

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОПРИВОД

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньою
програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та
електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2022

Електропривод. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Н.Д. Красношанка, М.В. Пушкар, В.М. Пижов. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електронні текстові дані (1 файл: 1,01 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 54 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРОПРИВОД

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Красношанка Наталія Дмитрівна*, канд. техн. наук, доц.

Пушкар Микола Васильович, канд. техн. наук, доц.

Пижов Володимир Михайлович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Бур'ян С.О.*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Перетятко Ю.В.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри теоретичної електротехніки факультету електроенерготехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Лабораторний практикум включає програми роботи, описи лабораторних стендів, методичні рекомендації та індивідуальні завдання щодо виконання та оформлення лабораторних робіт з дисципліни «Електропривод». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ЗМІСТ

Вступ	4
Вступнє заняття. Ознайомлення з лабораторією з дисципліни «Електропривод», правилами техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт та порядком виконання лабораторних робіт	6
Лабораторна робота № 1. Дослідження механічних характеристик двигунів постійного струму з незалежним збудженням	9
Лабораторна робота № 2. Дослідження механічних характеристик двигунів постійного струму з послідовним збудженням	20
Лабораторна робота № 3. Дослідження статичних характеристик системи «генератор – двигун»	32
Лабораторна робота № 4. Дослідження механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором	42
Список рекомендованої літератури	53
Додаток А. Приклад оформлення титульного листа.....	54

ВСТУП

Електричний привод є важливим елементом будь-якого сучасного виробництва або технологічного процесу. Більше 60% електричної енергії, що виробляється в світі, перетворюється у механічну роботу при використанні різноманітних електроприводів. Тому знання властивостей механічної частини електропривода та електромеханічних перетворювачів дозволяє проектувати енергоефективні системи регульованих електроприводів.

Дисципліна «Електропривод» є базових у професійній підготовці бакалаврів за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність». Вона готує студентів до вивчення таких дисциплін, як «Автоматизований електропривод», «Керування електроприводами», «Електромеханічні системи типових технологічних застосувань».

Основною метою дисципліни є формування у студентів здатностей застосовувати знання електромеханічних властивостей двигунів постійного та змінного струму для регулювання швидкості та моменту робочого органу. В результаті вивчення дисципліни студенти повинні навчитись досліджувати статичні та динамічні властивості електроприводів постійного та змінного струму, змінювати швидкість та напрям обертання двигунів, забезпечувати необхідні характеристики в гальмівних режимах.

Методичні вказівки до кожної лабораторної роботи включають назву та мету, короткі теоретичні відомості, завдання на роботу, методичні рекомендації та контрольні запитання. Для поглибленого вивчення матеріалу можна скористатися списком рекомендованої літератури.

До початку заняття студенти самостійно готують протокол лабораторної роботи та здійснюють підготовку до проведення лабораторної роботи, використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

На наступному занятті проходить захист звіту з лабораторної роботи. Звіт оформлюється на аркушах паперу формату А4, які ліворуч жорстко скріплюються. Текст та інші матеріали звіту розміщується з однієї сторони аркушів паперу. Звіт складається з титульного листа, мети й програми роботи, електричної схеми лабораторної роботи, таблиць зі знятими експериментальними та розрахунковими даними, розрахунків, побудованих характеристик, висновків до лабораторної роботи. Приклад оформлення титульного листа наведено в додатку А.

Вступне заняття

**ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ЛАБОРАТОРІЄЮ З ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРОПРИВОД», ПРАВИЛАМИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ
ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ПОРЯДКОМ ВИКОНАННЯ
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

(тривалість виконання 2 години)

Мета роботи – ознайомитися з лабораторними стендами, силовим обладнанням, вимірювальними приладами лабораторії; правилами техніки безпеки; визначити порядок допуску виконання та захисту звітів лабораторних робіт.

1. Порядок виконання лабораторних робіт

1) До початку заняття студенти самостійно готують протокол лабораторної роботи та здійснюють підготовку до проведення лабораторної роботи, використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2) Для допуску до виконання лабораторної роботи необхідно мати відповідний протокол та пройти експрес-контроль знань.

3) На наступному занятті проходить захист звіту лабораторної роботи. Звіт складається з титульного листа, мети й програми роботи, електричної схеми лабораторної роботи, таблиць зі знятими експериментальними та розрахунковими даними, розрахунків, побудованих характеристик, висновків до лабораторної роботи. Захист звіту здійснюється згідно з контрольними запитаннями до кожної лабораторної установки.

2. Заходи з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

1) До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж на робочому місці з записом у журналі реєстрації і вивчили:

- правила техніки безпеки при роботі в учбових та наукових лабораторіях кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода;
- особливості експлуатації електрообладнання і схему стенда;
- теоретичні положення і методичку виконання роботи.

2) Небезпечними факторами при проведенні лабораторної роботи є: електричний струм; клемні з'єднання; обертові частини електричних машин; вимірювальне обладнання (осцилографи і т. ін.).

3) Перед початком роботи студенти повинні:

- перевірити візуально технічний стан робочого місця (кріплення машин, півмуфт, захисних кожухів), прилади та інші апарати, а також надійність занулення (заземлення);
- звільнити робоче місце від усіх зайвих речей;
- після одержання вказівок на робочому місці, отримати дозвіл на збирання та налагодження схеми для досліджень;
- при виявленні будь-яких недоліків доповісти про них викладачу.

4) Під час роботи студентам забороняється:

- заходити за стенд та підніматися на фундаменти машин, торкатися неізольованих струмопровідних частин обладнання, а також обертових частин електричних машин;
- збирати схеми або робити переключення на клемних з'єднаннях під напругою;
- торкатися одночасно кількох металевих конструктивних частин електрообладнання при підключеному живленні;
- розбирати схеми не відкручуючи клеми;
- використовувати провідники без напаяних наконечників;
- перетинати з'єднувальними провідниками та кабелями проходи, а також

- працювати з натягнутими з'єднувальними провідниками;
- робити переключення на головних (розподільних) щитах;
- виконувати лабораторну роботу одному.

5) Студенти зобов'язані:

- перед включенням схеми перевірити, чи не торкається хто-небудь струмопровідних частин або рухомих частини машин та попередити голосом «Обережно, вмикаю!»;
- постійно спостерігати за справною роботою лабораторної установки;
- не залишати ввімкнену лабораторну установку без нагляду;
- при аварії чи нещасному випадку повідомити викладача (керівника робіт) для прийняття необхідних заходів.

б) Після закінчення роботи необхідно:

- відключити лабораторну установку від електромережі;
- розібрати схему, акуратно скласти провідники;
- навести порядок на робочому місці;
- повідомити викладачеві (керівнику) про виявлені неполадки під час роботи.

7) У випадку ураження електричним струмом:

- негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму шляхом відключення електромережі або відтягти його за одяг, при цьому свої руки ізолювати;
- провести (якщо потрібно) штучне дихання, зовнішній масаж серця, при необхідності викликати швидку медичну допомогу або лікаря.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

(тривалість виконання 4 години)

Мета роботи – вивчити електромеханічні властивості електродвигунів постійного струму з незалежним збудженням у різних режимах роботи, визначити вплив параметрів електроприводу на статичні механічні та електромеханічні характеристики; поглибити знання фізичних процесів, що протікають при роботі двигуна.

1.1. Програма досліджень

1) Ознайомитися з лабораторною установкою, усвідомити призначення усіх вимірювальних приладів та органів керування.

2) Записати паспортні дані електричних машин.

3) За паспортними даними розрахувати номінальний електричний опір R_n двигуна, що досліджується.

4) Зібрати схему досліджень, замкнути вимикачі SB1 і SB2 та встановити перемикачі SA1–SA4 на лабораторному пульті в нульовому положенні.

5) Дослідним шляхом зняти механічні характеристики:

– для рушійного режиму при $R_2=0$ та $I_{36}=I_{36.n}$ (природна характеристика); при $R_2 \neq 0$ і $I_{36}=I_{36.n}$ (штучні реостатні характеристики); $R_2=0$ та $I_{36} \neq I_{36.n}$ (штучні характеристики при послабленні потоку збудження);

– для режиму гальмування противмиканням при двох заданих значеннях R_2 і $I_{36}=I_{36.n}$;

– для режиму динамічного гальмування для двох заданих значеннях R_2 при $I_{36}=I_{36.n}$ і $I_{36} \neq I_{36.n}$.

R_2 – активний опір, що вводиться в коло якоря досліджуваної машини;

I_{36} – струм збудження досліджуваної машини

Дані для заданого варіанту брати з табл. 1.1.

б) Опрацювати результати дослідів та побудувати механічні характеристики $\omega=f(M)$.

7) Для заданого варіанту аналітично розрахувати механічні характеристики та порівняти їх з експериментальними даними.

8) Оформити звіт по роботі.

Таблиця 1.1

№ п/п	Рушійний режим				Гальмування противми- канням		Динамічне гальмування			Величина R_2^* для завдання п. 7		
	R_2^*		I_{36}^*		R_2^*		R_2^*		I_{36}^*	Рушійний режим та рекуператив- ного гальмування	Гальму- вання противм- иканням	Динаміч не гальму- вання
1	0,2	1,0	0,9	0,5	2,5	3,5	0	0,4	0,7	0,2	1,2	1,0
2	0,3	1,2	0,8	0,5	2,6	3,6	0,1	0,5	0,6	0,4	1,4	0,2
3	0,4	1,3	0,7	0,5	2,7	3,7	0,2	0,6	0,5	0,6	1,6	0,4
4	0,5	1,4	0,6	0,5	2,8	3,8	0,3	0,7	0,4	0,8	1,8	0,6
5	0,6	1,5	0,5	0,6	2,9	3,9	0,4	0,8	0,7	1,0	2,0	0,8
6	0,7	1,6	0,8	0,7	3,0	4,0	0,5	0,9	0,6	0,2	2,0	1,0
7	0,8	1,7	0,8	0,9	3,1	2,2	0,6	1,0	0,5	0,4	1,8	0,2
8	0,9	1,8	0,7	0,9	3,2	2,3	0,7	1,1	0,4	0,6	1,6	0,4
9	1,0	1,9	0,7	0,6	3,3	2,4	0,8	1,2	0,8	0,8	1,4	0,6
10	0,3	2,0	0,7	0,5	3,4	2,5	0,9	1,3	0,9	1,0	1,2	0,8

$$R_2^* = \frac{R_2}{R_H};$$

$$R_H = \frac{U_H}{I_H};$$

$$I_{36}^* = \frac{I_{36}}{I_{36.H}}$$

1.2. Короткі теоретичні відомості

Напруга U , прикладена до якоря двигуна постійного струму, у статичному режимі врівноважується ЕРС двигуна E та падінням напруги в колі якоря:

$$U = E + IR_{я\Sigma}, \quad (1.1)$$

де I – струм кола якоря, А; $R_{я\Sigma}$ – опір кола якоря, Ом.

ЕРС двигуна пов'язана зі швидкістю обертання співвідношенням:

$$E = c\Phi\omega, \quad (1.2)$$

де c – конструктивний коефіцієнт; Φ – магнітний потік; ω – кутова швидкість.

