

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В.В. Грабко, М.П. Розводюк, І.В. Грабенко**

# **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

## **Частина I. Машини постійного струму**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальностей 7.092203 – „Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”, 7.090601 – „Електричні станції”, 7.090602 – „Електричні системи і мережі”, 7.090603 – „Електротехнічні системи електроспоживання”. Протокол №6 від 27 січня 2005 р.

Вінниця ВНТУ 2005

УДК 621.313

Г75

*Рецензенти:*

*Б.С. Рогальський, доктор технічних наук, професор*

*В.В. Кухарчук, доктор технічних наук, професор*

*В.І. Нагул, кандидат технічних наук, доцент*

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В.**

**Г75** **Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму.** Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.

В навчальному посібнику викладені підходи до експериментальних досліджень електричних машин (машин постійного струму). Для кожного лабораторного заняття наведені основні теоретичні відомості, опис лабораторного стенда, задачі для самостійного розв'язку, програма лабораторної роботи і методичні вказівки для її виконання. Запропоновані лабораторні роботи дозволяють охопити основні питання для закріплення теоретичних знань з дисципліни „Електричні машини”. Навчальний посібник рекомендується для студентів, які навчаються за напрямками „Електромеханіка” спеціальності 7.092203 – „Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” та „Електротехніка” спеціальностей 7.090601 – „Електричні станції”, 7.090602 – „Електричні системи і мережі”, 7.090603 – „Електротехнічні системи електроспоживання”.

УДК 621.313

© В.В. Грабко, М.П. Розводюк, І.В. Грабенко, 2005 р.

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b> .....	5
<b>Розділ 1 Особливості роботи в лабораторії електричних машин</b> .....	6
1.1 Правила роботи в лабораторії електричних машин.....	6
1.2 Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт .....	8
1.3 Навантажувальні пристрої електричних двигунів .....	10
<b>Розділ 2 Теоретичні відомості про електричні машини постійного струму</b> .....	13
2.1 Будова машини постійного струму .....	13
2.2 Принцип дії генератора.....	14
2.3 Принцип дії двигуна.....	22
2.4 Реакція якоря.....	25
2.5 Класифікація генераторів за способом збудження .....	29
2.6 Процес самозбудження генератора з паралельним збудженням....	34
2.7 Рівняння обертових моментів для генератора.....	37
2.8 Класифікація двигунів за способом збудження .....	38
2.9 Рівняння обертових моментів для двигуна.....	40
<b>Розділ 3 Лабораторні заняття</b> .....	42
3.1 Лабораторне заняття №1П – Дослідження характеристик генераторів постійного струму з незалежним, паралельним і змішаним збудженням .....	42
3.1.1 Короткі теоретичні відомості про генератори постійного струму.....	42
3.1.1.1 Генератор з незалежним збудженням .....	42
3.1.1.2 Генератор з паралельним збудженням .....	49
3.1.1.3 Генератор зі змішаним збудженням.....	50
3.1.2 Завдання на підготовку до практичного заняття .....	51
3.1.3 Задачі для самостійного розв’язування .....	51
3.1.4 Програма лабораторної роботи.....	53

3.1.5	Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи .....	54
3.1.6	Питання до захисту .....	59
3.2	Лабораторне заняття №2П – Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням .....	60
3.2.1	Короткі теоретичні відомості.....	60
3.2.2	Завдання на підготовку до практичного заняття .....	66
3.2.3	Задачі для самостійного розв’язування .....	66
3.2.4	Програма лабораторної роботи.....	68
3.2.5	Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи .....	68
3.2.6	Питання до захисту .....	73
3.3	Лабораторне заняття №3П – Дослідження двигунів постійного струму з послідовним збудженням .....	73
3.3.1	Короткі теоретичні відомості про двигун послідовного збудження .....	74
3.3.2	Завдання на підготовку до практичного заняття .....	79
3.3.3	Задачі для самостійного розв’язування .....	79
3.3.4	Програма лабораторної роботи.....	80
3.3.5	Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи .....	81
3.3.6	Питання до захисту .....	84
	<b>Література.....</b>	<b>86</b>

## ПЕРЕДМОВА

Запропонований навчальний посібник складений у відповідності з програмою дисципліни „Електричні машини”, при опануванні якої у лабораторіях навчальних закладів виконуються навчальні випробування електричних машин і трансформаторів. Це допомагає студентам опанувати теоретичні розділи курсу. В процесі лабораторних випробувань студенти знайомляться з конструкцією складальних одиниць різних типів машин, стандартними позначеннями обмоток і маркуванням їхніх виводів, набувають навичок складання схем, опановують технікою вимірювань електричних і неелектричних величин, методикою проведення випробувань і обробки їхніх результатів.

Практичні задачі з теми кожної роботи наводяться у вказівках перед описом робіт. Частина цих задач за вказівкою викладача пропонується для самостійного домашнього розв’язування перед виконанням кожної роботи, частина розв’язується спільно на заняттях, а частина – після виконання роботи при оформленні звіту. Таким чином, усі запропоновані задачі повинні бути розв’язані. Час, що відводиться для аудиторного розв’язування задач, не повинен перевищувати (20...25)% загального часу, який відводиться на лабораторне заняття.

Навчальні випробування машин і трансформаторів через обмеженість часу проводяться по скороченій програмі, яка, однак, повинна включати перевірку найбільш важливих характеристик досліджуваної машини.

З метою полегшення та прискорення підготовки студентів до проведення випробувань в посібнику наведено загальні теоретичні відомості з курсу „Електричні машини”, розділу „Машини постійного струму”, а для кожного лабораторного заняття додаються основні відомості того типу електричної машини, яка підлягає випробуванню на лабораторній установці. В кожній роботі, разом із самостійними випробуваннями, передбачається аналіз отриманих результатів та порівняння їх з теоретичними положеннями.

Відгуки, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ.

## РОЗДІЛ 1

### ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

#### 1.1 Правила роботи в лабораторії електричних машин

Всі заняття в лабораторії електричних машин проходять під керівництвом викладача. При виконанні лабораторних робіт необхідно дотримуватися наступних правил [1].

1. Перед початком роботи проводиться інструктаж з техніки безпеки, про що робиться запис у відповідному журналі.

2. Роботи виконуються бригадами в складі трьох-чотирьох чоловік. Призначений бригадир відповідає за дисципліну членів бригади і за виконання ними даних правил.

3. Роботи виконуються фронтальним методом у послідовності, зазначеній викладачем. Перед кожною роботою студенти повинні вивчити теоретичні розділи курсу, що відносяться до даної роботи, розв'язати вказані викладачем задачі й ознайомитися зі змістом і методикою виконання роботи.

4. На початку кожного заняття проводиться перевірка домашнього розв'язання задач, а також готовності студентів до виконання роботи.

Непідготовлені студенти до виконання лабораторних робіт не допускаються, а у відведений для занять час вони повинні опрацювати весь незасвоєний матеріал. Відпрацьовування пропущених робіт проводиться в позаурочний час, визначений викладачем.

5. Викладач перед кожною роботою наводить короткі теоретичні відомості, що полегшує студентам виконання роботи й оформлення звіту.

6. Для занесення всіх вихідних даних і результатів експериментальних досліджень кожна бригада складає робочий протокол дослідження (один на бригаду).

У робочому протоколі вказуються:

- а) номер і назва роботи;
- б) склад бригади і дата виконання роботи;
- г) номінальні величини випробовуваних машин;

- г) перелік використовуваних у роботі вимірювальних приладів із зазначенням їхніх назв, типу, заводського номера і класу точності;
- д) назва і результати експериментів.

Після закінчення роботи протокол повинен перевірити і підписати викладач. У цьому ж протоколі він вказує номери задач, які повинні бути розв'язані. Розв'язування задач здійснюється в спеціальному робочому зошиті.

Робочий протокол досліджень – єдиний документ, що підтверджує виконання бригадою роботи. Без робочого протоколу, підписаного викладачем, звіти не приймаються і робота вважається невиконаною.

7. За результатами роботи студенти складають звіт (один на бригаду). Звіт оформляється в лабораторії протягом навчального часу до закінчення заняття та за її межами за допомогою комп'ютера на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 (210x297 мм) з рамкою зі штампом 15 мм через 1,5 міжрядкового інтервалу. Шрифт – Times New Roman, 12-14 кегль. Текст необхідно друкувати, залишаючи поля таких розмірів: лівий – 30 мм, правий – 15 мм, верхній – 20 мм, нижній – 30 мм.

Графіки будують за допомогою комп'ютера або вручну. При цьому повинна бути координатна сітка, а на кожній з координатних осей – нанесені позначення, їхні одиниці і масштаб. Для правильного уявлення про вигляд характеристик, масштаби вибирають таким чином, щоб початок координат відповідав нульовим значенням як функцій, так і їхніх аргументів.

