та потужність-швидкість. Вони надають інженеру необхідну інформацію щоб визначити, який двигун найкраще підходить для конкретного застосування.

Причиною проведення лабораторних робіт з дослідження шунтового та серієсного двигунів постійного струму є використання дуже схожих машин постійного струму для обох робіт, тому студент-інженер зможе побачити, як за допомогою паралельного або послідовного з'єднання обмотки збудження можна досягти дуже різних робочих характеристик.

*Опис моделі серієсного двигуна постійного струму*

Simulink/Simscapе Electrical модель серієсного ДПС складається з трьох підсистем, описаних нижче:

- *Серієсний двигун постійного струму*: номінальна потужність 10 к.с. / 1750 об/хв;

- *Блок живлення постійної напруги*: регульована напруга постійного струму, 0 - 300 В постійного струму;

- *Механічний момент навантаження*: регульований механічний момент навантаження 0 - 200 Н·м;

- *Панель*, яка дозволяє користувачеві:

- Змінювати за допомогою блока живлення постійну напругу, що подається на серієсний ДПС;

- Змінювати механічний момент навантаження, що подається на серієсний ДПС;

- Відображає напругу на затискачах, струми навантаження, якоря та збудження, момент навантаження та індукований момент, а також вхідну, перетворену, вихідну потужності та втрати у міді.


### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**5 - DC Series Motor Lab**".

Як бачимо, конкретними цілями цієї лабораторної роботи за думкою автора є:

- Набути досвіду в моделюванні серієсного ДПС;

- Застосувати концепції серієсного ДПС для перевірки ручними розрахунками результатів лабораторної роботи – порівняти параметри моделі та еквівалентної схеми;



- Побудувати характеристики, що включають залежність крутного моменту від швидкості, крутного моменту від струму якоря та потужності від швидкості;

- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками серієсного двигуна постійного струму.

У теці ми бачимо Word файл "**DCSeriesMotorLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

### **Проведення лабораторних дослідів**

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**DCSeriesMotorLab**".

2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 8.1).

3. Виконайте наступні завдання:

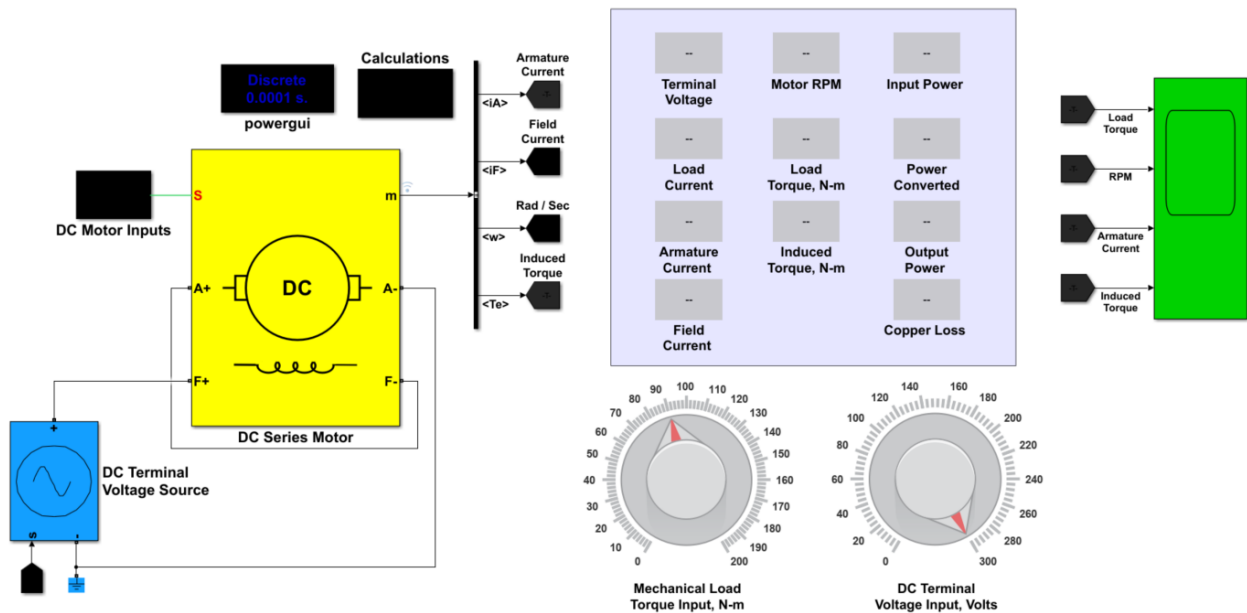
- **Завдання 1:** Відрегулюйте напругу на джерелі живлення постійного струму (**DC Terminal Voltage Input**) та механічний момент навантаження (**Mechanical Load Torque Input**) на рівні завдання №1 лабораторної роботи №7. Для встановленого значення напруги на затискачах двигуна (**Terminal Voltage**) та моменту (**Load Torque**) зафіксувати всі інші технічні параметри ДПС. Для моделювання необхідно натиснути зелену кнопку "Виконати" (**Run**) на панелі зверху. Рекомендується встановити час моделювання (**Stop Time**) 5 с.

- **Завдання 2:** Підтримуйте напругу на джерелі живлення постійного струму, визначену в завданні 1, а потім змінійте вхідний механічний момент навантаження в діапазоні від 0 до 200 Н·м (**Mechanical Load Torque Input**). Рекомендується скористатися шагом у 20 Н·м. Для кожного вимірювання фіксувати у таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell) струм якоря (**Armature Current**), швидкість (**Motor RPM**) та вихідну потужність (**Output Power**).

- **Завдання 3:** Відрегулюйте напругу на джерелі живлення постійного струму на 10-20% нижче напруги постійного струму, визначеної у завданні 1, а потім повторіть досліди із завдання 2.

- **Завдання 4:** Налаштуйте напругу на джерелі живлення постійного струму на 10-20% вище напруги постійного струму, визначеної в завданні 1, а потім знову повторіть досліди із завдання 2.

EE 3033 Electric Power Systems DC Series Motor Lab  
 Developed by Thomas Reid Spring 2021  
 University of Tulsa Electrical and Computer Engineering Department



**Рисунок 8.1 – Схема лабораторного стенду**


### **Аналіз отриманих результатів**

Тепер у вашій команді є дані (багато даних), які демонструють, як працює ДПС з послідовним збудженням. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб підкреслити і продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** У одній системі координат побудуйте три криві "крутний момент – швидкість" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.

- **Завдання 2:** У одній системі координат побудуйте три криві "крутний момент – струм якоря" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.

- **Завдання 3:** У одній системі координат побудуйте три криві "вихідна потужність – швидкість" для трьох значень напруги на затискачах ДПС відповідно до завдань 2-4 з п. 2.2. Проаналізуйте отримані графічні залежності та зробіть певні висновки щодо їх форми та параметрів.



- **Завдання 4:** Порівняйте криві характеристик для серієсного та шунтового двигунів постійного струму. Чим вони відрізняються? Чим вони схожі? Виходячи з кривих характеристики, чи можна використовувати обидва двигуни для одного й того ж застосування?

- **Завдання 5:** У якості самостійної роботи, використовуючи початкові умови щодо потужності (10 к.с.) та швидкості (1750 об/хв) двигуна, розрахуйте втрати електроенергії, вхідну, перетворену та вихідну потужності. Співставте отримані значення із вимірними у завданні 1 п. 2.2.

### **Контрольні запитання**

1. Яка роль статора машини постійного струму?
2. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
3. Яку конструкцію має якор машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має щітковий апарат?
5. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
6. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
7. Де застосовуються двигуни постійного струму?
8. Як класифікуються двигуни постійного струму?
9. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
10. Які характеристики ДПС називають робочими?
11. Чи допомагає еквівалентна схема серієсного двигуна у перевірці параметрів та втрат двигуна?
12. Чи можливо забезпечити однакові показники режиму роботи двигунів (швидкість та вихідну потужність) при однакових технічних параметрах ДПС з паралельним та послідовним збудженням (активні опори та індуктивності обмоток якоря та збудження тощо)?



## Лабораторна робота №9 Дослідження однофазного трансформатора за допомогою пакету Matlab Simulink

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів однофазних трансформаторів.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### **Теоретичні засади виконання роботи**

#### *Вступ*

**Трансформатор** – це електрична машина, яка перетворює вхідну електричну енергію (первинна сторона) в магнітну, а потім у вихідну електричну енергію (вторинна сторона). Таке перетворення енергії також змінює основні складові потужності (пам'ятайте, що  $P = VI$ ). Те, як напруга і струм змінюються від первинної сторони до вторинної, залежить від кількості витків на кожній стороні. Якщо на вторинній стороні більше витків, то напруга на вторинній стороні більша, ніж на первинній – це *підвищувальний* трансформатор. Якщо на вторинній стороні менше витків, то напруга на вторинній стороні менша за напругу на первинній стороні – це *понижувальний* трансформатор. Трансформатор є машиною постійної потужності (менше втрат в осерді і обмотках), і якщо напруга збільшується, то струм зменшується. Тобто підтримується постійна потужність.

Трансформатор є невід'ємною частиною *електроенергетичної системи* і є основною причиною існування електроенергетичної системи змінного струму. Завдяки трансформатору виробництво, передача, розподіл та використання електроенергії відбувається при найбільш економічній нарузі. Електроенергетична система є найбільш економічною та ефективною при використанні трансформаторів.

Застосування трансформатора включає в себе:

- Вимірювання високої напруги або великого струму за допомогою трансформатора напруги або трансформатора струму;

- Ізоляція між системами ланцюгів різних напруг;
- Передача електроенергії;
- Узгодження імпедансу джерела живлення та навантаження.

Для інженера-електрика дуже важливо розуміти, як функціонує трансформатор за різних умов, і використовувати його еквівалентну схему, а також тестувати і визначати параметри еквівалентної схеми. Це і є основною метою даної лабораторної роботи.

#### *Опис моделі однофазного трансформатора*

Simulink/Simscapе Electrical модель однофазного трансформатора складається з наступних підсистем:

- **Джерело:** 120 В середньоквадратична фазна напруга / 60 Гц / джерело з нульовим градусом (*zero-degree source*);

- **Датчики:** дві підсистеми датчиків, що вимірюють лінійну напругу і лінійний струм, один датчик розташований на стороні джерела, інший – на стороні навантаження;

- **Однофазний підвищувальний трансформатор:** 100 витків на первинній стороні і 200 витків на вторинній стороні з неідеальним осердям. Не ідеальність осердя обумовлена його магнітними властивостями та розмірами;

- **Паралельне RLC електричне навантаження:** однофазне комплексне паралельне навантаження – паралельно з'єднані резистор, конденсатор і котушка індуктивності (RLC ланцюг) – значення опору, ємності та індуктивності ланцюга можна регулювати або розімкнути ланцюг, щоб отримати тільки активний, тільки реактивний або комплексний імпеданс (опір).

- **Панель**, яка дозволяє користувачеві:

- налаштувати опір в Омах, ємність в мкФ та індуктивність в мГн паралельного RLC навантаження за допомогою поворотної ручки;

- вимкнути або увімкнути резистор, конденсатор і котушку індуктивності для створення тільки активного, тільки реактивного або комплексного імпедансу навантаження за допомогою тумблерів "On / Off";

- виконати тести холостого ходу та короткого замикання трансформатора;

- відображає фазну напругу і струм, активну, реактивну і повну потужності джерела й навантаження, коефіцієнт потужності і кут коефіцієнта потужності.

#### **Підготовка до виконання роботи**

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**2 - Single Phase Transformer Lab**".