Момент двигуна:

$$M = c\Phi I. \quad (1.3)$$

З (1.1) та (1.2) знаходимо рівняння електромеханічної характеристики $\omega = f(I)$:

$$\omega = \frac{U - IR_{я\Sigma}}{c\Phi}. \quad (1.4)$$

Підставляючи (1.3) в (1.4), отримуємо рівняння механічної характеристики $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(c\Phi)^2} M. \quad (1.5)$$

З (1.5) видно, що механічні характеристики – прямі лінії.

Величина $\beta = \frac{(c\Phi)^2}{R_{я\Sigma}}$ – модуль жорсткості статичної механічної характеристики.

Механічна характеристика при $U = U_H$; $\Phi = \Phi_H$; $R_{я\Sigma} = R_{я}$ (тобто при номінальних значеннях напруги на якорі та магнітного потоку і відсутності додаткових опорів в колі якоря) називається природною.

Момент та струм двигуна залежать від моменту на його валу (статичного моменту). Робоча точка двигуна визначається перетином механічних характеристик двигуна та механізму. Наприклад, якщо характеристика механізму має вигляд $M_c = \text{const}$ (рис. 1.1, графік 2), то при роботі двигуна на характеристиці 1 його робочою точкою буде А.

Характеристики 1 та 3, які відповідають рушійному режиму, розташовані в першому квадранті. Характеристика 1 – природна ($R_{\text{дод}}=0$), а 3 – реостатна штучна ($R_{\text{дод}} \neq 0$), де $R_{\text{дод}}$ – додатковий активний опір в колі якоря.

Чим більший додатковий опір кола якоря, тим більший нахил характеристики, тобто менша жорсткість β , причому вони перетинаються в одній точці – ідеального холостого ходу.

Режим рекуперативного гальмування відбувається в тому випадку, якщо розігнати двигун в ту ж саму сторону, в яку діє його момент, до швидкості вище ω_0 . при цьому знак струму якоря змінюється на протилежний, енергія, яка отримується від механізму, повертається в мережу.

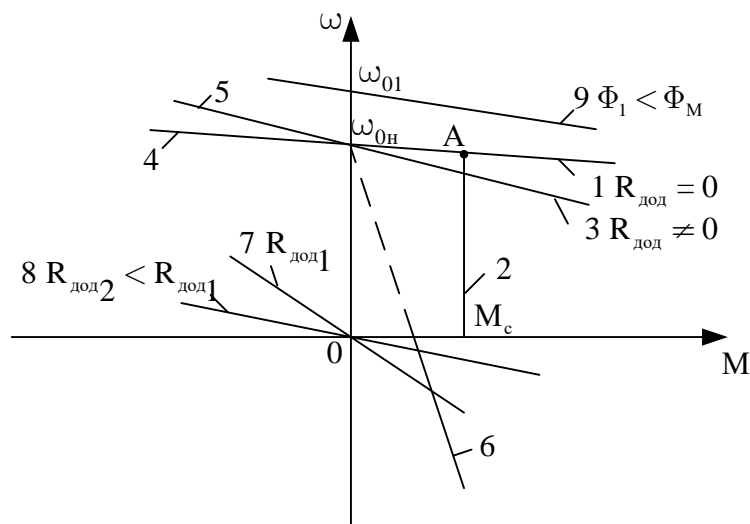


Рисунок 1.1 – Механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Цьому режиму відповідають характеристики 4 та 5 у другому квадранті, які є продовженням характеристик 1 та 3 (див. рис. 1.1).

Режим гальмування противмиканням виникає, коли зовнішня сила (момент навантаження або сили інерції) обертає двигун в сторону, протилежну напрямку дії його моменту. Характеристика 6 (суцільна лінія) (див. рис. 1.1), що відповідає режиму противмикання при активному статичному моменті, розташовується в четвертому квадранті. Пунктирна частина характеристики 6 відповідає рушійному режимові.

При реактивному статичному моменті для переходу в режим гальмування противмиканням необхідно зробити реверс працюючого двигуна. В цьому випадку механічна характеристика буде розташована в другому квадранті

Динамічне гальмування здійснюється, якщо у двигуна, що обертається, відключити якір від мережі і підключити на зовнішній опір, залишивши включеною обмотку збудження. При цьому ЕРС, що наводиться в якорі, викличе протікання струму, в результаті взаємодії якого з магнітним потоком створюватиметься гальмівний момент. Рівняння механічної характеристики в режимі динамічного гальмування має вигляд:

$$\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi)^2} M. \quad (1.6)$$

На рис. 1.1 даному режимові відповідають характеристики 7 та 8, причому вони приведені для різних додаткових опорів $R_{\text{дод1}}$ та $R_{\text{дод2}}$ в колі якоря ($R_{\text{дод1}} > R_{\text{дод2}}$).

При ослабленні магнітного потоку Φ швидкість ω_0 збільшується, а жорсткість β знижується. Механічну характеристику при $I_3 < I_{3,н}$ ілюструє графік 9.

1.3. Методичні вказівки

1.3.1. Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки для дослідження механічних характеристик двигуна постійного струму з незалежним збудженням представлена на рис. 1.2.

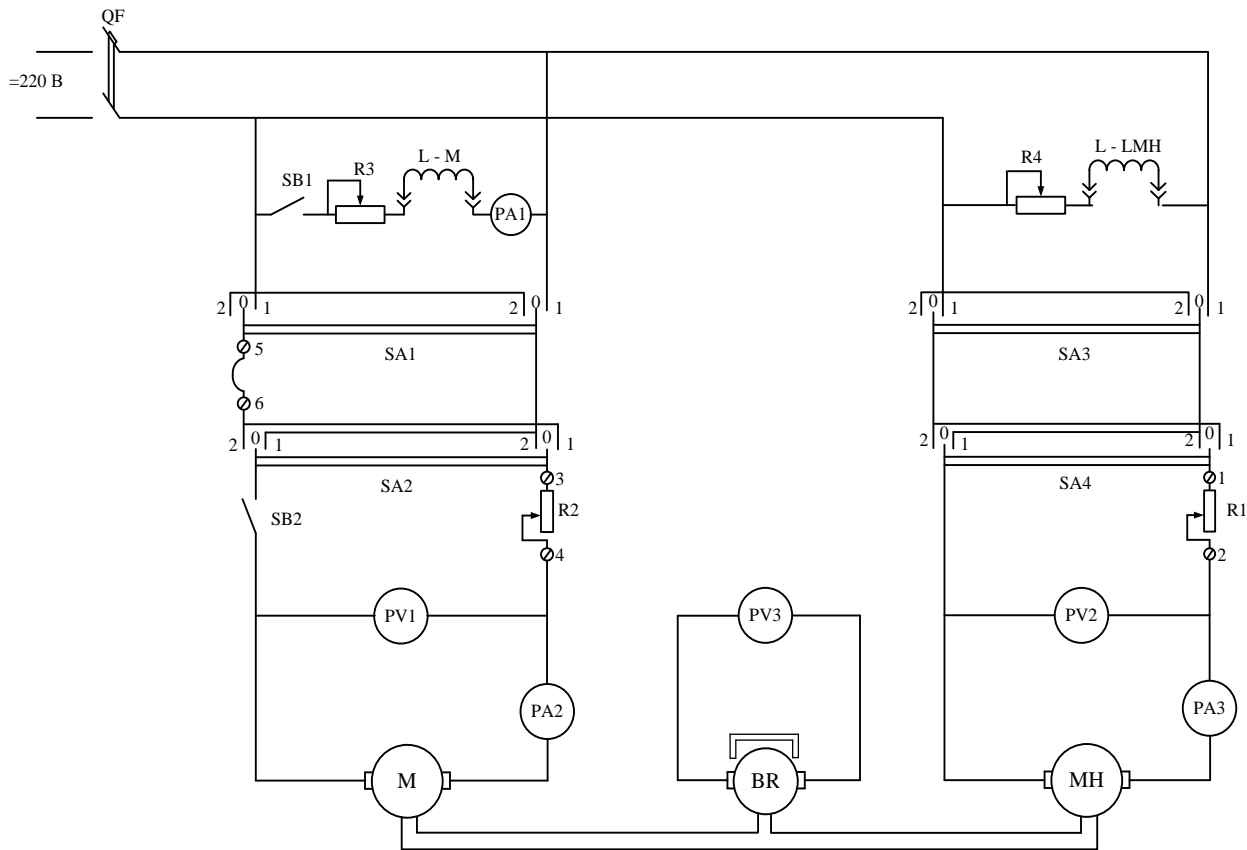


Рисунок 1.2 – Схема лабораторної установки для дослідження механічних характеристик електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням

Напруга живлення подається в досліджувану схему вмиканням автоматичного вимикача QF, який розташований на вертикальній панелі праворуч.

Навантажувальні резистори встановлені поза пультом та повинні бути підключені у відповідності зі схемою роботи до початку проведення лабораторних досліджень.

Перед початком кожної лабораторної роботи усі перемикачі на пульті повинні бути встановлені у нульове положення.

Для даної лабораторної роботи необхідно підключити реостати R1, R2 до точок 1, 2 та 3, 4 відповідно, а також встановити перемичку між точками 5 та 6.

1.3.2. Порядок проведення досліджень

1) Частота обертання двигуна вимірюється за допомогою тахогенератора BR, який механічно з'єднаний з валом двигуна. Напряга тахогенератора $U_{тг}$ вимірюється вольтметром PV3:

$$\omega = \frac{\pi n_{тг.н} U_{тг}}{30 U_{тг.н}}, \quad (1.7)$$

де $n_{тг.н}$ – номінальна частота обертання тахогенератора, об/хв; $U_{тг.н}$ – номінальна напряга тахогенератора, В (див. паспортні дані).

2) Вихідне положення для проведення усіх дослідів: перемикачі SA1–SA4 – в нульовому положенні; вимикачі SB1 і SB2 – замкнені; движки реостатів R1 та R2 – в положенні «Нескінченність» (∞); струм збудження I_{36} – номінальний.

3) Для зняття механічних характеристик необхідно змінювати в широких межах момент на валу двигуна. З цією метою використовується навантажувальна машина МН, вал якої механічно з'єднано з валом досліджуваного двигуна М. Момент навантажувальної машини пропорційний струму якоря, який вимірюється амперметром РА3. Змінюючи цей струм реостатом R1, можна змінювати момент на валу досліджуваного двигуна.

4) Зняття природної механічної характеристики в рушійному режимі.

Механічна характеристика в рушійному режимі знімається в такій послідовності:

а) узгодити напрямки моментів машин М і МН так, щоб включені в рушійному режимі поодинці, вони мали протилежний напрям обертання

(покази цифрового вольтметра PV3 мають різні знаки). Двигуни вмикати, переключаючи перемикач SA1 та SA3 в положення 1, перемикачі SA2 і SA4 – в положення 1 або 2, і, плавно зменшуючи опір R1 від нескінченності (∞) до нуля. Змінювати напрямок обертання навантажувальної машини перемикачем SA4. Після проведення перевірки повернути схему у вихідне положення;

б) поставити перемикачі SA1 в положення 1, SA3 – в положення 2. Запустити досліджувану машину M, вивести R2 в положення «0» (при цьому двигун M працює на природній характеристиці);

в) навантажити досліджуваний двигун до номінального струму за допомогою зміни опору R1 в колі якоря навантажувальної машини;

г) зменшуючи струм навантажувальної машини до нуля за допомогою реостата R1, знімати механічну характеристику в рушійному режимі (3–4 точки); занести дані в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

$R_1, \text{Ом}$	$I_3(\text{PA3}), \text{А}$	$I_{36}(\text{PA1}), \text{А}$	$I_2(\text{PA2}), \text{А}$	$U_1 (\text{PV1}), \text{В}$	$U_{\text{т}} (\text{PV3}), \text{В}$	$\omega, 1/\text{с}$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$

5) Для зняття штучної характеристики в рушійному режимі повторити операцію з п. 4, виставивши заданий за програмою опір R2. Положення движка реостата R2 вибирати по таблиці, розташованій на реостаті.