При побудові характеристик вручну спочатку наносять експериментальні точки, а потім проводять плавну криву, розташовану якомога ближче до основної кількості цих точок. При комп'ютерній побудові характеристик ця процедура реалізується за допомогою згладжування експериментальних даних. Отриману усереднену криву і приймають за дослідну характеристику.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) титульний аркуш, на якому вказується назва міністерства, університету, інституту, факультету та кафедри, номер і тема роботи,

навчальна група, прізвища студентів бригади, які виконували роботу, посада та прізвище викладача, який перевіряв звіт, рік виконання;

б) програму виконання роботи;

в) номінальні величини випробовуваних машин і перелік вимірювальних приладів, які були використані (з робочого протоколу);

г) електричні схеми дослідів;

д) таблиці з результатами вимірювань і розрахунків (таблиці повинні бути пронумеровані й мати назву);

е) розрахункові формули і приклади розрахунку для одного з характерних режимів, а також графіки характеристик;

ж) висновки, у яких подається коротка характеристика дослідженої машини, її основні відмінні риси і властивості, головні результати експериментів.

8. На кожному наступному занятті оформлений звіт бригади разом з робочим протоколом (вкладається в звіт після титульного аркушу) здаються на перевірку викладачеві. Правильно оформлені звіти викладач підписує, після чого бригада може захищати роботу. Під час захисту перевіряється знання кожним студентом теоретичного матеріалу, який відноситься до даної роботи, вміння теоретично пояснити отримані експериментальні характеристики і методику проведення різних дослідів. Крім того, повинні бути розв'язані всі задачі, що відносяться до даної роботи. Звіти з робіт, які студенти захистили, і протоколи досліджень залишаються в лабораторії.

## **1.2 Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт**

В лабораторії досліджуються електричні машини і трансформатори, які працюють при напругах до 400...500 В, що вимагає суворого дотримання основних правил техніки безпеки.

1. Кожен студент може виконувати роботу тільки в складі бригади з трьох-чотирьох чоловік. Одному виконувати роботу не дозволяється.

2. Збирання і розбирання робочої схеми потрібно виконувати тільки при відключеній напрузі живлення. Живлення лабораторії здійснюється від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ через проміжний знижувальний



трансформатор 0,4/0,23 кВ. Трифазна вихідна лінійна напруга 0,23 кВ цього трансформатора від головного розподільного щита подається на кожен лабораторний стіл через автоматичний вимикач (автомат) типу АК50К-3М.

На кожен стіл через автомат АК50К-3М підводиться постійна напруга 220 В, що знімається з регульованого трансформатора з рухомою короткозамкненою обмоткою через трифазний мостовий випрямляч. Живлення трансформатора здійснюється від головного розподільного щита лабораторії. Змінну напругу, регульовану за величиною, одержують за допомогою регульовального автотрансформатора або індукційного регулятора (поворотного автотрансформатора). Регульовану постійну напругу отримують від тих самих пристроїв, але через випрямлячі (трифазні або однофазні).

3. Електричні машини і трансформатори, які досліджують, розташовані під лабораторним столом або біля нього, а виводи початків і кінців всіх їхніх обмоток виводяться на передню похилу панель столу. На вертикальній панелі столу розташовані щитові вимірювальні прилади та прилади керування навантажувальними пристроями, а під склом горизонтальної панелі – лабораторні прилади. Більш докладний опис конструкції лабораторних стендів подається в кожній лабораторній роботі.

Для кожної електричної схеми дослідів повинні бути підібрані вимірювальні прилади, навантажувальні і регулюючі пристрої, що відповідають номінальним величинам випробовуваних машин.

Подавати напругу живлення на схему після складання або будь-яких пере з'єднань у ній дозволяється тільки після перевірки її викладачем або лаборантом. За наявності напруги на робочій схемі після вмикання автомата АК50К-3М над ним загоряються сигнальні лампи.

4. Студентам забороняється:

а) виконувати будь-які роботи на внутрішніх сторонах лабораторних стендів;

б) вмикати комутаційні апарати на головних розподільних щитах лабораторії;

в) переносити прилади, апарати і з'єднувальні провідники для складання схем з одного лабораторного стенда на інший;

г) торкатися до струмоведучих частин робочої установки, які знаходяться під напругою;

д) торкатися до частин машин, що обертаються;

е) залишати без догляду працюючу машину або схему, що знаходиться під напругою;

є) залишати на машинах чи столах невикористані провідники;

ж) доточувати провідники, які використовуються для складання схеми;

з) виконувати роботи на машинах без кожухів, які закривають сполучні муфти й інші виступні обертові частини.

При аваріях у машині або в схемі, що супроводжуються швидким перегрівом машин, з'єднувальних провідників, реостатів, різким збільшенням частоти обертання (рознос двигуна) студенти зобов'язані негайно зняти напругу з робочої схеми, вимкнувши автомат живлення на лабораторному столі, і повідомити про аварію викладачеві.

5. У випадку ураження кого-небудь із працюючих електричним струмом необхідно звільнити його від контакту із джерелом струму, негайно приступити до надання першої допомоги потерпілому і викликати швидку допомогу.

6. Студенти допускаються до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з даними правилами і підпису у відповідному журналі. При порушенні правил техніки безпеки студентів усувають від роботи і допускають до неї тільки з дозволу завідувача кафедри після повторного інструктажу. При повторному порушенні правил студент не допускається до подальшої роботи в лабораторії.

### **1.3 Навантажувальні пристрої електричних двигунів**

Для механічного навантаження електродвигунів застосовують різні гальмівні пристрої, що дозволяють регулювати і вимірювати величину навантажувального моменту (моменту опору). В лабораторії електричних машин з цією метою використовуються електромагнітні гальма і генератори постійного струму.

Будову електромагнітного гальма (ЕМГ) подано на рис. 1.1 [1].

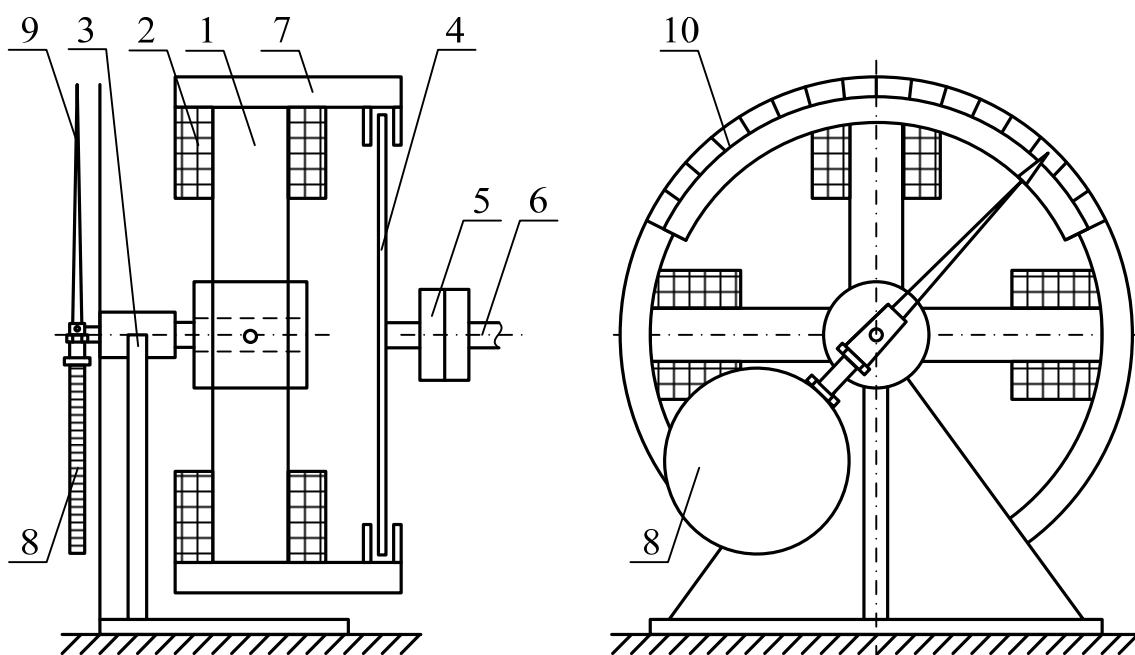


Рисунок 1.1 – Будова електромагнітного гальма

Робота ЕМГ полягає в наступному.

Електромагніт, що складається з декількох (на рис. 1.1 – чотирьох) полюсів 1 з полюсними котушками 2, з'єднаними послідовно, закріплений на одній стороні осі, яка може повертатися в підшипниках, закріплених у стійці 3. При обертанні досліджуваного двигуна (ДД) диск 4, з'єднаний муфтою 5 з валом 6 ДД, обертається в магнітному полі ЕМГ. При цьому в диску наводяться вихрові струми, внаслідок чого виникає гальмівна дія. У результаті електромагнітної взаємодії диска з полюсними наконечниками 7 вісь разом з електромагнітом і вантажем 8 повертається на деякий кут, при якому протидіючий момент, який створюється вантажем (противагою) 8, зрівноважить корисний момент двигуна  $M_2$ . Стрілка 9 відхилиться на такий самий кут і на шкалі 10 вкаже величину навантажувального моменту в Н·м.