Як бачимо, конкретними цілями цієї лабораторної роботи за думкою автора є:



- Здобути досвід моделювання неідеального однофазного трансформатора;
- Застосувати концепції трансформатора, розглянуті на лекціях, для перевірки параметрів лабораторної роботи за допомогою ручних розрахунків – порівняти характеристики моделі та еквівалентної схеми;
- Виміряти зміну ефективності, активної потужності в навантаженні, порівняно зі змінами в комплексному (повному) навантаженні;
- Провести випробування холостого ходу та короткого замикання, а потім використати результати для розробки еквівалентної схеми трансформатора;
- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками однофазного трансформатора.

У теці ми бачимо Word файл "**SinglePhaseTransformerLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

### **Проведення лабораторних дослідів**

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**SinglePhaseTransformerLab**".
2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 9.1).
3. Виконайте наступні завдання:
  - **Завдання 1:** Налаштуйте модель тільки для активного навантаження, для чого на панелі перемикачів (**Control Switches**) увімкніть тільки перемикач резистору (**Load Resistor Switch**). Виміряйте на боці джерела (**Source Side**) та навантаження (**Load Side**) середньоквадратичне (діюче) значення напруги (**Voltage rms**), активної (**Real Power**), реактивної (**Reactive Power**) та повної (**Apparent Power**) потужностей, змінюючи значення опору (**Resistance**) у діапазоні від 0 до 200 Ом з кроком 20 Ом. Занесіть виміряні величини у підготовлену заздалегідь таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 0,02 с, враховуючи встановлену частоту струму 60 Гц.

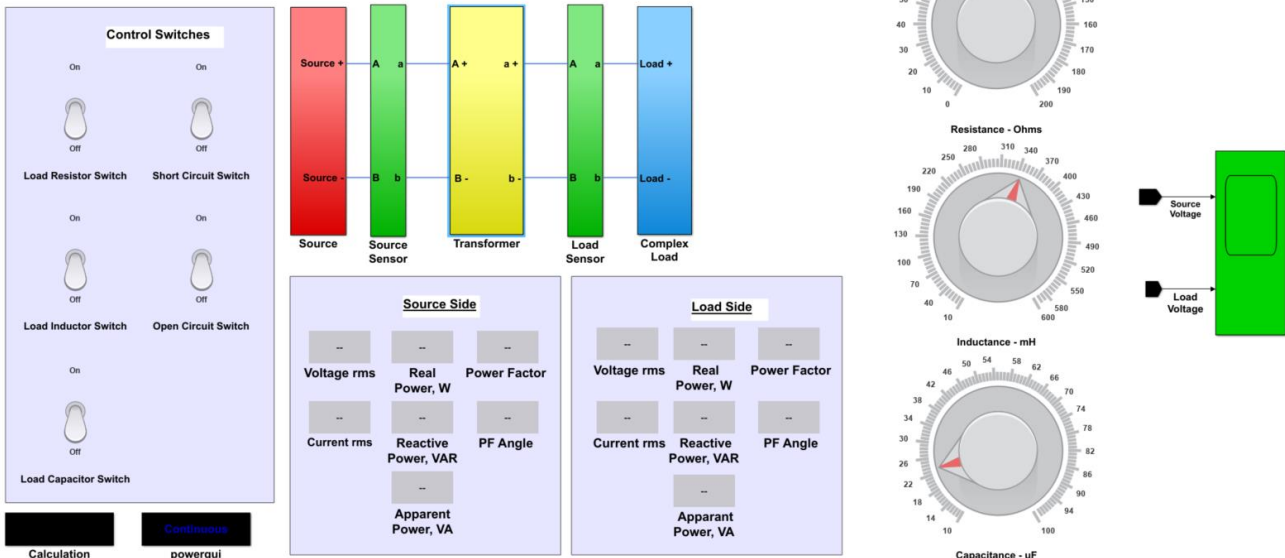



Рисунок 9.1 – Схема лабораторного стенду

- **Завдання 2:** Налаштуйте модель тільки для ємнісного реактивного навантаження, для чого на панелі перемикачів (**Control Switches**) увімкніть тільки перемикач конденсатору (**Load Capacitor Switch**). Виміряйте на боці джерела (**Source Side**) та навантаження (**Load Side**) середньоквадратичне (діюче) значення напруги (**Voltage rms**), активної (**Real Power**), реактивної (**Reactive Power**) та повної (**Apparent Power**) потужностей, змінюючи значення ємності (**Capacitance**) у діапазоні від 10 до 100 мкФ з кроком 10 мкФ. Занесіть виміряні величини у підготовлену заздалегідь таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 0,02 с, враховуючи встановлену частоту струму 60 Гц.

- **Завдання 3:** Налаштуйте модель тільки для індуктивного реактивного навантаження, для чого на панелі перемикачів (**Control Switches**) увімкніть тільки перемикач індуктивності (**Load Inductor Switch**). Виміряйте на боці джерела (**Source Side**) та навантаження (**Load Side**) середньоквадратичне (діюче) значення напруги (**Voltage rms**), активної (**Real Power**), реактивної (**Reactive Power**) та повної (**Apparent Power**) потужностей, змінюючи значення індуктивності (**Inductance**) у діапазоні від 10 до 600 мГн з кроком  $\approx 60$  мГн. Занесіть виміряні величини у підготовлену заздалегідь таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 0,02 с, враховуючи частоту струму 60 Гц.

- **Завдання 4:** Виконати дослід холостого ходу, для чого на панелі перемикачів (**Control Switches**) увімкніть тільки перемикач відповідного тесту (**Open Circuit Switch**). Запишіть усі параметри на боці джерела (**Source Side**) та навантаження (**Load Side**).



- **Завдання 5:** Виконати дослід короткого замикання, для чого на панелі перемикачів (**Control Switches**) увімкніть тільки перемикач відповідного тесту (**Short Circuit Switch**). Запишіть усі параметри на боці джерела (**Source Side**) та навантаження (**Load Side**).

### **Аналіз отриманих результатів**

Тепер у вашої команди є дані, які демонструють, як працює однофазний трансформатор. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** Для активного навантаження (завдання 1 з п. 2.2) розрахувати ККД і коефіцієнти трансформації для кожного значення опору – звести в таблицю, побудувати графіки, проаналізувати та зробити висновки;

- **Завдання 2:** Для індуктивного та ємнісного навантажень (завдання 2 і 3 з п. 2.2) розрахувати ККД і коефіцієнти трансформації, використовуючи виміряні дані – звести в таблицю, побудувати графіки, проаналізувати та зробити висновки;

- **Завдання 3:** Обговоріть і дайте відповіді на наступні питання:

- Чи є зміни в ефективності (ККД) та коефіцієнтах трансформації для різних за характером навантажень? Поясніть причини;

- Що відбувається із параметрами трансформатора, коли навантаження змінюється від відстаючого (індуктивного) до випереджаючого (ємнісного)?

- Чи відповідають виміряні під час дослідів холостого ходу та короткого замикання параметри трансформатору очікуваним значенням?

- **Завдання 4:** У рамках самостійної роботи, використовуючи результати випробувань холостого ходу та короткого замикання, розробіть відповідні еквівалентні схеми для однофазного трансформатора, порівняйте прогнозовані параметри еквівалентної схеми з виміряними даними навантаження.

### **Контрольні запитання**

1. Якими шляхами можна визначати параметри схеми заміщення трансформатора?

2. Накресліть схеми проведення дослідів н.х. для одно- та трифазного трансформаторів.

3. Яка роль струму н.х. в трансформаторі?

4. Яку величину складає струм н.х. в трансформаторі, і чому саме таку?



5. Що слід розуміти під втратами н.х. в трансформаторі, чому вони вважаються постійними?
6. Що слід розуміти під дослідним, а що під аварійним к.з. трансформатора?
7. Яка напруга називається напругою к.з. трансформатора?
8. Що слід розуміти під втратами к.з. трансформатора, чому ці втрати називаються змінними?
9. Як за результатами досліду к.з. визначити опори первинної та вторинної обмоток трансформатора?
10. Що таке характеристики к.з. трансформатора і як вони будуються?
11. Що слід розуміти під зовнішніми характеристиками трансформатора.
12. Поясніть зовнішні характеристики трансформатора при різних характерах навантаження.
13. Що представляє собою енергетична діаграма трансформатора?
14. Які втрати мають місце у навантаженому трансформаторі?
15. Поясніть з яких втрат складаються магнітні втрати і від яких величин вони залежать?
16. Поясніть з яких втрат складаються електричні втрати і від яких величин вони залежать?
17. Як визначається ККД та його максимальне значення у трансформатора?
18. Що є умовою максимального значення ККД?
19. Що слід розуміти під енергетичним ККД трансформатора?

## Лабораторна робота №10

### Реалізація дослідів холостого ходу та короткого замикання однофазного трансформатора на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо проведення дослідів холостого ходу та короткого замикання однофазного трансформатора й аналізу отриманих результатів.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі дослідів/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – дослідів/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у дослідів/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### ***Теоретичні засади виконання роботи***

#### *Вступ*

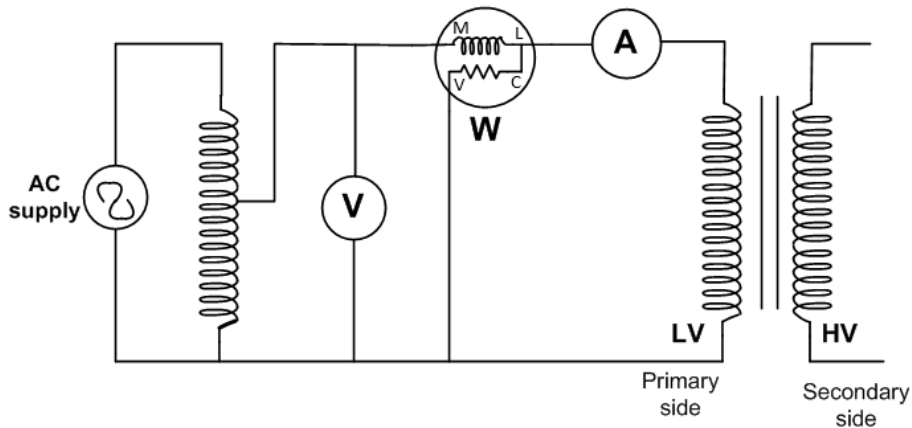
Дослідів холостого ходу і короткого замикання проводяться для визначення таких параметрів трансформатора, як коефіцієнт корисної дії, діапазон регулювання напруги, константи електричного кола тощо. Ці випробування проводяться без фактичного навантаження, і тому для їх проведення потрібна дуже мала потужність. Дослідів холостого ходу і короткого замикання дають дуже точний результат порівняно з випробуванням при повному навантаженні трансформатора.

#### *Дослід холостого ходу*

Метою дослідів холостого ходу є визначення струму холостого ходу і втрат трансформатора, на основі яких визначаються його інші параметри. Цей тест виконується на первинній обмотці трансформатора, до якої підключаються ватметр, амперметр і вольтметр. За допомогою джерела змінного струму на первинну обмотку подається стандартна номінальна напруга (рис. 10.1).

Вторинна обмотка трансформатора залишається розімкненою, а другий вольтметр підключається до її затискачів. Цей вольтметр вимірює вторинну індуквану напругу. Оскільки вторинна обмотка трансформатора розімкнута, через первинну обмотку протікає струм холостого ходу. Його значення дуже мале порівняно з повним номінальним струмом. Електричні втрати в міді відбуваються тільки на первинній обмотці трансформатора, оскільки вторинна обмотка розімкнута. Показання ватметра відображають лише втрати в осерді та

сталі. Втрати в осерді трансформатора однакові для всіх типів навантажень.