6) Штучні характеристики при ослабленому потоці збудження знімають в тому ж порядку, що і в п. 4, попередньо встановивши за допомогою резистору R3 заданий струм збудження I_{36} (контролюється по амперметру PA1).

7) Характеристики в режимі гальмування противмиканням знімають в такій послідовності:

а) узгодити за допомогою SA4 напрямки моментів машин M і МН так, щоб ввімкнені в рушійний режим поодиночі, вони мали протилежний напрямки обертання (покази цифрового вольтметра PV3 мають протилежні знаки);

б) поставити перемикачі SA1 та SA3 у положення 1. Запустити двигун М, виставивши потрібний для режиму противмикання опір R2;

в) зменшуючи R1, збільшувати струм і момент навантажувальної машини. Швидкість буде зменшуватись, і двигуни зупиняться. Потім, продовжуючи збільшення моменту МН, перевести досліджуваній двигун М в режим противмикання і зняти 3–5 точок; дані занести в табл. 1.2.

8) Характеристики в режимі динамічного гальмування знімають наступним чином:

а) перемикач SA3 перевести в положення 2, SA1 – в положення 1;

б) виставити необхідний опір R2 і струм збудження $I_{зб}$ (РА1) згідно заданому варіанту;

в) змінюючи R1, встановити ряд швидкостей обертання навантажувальної машини і досліджуваного двигуна; дані (4–5 точок) записати в табл. 1.2.

9) При виконанні дослідів необхідно стежити, щоб струми якоря двигунів (I_2, I_3) не перевищували 1,5 від їх номінальних значень.

Перемикачі SA1 та SA3 перемикають тільки при відсутності струмів в колах якоря, тобто коли R1 і R2 встановлені в положення нескінченності.

Момент досліджуваного двигуна розраховується за формулою

$$M = c\Phi_n I_2, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (1.8)$$

де $c\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}$; U_n – номінальна напруга якоря, В; I_n – номінальний

струм якоря, А; ω_n – номінальна швидкість обертання досліджуваного двигуна, рад/с.

Опір якоря досліджуваної машини

$$R_{я} = 0,5(1-\eta_n)R_n, \quad (1.9)$$

де $\eta_n = 1000P_n / U_n I_n$ – номінальний ККД досліджуваного двигуна; P_n – номінальна потужність досліджуваного двигуна, кВт; $R_n = U_n / I_n$ – номінальний опір двигуна.

Розрахункові дані занести в табл. 1.2.

Для характеристики при $I_{зб} \neq I_{зб.н}$ величину $c\Phi_i$ знаходять з кривої намагнічування. Якщо її немає, то при розрахунках можна користуватися лінійною залежністю

$$c\Phi_i = c\Phi_n \frac{I_{зб.i}}{I_{зб.н}}. \quad (1.10)$$

При побудові розрахункових характеристик достатньо розрахувати дві–три точки характеристики.

1.4. Контрольні запитання

1. У якому стані повинні знаходитися перемикачі SA1–SA4 для зняття характеристик рушійного режиму, динамічного гальмування, гальмування противмиканням і рекуперативного гальмування?
2. Яке значення опору R2 необхідно встановити перед вмиканням двигуна в мережу і чому?
3. Чим відрізняється двигун з незалежним збудженням від двигуна з паралельним збудженням?
4. Як впливає на жорсткість механічних характеристик опір в колі якоря двигуна?
5. Який вид приймає механічна характеристика рушійного режиму при зменшенні струму збудження?
6. Який вигляд має аналітичний вираз механічної характеристики для рушійного режиму, режимів рекуперативного і динамічного гальмування?
7. Яким чином здійснюється розрахунок механічних характеристик при струмі збудження, відмінному від номінального?
8. Як впливає на жорсткість характеристик динамічного гальмування зміна струму збудження?
9. Чому не можна послаблювати потік збудження при моменті на валу двигуна, близькому до номінального?

10. Як можна змінити напрям обертання двигуна постійного струму з незалежним збудженням?
11. Що називається природною механічною характеристикою?
12. Чим визначається робоча точка на механічній характеристиці?
13. Двигун навантажений активним (потенціальним) статичним моментом і працює в рушійному режимі на природній характеристиці. У який режим перейде двигун, якщо ввести в коло якоря додатковий опір і змінити полярність напруги на якорі? Показати нову робочу точку.

1.5. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

- 1) Титульний аркуш.
- 2) Мета та програма роботи.
- 3) Таблиці зі знятими експериментальними даними.
- 4) Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
- 5) Побудовані експериментальні та розрахункові статичні характеристики.
- 6) Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

(тривалість виконання 4 години)

Мета роботи – дослідити статичні властивості електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням при його роботі в рушійному і в гальмівних режимах.

Вивчити та перевірити основні положення теорії електроприводу на основі результатів експериментальних досліджень.

2.1. Програма досліджень

- 1) Вивчити схему досліджень.
- 2) Ознайомитися з вимірювальними приладами і апаратами лабораторної установки.
- 3) Записати паспортні дані використовуваних машин і приладів.
- 4) За паспортними даними розрахунковим шляхом визначити величини номінального опору R_n , опору якірного ланцюга двигуна $R_{я\Sigma}$ і номінальну швидкість ω_n .
- 5) Зібрати схему експериментальних досліджень (рис. 3.1) і встановити перемикачі SA1–SA4, SB3 в нульове положення.
- 6) Дослідним шляхом зняти електромеханічні характеристики досліджуваного двигуна $M \omega = f(I_{я})$; за даними допоміжної машини МН розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна $M \omega = f(M)$ при $U_{я}=U_n=const$ для таких режимів:
 - рушійного;
 - гальмування противмиканням;
 - динамічного гальмування із самозбудженням;
 - динамічного гальмування з незалежним збудженням.

Параметри схеми задає викладач у відповідності з варіантом за табл.

2.1.

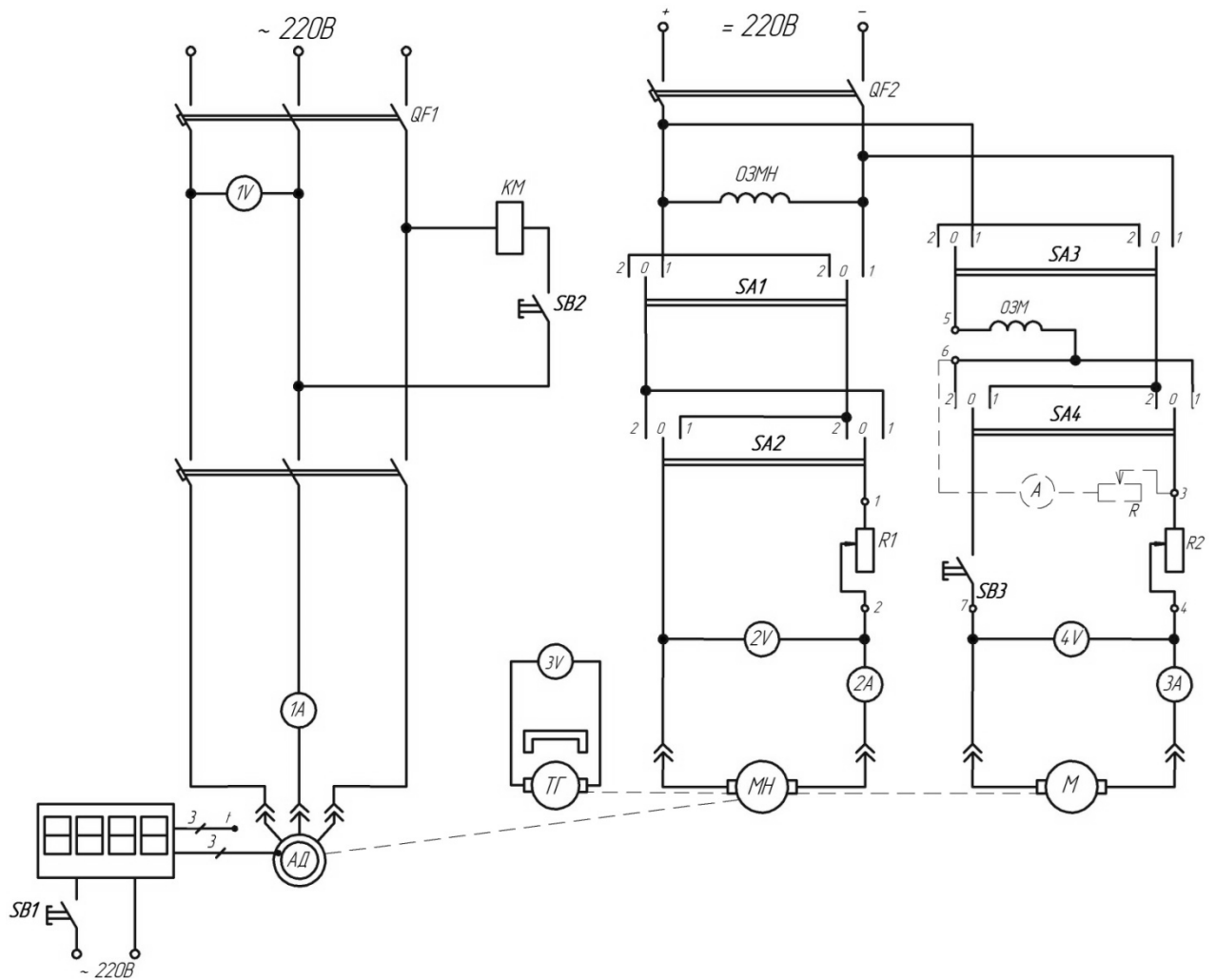


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова лабораторного стенда

7) Розрахувати і побудувати механічні характеристики $\omega = f(M)$ за допомогою універсальних характеристик для рушійного режиму та гальмування противмиканням.

8) Порівняти механічні характеристики, отримані експериментальним і розрахунковим шляхом.

9) Зробити висновки.

Таблиця 2.1 – Варіанти для зняття експериментальних досліджень

Номер варіанту	Рушійний режим		Режим гальмування проти-вмиканням		Режим динамічного гальмування				
					З само-збудженням		З незалежним збудженням		
							$I_{зб}=I_{ян}$		$I_{зб}=0,8I_{ян}$
$R_{дод}^* = R_2/R_H$									
1.	0,3	1,0	1,5	3,0	0,3	0,8	0,2	0,6	0,9
2.	0,4	0,9	1,6	2,8	0,4	0,9	0,4	0,5	1,0
3.	0,5	0,8	1,7	2,6	0,5	1,0	0,5	0,4	0,8
4.	0,6	0,7	1,9	2,5	0,6	1,2	0,6	0,2	1,2

2.2. Короткі теоретичні відомості

Рівняння статичних характеристик двигуна постійного струму з послідовним збудженням співпадають по формі з аналогічними для двигунів з незалежним збудженням:

$$\omega = \frac{U_{я}}{c\Phi(I_{я})} - \frac{R_{я\Sigma}}{(c\Phi(I_{я}))^2} M \quad (\text{механічна характеристики}); \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{c\Phi(I_{я})} - \frac{R_{я\Sigma}}{c\Phi(I_{я})} I_{я} \quad (\text{електромеханічна характеристика}). \quad (2.2)$$

Їх відмінність – залежність потоку двигуна від струму якоря, який одночасно є струмом збудження. Характеристика намагнічування $\Phi=f(I)$ показана на рис. 2.2. (крива 1). Апроксимуємо цю характеристику двома прямими (ламана 2) та проаналізуємо форми статичних характеристик двигуна.