Електромагнітне гальмо зручне в експлуатації тим, що дозволяє шляхом регулювання сили струму в його обмотці збудження плавно змінювати навантаження на валу досліджуваного двигуна. В лабораторних установках регулювану постійну напругу на обмотку збудження ЕМГ

подають з випрямного містка, підключеного на вихід автотрансформатора (ЛАТРа) Т2 через перемикач SA3 (рис. 1.2).

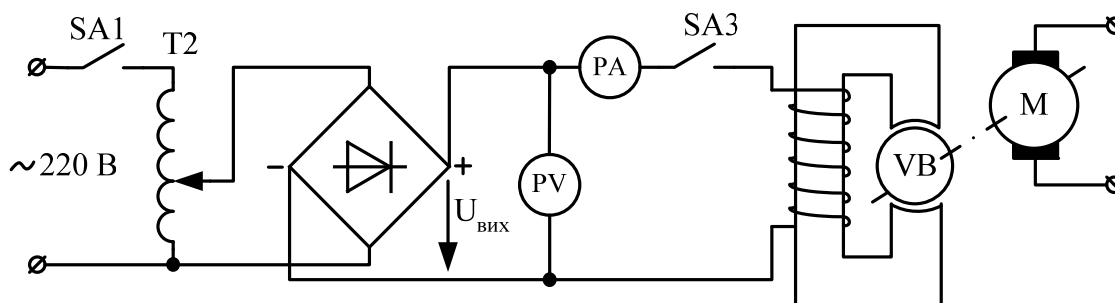


Рисунок 1.2 –Схема електрична принципова ЕМГ

**Увага!** При працюючому двигуні ( $n \neq 0$ ) перед вмиканням перемикача SA3, тобто перед подачею живлення на обмотку збудження ЕМГ обов'язково потрібно за допомогою ЛАТРа встановити, контролюючи вольтметром, його вихідну напругу  $U_{вих} = 0$ . В іншому випадку ( $U_{вих} \neq 0$ ) при вмиканні SA3 створюється гальмівний момент, при якому рухома система ЕМГ різко відхилиться, в результаті чого вона з великою силою може вдарити по гвинтові, який обмежує кут її повороту, і зрізати його.

Електромагнітне гальмо застосовується в лабораторії при дослідженні серієсного двигуна. Для створення навантаження на валу двигуна можна використовувати також генератор постійного струму або синхронний генератор. Процес створення і регулювання гальмівного моменту, який створюється генератором, описаний далі.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 2.1 Будова машини постійного струму

Будова генераторів і двигунів постійного струму однакова (рис. 2.1).

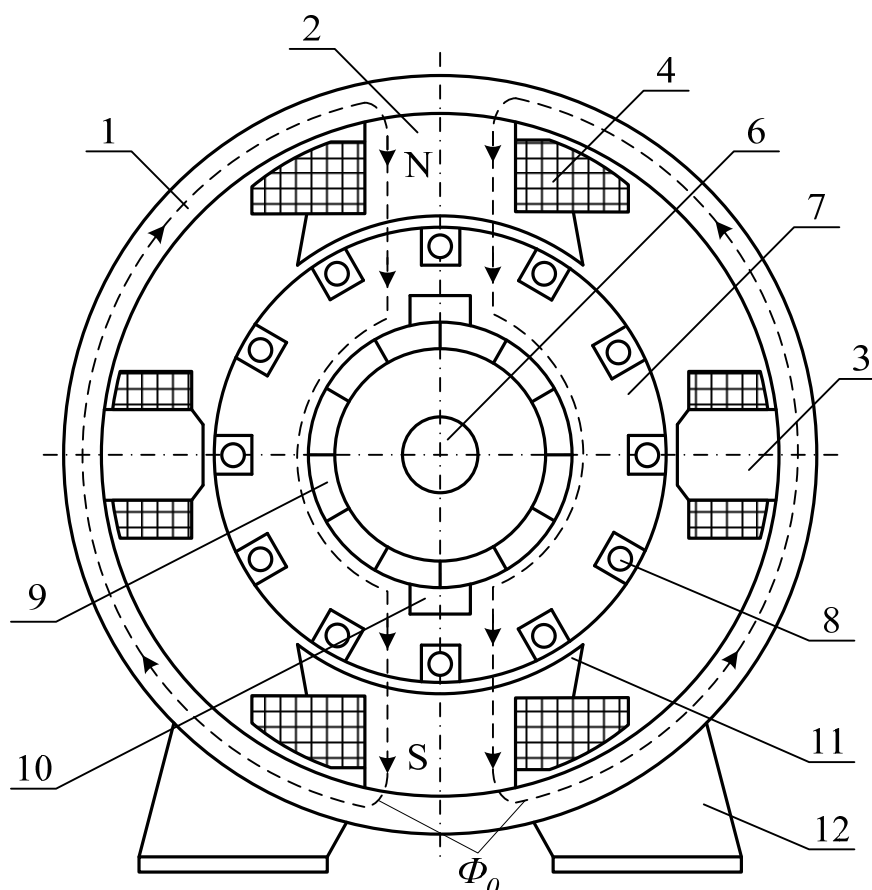


Рисунок 2.1 – Схема машини постійного струму

Нерухома частина машини, яка називається статором (індуктором), складається з циліндричної станини (ярма) 1, до якої болтами кріпляться головні полюси 2 і додаткові полюси 3. Для зменшення магнітних втрат (втрат потужності від вихрових струмів і на перемагнічування) головні полюси виготовляються з окремих сталевих пластин. Додаткові полюси виготовляються суцільними або також набираються з пластин. На сердечниках головних полюсів розміщені котушки обмоток збудження 4, на додаткових полюсах – котушки 5 обмоток додаткових полюсів [1–4].

До ярма з обох торців болтами кріпляться підшипникові щити, в яких розташовані підшипники, що несуть вал 6 обертової частини машини, яка називається якорем. На валу закріплене осердя 7 якоря, який для зменшення магнітних втрат набирається з ізолюваних одна від одної сталевих пластин. В пазах, розташованих на поверхні сердечника якоря, укладена обмотка 8. Обмотки якоря, збудження і додаткових полюсів виготовляють з мідних ізолюваних проводів. Обмотка якоря складається з секцій, кінці яких приєднуються до розташованого на валу колектора 9.

Колектор – це циліндр, що складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної і від вала. До колектора за допомогою пружин притискаються графітні або вуглеграфітні, або металографітні щітки 10. Вони розташовані в щіткотримачах, закріплених на траверсі.

Обмотка збудження машини живиться постійним струмом і призначена для створення основного магнітного поля, показаного на рис. 2.1 умовно за допомогою двох ліній магнітної індукції (зображені штриховою лінією).

Головні полюси закінчуються полюсними наконечниками 11, що призначені для отримання на більшій частині окружності якоря однакового повітряного зазору між сердечником якоря і головними полюсами.

Додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками.

За допомогою колектора і щіток обертова обмотка якоря з'єднується з зовнішнім електричним колом. Про інші важливі призначення колектора і щіток буде сказано далі.

На рис. 2.1 показана машина постійного струму з двома головними полюсами. В залежності від потужності і напруги машини постійного струму можуть мати і більшу кількість полюсів. При цьому відповідно збільшується кількість комплектів щіток і додаткових полюсів. Кріплення машини до фундаменту або металоконструкції здійснюється за допомогою лап 12.

## 2.2 Принцип дії генератора

Основним типом машин постійного струму є колекторний тип з електромагнітним збудженням. В них основний магнітний потік  $\Phi_0$

створюється постійним струмом, що протікає по обмотці збудження, яка розташована на головних полюсах [1–4].

Розглянемо принцип роботи генератора постійного струму на прикладі найпростішої колекторної машини з електромагнітним збудженням, обмотка якоря якої складається лише з одного витка (рис. 2.2).