**Рисунок 10.1 – Еквівалентна електрична схема для дослідження холостого ходу трансформатора**

*Розрахунки дослідження холостого ходу:*

Нехай  $W_0$  – показання ватметра;

$V_1$  – показання вольтметра;

$I_0$  – показання амперметра.

Тоді втрати у сталі трансформатора  $P_i = W_0$  і

$$W_0 = V_1 I_0 \cos \varphi. \quad (1)$$

Коефіцієнт потужності холостого ходу дорівнює

$$\cos \varphi = W_0 / (V_1 I_0).$$

Активна складова  $I_w$  дорівнює

$$I_w = W_0 / V_1. \quad (2)$$

Підставивши значення  $W_0$  з рівняння (1) у (2), отримаємо значення активної складової

$$I_w = I_0 \cos \varphi.$$

Намагнічувальна (реактивна) складова дорівнює

$$I_m = (I_0^2 - I_w^2)^{1/2}.$$

Нижче наведено параметри холостого ходу. Еквівалентний опір кола намагнічування дорівнює

$$R_0 = V_1 / I_w.$$

Еквівалентний реактивний опір кола намагнічування

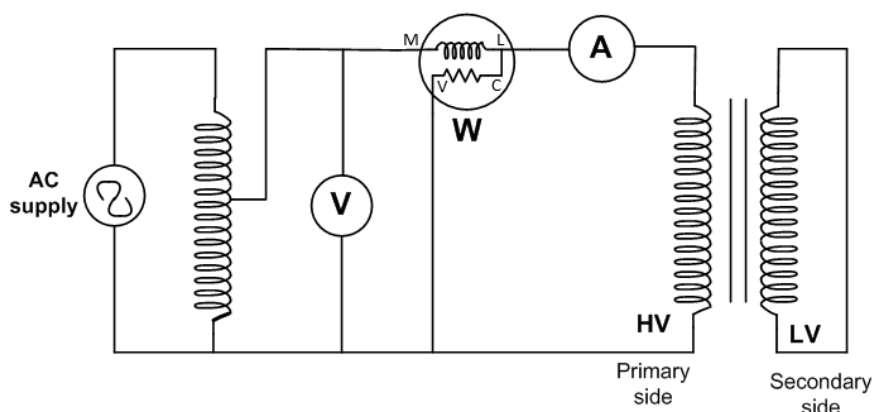
$$X_0 = V_1 / I_m.$$

### Дослід короткого замикання трансформатора

Такий дослід виконується для визначення нижчезазначених параметрів трансформатора:

1. Електричні втрати в міді, що виникають при повному навантаженні. Їх значення використовується для визначення ефективності трансформатора;
2. Еквівалентний активний, повний і реактивний опір короткого замикання.

При досліді короткого замикання вимірювальні прилади, такі як ватметр, вольтметр і амперметр, підключаються до обмотки високої напруги трансформатора. Його вторинна обмотка замикається накоротко за допомогою товстого провідника або амперметра, який підключається до затискачів вторинної обмотки. Джерело низької напруги (що становить приблизно 5-10% від номінального значення) підключається до первинної обмотки, через що струм повного навантаження протікає як через вторинну, так і через первинну обмотку трансформатора. Струм повного навантаження вимірюється амперметром, підключеним до вторинної обмотки (рис. 10.2).



**Рисунок 10.2 – Еквівалентна схема для досліді короткого замикання трансформатора**

Після підключення джерела магнітний потік встановлюється в осерді трансформатора. Його величина невелика порівняно з нормальним значенням. Втрати у сталі трансформатора залежать від потоку. При досліді короткого замикання вони значно менші через низьке значення магнітного потоку, тому ними нехтують. Показання ватметра визначають лише втрати в міді обмоток. Вольтметр вимірює напругу, прикладену до

обмотки високої напруги. Вторинний струм індукується в трансформаторі через прикладену напругу.

*Розрахунки досліду короткого замикання*

Нехай  $W_c$  – показання ватметра;

$V_{sc}$  – показання вольтметра;

$I_{sc}$  – показання амперметра.

Тоді повні втрати в міді трансформатора при повному навантаженні визначаються за формулою

$$P_c = [I_f/I_{sc}]^2 W_c;$$
$$I_{sc}^2 R_s = W_c.$$

Еквівалентний активний опір, віднесений до вторинної сторони:

$$R_s = W_c / I_{sc}^2.$$

Еквівалентний повний опір, віднесений до вторинної сторони:

$$Z_s = V_{sc} / I_{sc}.$$

Еквівалентний реактивний опір, віднесений до вторинної сторони:

$$X_s = (Z_s^2 - R_s^2)^{1/2}.$$

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Досліди холостого ходу та короткого замикання однофазного трансформатора на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/circuit-parameters-oc-test/>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено *"Визначення еквівалентної схеми трансформатора за результатами випробувань холостого ходу та короткого замикання"*.

На панелі зліва ми бачимо меню **"Theory"**, наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню "**Pretest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

### Проведення лабораторних дослідів

1. У меню "**Procedure**" необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

**Крок 1.** Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 10.3). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

**Крок 2.** Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

**Крок 3.** Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дрід, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

**Крок 4.** Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

From	A	B	D	E	E	D	H	C	L	V	S1	S2
To	D	E	F	G	I	P2	M	L	P1	P2	K	J

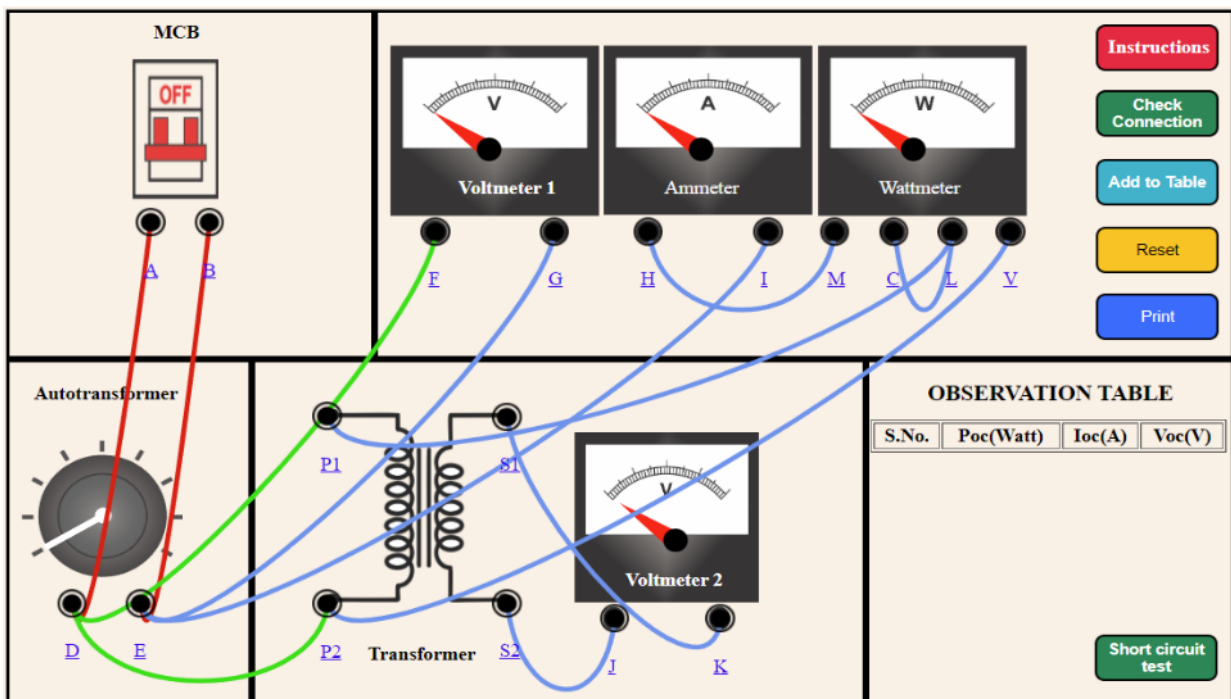



Рисунок 10.3 – Коректно зібрана схема лабораторного стенду



Крок 5. Потім натисніть на ручку автотрансформатора (**Auto Transformer**).

Крок 6. Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

Крок 7. Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати результати дослідження холостого ходу трансформатора.

Крок 8. Натисніть кнопку "Дослід короткого замикання" (**Short Circuit Test**), щоб виконати відповідний дослід.

Крок 9. Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених інструкцій. Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

Крок 10. Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

Крок 11. Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дрід, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

Крок 12. Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

Крок 13. Потім натисніть на ручку автотрансформатора (**Auto Transformer**).

Крок 14. Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

Крок 15. Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати результати дослідження короткого замикання трансформатора.

Крок 16. Натисніть кнопку "Отримати" (**Submit**), щоб отримати еквівалентну принципову схему трансформатора.

Крок 17. Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні дослідження відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

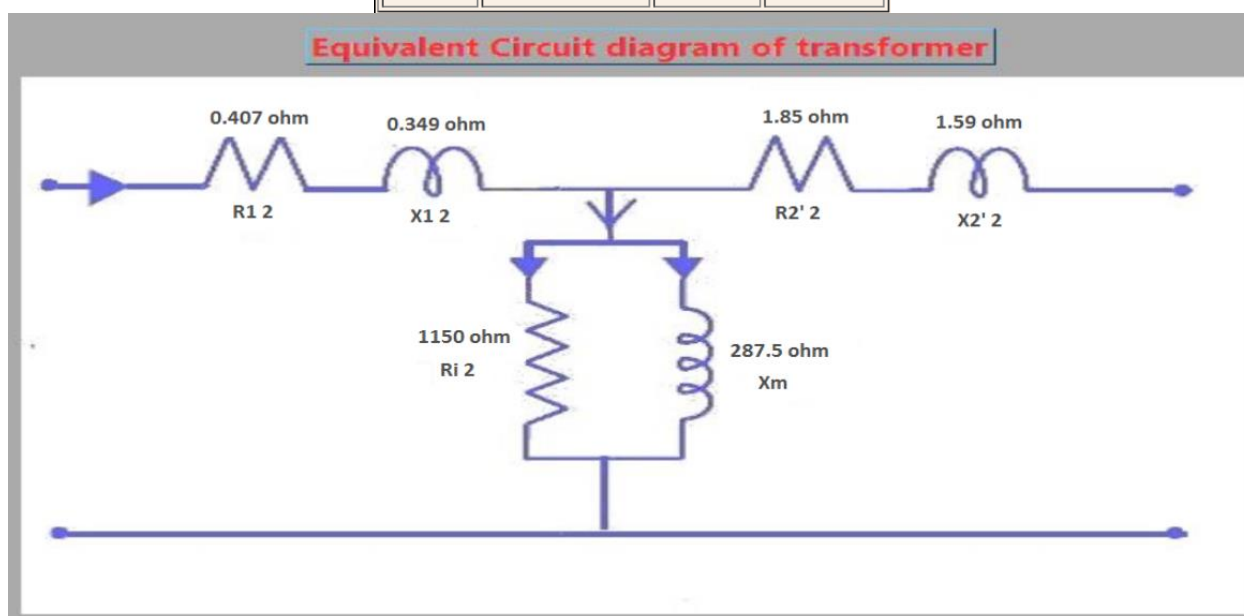
### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має виміряти електричні параметри однофазного трансформатора у рамках дослідів холостого ходу та короткого замикання, а також побудувати його еквівалентну схему (рис. 10.4).