При $I_{я} < I_{гр}$ $\Phi = K_{\Phi} I_{я}$ ($K_{\Phi} = \text{const}$ – коефіцієнт пропорційності для ненасиченої ділянки кривої намагнічування). Тоді рівняння механічної та електромеханічної характеристик матимуть вигляд:

$$\omega = \frac{U_{я}}{\sqrt{cK_{\Phi}M}} - \frac{R_{я\Sigma}}{cK_{\Phi}}; \quad \omega = \frac{U_{я}}{cK_{\Phi}I_{я}} - \frac{R_{я\Sigma}}{cK_{\Phi}}. \quad (2.3)$$

З цих рівнянь випливає, що в області навантажень, менших $I_{гр}$, статичні характеристики двигуна мають гіперболічний характер і при $M \rightarrow 0$ і $I_я \rightarrow 0$ асимптотично наближаються до осі ординат ω .

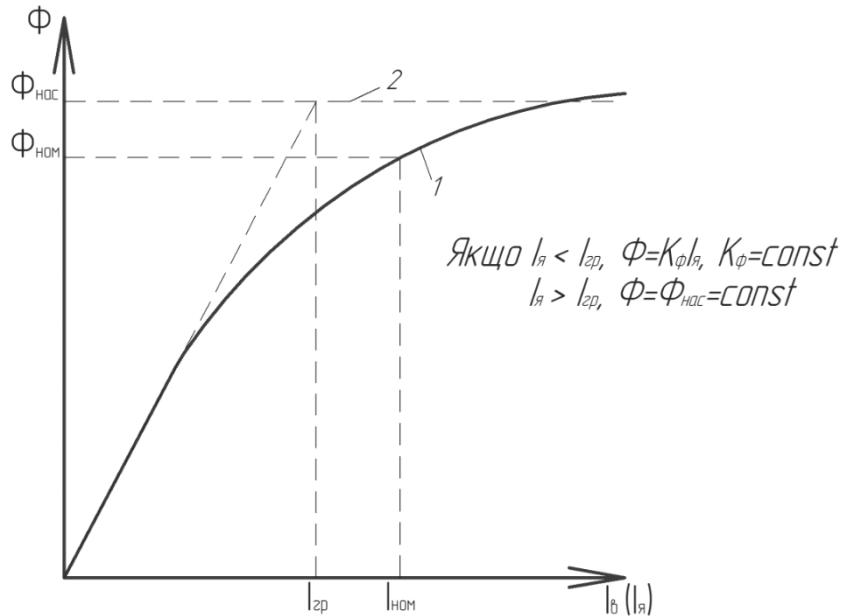


Рисунок 2.2 – Характеристика намагнічування $\Phi=f(I_я)$

При $I_я > I_{гр}$ магнітний ланцюг машини насичується і при прийнятому допущенні $\Phi = \Phi_{нас} = const$. Характеристики двигуна в області великих навантажень, більших $I_{гр}$, практично лінійні, подібно аналогічним характеристикам двигуна з незалежним збудженням.

Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження в різних режимах зображені на рис. 2.3.

Для електродвигуна послідовного збудження можливі два гальмівних режими: противмикання і динамічного гальмування.

При роботі двигуна в режимі противмикання для обмеження струму в коло якоря вводиться додатковий опір.

Механічні характеристики для цього гальмування розташовані в IV квадранті і є продовженням характеристик рушійного режиму при негативній кутовій швидкості.

Режим противмикання можливий також при зміні полярності напруги, що підводиться до якоря. У цьому випадку слід залишити без зміни напрям струму в обмотці збудження.

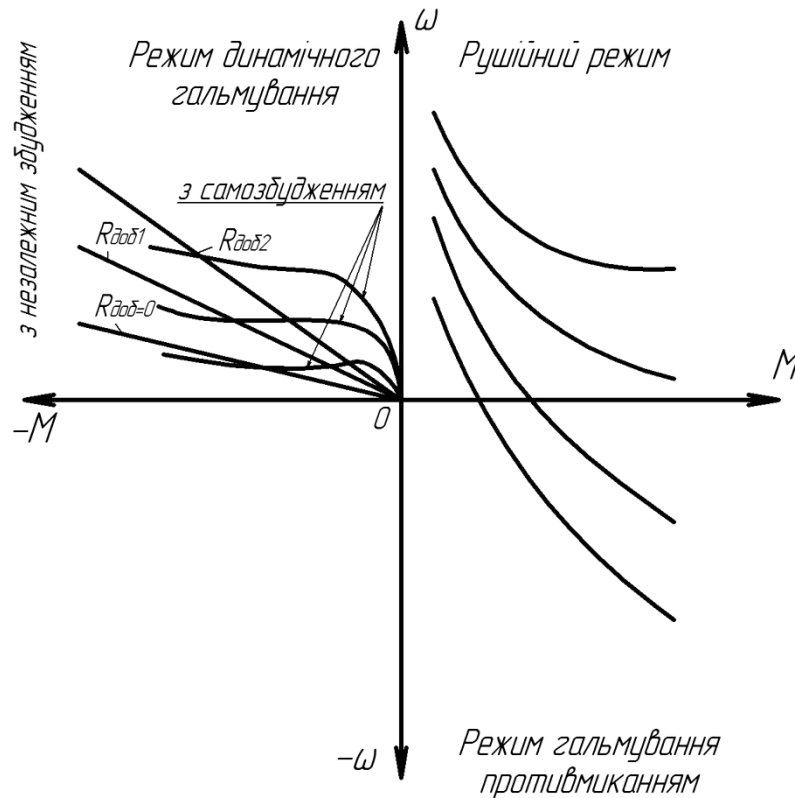


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

Динамічне гальмування двигуна може бути отримано двома способами: із самозбудженням і при незалежному збудженні.

При переході машини з рушійного режиму в режим динамічного гальмування з самозбудженням необхідно перемкнути полярність якоря або обмотки збудження щоб уникнути розмагнічування машини. У цьому випадку машина самозбуджується при даному опорі кола якоря тільки при певних значеннях швидкості. При цьому вона створює гальмівний момент, причому наростання цього моменту може відбутися стрибком (інтенсивне самозбудження), який при порівняно великих махових масах механізму може викликати небажанні поштовхи. Тому частіше використовується

динамічне гальмування з незалежним збудженням. У цьому випадку обмотка збудження підключається до мережі через додатковий обмежувальний опір. При цьому механічні характеристики лінійні і перетинаються на початку системи координат.

Механічна та електромеханічна характеристика двигуна мають нелінійний вигляд. При невеликих навантаженнях, коли магнітне коло двигуна ненасичене, це гіперболи, які із збільшенням навантаження та насичення магнітного кола переходять у прямі. За паспортними даними природну характеристику побудувати неможливо. Для цього використовуються універсальні характеристики, які приводяться у довідниках для однієї серії двигунів, і представляють собою залежності у відносних одиницях швидкості та моменту двигуна від струму (рис. 2.4).

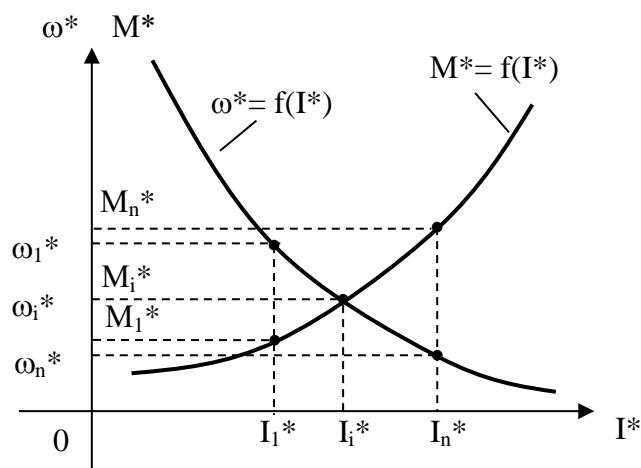


Рисунок 2.4 – Універсальні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Побудова природних механічної та електромеханічної характеристики здійснюється у наступній послідовності:

- 1) На осі абсцис задається ряд струмів I_i^* ;
- 2) За універсальними характеристиками знаходяться відповідні швидкості ω_i^* та моменти M_i^* ;

3) На основі паспортних даних обчислюються швидкості, моменти та струми в абсолютних одиницях $M_i = M_i^* \cdot M_n$, $\omega_i = \omega_i^* \cdot \omega_n$, $I_i = I_i^* \cdot I_n$;

4) За результатами попереднього пункту будується природна механічна та електромеханічна характеристика $\omega = f(M)$ та $\omega = f(I)$.

На основі природної характеристики за допомогою різних методів будуються штучні характеристики. *Аналітичний* метод ґрунтується на відношенні швидкостей на природній та штучній характеристиках. Для природної характеристики швидкість будь-якої точки дорівнює

$$\omega_{шi} = \frac{U_n - I_i R_{дв}}{c\Phi_i},$$

де $R_{дв} = R_{я} + R_{оз}$ – електричний опір двигуна, який приблизно можна знайти за паспортними даними $R_{дв} \approx 0,75R_n(1 - \eta_n)$.

Відповідно для штучної характеристики

$$\omega_{шi} = \frac{U - I_i(R_{дв} + R_d)}{c\Phi_i}.$$

Тоді відношення швидкостей на характеристиках визначається виразом

$$\omega_{шi} = \omega_{шi} \frac{U - I_i(R_{дв} + R_d)}{U_n - I_i R_{дв}}. \quad (2.4)$$

За допомогою формули (2.4) будується штучна характеристика. При наявності додаткового опору R_d у колі двигуна в чисельник підставляється номінальна напруга U_n . Для розрахунку штучної характеристики при зміні напруги

живлення U у чисельник підставляється $R_d=0$. Штучна характеристика будується в наступній послідовності:

- 1) за допомогою універсальної характеристики будується природна електромеханічна характеристика згідно до вищенаведеного;
- 2) задається ряд струмів I_i , за якими на природній характеристиці знаходяться відповідні швидкості $\omega_{\Pi i}$;
- 3) за формулою (2.4), наприклад, при наявності додаткового опору в R_d , для відповідного струму I_i та $\omega_{\Pi i}$ знаходяться швидкості для штучної характеристики $\omega_{\Pi i}$;
- 4) за результатами попереднього пункту наносяться точки швидкостей $\omega_{\Pi i}$ на перетині з відповідними струмами I_i й отримується штучна електромеханічна характеристика $\omega = f(I)$; на рис. 2.5 зображені природна та штучна характеристики при додатковому опорі $R_d=R_1$;
- 5) за допомогою універсальної характеристики $M^* = f(I^*)$ знаходяться моменти M_i та будується штучна механічна характеристика $\omega = f(M)$.