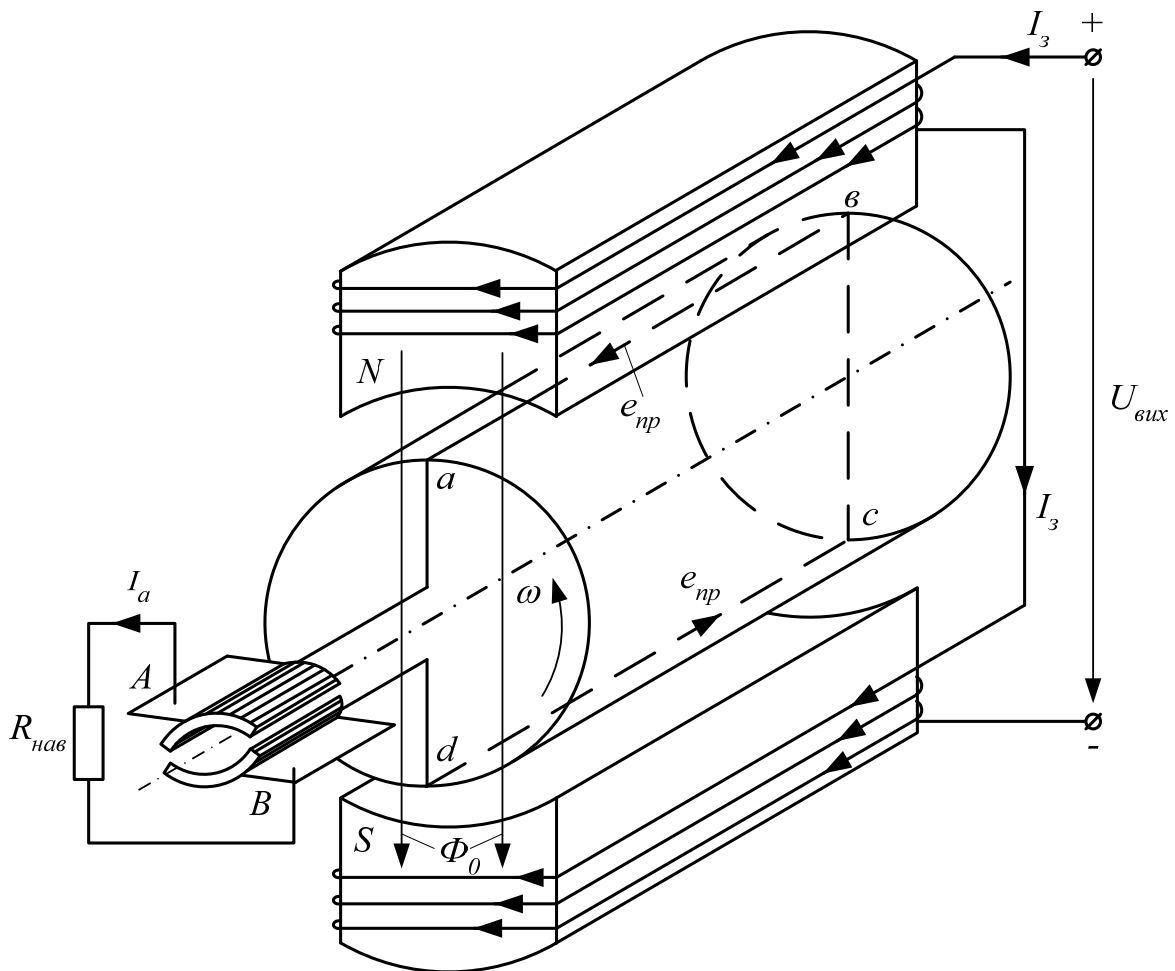


Рисунок 2.2 – Найпростіша машина постійного струму

Між двома полюсами електромагніту розміщений якор, що є сталевим циліндром. На якорі розташована обмотка у вигляді витка  $abcd$ , кінці якої приєднані до двох пластин (півкілець), закріплених на валу й ізольованих одна від одної. Ці пластини утворюють колектор. До півкілець дотикаються щітки  $A$  та  $B$ , до яких приєднане навантаження генератора  $R_{нав}$ . Якор обертається під дією механічної сили первинного двигуна, наприклад турбіни, двигуна внутрішнього згорання або електродвигуна.

Колектор обертається разом з валом, а щітки  $A$  та  $B$  залишаються нерухомими.

Полярність полюсів електромагніту (головних полюсів машини) залежить від напрямку струму в обмотці збудження і може бути визначена за допомогою правої руки: якщо долоню правої руки покласти на котушку збудження таким чином, щоб чотири пальці співпадали з напрямком струму у витках котушки, тоді відігнутий у площині долоні на  $90^0$  великий палець покаже напрямок магнітних силових ліній поля, створеного струмом котушки [1]. Відповідно до цього правила верхній полюс на рис. 2.2 є північним ( $N$ ), а нижній – південним ( $S$ ). Незалежно від числа полюсів машини їх полярність завжди чергується, тобто за полюсом  $N$  завжди буде полюс  $S$ . Силові лінії поля (лінії магнітної індукції) виходять з північного полюса, пронизують якір і входять у південний, двічі перетинаючи при цьому повітряний зазор. Далі вони замикаються по ярму машини (на рис. 2.2 не показано). Припустимо, що якір обертається проти руху годинникової стрілки з кутовою швидкістю  $\omega$  [рад/с]. При цьому сторони  $ab$  і  $cd$  витка перетинають силові лінії поля і в них, відповідно до закону електромагнітної індукції, індукується електрорушійна сила (ЕРС). Напрямок цієї ЕРС визначається правилом правої руки: якщо долоню правої руки розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а відігнутий у площині долоні на  $90^0$  великий палець збігався з напрямком руху провідника, то чотири витягнутих пальці покажуть напрямок індукованої у провіднику ЕРС. На рис. 2.2 напрямок ЕРС у провідниках  $ab$  і  $cd$  показаний стрілками.

Миттєве значення ЕРС для одного провідника обмотки визначається за формулою

$$e_{np} = B_{\delta} l \vartheta, \quad (2.1)$$

де  $B_{\delta}$  – індукція в повітряному зазорі від основного магнітного поля в точці, де знаходиться провідник;

$l$  – активна довжина провідника, що перетинає силові лінії поля;

$\vartheta$  – лінійна швидкість руху провідника:



$$\vartheta = \frac{\pi D_a n}{60}, \quad (2.2)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря, м;

$n$  – частота обертання якоря, об/хв.

Кутову швидкість обертання можна виразити через частоту обертання:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (2.3)$$

В обох провідниках внаслідок симетрії індуються однакові ЕРС, які по контуру витка додаються, і тому повна ЕРС якоря найпростішої машини становить

$$E = 2e_{np} = 2B_\delta l \vartheta. \quad (2.4)$$

Активна довжина провідника – величина незмінна. Якщо швидкість руху якоря в процесі роботи генератора залишається незмінною, тоді  $l\vartheta = \text{const}$ . Тому величина і напрямок ЕРС  $e_{np}$  визначається винятково значенням магнітної індукції  $B_\delta$ . Але розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини в різних місцях по окружності якоря нерівномірний: під серединою полюсів  $B_\delta$  має максимальні значення (під північним полюсом – позитивне, під південним – негативне), ближче до країв полюсів індукція зменшується (рис. 2.3). Лінія  $O_1O_2$ , яка розділяє зони магнітних полюсів і проходить через центр якоря, називається *геометричною нейтраллю*. Магнітна індукція на геометричній нейтралі дорівнює нулю.

В процесі роботи генератора якір обертається і провідники його обмотки по черзі займають в магнітному полі положення з різними значеннями магнітної індукції. Тому в обмотці якоря наводиться змінна ЕРС. При цьому графік зміни ЕРС у функції часу відповідає діаграмі розподілу магнітної індукції  $B_\delta$  в повітряному зазорі (див. рис. 2.3). Так, наприклад, при синусоїдному характері розподілу магнітної індукції ЕРС струм в обмотці якоря також буде синусоїдним. Якби в машині не було колектора (замість півкільць були б два кільця), то струм у зовнішньому

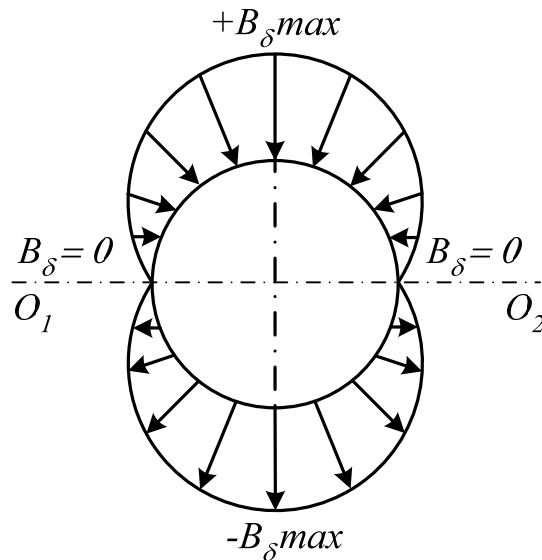


Рисунок 2.3 – Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини

колі генератора був би змінним. За допомогою колектора та щіток  $A$  і  $B$  змінний струм обмотки якоря перетворюється в пульсуючий, тобто незмінний за напрямом струм.