### OBSERVATION TABLE

S.No.	Poc(Watt)	Ioc(A)	Voc(V)
1	50	0.9	230

S.No.	Psc(Watt)	Isc(A)	Vsc(V)
1	37.5	4.5	11



**Рисунок 10.4 – Приклад вимірюваних параметрів однофазного трансформатора як результат виконання лабораторної роботи**

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману еквівалентну схему трансформатора та зробити певні висновки щодо її параметрів. Також використовуючи виміряні у розділі 2.2 величини та залежності у п. 1.2 рекомендується розрахувати відповідні параметри трансформатора для дослідів холостого ходу та короткого замикання.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці



аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".

### **Контрольні запитання**

1. Що називають трансформатором?
2. Яке призначення магнітної системи та обмоток трансформатора і як вони разом називаються?
3. Як класифікуються магнітопроводи та обмотки сучасних трансформаторів.
4. Як складаються рівняння ЕРС та струмів трансформатора?
5. Які величини відносяться до параметрів схеми заміщення трансформатора?
6. Якими шляхами можна визначати параметри схеми заміщення трансформатора?
7. Що слід розуміти під дослідним, а що під аварійним КЗ трансформатора?
8. Схема заміщення та векторна діаграма трансформатора в режимі неробочого ходу.
9. Схема заміщення та векторна діаграма трансформатора в режимі КЗ.
10. Як визначається напруга короткого замикання трансформатора?
11. Поясніть побудову трикутника короткого замикання.
12. Як визначається стале значення струму короткого замикання?
13. Поясніть суть дослідження холостого ходу трансформатора.
14. Поясніть суть дослідження короткого замикання трансформатора.



## Лабораторна робота №11

### Дослідження трифазного трансформатора за допомогою пакету Matlab Simulink

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів трифазних трансформаторів.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### **Теоретичні засади виконання роботи**

*Вступ*

**Трифазні трансформатори** використовуються в електроенергетичних системах для перетворення симетричної трифазної напруги на певному рівні в симетричну трифазну напругу на другому рівні. Трансформатори, що використовуються між генераторами та лініями електропередачі, між системами передачі та підстанціями, а також між підстанціями та розподільчими системами, є трифазними трансформаторами. Комерційні та промислові електричні навантаження потребують трифазних трансформаторів для перетворення трифазної розподільчої напруги до фактичного рівня використання.

Трифазні трансформатори можуть бути сформовані двома способами. Перший – це з'єднання трьох окремих однофазних трансформаторів для формування трифазного трансформаторного блоку. Другий – це виготовлення багатоніжкового магнітопроводу з усіма трифазними обмотками (первинними і вторинними), розташованими на осерді. У будь-якому випадку кожна фаза працює однаково, маючи однакові параметри та характеристики. Однак одним з ускладнень є те, що первинна і вторинна обмотки можуть бути з'єднані незалежно одна від одної за схемою "зірка" (**Star, WYE**) або "трикутник" (**Delta**). Використовуються чотири типи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів:

- Зірка – Зірка;
- Зірка – Трикутник;

- Трикутник – Зірка;
- Трикутник – Трикутник.

Схема "Зірка – Трикутник" зазвичай використовується для пониження напруги з високої до низької або середньої, як у розподільчих трансформаторах. "Трикутник – Зірка" використовується для підвищення до високої напруги, як у трансформаторах генераторних станцій. З'єднання "Трикутник – Трикутник" – це можливість відключення однієї фази для ремонту, але при цьому трансформатор продовжує працювати як трифазний при рівні потужності 58 %. З'єднання "Зірка – Зірка" використовується рідко через потенційні проблеми з несиметрією напруги та третіми гармоніками.

*Основна мета лабораторної роботи* – дати студентам-електротехнікам досвід роботи з трифазними трансформаторами і зрозуміти, як тип з'єднання обмоток впливає на ефективність і передачу потужності до навантаження.

*Опис моделі трифазного трансформатора*

Simulink/Simscape Electrical модель трифазного трансформатора складається з наступних компонентів:

- **Трифазне джерело:** симетричне з'єднане зіркою джерело з позитивною послідовністю фаз на частоті 60 Гц, з регульованою лінійною напругою джерела та заземленою нейтраллю;

- **Датчики:** дві підсистеми датчиків, що вимірюють лінійну напругу та лінійний струм, один з яких розташований на стороні джерела, а інший – на стороні навантаження.

- **Трифазний понижувальний трансформатор:** трансформатор може бути підключений як за схемою зірки, так і за схемою трикутник на первинній і вторинній сторонах з активними опорами та індуктивностями ланцюга, доступними в одиницях SI;

- **Паралельне навантаження RLC:** трифазне комплексне паралельне навантаження – паралельно з'єднані резистор, конденсатор і котушка індуктивності (RLC ланцюг) – значення опору, ємності та індуктивності можна регулювати або розімкнути ланцюг, щоб отримати тільки активний, тільки реактивний або комплексний імпеданс (опір).

- **Панель,** яка дозволяє користувачеві:

- відрегулювати напругу джерела живлення за допомогою поворотної ручки;

- вимкнути або увімкнути навантаження, підключене за схемою зірка або трикутник.

- відображає лінійні напруги та струми, активну та реактивну потужності джерела та навантаження.

## **Підготовка до виконання роботи**

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**6 - Three Phase Transformer Lab**".

Як бачимо, конкретними цілями цієї лабораторної роботи за думкою автора є:

- Здобути досвід моделювання неідеального трифазного трансформатора;
- Застосувати концепції трансформатора, розглянуті на лекціях, для перевірки результатів лабораторної роботи за допомогою ручних розрахунків – порівняти характеристики моделі та еквівалентної схеми;
- Виміряти зміну ефективності та активної потужності в навантаженні відносно змін у комплексному навантаженні;
- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками трифазного трансформатора.

У теці ми бачимо Word файл "**ThreePhaseTransformerLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

## **Проведення лабораторних дослідів**

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**ThreePhaseTransformerLab**".

2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 1011).

3. Виконайте наступні завдання:

- **Завдання 1:** Налаштуйте з'єднання обмоток трансформатора за схемою "зірка – зірка", для чого подвійним натисканням відкрийте його модель (**Three-Phase Transformer (Two Windings)**) та встановіть схему зірки для первинної (**Primary**) та вторинної (**Secondary**) обмоток.

Далі реалізуйте режим холостого ходу трансформатора, для чого вимкніть обидва перемикача навантаження (**WYE Load, Delta Load**).

Підготуйте таблицю для фіксації усіх параметрів на панелях джерела (**Source Side**), загального навантаження (**Load Side**), навантаження зіркою (**WYE Load**) та трикутником (**Delta Load**), а саме:

- лінійна напруга (**Line Voltage**);
- лінійний струм (**Line Current**);
- активна потужність (**Real Power**);
- реактивна потужність (**Reactive Power**).

Встановіть напругу джерела живлення (**Source Line Voltage**) на рівні 500-900 В (одне значення) та виконайте моделювання режиму. Занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 0,1 с.

EE 3033 Electric Power Systems Three-Phase Transformer Power Lab  
Developed by Britney Baxter Spring 2021  
University of Tulsa Electrical and Computer Engineering Department

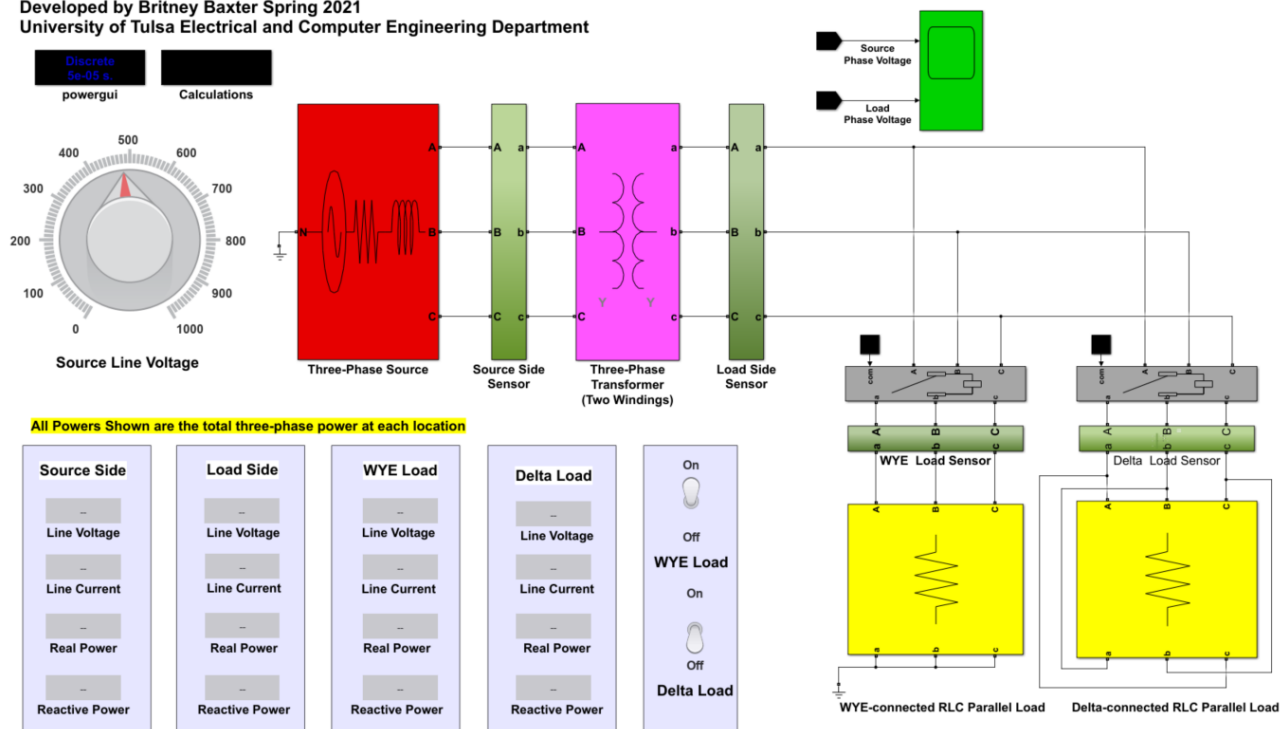



Рисунок 11.1 – Схема лабораторного стану

• **Завдання 2:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження зіркою (**WYE Load**) та встановіть тільки активний опір величиною 100 Ом. Для цього подвійним натисканням відкрийте модель навантаження (**WYE-connected RLC Parallel Load**) та у параметрах оберіть його тип **R** та величину 100 Ом. Виконайте моделювання режиму та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

• **Завдання 3:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження трикутником (**Delta Load**) та встановіть тільки активний опір величиною 100 Ом. Для цього подвійним натисканням відкрийте модель навантаження (**Delta-connected RLC Parallel Load**) та у параметрах оберіть його тип **R** та величину 100 Ом. Виконайте моделювання режиму та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.