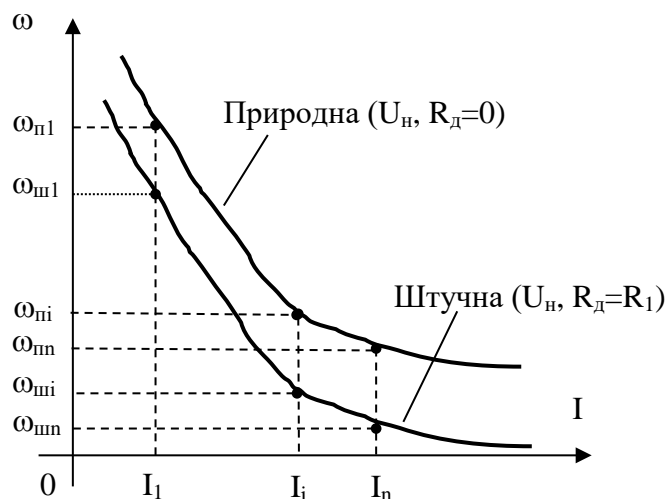


Рисунок 2.5 – Побудова механічних характеристик двигуна з послідовним збудженням при $R_d=R_1$

2.3. Методичні вказівки

Лабораторна установка представляє собою стенд, на передній панелі якого розміщені вимірювальні прилади, перемикачі, клема, схема експериментальних досліджень. Для виконання поставленого завдання необхідно підключити наступні елементи: досліджувану (М) і навантажувальну (МН) машини, тахогенератор (ТГ), два навантажувальних реостата - R1 і R2.

Перед початком лабораторної роботи всі перемикачі на пульті повинні бути встановлені в нульове положення.

При виконанні досліджень необхідно керуватися такими вказівками.

1) Природну електромеханічну характеристику двигуна М знімають при встановленні перемикачів SA3 і SA4 в положення, що забезпечує рушійний режим роботи (двигун М підключений до мережі), а перемикачів SA1 і SA2 – в положення, що забезпечує динамічне гальмування машини МН (двигун МН відключений від мережі і замкнений на навантажувальний опір R1).

Пуск двигуна з послідовним збудженням може здійснюватися тільки при наявності навантаження на валу не менше половини номінального. Для цього резистор R1 виставляють в середнє положення і, зменшуючи опір R2, запускають досліджуваний двигун М. В процесі пуску значення струму двигунів не повинні перевищувати номінальних. Змінюючи опір R1, створюють за допомогою машини МН різні гальмівні моменти на валу досліджуваного двигуна М. Крайніми точками характеристик є $\omega = 1,5\omega_{\text{ном}}$ та $I = I_{\text{ном}}$.

2) Штучні електромеханічні характеристики для рушійного режиму знімають при установці перемикачів в ті ж положення, що і при дослідженнях по п. 1, але з додатковим опором R2, не рівним нулю (значення R2 наведені в табл. 2.1).

3) Штучні характеристики режиму противмикання знімають при включенні М і МН в рушійний режим (включення їх у мережу). При цьому потрібно встановити перемикачем SA2 такий напрямок обертання МН, щоб він був протилежним напрямку обертання досліджуваного двигуна М (при їх окремому включенні). Змінюючи опір R1, створюють за допомогою машини МН різні моменти на валу досліджуваного двигуна М.

4) Характеристики динамічного гальмування із самозбудженням знімають при переведенні перемикача SB3 в положенні «Замкнено», перемикача SA3 – в положенні 2, а перемикача SA4 – в таке положення, при якому струм в обмотці збудження двигуна М протікав би в тому ж напрямку, що і в рушійному режимі. Навантажувальна машина при цьому включена в такий же рушійний режим, що і при дослідженні в п. 3. Змінюючи опір R1, створюють за допомогою машини МН різні моменти на валу досліджуваного двигуна М.

5) Характеристики динамічного гальмування з незалежним збудженням знімають при замиканні якоря двигуна на опір R2 (провідник, раніше об'єднуючий опір R2 і клему 3, від'єднують від неї і приєднують до клемі 7). При цьому перемикач SB3 необхідно перевести в положення «Розімкнено». Крім того, обмотку збудження ОЗМ включають через додатковий амперметр А та навантажувальний резистор R, що допускає протікання номінального струму якоря тривалий час. До точок 3, 6 підключають амперметр і резистор (пунктирні лінії на схемі рис. 2.1), перемикач SA3 встановлюється в положення 1, а SA4 – в положення 2. МН включається при цьому в рушійний режим. Змінюючи опір R1, створюють за допомогою машини МН різні моменти на валу досліджуваного двигуна М.

Всі перемикачі, наявні на нижній частині панелі і не позначені на схемі, повинні бути встановлені в нульове положення.

б) Розрахунок штучних механічних характеристик двигуна з послідовним збудженням проводиться за допомогою універсальних характеристик $\omega^*=f(I_a^*)$ і $M^*=f(I_a^*)$.

7) Розрахунковий момент на валу досліджуваного двигуна M розраховують по даним МН

$$M = I \frac{M_n}{I_n}, \quad (2.5)$$

де I – поточне значення струму навантажувальної машини; M_n та I_n – відповідно номінальний момент та струм навантажувальної машини.

2.4. Контрольні запитання

1. Чому при зниженні навантажувального моменту на валу електродвигуна з послідовним збудженням його швидкість значно зростає?
2. Чому перевантажувальна здатність по моменту у двигунів з послідовним збудженням вище, ніж при незалежному збудженні?
3. В яких положеннях повинні знаходитися перемикачі SA1–SA4 при знятті характеристик рушійного режиму, гальмування противмиканням і динамічного?
4. Яким чином здійснюється запуск двигуна з послідовним збудженням?
5. Які переключення необхідно зробити в схемі для здійснення режиму динамічного гальмування з незалежним збудженням?
6. Чим пояснити відсутність режиму рекуперативного гальмування в двигунах послідовного збудження?
7. Як розрахувати опір якірного кола двигуна з послідовним збудженням за паспортними даними?
8. Чому дорівнює номінальний опір двигуна з послідовним збудженням?
9. Поясніть сутність побудови штучних статичних характеристик з допомогою універсальних характеристик.

2.5. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

- 1) Титульний аркуш.
- 2) Мета та програма роботи.
- 3) Основні теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторної роботи.
- 4) Таблиці зі знятими експериментальними даними.
- 5) Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
- 6) Побудовані експериментальні та розрахункові статичні характеристики.
- 7) Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ
«ГЕНЕРАТОР – ДВИГУН»
(тривалість виконання 4 години)

Мета роботи – дослідити механічні характеристики електричної машини постійного струму незалежного збудження при роботі в системі генератор – двигун та способи регулювання швидкості обертання двигуна при постійному моменті та постійній потужності.

3.1. Програма досліджень

- 1) Вивчити схему експериментальних досліджень, ознайомитися з розташуванням вимірювальних приладів і апаратів лабораторної установки.
- 2) Записати паспортні дані електричних машин і електричних приладів.
- 3) Зібрати схему експериментальних досліджень (рис. 3.1) і встановити всі перемикачі, які використовуються в роботі, в потрібне положення.
- 4) Зняти дослідним шляхом і побудувати графічно механічні характеристики двигуна $\omega = f(M)$ при постійному потоці збудження двигуна ($i_3 = i_{3ном} = const$) для трьох значень струму збудження генератора, що забезпечують отримання напруги реального холостого ходу на затискачах генератора U_G згідно з названим керівником варіантом завдання (табл. 3.1). Механічні характеристики зняти як для рушійного режиму, так і для режиму рекуперативного гальмування.
- 5) Дослідним шляхом зняти і графічно побудувати механічну характеристику двигуна в режимі динамічного гальмування.

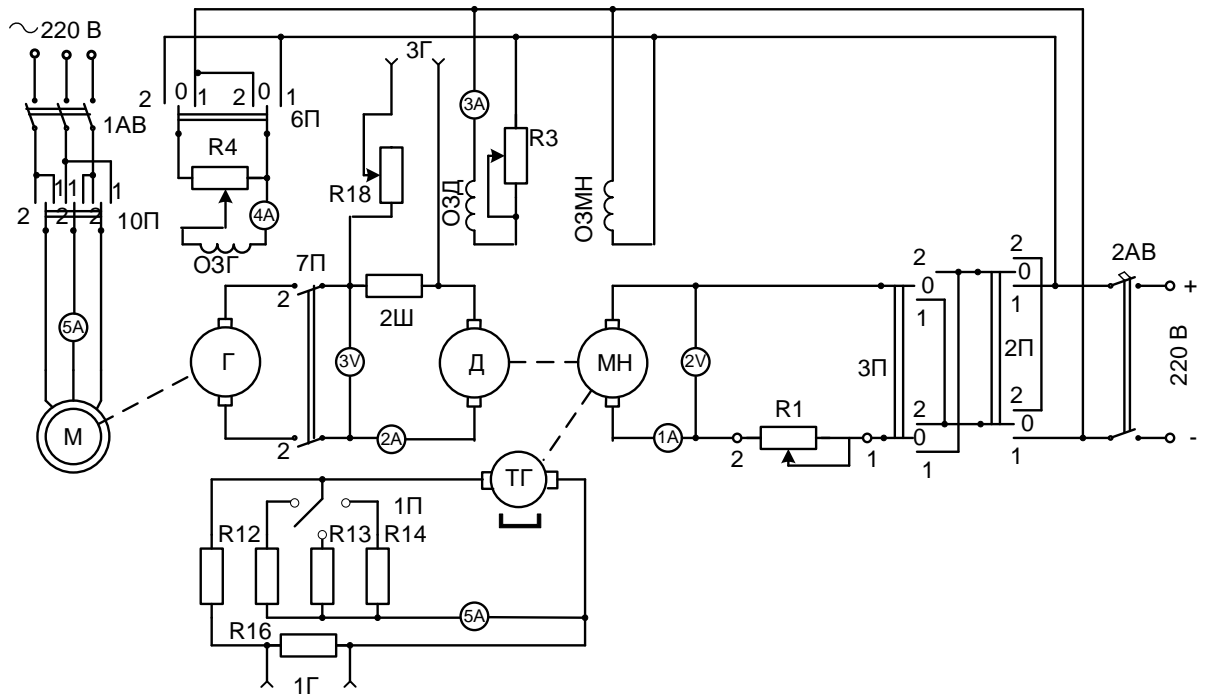


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенду

Таблиця 3.1

Номер варіанту	Рушійний режим та рекуперативне гальмування					$P=f(U_{Г})$	$M=f(I_{3б})$
						$\omega=f(U_{Г})$	$\omega=f(I_{3б})$
						(п. 7)	(п. 9)
	$U_{Г}/U_{Г.н}$			$I_{3б.д}/I_{3б.д.н}$		$M/M_{н}$	$P/P_{н}$
1	1,0	0,8	0,5	0,9	0,8	1,0	0,5
2	1,0	0,6	0,4	0,9	0,6	0,5	0,8
3	1,0	0,8	0,2	0,9	0,5	0,6	0,6
4	1,0	0,5	0,2	0,9	0,5	0,8	0,7
5	1,0	0,7	0,3	0,9	0,7	0,7	0,9
6	1,0	0,6	0,2	0,9	0,8	0,8	0,7
7	1,0	0,5	0,3	0,9	0,7	0,6	0,8
8	1,0	0,7	0,4	0,9	0,6	0,5	0,5
9	1,0	0,8	0,4	0,9	0,7	0,6	0,4
10	1,0	0,6	0,3	0,9	0,6	0,4	0,6

б) Зняти дослідним шляхом і графічно побудувати механічні характеристики при постійному струмі збудження генератора для двох значень струму в обмотці збудження двигуна згідно заданому варіанту завдання (див. табл. 3.1). Характеристики зняти для рушійного режиму та режиму рекуперативного гальмування. Значення струму збудження генератора задає керівник.