При зображеному на рис. 2.2 положенні витка  $abcd$  струм у зовнішньому колі генератора направлений від щітки  $A$  до щітки  $B$ , тобто щітка  $A$  має позитивну полярність, а щітка  $B$  – негативну. При повороті якоря на  $180^\circ$  напрями ЕРС у провідниках і струму у витку зміняться на зворотні. Однак полярність щіток, а отже, і напрям струму в зовнішньому колі залишаються незмінними. Пояснюється це тим, що в той момент, коли струм у витку змінює свій напрям, відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Таким чином, під щіткою  $A$  завжди знаходиться пластина, що з'єднується з провідником, розташованим під північним полюсом, а під щіткою  $B$  – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. В результаті полярність щіток при роботі генератора залишається незмінною незалежно від положення витка в магнітному полі. Тому і напрям струму в зовнішньому колі незмінний, хоча величина його змінюється, тому що при положенні провідників обмотки під серединою полюсів струм має максимальне значення, а при їхньому положенні на геометричній нейтралі струм дорівнює нулю. Це ілюструє рис. 2.4  $a$ , на якому показані різні положення якоря генератора за один оберт, і рис. 2.4  $b, в$ , на яких зображені графіки ЕРС і струму в обмотці якоря

(рис. 2.4, б) і ЕРС і струму на щітках і в зовнішньому колі (рис. 2.4, в) [1].

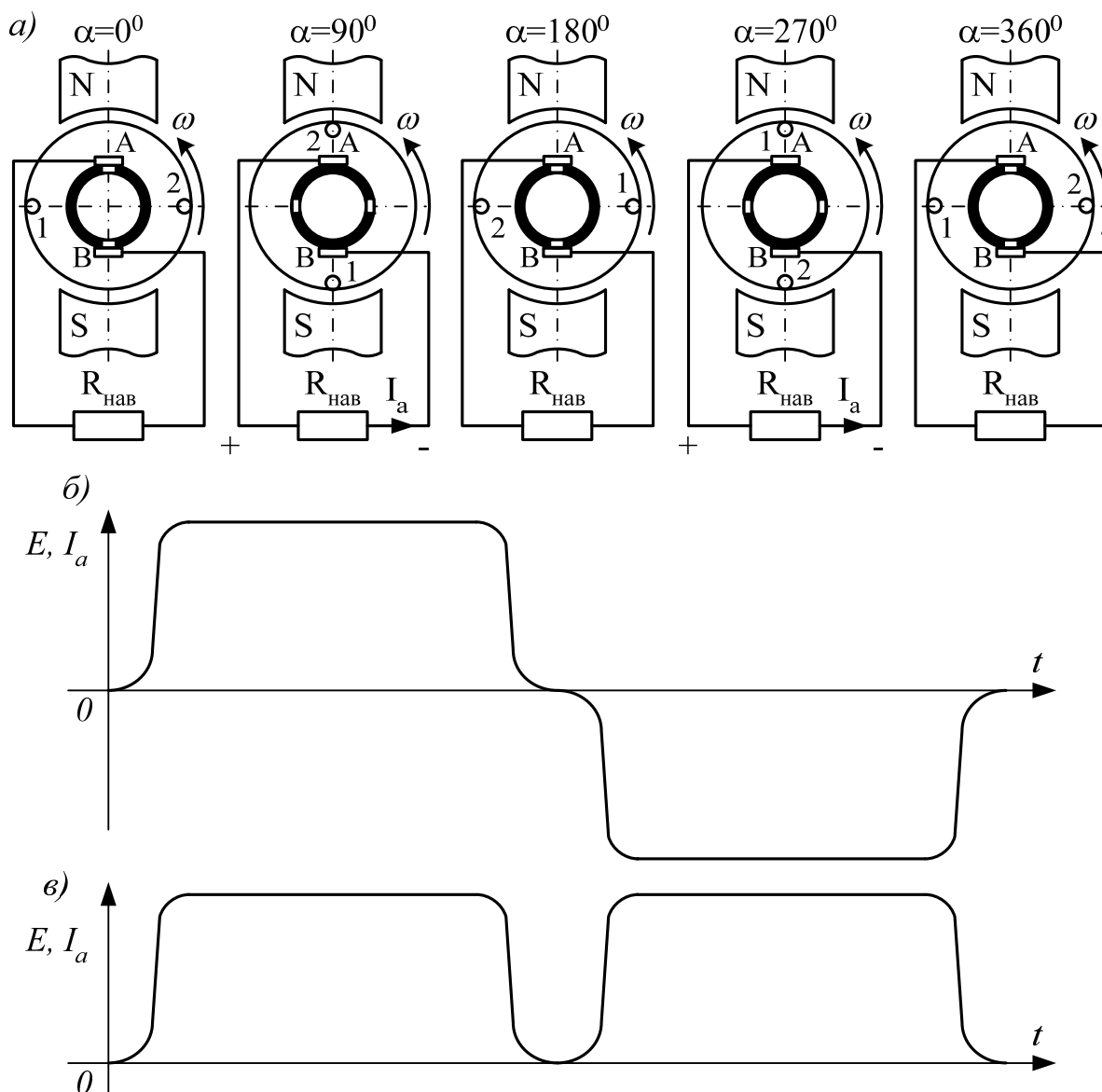


Рисунок 2.4 – Процес комутації (а) та криві ЕРС і струму найпростішої машини в колі якоря (б) і в зовнішньому колі (в)

Таким чином, у генераторі постійного струму за допомогою колектора змінний струм в обмотці якоря перетворюється в пульсуючий струм у зовнішній ділянці кола.

Щоб зменшити пульсації й отримати практично постійний за величиною струм у зовнішньому колі, на якорі розташовують обмотку, що складається з декількох десятків витків (секцій). В процесі роботи генератора на холостому ході, коли струм в колі якоря відсутній ( $I_a = 0$ ), в

його обмотці від основного магнітного поля індукується ЕРС, діюче значення якої визначається за формулою

$$E = c_e n \Phi, \quad (2.5)$$

де  $c_e$  – конструктивна стала машини:

$$c_e = \frac{pN}{60a}, \quad (2.6)$$

де  $p$  – число пар полюсів;

$N$  – число активних провідників обмотки якоря;

$a$  – кількість паралельних віток обмотки якоря.

Формулу для ЕРС можна представити в іншому вигляді:

$$E = c_m \omega \Phi, \quad (2.7)$$

де

$$c_m = \frac{pN}{2\pi a}. \quad (2.8)$$

В режимі холостого ходу напруга генератора на затискачах якоря  $U_0 = E_0$ . При роботі генератора в режимі навантаження ( $I_a \neq 0$ ) його вихідна напруга  $U$  менша ЕРС  $E$  на величину спаду напруги в якірному колі:

$$U = E - I_a R_{a\Sigma}, \quad (2.9)$$

де  $R_{a\Sigma}$  – повний опір якірного кола, який складається з власного опору обмотки якоря  $R_a$ , опору додаткових полюсів  $R_{d.n.}$ , опору компенсаційної обмотки  $R_{к.о.}$  та опору щітково-колекторного переходу  $R_{щ}$ .

Якір генератора приводиться в обертання первинним двигуном, який створює на валу генератора обертовий момент  $M$  (рис. 2.5).

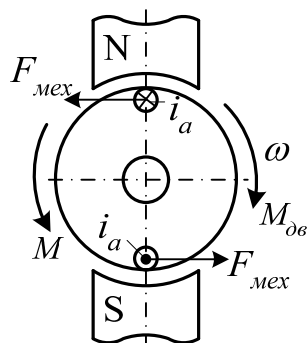


Рисунок 2.5 – Процес створення обертового моменту в генераторі постійного струму

Якщо генератор працює в режимі холостого ходу ( $I_a = 0$ ), для обертання його якоря потрібен невеликий момент, який називається *моментом холостого ходу*. Він витрачається на подолання сил тертя в підшипниках, тертя щіток з колектором, тертя частин, що обертаються, з опором повітрям.

В режимі навантаження в провідниках обмотки якоря під дією ЕРС виникає струм  $i_a$ . Оскільки ці провідники зі струмом знаходяться в магнітному полі, то відповідно до закону Ампера на них діють механічні сили, що залежать від величини індукції в повітряному зазорі в місці розташування провідника  $B_\delta$ , довжини провідника  $l$  і струму в ньому  $i_a$ :

$$F_{\text{мех}} = B_\delta l i_a. \quad (2.10)$$

Напрямок сили визначається правилом лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а чотири витягнуті пальці збігалися з напрямком струму в провіднику, то відігнутий у площині долоні на  $90^\circ$  великий палець покаже напрям механічної сили, яка діє на провідник (див. рис. 2.5). Такі сили діють на всі провідники обмотки якоря, що в результаті створює електромагнітний момент  $M$ , спрямований назустріч моменту первинного двигуна й напрямку обертання якоря, тобто є гальмівним моментом. Саме ця властивість

генератора і дозволяє використовувати його як навантажувальний пристрій на валу двигуна. Величина електромагнітного моменту може бути знайдена з виразів

$$M = F_{\text{мех}} \frac{D_a}{2}, \quad (2.11)$$

$$M = c_m \Phi I_a, \quad (2.12)$$

де  $D_a$  – зовнішній діаметр якоря.