- **Завдання 4:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть обидва перемикачі навантаження зіркою (**WYE Load**) та трикутником (**Delta Load**) та встановіть тільки активні опори величиною 100 Ом для кожного навантаження. Виконайте моделювання режиму та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

- **Завдання 5:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження зіркою (**WYE Load**) та встановіть тільки активний опір величиною 100 Ом. Виконайте моделювання для 4-х з'єднань первинної та вторинної обмоток трансформатора (зірка – зірка; зірка – трикутник; трикутник – зірка; трикутник – трикутник) та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

- **Завдання 6:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження трикутником (**Delta Load**) та встановіть тільки активний опір величиною 100 Ом. Виконайте моделювання для 4-х з'єднань первинної та вторинної обмоток трансформатора (зірка – зірка; зірка – трикутник; трикутник – зірка; трикутник – трикутник) та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

- **Завдання 7:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження зіркою (**WYE Load**) та встановіть комплексний опір **RLC**:  $R = 100$  Ом,  $L = 0,2653$  Гн,  $C = 26,5e-6$  Ф. Виконайте моделювання для 4-х з'єднань первинної та вторинної обмоток трансформатора (зірка – зірка; зірка – трикутник; трикутник – зірка; трикутник – трикутник) та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

- **Завдання 8:** Для встановленого у Завданні 1 рівня напруги живлення увімкніть перемикач навантаження трикутником (**Delta Load**) та встановіть комплексний опір **RLC**:  $R = 100$  Ом,  $L = 0,2653$  Гн,  $C = 26,5e-6$  Ф. Виконайте моделювання для 4-х з'єднань первинної та вторинної обмоток трансформатора (зірка – зірка; зірка – трикутник; трикутник – зірка; трикутник – трикутник) та занесіть виміряні величини у підготовлену таблицю.

### **Аналіз отриманих результатів**

Тепер у вашої команди є дані, які демонструють, як працює однофазний трансформатор. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** Для результатів завдань 1-4 (п. 2.2) проаналізувати зміну електричних параметрів (напруга, струм, потужність) на первинній та вторинній сторонах трансформатора залежно від схеми з'єднання

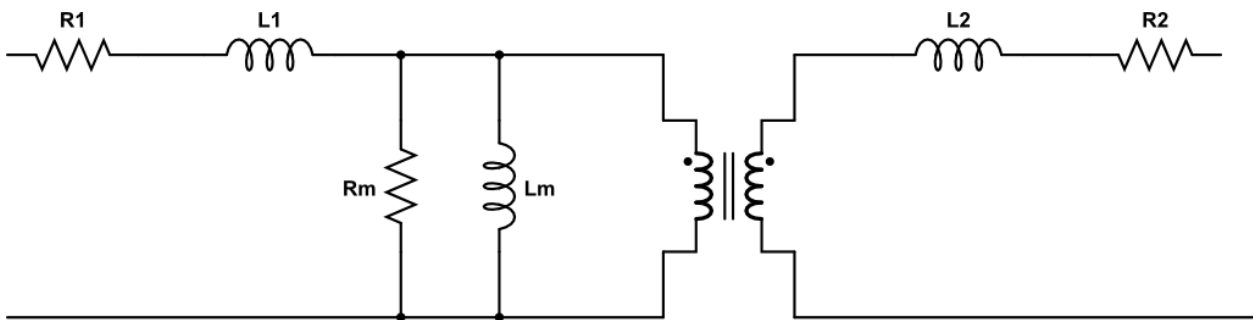
навантаження. Поясніть отримані результати, користуючись таблицею із наведеними результатами;

- **Завдання 2:** Результати завдань 5 і 6 (п. 2.2) отримані для однакових умов щодо джерела і величини навантаження, але різних з'єднань обмоток трансформатора. Як схеми з'єднання впливають на ефективність передачі потужності від джерела до навантаження – дослідить, використовуючи коефіцієнт корисної дії та повну потужність, що передається до навантаження (ці параметри необхідно розрахувати);

- **Завдання 3:** Що відбувається, коли реактивні елементи вводяться в навантаження за схемою зірки (завдання 7 п. 2.2)?

- **Завдання 4:** Що відбувається, коли реактивні елементи вводяться в навантаження за схемою трикутника (завдання 8 п. 2.2)?

- **Завдання 5:** У рамках самостійної роботи, використовуючи еквівалентну модель однофазного трансформатора (рис. 11.2) та значення параметрів елементів трифазного трансформаторного блоку (***Three-Phase Transformer (Two Windings)***), перевірте характеристики моделі для одного режиму навантаження.



**Рисунок 11.2 – Еквівалентна схема лінійного трансформатора: R1 / R2 – опори первинної та вторинної обмоток; L1 / L2 – індуктивності на первинній та вторинній стороні; Rm – опір намагнічування для втрат в осерді; Lm – індуктивність намагнічування.**

### ***Контрольні запитання***

1. Якими шляхами можна визначати параметри схеми заміщення трансформатора?

2. Накресліть схеми проведення дослідів н.х. для одно- та трифазного трансформаторів.

3. Яка роль струму н.х. в трансформаторі?

4. Яку величину складає струм н.х. в трансформаторі, і чому саме таку?

5. Що слід розуміти під втратами н.х. в трансформаторі, чому вони вважаються постійними?



6. Що слід розуміти під дослідним, а що під аварійним к.з. трансформатора?
7. Яка напруга називається напругою к.з. трансформатора?
8. Що слід розуміти під втратами к.з. трансформатора, чому ці втрати називаються змінними?
9. Як за результатами дослідів к.з. визначити опори первинної та вторинної обмоток трансформатора?
10. Що таке характеристики к.з. трансформатора і як вони будуються?
11. Що слід розуміти під зовнішніми характеристиками трансформатора.
12. Поясніть зовнішні характеристики трансформатора при різних характерах навантаження.
13. Що представляє собою енергетична діаграма трансформатора?
14. Які втрати мають місце у навантаженому трансформаторі?
15. Поясніть з яких втрат складаються магнітні втрати і від яких величин вони залежать?
16. Поясніть з яких втрат складаються електричні втрати і від яких величин вони залежать?
17. Як визначається ККД та його максимальне значення у трансформатора?
18. Що є умовою максимального значення ККД?
19. Що слід розуміти під енергетичним ККД трансформатора?



## Лабораторна робота №12

### Регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором на платформі Virtual Labs

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо реалізації та ефективності способів регулювання швидкості асинхронних двигунів з фазним ротором.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 3 бали – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 2 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 1 бал – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### **Теоретичні засади виконання роботи**

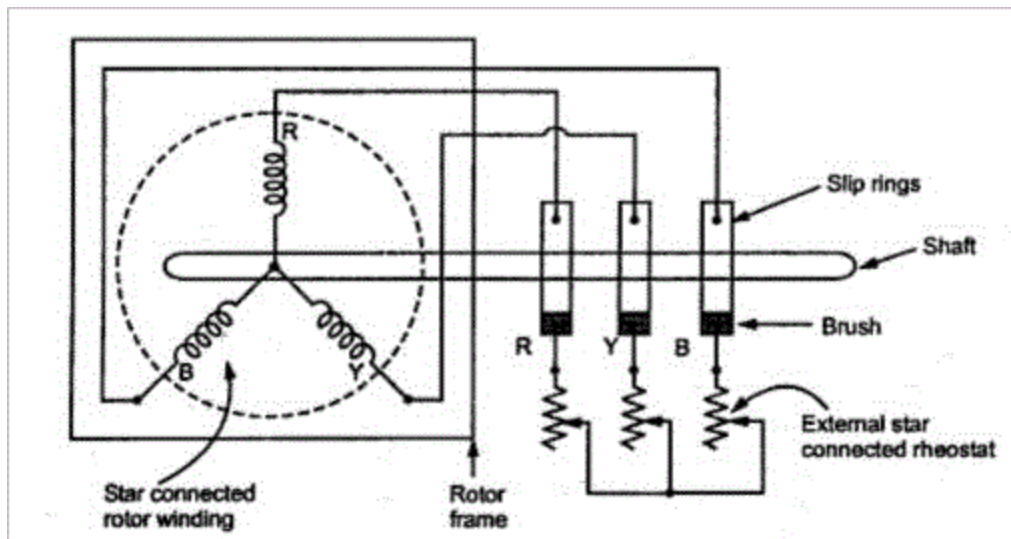
#### *Вступ*

Асинхронний двигун (АД) з фазним ротором або з контактними кільцями має статор, як у АД з короткозамкненим ротором, але ротор з ізольованими обмотками (**Star Connected Rotor Winding**), виведеними назовні через контактні кільця (**Slip Rings**) і щітки (**Brush**). Однак у нормальному режимі роботи на контактні кільця не подається струм. Їхнє єдине призначення полягає в тому, щоб під час запуску АД послідовно з обмотками ротора ввімкнути зовнішній додатковий опір (External Star Connected Rheostat) для зменшення пускового струму (рис. 12.1).

#### *Характеристики АД з контактними кільцями*

Двигун з контактними кільцями або двигун з фазним ротором – це АД, який можна запустити на номінальній напрузі мережі, що подається на клеми його статора. Клеми обмоток ротора двигуна з фазним ротором з'єднані з трьома контактними кільцями, встановленими на валу (**Shaft**), але ізольованими від нього. Виводи від трьох щіток, що натискають на ці контактні кільця, підведені до зовнішніх активних опорів. У момент запуску значення пускового струму регулюється шляхом додавання зовнішніх опорів до кола ротора АД. У міру розгону ротора зовнішній опір зменшується покроково, так що крутний момент двигуна прагне залишатися максимальним протягом усього періоду розгону. Нарешті, при нормальній роботі додатковий зовнішній опір повністю відсікається та контактні кільця замикаються накоротко, так що двигун тепер розвиває повний крутний момент навантаження. Слід зазначити, що ковзання, необхідне для створення максимального крутного моменту, прямо

пропорційне опору ротора. Отже очевидно, що ковзання АД збільшується зі збільшенням зовнішнього опору.



**Рисунок 12.1 – Еквівалентна схема асинхронного двигуна з контактними кільцями**

Виходячи з вищесказаного, давайте обговоримо реостатне регулювання швидкості асинхронних двигунів з контактними кільцями.

#### *Регулювання швидкості за допомогою реостата у колі ротора*


Зовнішній реостат, який використовується для пуску АД з контактними кільцями, може також використовуватися для регулювання швидкості. Але слід звернути увагу на те, що у цьому випадку пусковий реостат повинен бути розрахований на "безперервну" роботу. За допомогою цього реостата, доданого в коло ротора, можна регулювати частоту обертання двигунів з контактними кільцями. Опір включається максимально під час пуску і повільно відключається для збільшення швидкості двигуна. Під час роботи на повній швидкості, якщо виникає потреба зменшити швидкість, опір повільно додається і таким чином швидкість зменшується. Щоб зрозуміти, як відбувається регулювання швидкості, давайте розглянемо залежність крутного моменту  $T$  від ковзання  $S$ , наведену нижче:

$$T \equiv S/R,$$

де  $R$  – опір кола ротора.

З наведеної вище залежності видно, що зі збільшенням опору кола ротора крутний момент зменшується. Але для заданого навантаження двигун, а отже і ротор, повинен видавати той самий крутний момент без будь-якого зниження. Тому, щоб підтримувати крутний момент постійним, зі збільшенням опору кола ротора збільшується і ковзання. Це збільшення ковзання є нічим іншим, як зменшенням швидкості двигуна.

*Недоліки регулювання швидкості АД за допомогою реостата у колі ротора*



Зі збільшенням опору кола ротора збільшуються втрати електроенергії, що пропорційні  $I^2R$ , що, в свою чергу, знижує ефективність роботи двигуна (його коефіцієнт корисної дії). Це можна інтерпретувати так, що втрати прямо пропорційні зменшенню швидкості. Оскільки електричні втрати є значними, цей метод зниження швидкості використовується лише протягом короткого періоду часу.

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно перейти за посиланням на сторінку з метою роботи "Регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором на платформі Virtual Labs", а саме:

<https://ems-iitr.vlabs.ac.in/exp/speed-control-slip-ring/>

Як бачимо, метою цієї роботи авторами визначено *"Провести дослідження регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором методом керування опором кола ротора. Побудувати графіки швидкісних характеристик двигуна при різних значеннях прикладеного опору в колі контактних кілець асинхронного двигуна"*.