7) Зняти дослідним шляхом і графічно побудувати залежності $P = f(U_r)$, $\omega = f(U_r)$ при постійному моменті на валу двигуна ($M = \text{const}$) і регулювання швидкості обертання двигуна зміною напруги, що підводиться.

8) За даними п. 7 визначити діапазон регулювання швидкості обертання електродвигуна.

9) Зняти дослідним шляхом і графічно побудувати залежності $M = f(I_{36})$, $\omega = f(I_{36})$ при постійній потужності на валу двигуна ($P = \text{const}$) і напрузі на затискачах генератора, рівній номінальній ($U_r = U_{rн}$). Значення потужності на валу двигуна задає керівник.

10) За паспортними даними розрахувати і побудувати природну механічну характеристику двигуна.

11) Зробити висновки.

3.2. Короткі теоретичні відомості

Багато виробничих механізмів за умовами технологічного процесу вимагають плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні. Діапазон регулювання частоти обертання, тобто відношення максимальної частоти обертання до мінімальної при номінальному навантаженні на валу двигуна, і необхідна плавність регулювання різні для різних виробничих механізмів.

Для задоволення вказаних вимог поряд з іншими системами застосовується система генератор–двигун, в якій в якості джерела енергії використовується генератор постійного струму.

Як правило, генератор обертається за допомогою синхронного або асинхронного приводного двигуна, швидкість обертання якого може бути прийнята незмінною.

Швидкість обертання двигуна в системі генератор–двигун регулюється зміною напруги на затискачах генератора (ЕРС генератора E_r) шляхом зміни значення струму в обмотці збудження генератора при постійному магнітному потоці двигуна або магнітного потоку двигуна при постійній напрузі на затискачах генератора.

ЕРС генератора E_r – функція двох величин: швидкості обертання ω_r і магнітного потоку Φ_r , створюваного обмоткою збудження:

$$E_r = c_r \Phi_r \omega_r, \quad (3.1)$$

де c_r – коефіцієнт, що визначається конструктивними параметрами генератора.

При постійній швидкості обертання генератора ω_r , його ЕРС залежить тільки від магнітного потоку, який, при нехтуванні насиченням магнітного кола генератора, пропорційний струму збудження генератора $I_{зб}$:

$$\Phi_r = K_\phi I_{зб} = K_\phi \frac{U_{зб}}{r_{зб} + R_d}, \quad (3.2)$$

де K_ϕ – постійний коефіцієнт; $U_{зб}$ – напруга збудження, яка прикладена до обмотки збудження генератора від окремого джерела постійного струму $r_{зб}$ – опір обмотки збудження; R_d – додатковий опір в колі обмотки збудження.

Приймаючи до уваги (3.1), отримаємо, що зміна опору R_d призводить до регулювання ЕРС генератора:

$$E_r = K \frac{1}{r_{зб} + R_d}, \quad (3.3)$$

де $K = c_r K_\phi \omega_r U_{зб}$.

Струм збудження генератора може також регулюватися зміною напруги збудження $U_{зб}$, при застосуванні спеціальних збуджувачів.

Напруга на затискачах генератора U_r внаслідок наявності внутрішнього опору якірного кола $R_{яг}$ залежить від струму, що протікає в якірному колі I :

$$U_{\Gamma} = E_{\Gamma} - IR_{\text{яг}}. \quad (3.4)$$

З урахуванням (3.4) рівняння електромеханічної та механічної характеристик двигуна в системі генератор – двигун мають вигляд:

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{c\Phi_{\text{д}}} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}}{c\Phi_{\text{д}}} I; \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{c\Phi_{\text{д}}} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}}{(c\Phi_{\text{д}})^2} M, \quad (3.6)$$

де $c = \frac{pN}{2\pi a}$ – коефіцієнт, що визначається конструктивними параметрами двигуна; p – кількість пар полюсів; N – кількість активних провідників обмотки якоря; a – кількість паралельних віток обмотки якоря; $\Phi_{\text{д}}$ – магнітний потік збудження двигуна; $R_{\text{яд}}$, $R_{\text{яг}}$ – опір якірних кіл двигуна та генератора відповідно.

Знаки струму в колі якоря I і моменту двигуна M залежать від співвідношення ЕРС генератора E_{Γ} і протиЕРС двигуна $E_{\text{д}}$. ПротиЕРС двигуна, як і ЕРС генератора, визначається швидкістю його обертання і магнітним потоком:

$$E_{\text{д}} = c\Phi_{\text{д}}\omega_{\text{д}}. \quad (3.7)$$

Залежно від співвідношення E_{Γ} та $E_{\text{д}}$ можливі наступні режими роботи двигуна в системі генератор–двигун:

- 1) при $E_{\Gamma} > E_{\text{д}}$ – рушійний;
- 2) при $E_{\text{д}} > E_{\Gamma}$ – рекуперативного гальмування;
- 3) при $E_{\Gamma} = 0$, $E_{\text{д}} \neq 0$ – динамічного гальмування.

У рушійному режимі при $E_{\Gamma} > E_{\text{д}}$ енергія мережі перетворюється в механічну приводним двигуном генератора, після чого – в електричну генератором постійного струму, а потім двигуном – в механічну енергію. Таким чином, енергія мережі після триразового перетворення йде на виконання роботи, обумовленої технологічним процесом. Струм двигуна в цьому режимі додатний:

$$I = \frac{E_r - E_d}{R_{яд} + R_{яг}} > 0. \quad (3.8)$$

У режимі рекуперативного гальмування ($E_d > E_r$) енергія зазнає перетворення, зворотне розглянутому, і віддається (рекуперується) в мережу. При цьому струм двигуна $I < 0$, тобто протилежний за знаком струму в рушійному режимі.

Режим динамічного гальмування ($E_r = 0, E_d \neq 0$) аналогічний режиму динамічного гальмування при роботі двигуна від мережі. У цьому випадку роль опору динамічного гальмування виконує опір якірних кіл двигуна і генератора: $R_{яд} + R_{яг}$.

Як впливає з (3.6), механічні характеристики двигуна постійного струму в системі генератор–двигун є сімейством паралельних одна одній прямих (рис. 3.2), кожна з яких відсікає на осі ординат відрізки $\omega_{0e}, \omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}$ і т.д., відповідні значенням $E_{гн}, E_{г1}, E_{г2}, E_{г3}$ і т.д. Жорсткість механічних характеристик при різних значеннях ЕРС генератора зберігається і за значенням дещо менша, ніж жорсткість природної характеристики двигуна. Це пояснюється включенням в якірне коло двигуна додаткового опору кола якоря генератора. Характеристики рушійного режиму знаходяться в I або III квадранті, рекуперативного гальмування – в II або IV (в залежності від напрямку обертання). Характеристика, що проходить через початок координат ($E_r = 0, E_d \neq 0$), відповідає режиму динамічного гальмування.

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною ЕРС генератора E_r здійснюється у бік зменшення швидкості обертання. Для збільшення швидкості обертання двигуна при постійному струмі збудження генератора і відповідно постійному значенні ЕРС генератора ($E_r = \text{const}$) магнітний потік двигуна зменшують шляхом зменшення струму в обмотці збудження.

З (3.6) випливає, що зменшення магнітного потоку двигуна Φ_d сприяє збільшенню швидкості обертання ідеального холостого ходу ω_0 та зменшенню жорсткості механічних характеристик (див. рис. 3.2).

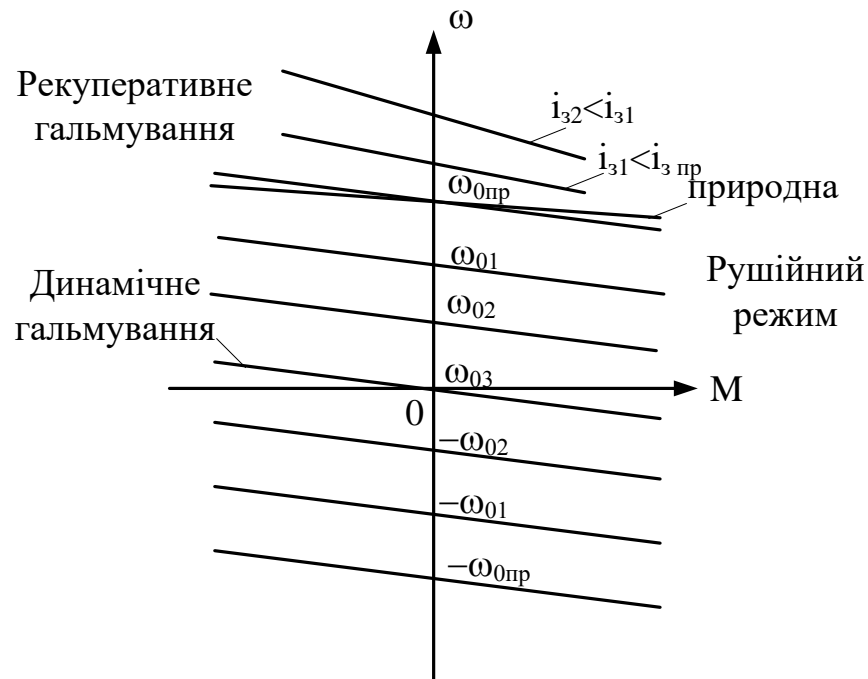


Рисунок 3.2 – Механічні характеристики системи «генератор–двигун»

3.3. Методичні вказівки

1) Механічні характеристики двигуна в рушійному режимі і режимі рекуперативного гальмування представляють собою продовження одна одної. Тому знімати їх доцільно за допомогою навантажувальної машини, починаючи з номінального струму рушійного чи рекуперативного режимів і завершуючи номінальним струмом відповідно рекуперативного або рушійного режимів.

При знятті механічних характеристик не слід підтримувати напругу на затискачах якоря генератора, а тільки його струм збудження.

Змінюючи опір R_1 в яірному колі МН створюються різні моменти на валу досліджуваної машини М.

2) При знятті регульовальних характеристик $P = f(U_r)$, $\omega = f(U_r)$ при зміні напруги на затискачах якоря струм в яірному колі двигуна підтримується постійним опором R_1 в яірному колі МН. При постійному магнітному потоці двигуна ($\Phi_d = \text{const}$) це відповідає регулюванню швидкості

обертання при постійному моменті ($M = \text{const}$). Напруга на затискачах якоря машини M задається зміною струму обмотки збудження генератора.

3) При знятті регульовальних характеристик $M = f(I_{зб})$, $\omega = f(I_{зб})$ при зміні магнітного потоку струм в якірному колі двигуна підтримується постійним за допомогою опору $R1$ в якірному колі МН. При постійній напрузі на затискачах генератора це відповідає регулюванню швидкості обертання при постійній потужності ($P = \text{const}$). Магнітний потік машини M задається зміною струму обмотки збудження машини M .