З формули (2.12) видно, що, змінюючи величину магнітного потоку полюсів регулюванням струму збудження генератора і зміною струму якоря (струму навантаження), можна змінювати величину моменту генератора, а отже, і величину моменту навантаження на валу двигуна.

Напрямок ЕРС в обмотці якоря, полярність щіток, напрям напруги і струму в зовнішньому колі генератора можна змінити одним із двох способів:

1) зміною напрямку магнітного поля головних полюсів (зміною їхньої полярності). Для цього змінюють напрям струму в обмотці збудження, змінюючи полярність підведеної до неї напруги;

2) зміною напрямку обертання якоря генератора за допомогою приводного двигуна.

На практиці здебільшого використовується перший спосіб.

### 2.3 Принцип дії двигуна

Принцип дії електричних двигунів постійного струму базується на взаємодії провідників обмотки якоря, по яких протікає струм, з магнітним полем полюсів машини, в якому знаходяться провідники.

Основне поле  $\Phi$  у двигуні, як і в генераторі, створюється струмом обмотки збудження, а струм  $i_a$  в провідниках обмотки якоря протікає під дією підведеної до неї постійної напруги. Сила, що діє на провідник, визначається законом Ампера (2.10) [1, 2].

Напрямок цієї сили визначається правилом лівої руки. Обмотка якоря намотується таким чином, щоб одна сторона секції (витка) знаходилась під

північним ( $N$ ) полюсом, а друга – під південним ( $S$ ). Тому, щоб якір обертався увесь час в одну і ту саму сторону, при переході провідника з-під північного полюса під південний напрям струму в ньому повинен змінюватися на протилежний. Напрямок струму в провідниках обмотки якоря при переході їх через лінію геометричної нейтралі змінюється за допомогою колектора. Таким чином, колектор у двигуні перетворює постійний струм джерела живлення в змінний струм у секції (витку) обмотки якоря, тобто виконує функцію інвертора струму. Зміна напрямку струму у витку за допомогою колектора показана на рис. 2.6 [1].

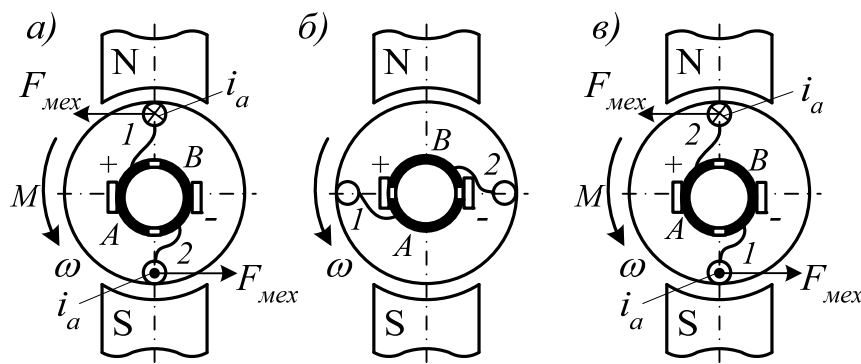


Рисунок 2.6 – Процес створення обертового моменту в двигуні постійного струму

Виток 1-2 (рис. 2.6, *a*) розміщений у магнітному полі полюсів. Кінці його припаяні до колекторних пластин  $A$  і  $B$ . Під дією прикладеної до щіток напруги у витку протікає струм  $i_a$ . Визначивши за правилом лівої руки напрямки сил, що діють на провідники  $1$  і  $2$ , бачимо, що виток буде обертатися проти руху годинникової стрілки. В позиції рис. 2.6, *б* виток пройде геометричну нейтраль за рахунок сил інерції (якщо він один) або під дією інших витків, які в цей час не знаходяться на геометричній нейтралі (у реальній машині). В позиції (рис. 2.6, *в*), коли сторона  $1$  витка перейшла в зону дії південного полюса, а сторона  $2$  – у зону дії північного, напрям струму у витку зміниться на протилежний, тому що під щіткою позитивної полярності виявилася пластина  $B$ , а під щіткою негативної полярності – пластина  $A$ . Отже, на виток діє момент такого ж напрямку, як

і в позиції рис. 2.6, а, і він буде продовжувати обертатися в ту ж саму сторону.

При обертанні якоря в магнітному полі полюсів у провідниках його обмотки буде індукватися ЕРС, напрямок якої визначається, як і в генераторі, за правилом правої руки, але він завжди протилежний напрямку струму в провідниках обмотки якоря (рис. 2.7). В зв'язку з тим, що струм в обмотці якоря створюється прикладеною напругою, ЕРС якоря спрямована назустріч цій напрузі живлення. Тому таку ЕРС називають *протиЕРС*.

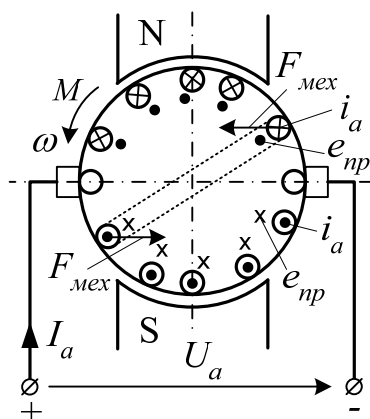


Рисунок 2.7 – До пояснення протиЕРС

Величини електромагнітного моменту  $M$  двигуна і ЕРС, індукованої в обмотці якоря, визначаються за тими ж виразами, що і для генератора:

$$M = c_m \Phi I_a; \quad E = c_m \omega \Phi.$$

Прикладена до обмотки якоря двигуна напруга врівноважується наведеною в ній протиЕРС, а також спадом напруги в якорному колі:

$$U = E + I_a R_a. \quad (2.13)$$

В номінальному режимі роботи двигуна велика частина напруги (близько 95%) врівноважується протиЕРС, а на спад напруги приходиться близько 5%. В пусковому режимі при вмиканні двигуна в мережу в перший момент якорі ще нерухомий ( $\omega = 0$ ), тому  $E = c_m \omega \Phi = 0$  і вся прикладена напруга врівноважується тільки спадом напруги в якорі  $I_a R_a$ .



Внаслідок цього струм якоря при пуску буде перевищувати струм номінального режиму приблизно в 20 разів, що є недопустимим. Щоб обмежити пусковий струм, у коло якоря двигуна вводять пусковий реостат  $R_n$ , який повинен обмежувати струм приблизно до  $1,5I_{a.ном}$  ( $I_{a.ном}$  – номінальний струм якоря). По мірі розгону двигуна реостат повинен виводитися і при роботі в номінальному режимі струм у якорі обмежується в основному наведеною в обмотці протиЕРС:

$$I_{a.ном} = \frac{U_{ном} - E_{ном}}{R_a}. \quad (2.14)$$

Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно змінити напрям обертового моменту, який він розвиває. Це можна зробити одним із двох способів:

1) зміною полярності напруги, підведеної до якоря двигуна, і, як наслідок, напрямку струму якоря;

2) зміною напрямку магнітного потоку головних полюсів, для чого змінюється напрям струму в обмотці збудження.

На практиці здебільшого використовується перший спосіб.

Розглянувши принципи дії генератора і двигуна, можна зробити висновок про те, що машини постійного струму оборотні. Це значить, що за певних умов генератори можуть працювати як двигуни і навпаки. Можливість двигунів працювати як генератори і, як наслідок, розвивати гальмівний момент, широко використовується на практиці.

## 2.4 Реакція якоря

Машини постійного струму можуть працювати або в режимі холостого ходу, коли корисна потужність, що знімається з машини, дорівнює нулю, або в режимі навантаження, коли з неї знімається корисна потужність (електрична – у генераторі, механічна – у двигуні). Кожна машина розраховується на визначені значення потужності, напруги, струму і частоти обертання. Цей режим навантаження, у якому машина може тривалий час працювати, не перегріваючись вище допустимої температури, називається *НОМІНАЛЬНИМ*, а величини, що характеризують

його – *номінальними величинами*. Останні наводяться в паспорті машини і перевищення їхніх значень є недопустимим (допускаються лише короткочасні перевантаження).

Корисна електрична потужність, яка знімається з обмотки якоря генератора, визначається з виразу

$$P_2 = UI_a. \quad (2.15)$$

Оскільки вихідна напруга генератора практично постійна, то потужність  $P_2$  змінюється пропорційно струму навантаження (струму якоря). При відсутності навантаження  $I_a = 0$  –  $P_2 = 0$ , що відповідає холостому ходу генератора.

Обмотка якоря двигуна споживає з мережі електричну потужність

$$P_1 = UI_a, \quad (2.16)$$

яка перетворюється в ньому в корисну механічну потужність  $P_2$ , що знімається з вала двигуна. При відсутності навантаження на валу двигуна ( $P_2 = 0$ ), він працює в режимі холостого ходу, але при цьому споживає з мережі невелику потужність

$$P_{10} = U_{\text{ном}}I_{a,0}, \quad (2.17)$$

необхідну для компенсації його власних втрат. При збільшенні навантаження на валу збільшується потужність  $P_1$  і струм  $I_a$ . Отже, в генераторі і в двигуні струм якоря залежить від корисного навантаження машини.