На панелі зліва ми бачимо меню **"Theory"**, наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з курсу "Електричні машини" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

У рамках підготовки до лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти попередній тест у меню **"Pretest"**. Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного матеріалу перед виконанням лабораторних дослідів.

### ***Проведення лабораторних дослідів***

1. У меню **"Procedure"** необхідно ознайомитися із порядком виконання роботи, який полягає у наступному:

*Крок 1.* Виконайте з'єднання елементів схеми відповідно до наведених нижче інструкцій (рис. 12.2). Рекомендується використовувати кнопку "Інструкції" (**Instructions**).

Крок 2. Натисніть на кнопку "Перевірити" (**Check**) для перевірки з'єднань.

Крок 3. Якщо з'явилось попередження "Неправильне підключення" (**Incorrect Connections**), то натисніть на номер вузла, щоб від'єднати дрiт, або натисніть кнопку скидання (**Reset**) і встановіть з'єднання знову.

From	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	16	17	18	19	20
To	21	22	23	12	13	12	8	15	12	17	13	14	24	25	26

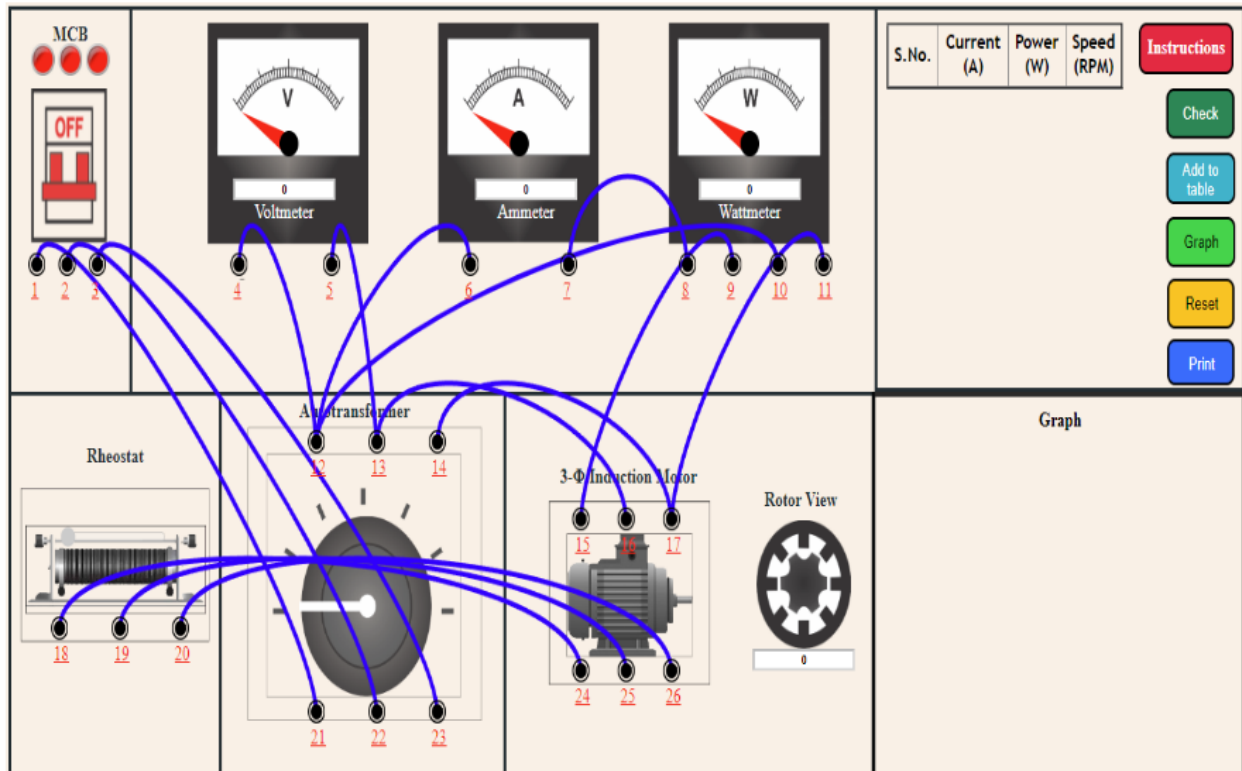


Рисунок 12.2 – Коректно зібрана схема лабораторного станду

Крок 4. Якщо з'явилось повідомлення "Правильне підключення" (**Correct Connections**), тоді увімкніть вимикач МСВ для подачі живлення на стенд.

Крок 5. Потім натисніть на ручку автотрансформатора (**Auto Transformer**).

Крок 6. Натисніть кнопку "Додати" (**Add to Table**), щоб додати значення до таблиці спостережень (**Observation Table**).

Крок 7. Пересувайте ручку реостата (**Rheostat**), щоб змінити опір у колі ротора АД.

Крок 8. Повторіть кроки 6-7 для різних значень опору кола ротора (рекомендується використати усі положення реостату).

Крок 9. Натисніть кнопку "Графік" (**Graph**), щоб побудувати відповідні графічні залежності.

Крок 10. Натисніть кнопку "Друк" (**Print**), щоб роздрукувати веб-сторінку.

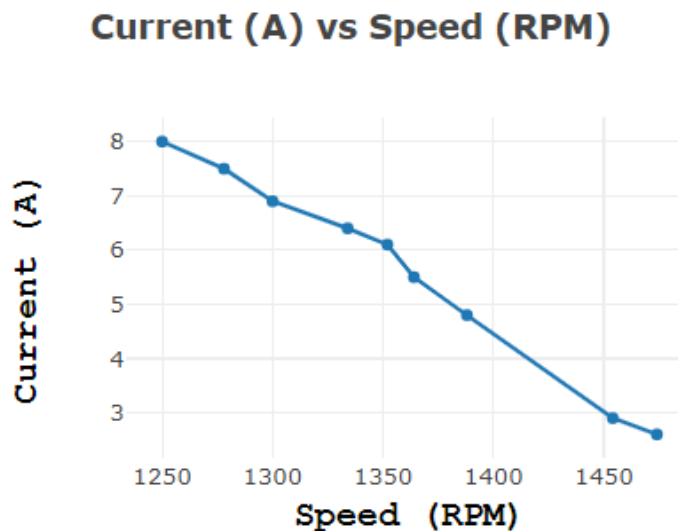
Крок 11. Натисніть кнопку "Скинути" (**Reset**), щоб скинути веб-сторінку.

2. Визначити призначення елементів лабораторного стенду та розібратися у схемі електричних з'єднань.

3. Перейти у меню симуляції "**Simulation**" та покроково виконати лабораторні досліді відповідно до алгоритму, викладеному у меню "**Procedure**".

### **Аналіз отриманих результатів**

У результаті виконання лабораторної роботи здобувач має виміряти електричні параметри асинхронного двигуна та побудувати залежність швидкості обертання від споживаного струму (рис. 12.3).



**Рисунок 12.3 – Приклад вимірюваних параметрів АД з фазним ротором як результат виконання лабораторної роботи**

Здобувачу рекомендується проаналізувати отриману залежність та зробити певні висновки щодо її форми та параметрів.

### **Завершення роботи**

У рамках завершення лабораторної роботи здобувачу рекомендується пройти заключний тест у меню "**Posttest**". Це дозволить перевірити засвоєння відповідного теоретичного та практичного навчального матеріалу, який здобувач опрацював під час виконання лабораторної роботи.

У меню "**References**" можна ознайомитися із посиланнями на літературні джерела, які автори рекомендують використовувати під час підготовки та виконання лабораторної роботи.

У меню "**Contributors**" наведено відомості про розробників віртуальної лабораторної роботи.



Після виконання лабораторної роботи у здобувача можуть виникнути певні зауваження або пропозиції щодо якості її змісту та функціоналу. Ці аспекти, а також слова вдячності розробникам, рекомендується висловити у меню зворотного зв'язку "**Feedback**".

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть принцип дії асинхронного двигуна.
2. З яких основних частин складається асинхронний двигун і яке їх призначення?
3. Що таке ковзання і як його визначають?
4. З якою максимальною швидкістю може обертатися асинхронний двигун при частоті мережі 50 Гц?
5. Розкажіть про режим холостого ходу і короткого замикання асинхронного двигуна.
6. В якому режимі знаходиться асинхронний короткозамкнений двигун при пуску?
7. Як визначається ККД асинхронного двигуна?
8. Що таке критичне ковзання і від яких величин воно залежить?
9. Яке призначення пускового реостату в асинхронному двигуні з фазним ротором?
10. Назвати переваги і недоліки пуску трифазного коротко-замкненого асинхронного двигуна прямим вмиканням у мережу.
11. Як при частотному регулюванні частоти обертання асинхронного двигуна при  $M_2 = \text{const}$  водночас з частотою струму необхідно змінювати напругу?
12. Як здійснюється ступеневе регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з КЗ ротором?
13. Як здійснюється регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з фазним ротором?



## **Лабораторна робота №13** **Дослідження синхронного генератору за допомогою** **пакету Matlab Simulink**

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів синхронних генераторів.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### ***Теоретичні засади виконання роботи***


*Вступ*

**Синхронна машина**, генератор або двигун, визначається як машина, в якій механічна швидкість обертання точно пропорційна електричній частоті машини. Електричний генератор перетворює вхідну механічну потужність від первинного двигуна в електричну вихідну потужність і має електричну частоту, пропорційну механічному обертанню і кількості пар полюсів.

**Синхронний генератор** працює за принципом законів електромагнітної індукції Фарадея. Електромагнітна індукція визначає, що електрорушійна сила індукується в котушці якоря, якщо вона обертається в однорідному магнітному полі. ЕРС також буде генеруватися, якщо поле обертається, а провідник стає нерухомим. Таким чином, відносний рух між провідником і полем індукує ЕРС в провіднику. Форма хвилі індукованої напруги завжди є синусоїдальною кривою.

Ротор і статор – це обертова і нерухома частини синхронного генератора. Вони є його енергогенеруючими компонентами. Ротор має полюс збудження, а статор включає в себе провідники якоря. Відносний рух між ротором і статором індукує напругу між провідниками.

Основними показниками роботи генератора є його ефективність і регулювання напруги. На обидва показники впливає електричне навантаження, що подається на генератор, яке може змінюватися від індуктивного до резистивного або ємнісного. Це важливо для розуміння



того, як з'єднати генератори паралельно для живлення великої потужної електромережі.

#### *Опис моделі синхронного генератора змінного струму*

Simulink/Simscape Electrical модель синхронного генератора змінного струму складається з наступних підсистем:

- **Синхронний генератор:** підключений до мережі зіркою, потужністю 10,2 кВА, напругою 460 В (середньоквадратичне значення), 60 Гц, 1800 об/хв, опір статора 1,616 Ом, 2 пари полюсів;
- **Трифазна паралельна гілка RLC:** симетричне трифазне навантаження з регульованим пофазним опором – тільки резистивним, тільки реактивним або комплексним імпедансом;
- **Напруга збудження постійного струму:** регулюється в діапазоні 0 - 100 Вольт постійного струму;
- **Регульована швидкість генератора:** регульована механічна швидкість обертання в діапазоні від 0 до 2000 об/хв;
- **Трифазні автоматичні вимикачі:** автоматичні вимикачі для тестування на холостий хід і коротке замикання;
- **Панель**, яка дозволяє користувачеві:
  - змінювати напругу збудження постійного струму на обмотках збудження генератора;
  - змінювати механічну швидкість обертання генератора;
  - відображає напругу і струм збудження генератора, частоту обертання, перетворену потужність та індукований крутний момент;
  - відображає електричну частоту навантаження, лінійні напругу та струм, активну та реактивну потужності, а також коефіцієнт потужності.