При виконанні досліджень необхідно стежити, щоб машини не були перевантаженими по струму, а швидкість обертання двигуна не перевищувала номінальне значення більш ніж на 10%.

Варіанти завдань на лабораторні дослідження представлені в табл. 3.1 і задаються керівником. Експериментальні та розрахункові дані повинні бути наведені в табл. 3.2 і 3.3.

Таблиця 3.2

Номер досліджу	Пункт програми роботи	Дані за варіантом	Дослід				Розрахунок	
			I_2, A	I_1, A	U_3, B	U_1, B	$M, H \cdot m$	$\omega, \text{рад/с}$
	4	$\frac{U_{\Gamma}}{U_H} =$						
	5							
	6	$\frac{I_{зб д}}{I_{зб д.н}} =$						

Таблиця 3.3

Номер досліджу	Пункт програми роботи	Дані за варіантом	Дослід					Розрахунок		
			I_3, A	$M, H \cdot m$	I_2, A	I_1, A	U_1, B	$M, H \cdot m$	P, Bt	$\omega, рад/с$
	7	$\frac{M}{M_n} =$								
	9	$\frac{P}{P_n} =$								

Момент двигуна

$$M = c\Phi_d I, \quad (3.9)$$

де

$$c\Phi_d = \frac{U_n - I_n R_{яд}}{\omega_n}; \quad (3.10)$$

U_n, I_n, ω_n – номінальні напруга, струм та швидкість обертання двигуна відповідно.

Опір якорного кола двигуна:

$$R_{я.д} = 0,5(1-\eta)R_n, \quad (3.11)$$

де η – ККД двигуна,

$$\eta = \frac{1000P_n}{U_n I_n}, \quad (3.12)$$

P_n – номінальна потужність двигуна, Вт;

R_n – номінальний опір двигуна; $R_n = U_n / I_n$.

3.4. Контрольні запитання

1. Поясніть за принциповою схемою системи генератор–двигун роботу двигуна в різних режимах згідно з програмою роботи.
2. Чому жорсткість механічної характеристики двигуна в системі генератор–двигун менше, ніж жорсткість природної характеристики?

3. Чому механічні характеристики двигуна, відповідні зміни напруги генератора при постійному магнітному потоці двигуна, паралельні?
4. Який вигляд мають електромеханічні та механічні характеристики двигуна при регулюванні швидкості обертання зміною магнітного потоку двигуна при постійній нарузі на затискачах його якоря?
5. Як в системі генератор–двигун здійснюється рекуперативне і динамічне гальмування?
6. Чому зміна швидкості обертання двигуна зміною напруги на затискачах якоря повинна відбуватись при постійному моменті, а зміною магнітного потоку – при постійній потужності?
7. Вкажіть переваги і недоліки системи генератор–двигун.
8. У якій послідовності необхідно знімати характеристики рушійного режиму та режиму рекуперативного гальмування?
9. Наведіть методику розрахунку та побудови природної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження.
10. Яким чином змінюється напрямок обертання двигуна в системі генератор–двигун?

3.5. Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити наступні матеріали:

- 1) Титульний аркуш.
- 2) Мета та програма роботи.
- 3) Таблиці зі знятими експериментальними даними.
- 4) Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
- 5) Побудовані експериментальні та розрахункові статичні характеристики.
- 6) Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 4

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ**

(тривалість виконання 4 години)

Мета роботи – дослідити механічні характеристики асинхронного електродвигуна з фазним ротором при роботі його в різних режимах; поглибити знання фізичних процесів, що виникають при роботі двигуна; перевірити основні положення теорії електроприводу на підставі результатів експериментальних досліджень.

4.1. Програма досліджень

1) Ознайомитися з лабораторною установкою, вивчити призначення всіх вимірювальних приладів і органів керування.

2) Записати паспортні дані електричних машин.

3) Зібрати схему експериментальних досліджень (рис. 4.1) і встановити всі перемикачі, які використовуються в роботі, в задане положення.

4) Зняти дослідним шляхом і графічно побудувати механічні характеристики двигуна $\omega = f(M)$ при постійній напрузі в колі статора $U=U_n=\text{const}$ і частоті струму в мережі $f=f_n=\text{const}$ для рушійного режиму та режиму рекуперативного гальмування; при додатковому опорі в колі ротора $R_2 = 0$ (природна характеристика); при опорі в колі ротора $R_2 \neq 0$ (штучні реостатні характеристики); режиму гальмування противмиканням при двох значеннях додаткового опорі в колі ротора; динамічного гальмування при двох значеннях додаткового опорі в колі ротора для двох значень постійного струму в колі статора.

Параметри схеми задаються керівником відповідно з варіантом за табл. 4.1, в якій прийняті такі позначення:

R_d – додатковий опір в колі ротора, який вводиться в кожен фазу;

$I_{с.п}$ – значення постійного струму, що протікає в колі статора при динамічному гальмуванні;

$R_{р.н}$ – номінальний опір обмотки ротора;

$I_{с.н}$ – номінальний струм статора.

5) Обробити результати досліджень і побудувати механічні характеристики.

6) Зробити висновки.

7) Оформити звіт про роботу.

Таблиця 4.1

Номер варіанту	Рушійний режим та рекуперативного гальмування			Режим гальмування протівмикан ням		Режим динамічного гальмування			
	$R_d/R_{р.н}$						$I_{с.п}/I_{с.н}$		
1	0	0,2	1,4	3,0	4,0	0,2	0,9	0,4	0,6
2	0	0,3	0,9	2,7	3,8	0,3	0,8	0,4	0,6
3	0	0,4	1,2	2,8	3,7	0,5	1,2	0,4	0,6
4	0	0,5	1,0	3,2	3,8	0	1,0	0,4	0,6
5	0	0,6	1,3	3,4	4,2	0,6	1,3	0,4	0,6
6	0	0,4	1,5	2,8	4,0	0,4	1,2	0,4	0,6
7	0	0,5	1,1	2,6	3,7	0,6	1,1	0,4	0,6
8	0	0,6	1,2	3,5	4,2	0,3	1,2	0,4	0,6
9	0	0,2	0,8	3,0	3,8	0	0,8	0,4	0,6
10	0	0,3	0,9	3,3	3,7	0,3	0,9	0,4	0,6

Позначення на схемі:

ППП — пристрій плавного пуску

QF1, QF2 — Автоматичні вимикачі

SA1 — SA2 — пакетні перемикачі

HL1—HL2 — сигнальні лампи

KM1 — контактор силовий

TV1 — трансформатор напруги

PV1 — PV3 — Вольтметри аналогові

PA1 — PA3 — амперметри аналогові

R1 — R3 — тумби опорів

SB1 — SB2 — перемикачі двопозиційні

L1 — L2 — Силові входи пристрою плавного пуску

T1 — T2 — силові виходи пристрою плавного пуску

M1 — асинхронний двигун з фазним ротором

M2 — двигун постійного струму з незалежним збудженням

TG — тахогенератор

1B — 5B — виводи для запису перехідних процесів

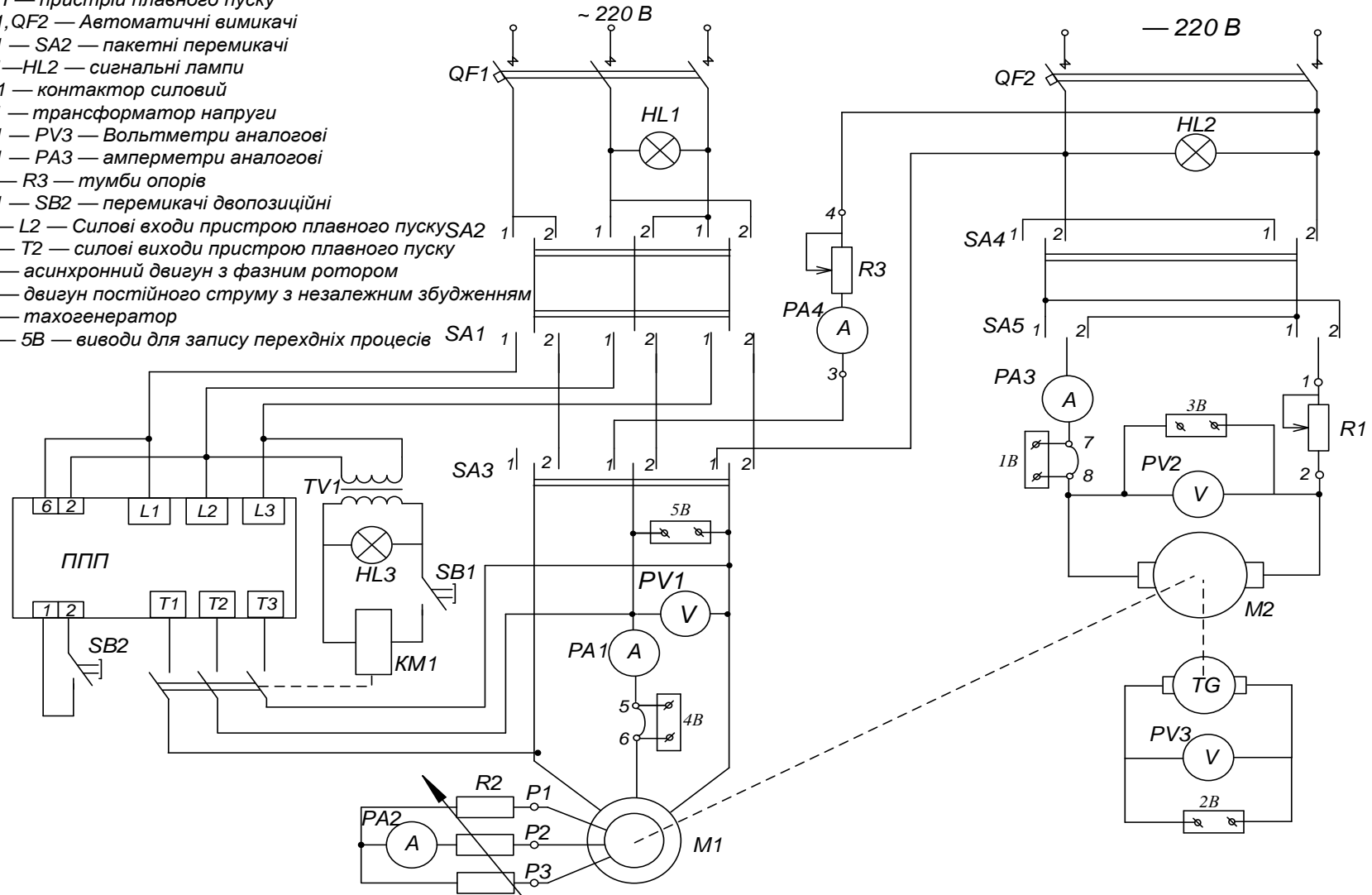


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного стенду

4.2. Короткі теоретичні відомості

Асинхронні двигуни отримали в промисловості дуже широке застосування завдяки ряду переваг порівняно з іншими типами двигунів.

Для виведення рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна використовують спрощену Г-подібну схему заміщення, яка наводиться в літературі з теорії електроприводу.