В режимі холостого ходу в генераторі струм якоря  $I_a = 0$ , а в двигуні він дуже малий ( $I_a \approx 0$ ) і ним можна знехтувати. Обмотка якоря в цьому режимі не створює магнітного поля і, як наслідок, в машині буде лише основне поле  $\Phi_0$ , створене обмоткою збудження (рис. 2.8, а).

В режимі навантаження ( $I_a \neq 0$ ) по обмотці якоря протікатиме струм, що буде створювати своє власне магнітне поле  $\Phi_a$ , картина якого при встановленні щіток на геометричну нейтраль і за відсутності збудження ( $I_z = 0$ ) зображена на рис. 2.8, б.

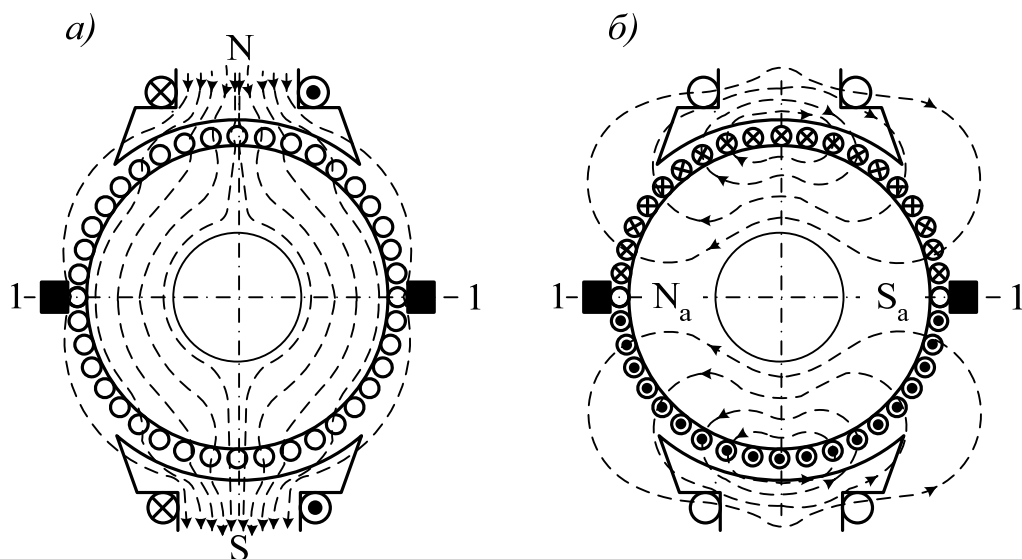


Рисунок 2.8 – Магнітне поле індуктора (а) і якоря (б)

Як видно з рис. 2.8, б, вісь поля якоря спрямована по осі щіток 1–1. Поле якоря, накладаючись на поле індуктора, буде спотворювати закон його розподілу в межах полюсного розподілу (спотворювати форму поля), а також може змінити його величину. Цей вплив поля якоря на основне поле машини називається *реакцією якоря*.

Відносний напрямок основного поля і поля якоря залежить від положення щіток на колекторі. Якщо щітки розташовані на геометричній нейтралі, то поле обмотки якоря перпендикулярне до основного магнітного поля машини, і в такому випадку реакцію якоря називають *поперечною* (рис. 2.9). Полярність полюсів і напрям струмів якоря на цьому рисунку відповідають випадкові, коли в режимі генератора (Г) якор обертається за годинниковою стрілкою, а в режимі двигуна (Д) – проти годинникової стрілки.

Як впливає з рис. 2.9, поперечна реакція якоря викликає послаблення поля під одним краєм полюса і його посилення під іншим, внаслідок чого вісь результуючого поля повертається в генераторі за напрямом обертання якоря, а в двигуні – у зворотну сторону.

Під впливом поперечної реакції якоря нейтральна лінія на поверхні якоря, на якій  $B_{\delta} = 0$ , повертається з положення геометричної нейтралі 1–1 на деякий кут  $\alpha$  у положення 2–2 (рис. 2.9), що називається *лінією фізичної*

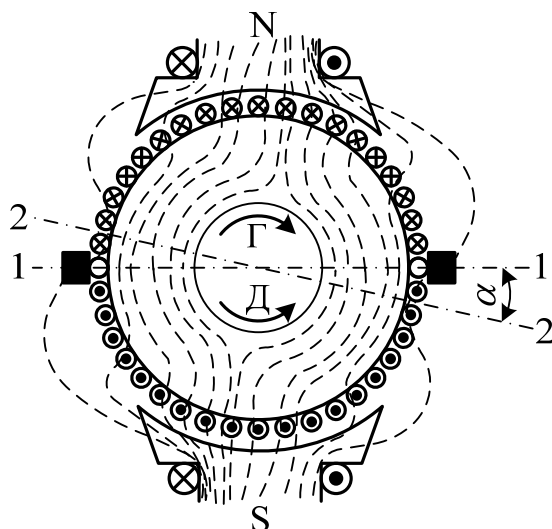


Рисунок 2.9 –Результуюче магнітне поле при встановленні щіток на геометричну нейтраль

*нейтралі.* У генератора фізична нейтраль повернена в напрямі обертання якоря, а в двигуні – у зворотну сторону.

З рис. 2.8, б випливає, що при обертанні якоря в провідниках, показаних у лівій частині рис. 2.8, б, поле поперечної реакції якоря індукує ЕРС одного напрямку, а в правій частині – іншого. В результаті цього при встановленні щіток на геометричну нейтраль сумарна ЕРС від поля реакції якоря в кожній паралельній вітці обмотки і на щітках дорівнює нулю.

Крім того, поле поперечної реакції якоря може здійснювати і кількісний вплив на результуюче поле машини:

а) якщо внаслідок сумарної дії основного поля і поля якоря магнітне коло машини залишається ненасиченим ( $\mu = \text{const}$ ), то збільшення поля під одним краєм полюса компенсується його зменшенням під іншим, внаслідок чого результуюче поле при навантаженні буде таким самим, як і при холостому ході, тобто  $\Phi = \Phi_0$ . Ненасичений режим роботи магнітного кола здебільшого виникає при малих значеннях струмів збудження і якоря;

б) якщо магнітне коло машини виявляється насиченим ( $\mu \neq \text{const}$ ), що відзначається при струмах  $I_a$  і  $I_z$ , близьких до номінальних значень, то результуюче поле при навантаженні зменшується на деяке значення  $\Delta\Phi$ :

$$\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi. \quad (2.18)$$

Зменшення магнітного потоку приводить до відповідного зменшення ЕРС обмотки якоря:

$$E = c_m \omega \Phi = c_m \omega (\Phi_0 - \Delta \Phi) = c_m \omega \Phi_0 - c_m \omega \Delta \Phi = E_0 - \Delta E, \quad (2.19)$$

де  $E_0$  – ЕРС від основного поля;

$\Delta E$  – зменшення ЕРС за рахунок поперечної реакції якоря.

Якщо щітки зміщені з геометричної нейтралі на  $90^\circ$  електричних, то поле якоря діє вздовж осі полюсів і називається *полем повздовжньої реакції якоря*. Це поле в залежності від напрямку струму в якорі намагнічує або розмагнічує поле полюсів, і в результаті його взаємодії з полем полюсів електромагнітний момент не виникає. Індукована при обертанні якоря ЕРС на щітках буде в цьому випадку також рівна нулю.

Зв'язок між геометричним та електричним кутами такий:

$$\alpha_{геом}^0 = \frac{\alpha_{ел}^0}{p}. \quad (2.20)$$

При повороті щіток генератора в напрямі обертання і щіток двигуна проти напрямку обертання виникає повздовжня розмагнічувальна реакція якоря, що викликає зменшення потоку полюсів. При зміщенні щіток у зворотному напрямі виникає повздовжня намагнічувальна реакція якоря, що викликає збільшення магнітного потоку полюсів.

## 2.5 Класифікація генераторів за способом збудження

Для нормальної роботи генератора в ньому повинно бути створене основне магнітне поле, для чого обмотка збудження генератора повинна бути підключена до джерела постійної напруги. Властивості генераторів постійного струму залежать від числа і способу підключення обмоток збудження або, як говорять, від способу збудження генераторів. Залежно від способу збудження розрізняють генератори з незалежним збудженням та з самозбудженням.

*Генератори з незалежним збудженням* виконуються з електромагнітним і магнітоелектричним збудженням.