#### **Підготовка до виконання роботи**

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**4 - Synchronous Generator Lab**".

Як бачимо, *конкретними цілями цієї лабораторної роботи* за думкою автора є:

- Набути досвіду моделювання синхронного генератора;
- Застосувати концепції синхронного генератора, розглянуті на лекціях, для перевірки результатів лабораторної роботи за допомогою ручних розрахунків – порівняти параметри моделі та еквівалентної схеми;
- Виконати досліди холостого ходу та короткого замикання генератора, а потім визначити параметри еквівалентної схеми генератора для порівняння між моделлю і ручними розрахунками;
- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками синхронного генератора.

У теці ми бачимо Word файл "**SynchronousGeneratorLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

### Проведення лабораторних дослідів

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**SynchronousGeneratorLab**".
2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 13.1).

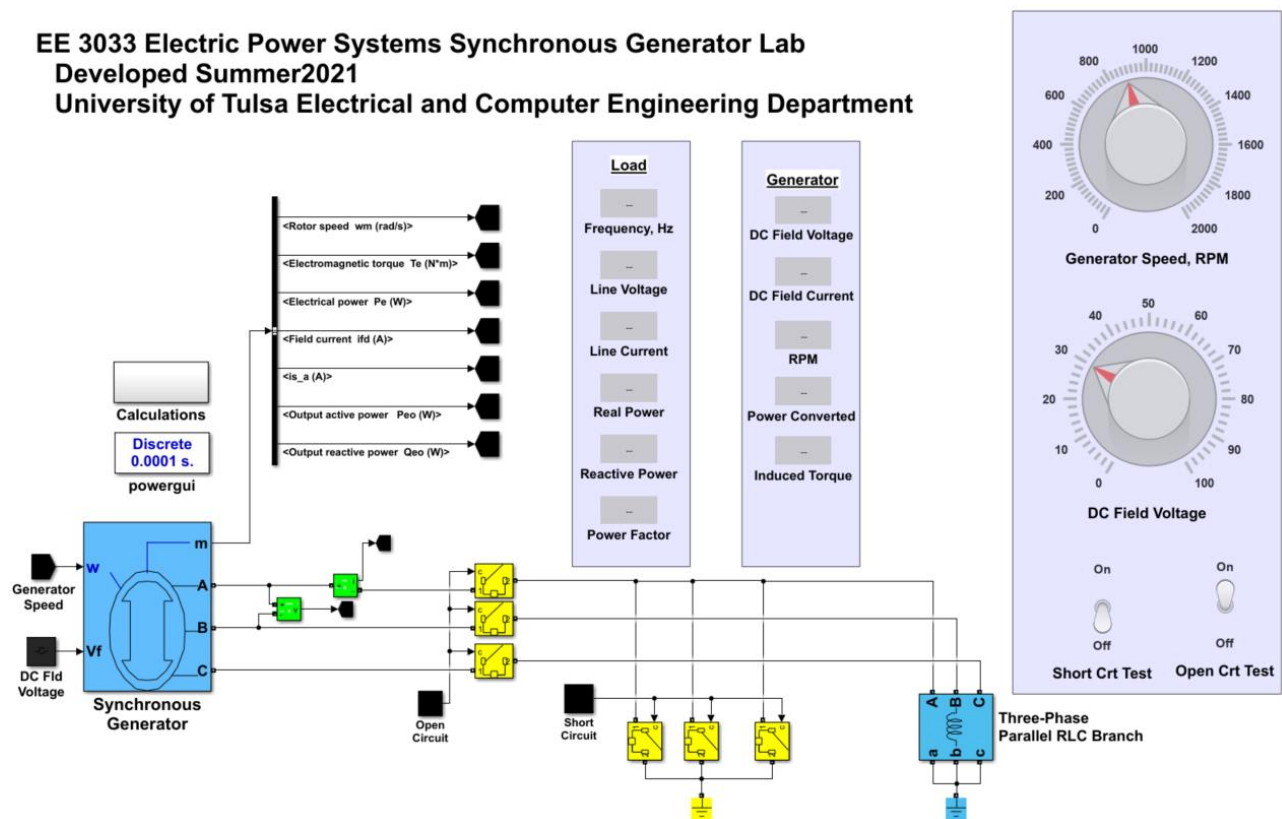



Рисунок 13.1 – Схема лабораторного стенду

3. Виконайте наступні завдання:

- **Завдання 1:** Виконайте тест холостого ходу при частоті обертання 1800 об/хв і 1000 об/хв (**Generator Speed, RPM**), для чого увімкніть відповідний перемикач (**Open Crt Test**) і змінійте напругу збудження (**DC**



**Field Voltage**) від 0 до 100 В із кроком 20 В. Занесіть виміряні величини (лінійну напругу (**Line Voltage**) і струм збудження (**DC Field Current**)) у підготовлену заздалегідь таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 2 с.

- **Завдання 2:** Виконайте тест короткого замикання при частоті обертання 1800 об/хв і 1000 об/хв (**Generator Speed, RPM**), для чого увімкніть відповідний перемикач (**Short Crt Test**) і змініть напругу збудження (**DC Field Voltage**) від 0 до 100 В із кроком 20 В. Занесіть виміряні величини (лінійну напругу (**Line Voltage**), струм (**Line Current**) і струм збудження (**DC Field Current**)) у підготовлену заздалегідь таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 2 с.

- **Завдання 3:** Вимкніть усі перемикачі. Налаштуйте трифазну паралельну RLC-гілку (**Three-Phase Parallel RLC Branch**) на резистивно-індуктивне навантаження ( $R = 100$  Ом,  $L = 0,375128$  Гн). Змоделюйте модель при частоті обертання генератора 1800 об/хв, змінюючи напругу збудження (**DC Field Voltage**) від 0 до 30 В із кроком  $\approx 5$  В. Занесіть виміряні величини у підготовлену заздалегідь таблицю, а саме: лінійну напругу (**Line Voltage**) та струм (**Line Current**), струм збудження (**DC Field Current**), активну (**Real Power**), реактивну (**Reactive Power**) та коефіцієнт потужності (**Power Factor**).

- **Завдання 4:** Налаштуйте трифазну паралельну RLC-гілку (**Three-Phase Parallel RLC Branch**) на резистивно-ємнісне навантаження ( $R = 100$  Ом,  $C = 1,875677e-5$  Ф). Змоделюйте модель при частоті обертання генератора 1800 об/хв, змінюючи напругу збудження (**DC Field Voltage**) від 0 до 30 В із кроком  $\approx 5$  В. Занесіть виміряні величини у підготовлену заздалегідь таблицю, а саме: лінійну напругу (**Line Voltage**) та струм (**Line Current**), струм збудження (**DC Field Current**), активну (**Real Power**), реактивну (**Reactive Power**) та коефіцієнт потужності (**Power Factor**).

### **Аналіз отриманих результатів**

Тепер у вашої команди є дані, які демонструють, як працює однофазний трансформатор. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** Для досліду холостого ходу (завдання 1 з п. 2.2) побудуйте графіки виміряних величин (в одній системі координат для частоти обертання 1000 та 1800 об/хв), проаналізуйте та зробіть висновки;



- **Завдання 2:** Для досліду короткого замикання (завдання 2 з п. 2.2) побудуйте графіки вимірних величин (в одній системі координат для частоти обертання 1000 та 1800 об/хв), проаналізуйте та зробіть висновки;
- **Завдання 3:** У одній системі координат для резистивно-індуктивного та резистивно-ємнісного навантаження побудуйте графіки вимірних під час виконання завдань 3 і 4 (п. 2.2) величин: лінійна напруга, активна, реактивна та коефіцієнт потужності. Проаналізуйте та зробіть висновки;
- **Завдання 4:** У рамках самостійної роботи, використовуючи еквівалентну схему синхронного генератора та моделі потоку потужності, перевірте параметри моделі Simscape. Чи працює модель Simscape так, як очікувалося? Якщо так, то чому ваша команда прийшла до такого висновку?

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть роль синхронних машин у виробництві електроенергії. Чому машина називається синхронною?
2. Поясніть різницю в конструкції роторів потужних синхронних генераторів.
3. Поясніть конструктивні відмінності турбогенераторів, гідрогенераторів та дизель-генераторів.
4. Які існують способи збудження синхронних машин? Які вимоги ставляться до систем збудження синхронних генераторів?
5. Поясніть конструкцію та призначення збуджувача та підзбуджувача синхронної машини.
6. Що слід розуміти під реакцією якоря синхронного генератора?
7. Поясніть, як діє реакція якоря в синхронному генераторі при активному, індуктивному, ємнісному та змішаному характерах навантаження.
8. Що є основною причиною зміни напруги навантаженого синхронного генератора?
9. Які існують характеристики для синхронних генераторів, що характеризують їх властивості?
10. Які втрати синхронних машин відносять до основних, а які до додаткових втрат? Як визначаються електричні втрати в обмотці статора синхронної машини?
11. Що слід розуміти під синхронізацією синхронного генератора з мережею? Які є способи синхронізації генератора з мережею, в чому їх переваги та недоліки?
12. Як регулюється активне навантаження синхронного генератора при паралельній роботі з мережею?



## Лабораторна робота №14

### Дослідження синхронного двигуна за допомогою пакету Matlab Simulink

*Мета лабораторної роботи:* закріпити отримані теоретичні знання та набути практичних умінь щодо дослідження технічних параметрів синхронних двигунів.

*Критерії оцінювання виконання лабораторної роботи:*

- 5 балів – всі досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно, без помилок і опісок;
- 4 бали – досліді/розрахунки виконані вірно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно, з певними помилками і опісками;
- 3 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, або аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно;
- 1-2 бали – у досліді/розрахунках присутні певні помилки, аналіз отриманих результатів неповний, звіт оформлений неохайно.

### **Теоретичні засади виконання роботи**


#### *Вступ*

**Синхронна машина**, генератор або двигун, визначається як машина, в якій механічна швидкість обертання точно пропорційна електричній частоті машини. Електродвигун перетворює вхідну електричну енергію від джерела мережі або нескінченної шини в механічну вихідну потужність. Оскільки електрична частота джерела або нескінченної шини не змінюється, то швидкість обертання двигуна не змінюється. Напруга на затискачах двигуна також не змінюється. **Синхронний двигун** – це пристрій з постійною швидкістю. Коли на двигун подається навантаження, він буде розвивати крутий момент для підтримки постійної швидкості.

**Основні характеристики синхронного двигуна** наступні:

- 1) Він працює з постійною швидкістю, і єдиний спосіб змінити швидкість двигуна – це змінити частоту вхідної електроенергії;
- 2) Він за своєю природою не може самозапуститися;
- 3) На холостому ході споживає невеликий струм для покриття внутрішніх втрат двигуна, а зі збільшенням навантаження споживається більший струм зі збільшенням *кута навантаження* (кут між магнітним полем ротора та статора). Збільшення навантаження може тривати до тих пір, поки кут навантаження не досягне 90 градусів, подальше збільшення навантаження неможливе. Якщо навантаження збільшується після цієї точки, то двигун виходить із синхронізму й зупиняється.

Синхронні двигуни застосовуються в наступних сферах:



1) Корекція коефіцієнта потужності – двигун може працювати в широкому діапазоні коефіцієнтів потужності від відстаючих (споживання  $Q$ ) до резистивних ( $P = S$ ) і випереджаючих (генерація  $Q$ ). *Синхронний конденсатор* – це синхронний двигун без зовнішнього валу, який використовується для генерації ємнісної реактивної потужності та корекції коефіцієнта потужності.