Для двигунів з фазним ротором вводиться поняття номінального опору обмотки ротора:

$$R_{p.n} = \frac{E_{p.n}}{\sqrt{3}I_{p.n}}, \quad (4.1)$$

де $E_{p.n}$, $I_{p.n}$ – відповідно номінальні ЕРС та струм ротора.

Частота обертання магнітного поля (синхронна частота)

$$n_c = \frac{60f_1}{p_n}, \text{ об/хв}, \quad (4.2)$$

де f_1 – частота струму в мережі, Гц; p_n – кількість пар полюсів.

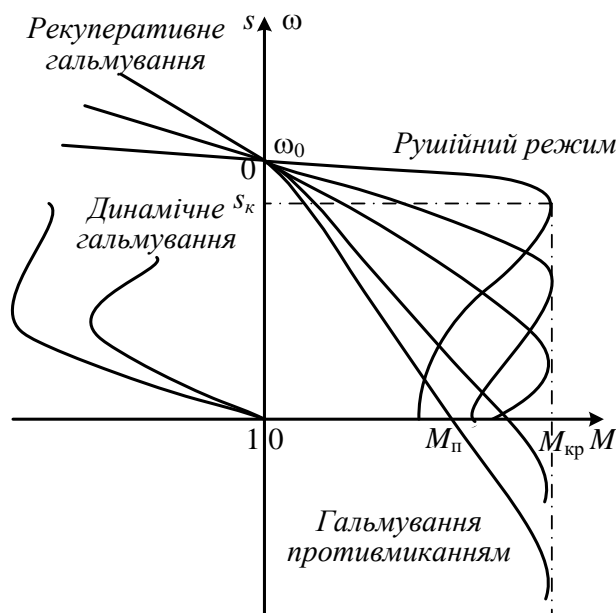


Рисунок 4.2 – Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Синхронна кутова швидкість

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p_n}, \text{ рад/с.} \quad (4.3)$$

Ковзання ротора

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} = \frac{n_c - n}{n_c}, \quad (4.4)$$

де ω , n – відповідно кутова швидкість і частота обертання ротора.

Струм ротора:

$$I_p = \frac{E_p s}{\sqrt{R_p^2 + (X_p s)^2}} = \frac{E_p}{\sqrt{\left(\frac{R_p}{s}\right)^2 + X_p^2}}, \quad (4.5)$$

де X_p – індуктивний опір фази обмотки ротора.

Приведений струм ротору:

$$I_p' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_c + R_p'/s)^2 + (X_c + X_p')^2}}, \quad (4.6)$$

де U_ϕ – фазна напруга статора; R_c , X_c – відповідно активний і реактивний опори статора; R_p' , X_p' – приведені активний та індуктивний опори обмотки ротора.

Струм статора – це геометрична сума приведенного струму ротора I_p' і струму холостого ходу I_0 .

Обертвий момент асинхронного двигуна

$$M = \frac{m_1 U_\phi^2 R_p'}{\omega_c s [(R_c + R_p'/s)^2 + (X_c + X_p')^2]}, \quad (4.7)$$

де m_1 – кількість фаз статора.

По (4.7) може бути розрахована і побудована залежність $M = f(\omega)$ або з урахуванням (4.4) – механічна характеристика $\omega = f(M)$.

Функція $M = f(s)$ має максимум. Ковзання s , при якому момент буде мати найбільше, або критичне, значення M_k , називається критичним і визначається так:

$$s_k = \frac{R'_p}{\sqrt{R_c^2 + X_k^2}}, \quad (4.8)$$

де $X_k = X_c + X'_p$.

Підставив значення s_k в (4.7), отримаємо значення критичного (максимального) моменту двигуна:

$$M_k = \frac{m_1 U_\phi^2}{2\omega_c [R_c + \sqrt{R_c^2 + X_k^2}]}. \quad (4.9)$$

Для практичних розрахунків механічної характеристики можна скористатись наближеною формулою Клосса:

$$M \approx \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (4.10)$$

Рівняння електромеханічної характеристики на робочій ділянці:

$$\omega = \omega_c - \omega_c \frac{\sqrt{3}R_p}{E_{pH}} I_p, \quad (4.11)$$

де

$$I_p = \frac{E_{pH} s}{\sqrt{3}R_p} \quad (4.12)$$

Рівняння (4.12) справедливе при малих значеннях ковзання.

4.3. Методичні вказівки

4.3.1. Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки для дослідження механічних характеристик електропривода за системою «генератор – двигун» представлена на рис. 4.1.

Напруга живлення подається в досліджувану схему вмиканням автоматичних вимикачів QF1 та QF2.

Навантажувальні опори встановлені поза пультом та повинні бути підключені у відповідності зі схемою роботи до початку проведення лабораторних досліджень.

Перед початком кожної лабораторної роботи усі перемикачі на пульті повинні бути встановлені у нульове положення.

Для даної лабораторної роботи необхідно підключити реостати R1 до точок 1, 2 та R2 в коло фазного ротора, а також встановити перемички між точками 5 і 6 та 7 і 8 відповідно.

4.3.2. Порядок проведення досліджень

1) Частота обертання двигуна вимірюється за допомогою тахогенератора BR, який механічно з'єднаний з валом двигуна. Напруга тахогенератора $U_{тг}$ вимірюється вольтметром PV3:

$$\omega = \frac{\pi n_{тг.н} U_{тг}}{30 U_{тг.н}}, \quad (4.13)$$

де $n_{тг.н}$ – номінальна частота обертання тахогенератора, об/хв; $U_{тг.н}$ – номінальна напруга тахогенератора, В (див. паспортні дані).

2) Вихідне положення для проведення усіх дослідів: перемикачі SA2–SA5 – в нульовому положенні; SA1 – в положенні 2; вимикачі SB1 і SB2 – розімкнені; движки реостатів R1 та R2 – в положенні «Нескінченність» (∞).

3) Для зняття механічних характеристик необхідно змінювати в широких межах момент на валу двигуна. З цією метою використовується навантажувальна машина М2, вал якої механічно з'єднано з валом досліджуваної машини М1. Момент навантажувальної машини пропорційний струму якоря, який вимірюється амперметром РА3. Змінюючи цей струм реостатом R1, можна змінювати момент на валу досліджуваної машини.

б) Переключити SA4 у положення 1. Запустити досліджувану машину М1, вивести R2 в положення «0» (при цьому двигун М1 працює на природній характеристиці);

в) навантажити досліджуваний двигун до номінального струму за допомогою зміни опору R1 в колі якоря навантажувальної машини;

г) зменшуючи струм навантажувальної машини до нуля за допомогою реостата R1, знімати механічну характеристику в рушійному режимі (3–4 точки); занести дані в табл. 4.2;

4) Механічні характеристики в рушійному режимі і режимі рекуперативного гальмування представляють собою продовження одна одної. Тому їх зняття доцільно проводити за допомогою навантажувальної машини, починаючи з номінального струму рушійного чи рекуперативного режиму і завершуючи номінальним струмом відповідно рекуперативного або рушійного режиму. При цьому при знятті рекуперативного режиму напрямок обертання навантажувальної машини повинен співпадати з напрямком обертання асинхронного двигуна. Величину моменту навантаження на валу досліджуваного двигуна М1 задають зміною величини додаткового опору R1 в колі якоря навантажувальної машини М2.

5) Для зняття механічних характеристик режиму гальмування противмиканням напрямок обертання навантажувальної машини повинен бути протилежним напрямку обертання асинхронного двигуна. Величину моменту навантаження на валу досліджуваного двигуна М1 задають зміною величини додаткового опору R1 в колі якоря навантажувальної машини М2.

б) Для зняття механічних характеристик режиму динамічного гальмування обмотка статора асинхронного двигуна від'єднується від мережі змінного струму і приєднується до мережі постійного струму через опір R3. Для зняття кожної характеристики режиму динамічного гальмування (при кожному із заданих додаткових опорів ротора) опором R3 по амперметру PA4 встановлюється задане значення постійного струму, яке протягом зняття характеристики залишається незмінним. Величину моменту на валу досліджуваного двигуна M1 задають зміною величини додаткового опору R1 в колі якоря навантажувальної машини M2.

У процесі проведення роботи необхідно простежити, щоб машини не перевантажувались за струмом.

Варіанти завдань на лабораторні дослідження представлені в табл. 4.1 і задаються керівником.

Експериментальні дані зводяться в табл. 4.2

Таблиця 4.2

Номер варіанту	Пункт програми роботи	Дані варіанту	Дослід					Розрахунок	
			I ₂ , А	U ₁ , В	U ₂ , В	I ₃ , А	U ₃ , В	M, Н·м	ω, рад/с

Механічні характеристики асинхронного двигуна $\omega = f(M)$ знімають за допомогою навантажувальної машини M2. Момент на валу досліджуваного двигуна визначається за величиною моменту навантажувальної машини. Якщо знехтувати втратами обертання кожної з машин, то момент може бути знайдений наступним чином:

$$M = c\Phi_n I_3, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.14)$$

де $s\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_n}{\omega_n}$; U_n – номінальна напруга якоря, В; I_n – номінальний

струм якоря, А; ω_n – номінальна швидкість обертання навантажувальної машини, 1/с.

Опір якоря навантажувальної машини

$$R_{я} = 0,5(1-\eta_n)R_n, \quad (4.14)$$

де $\eta_n = 1000P_n / U_n I_n$ – номінальний ККД навантажувальної машини; P_n – номінальна потужність навантажувальної машини, кВт; $R_n = U_n / I_n$ – номінальний опір двигуна постійного струму.

4.4. Контрольні запитання

1. Як визначити номінальний опір ротора асинхронного двигуна?
2. Який додатковий опір в колі ротора необхідно виставити перед включенням двигуна в мережу?
3. Яким чином впливає опір кола ротора на жорсткість механічної характеристики?
4. З якою метою в коло ротора вводиться великий опір при знятті характеристики в режимі гальмування противмиканням?
5. Який вигляд мають характеристики режиму динамічного гальмування при різних значеннях опору в колі ротора і різних значеннях постійного струму в обмотці статора?
6. В якій послідовності необхідно знімати характеристики рушійного режиму та режиму рекуперативного гальмування?
7. Як розрахувати за дослідними даними момент двигуна?
8. Як змінити напрям обертання асинхронного двигуна?
9. Яка різниця між природною і штучною характеристиками двигуна?

4.5. Зміст звіту

- 1) Титульний аркуш.
- 2) Мета та програма роботи.
- 3) Таблиці зі знятими експериментальними даними.
- 4) Розрахунки, необхідні для побудови характеристик.
- 5) Побудовані експериментальні та розрахункові статичні характеристики.
- 6) Висновки за результатами виконання лабораторної роботи.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пижов В.М., Красношарпа Н.Д., Островерхов М.Я. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.М. Піжов, Н.Д. Красношарпа, М.Я. Островерхов. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.
2. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
3. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
4. Теорія електропривода: Підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.
5. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.
6. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теорія електропривода - 1» для студентів напряму підготовки 6.050702 – «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» / Укл. О.І. Кіселичник, Н.Д. Красношарпа. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 33 с.

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Лабораторна робота № 1
з дисципліни «Електропривод»

**Дослідження механічних характеристик двигунів постійного струму
з незалежним збудженням**

Виконали:
студенти групи ЕП-41
Петренко О.О.
Іваненко Д.Л.
Третенко Д.І.

Перевірила:
доц. Красношарпа Н.Д.

Київ 2022