2) Постійна швидкість: синхронний двигун може використовуватися для постійних і точних застосувань, таких як позиціонування, роботизовані приводи та великі промислові установки.

*Опис моделі синхронного двигуна змінного струму*

Simulink/Simscape Electrical модель синхронного двигуна змінного струму складається з наступних підсистем:

- **Синхронний двигун:** підключений до мережі зіркою, потужністю 10,2 кВА, напругою 762 В (середньоквадратичне значення), 60 Гц, частота обертання 1800 об/хв, двигун з явнополюсним ротором з 2-ма парами полюсів;

- **Трифазне мережеве джерело:** симетричне трифазне джерело, з'єднання зіркою із заземленою нейтраллю, середньоквадратичне значення лінійної напруги 762 В, частота 60 Гц, позитивна послідовність фаз;

- **Напруга збудження постійного струму:** діапазон регулювання 0 - 100 Вольт постійного струму;

- **Регульоване механічне навантаження:** діапазон регулювання від 0 до 100 кВт;

- **Панель**, яка дозволяє користувачеві:

- змінювати напругу збудження постійного струму на обмотках збудження двигуна;

- змінювати механічне навантаження на двигун;

- відображає напругу і струм збудження двигуна, частоту обертання, вхідну активну і реактивну потужності, перетворену потужність, кут коефіцієнта потужності, індукований крутний момент і кут навантаження.

### ***Підготовка до виконання роботи***

Під час підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно відкрити теку, де вона розміщується, а саме "**7 - Synchronous Motor Lab**".

Як бачимо, *конкретними цілями цієї лабораторної роботи* за думкою автора є:

- Набути досвіду моделювання синхронного двигуна;

- Застосувати концепції синхронного двигуна, розглянуті на лекціях, для перевірки результатів лабораторної роботи за допомогою ручних розрахунків – порівняти параметри моделі та еквівалентної схеми;

- Розробити фазові діаграми двигуна для зміни механічного навантаження при постійному струмі збудження та при зміні струму збудження для постійного механічного навантаження;
- Побудувати вольт-амперні характеристики двигуна, який працює як двигун і синхронний конденсатор;
- Отримати уявлення та спостерігати за робочими характеристиками синхронного двигуна.

У теці ми бачимо Word файл "**SynchronousMotorLab**", наповнення якого у вигляді теоретичних засад поточної лабораторної роботи українською мовою наведено вище.

Всі лабораторні роботи з пакету "EE 3033 Electrical Power Systems Labs" оформлені англійською мовою. Необхідні компоненти, як то теоретичні засади, порядок проведення дослідів тощо, будуть перекладені у відповідних методичних вказівках. З іншими складовими здобувачу рекомендується ознайомитися особисто у рамках самостійної роботи. Для найбільш точного комп'ютерного перекладу на українську мову можна скористатися загальнодоступними перекладачами, а саме:

1. <https://www.deepl.com/translator>
2. <https://translate.google.com/?sl=en&tl=uk&op=translate>

### Проведення лабораторних дослідів

1. Відкрийте Simulink/Simscape Electrical модель шунтового ДПС шляхом подвійного натискання на файл "**SynchronousMotorLab**".
2. Ознайомтеся із схемою лабораторного стенду (рис. 14.1).

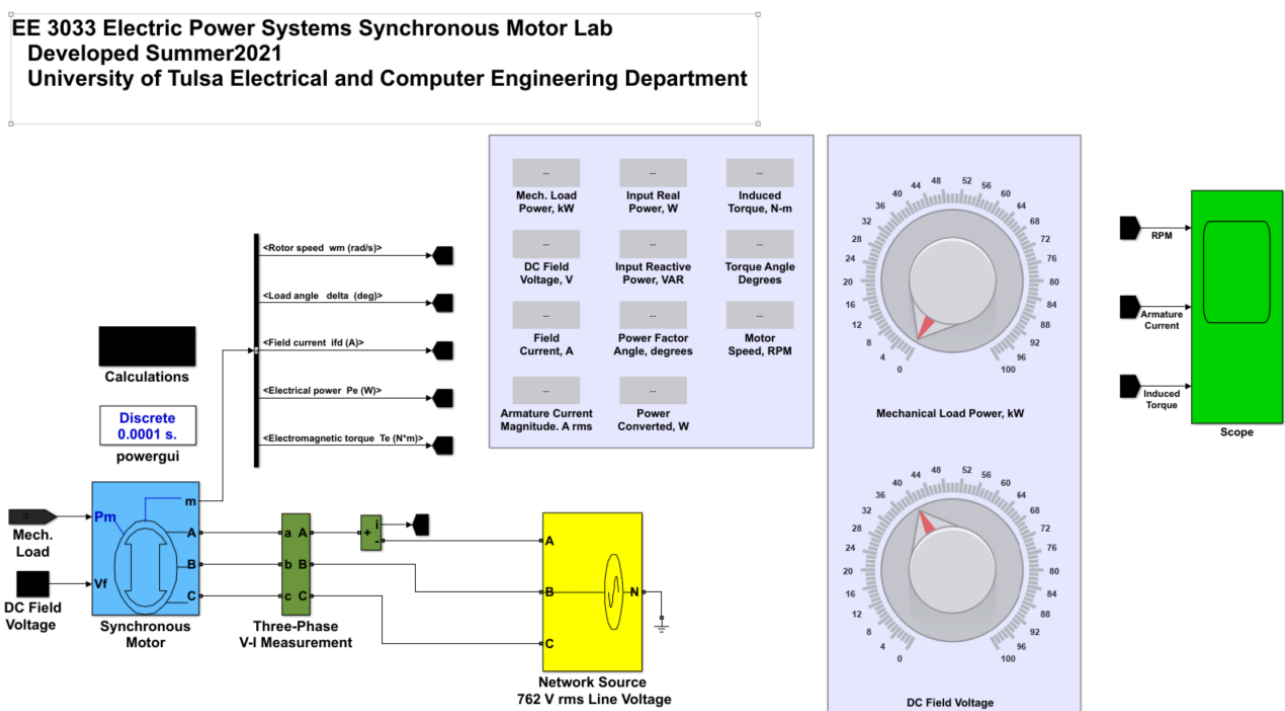


Рисунок 14.1 – Схема лабораторного стенду

3. Виконайте наступні завдання:

- **Завдання 1:** Встановіть напругу збудження постійного струму (**DC Field Voltage**) на рівні 20 В. Змінюйте механічне навантаження (**Mechanical Load Power, kW**) від 1 кВт до 50 кВт із кроком  $\approx 10$  кВт. Виміряйте та запишіть у підготовлену таблицю (рекомендується скористатися Microsoft Excell) наступні параметри: індукований крутний момент (**Induced Torque, N-m**), струм якоря (**Armature Current Magnitude, A rms**) та кут навантаження (**Torque Angle Degrees**). Рекомендується інтервал моделювання (**Stop Time**) прийняти 3 с.

- **Завдання 2:** Підтримуйте постійне механічне навантаження (**Mechanical Load Power, kW**) і змінюйте напругу збудження постійного струму (**DC Field Voltage**) від 5 до 50 В (5-6 значень). Виміряйте та запишіть у підготовлену заздалегідь таблицю струм збудження (**Field Current, A**), струм якоря (**Armature Current Magnitude, A rms**), кут коефіцієнта потужності (**Power Factor Angle, degrees**) та кут навантаження (**Torque Angle Degrees**). Зробіть такі виміри для механічних навантажень 1 кВт, 20 кВт і 50 кВт.


- **Завдання 3:** Реалізуйте режим холостого ходу двигуна, для чого підтримуйте постійне механічне навантаження (**Mechanical Load Power, kW**) на рівні 0 кВт і змінюйте напругу збудження постійного струму (**DC Field Voltage**) від 5 до 50 В (5-6 значень). Виміряйте та запишіть у підготовлену заздалегідь таблицю струм збудження (**Field Current, A**), струм якоря (**Armature Current Magnitude, A rms**), кут коефіцієнта потужності (**Power Factor Angle, degrees**) та кут навантаження (**Torque Angle Degrees**).

### **Аналіз отриманих результатів**

Тепер у вашої команди є дані, які демонструють, як працює однофазний трансформатор. Організуйте дані в таблиці та використовуйте ці таблиці, щоб продемонструвати свої міркування для наступних завдань аналізу і розрахунків. Саме тут інженер (і команда інженерів) демонструє своє розуміння фізичної системи та теоретичне підґрунтя для пояснення та обговорення результатів. Отже:

- **Завдання 1:** Використовуючи дані експериментального завдання 1 (п. 2.2), розрахуйте значення індукованої (наведеної) напруги для кожної величини навантаження. Побудуйте графіки зміни індукованої напруги та кута навантаження, щоб визначити вплив зміни навантаження на параметри синхронного двигуна. Проаналізуйте та зробіть висновки;

- **Завдання 2:** Використовуючи дані експериментального завдання 2 (п. 2.2), побудуйте 4-ри графіки зміни вимірних параметрів синхронного двигуна (в одній системі координат для різних величин навантаження). Проаналізуйте та зробіть висновки;



- **Завдання 3:** Використовуючи дані експериментального завдання 2 (п. 2.2), побудуйте графік зміни кута коефіцієнта потужності залежно від струму збудження (в одній системі координат для різних величин навантаження). Проаналізуйте та зробіть висновки;

- **Завдання 4:** У рамках самостійної роботи, використовуючи еквівалентну схему синхронного двигуна та моделі потоку потужності, перевірте параметри моделі Simscape. Чи працює модель Simscape так, як очікувалося? Якщо так, то чому ваша команда прийшла до такого висновку?

### ***Контрольні запитання***

1. Поясніть роль синхронних машин у виробництві електроенергії. Чому машина називається синхронною?

2. Чим пояснити поширене використання в сучасних електроприводах синхронних двигунів?

3. Наведіть конструктивну схему синхронного двигуна і поясніть принцип дії синхронного двигуна.

4. Які переваги та недоліки синхронного двигуна у порівнянні з асинхронним?

5. На яку потужність і де використовуються синхронні двигуни загального призначення?

6. Що таке синхронний компенсатор? Що дає використання синхронних компенсаторів в електричних системах?

7. Поясніть принцип дії та конструкцію синхронного реактивного двигуна.

8. Як запускаються і де використовуються реактивні синхронні двигуни?



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2017. – 452 с.
- 2 Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2020. – 408 с.
- 3 Theodore Wildi. Electrical Machines, Drives, and Power Systems / Updated 6-th edition // Pearson, 2023. – 2261 p.
- 4 Розрахунки магнітних полів в електротехнічних пристроях: навчальний посібник / В.І. Мілих. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. 136 с.
- 5 Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
- 6 Чуєнко Р.М. Електричні машини: навчальний посібник / Р.М. Чуєнко. – К.: Видавництво "Компрінт", 2017. – 462 с.
- 7 Чуєнко М.О. Практикум з електричних машин: навчальний посібник / О.М. Чуєнко, Р.М. Чуєнко, О.В. Санченко. – Ніжин.: ПП Лисенко М.М., 2014. – 320 с.
- 8 Белікова Л.Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012. – 480 с.
- 9 Проектування синхронних явнополюсних машин: навчально-методичний посібник з курсового проектування / О.Ю. Юр'єва, Л.В. Шилкова, Д.В. Потоцький. – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – 72 с.
- 10 Шкрабець Ф.П., Ципленков Д.В. Збірник задач з електротехніки та основ електроніки. Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 258 с.