У генераторів з електромагнітним збудженням обмотка збудження F1–F2, розташована на головних полюсах, підключається до незалежного джерела живлення (рис. 2.10); в цьому випадку обмотка збудження називається незалежною обмоткою збудження (НОЗ). Струм кола збудження  $I_z$  може змінюватися в широких межах за допомогою резистора  $R_z$ . Потужність, споживана обмоткою збудження, невелика й у номінальному режимі складає 1–5% номінальної потужності, що знімається з якоря генератора. Звичайно, процентне значення потужності збудження зменшується із зростанням номінальної потужності машини.

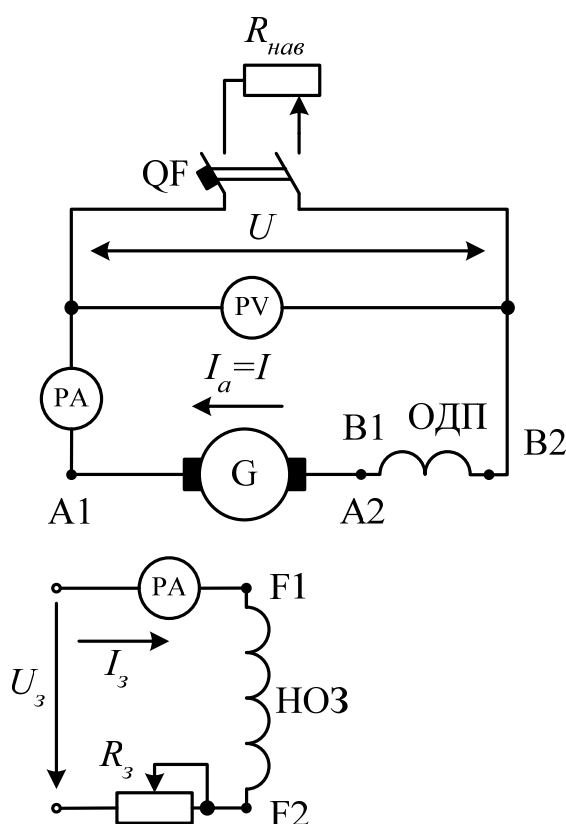


Рисунок 2.10 – Схема генератора з незалежним збудженням

Номінальна напруга обмотки збудження генератора вибирається рівною або (інколи) меншою номінальної напруги обмотки якоря A1–A2. Для зменшення іскріння щіток в коло якоря послідовно з обмоткою якоря вмикається обмотка додаткових полюсів (ОДП) B1–B2.

Магнітоелектричні генератори збуджуються постійними магнітами, з яких виготовляються полюси машини. З таким способом збудження

виконуються генератори переважно невеликої потужності. Недоліком генераторів з магнітоелектричним збудженням є трудність регулювання напруги.

У генераторів із самозбудженням обмотка збудження отримує живлення від власного якоря. Залежно від способу її вмикання генератори із самозбудженням підрозділяються на генератори з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

Схема з'єднання генератора з паралельним збудженням показана на рис. 2.11.

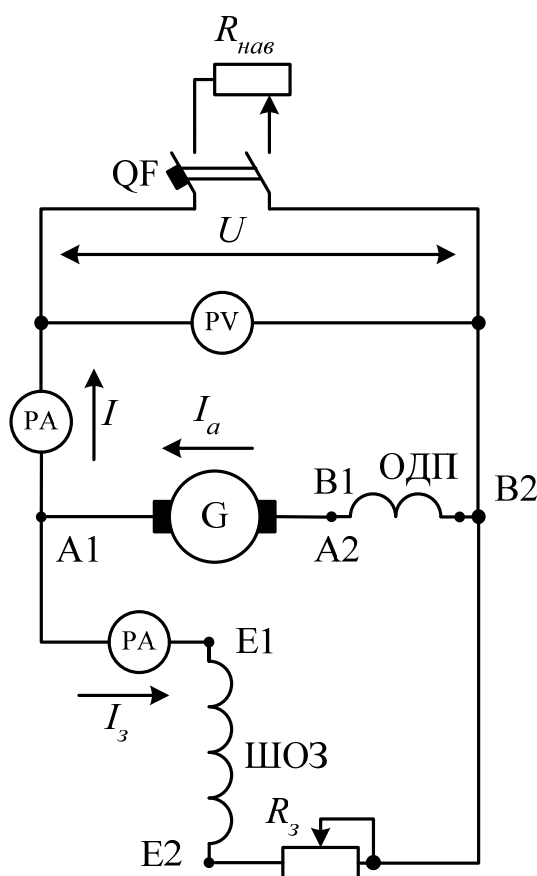


Рисунок 2.11 – Схема генератора з паралельним збудженням

Коло обмотки збудження E1–E2 вмикають паралельно якорю, від якого вона і отримує живлення; в цьому випадку обмотку збудження називають паралельною обмоткою збудження або шунтовою (ШОЗ), яку розраховують на напругу якоря.

Резистор  $R_z$  дає можливість змінювати струм збудження  $I_z$ , а отже, і вихідну напругу  $U$ . Струм якоря  $I_a$  у такого генератора дорівнює сумі

$$I_a = I + I_3, \quad (2.21)$$

де  $I$  – струм навантаження.

Струм збудження відносно малий і для номінального режиму складає 1–5% номінального струму машини.

У генератора з *послідовним збудженням* (рис. 2.12) обмотка збудження

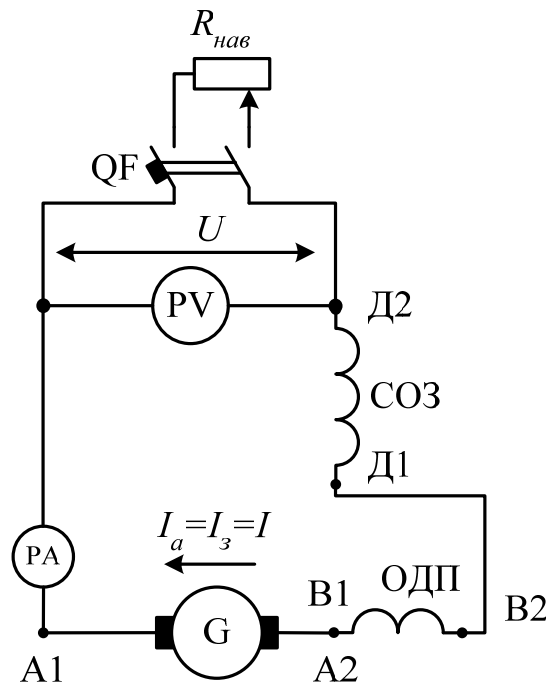


Рисунок 2.12 – Схема генератора з послідовним збудженням

з'єднується послідовно з якорем; в цьому випадку обмотку збудження називають послідовною обмоткою збудження або серієсною (СОЗ). Її струм збудження дорівнює струму якоря:

$$I_3 = I_a = I. \quad (2.22)$$

У генераторів із *змішаним збудженням* (рис. 2.13) на полюсах розміщують дві обмотки. Одна з них має велике число витків і виконана з провідників відносно невеликого перерізу – вмикається паралельно якорю, а інша обмотка з малим числом провідників великого перерізу – вмикається послідовно з якорем.



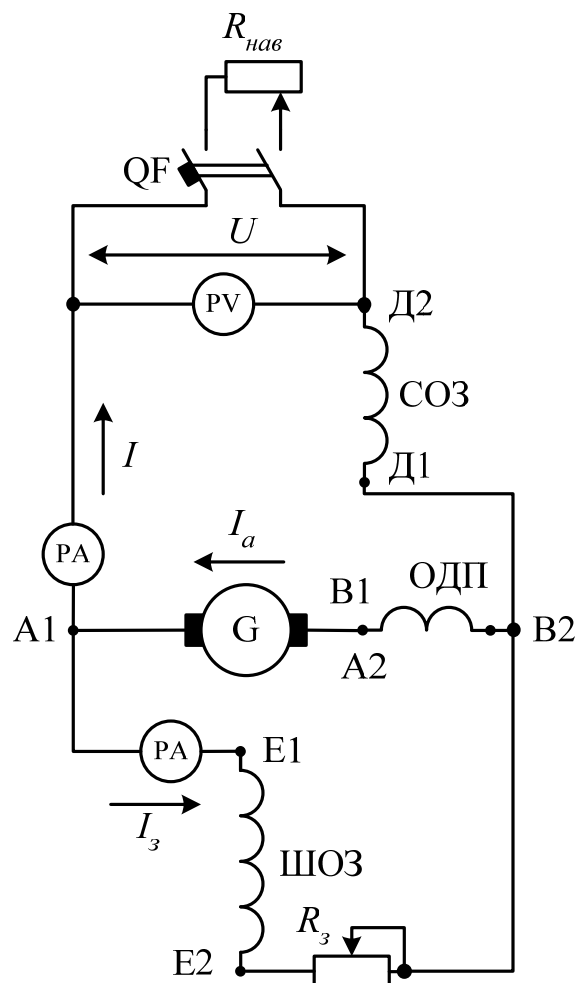


Рисунок 2.13 – Схема генератора із змішаним збудженням

Струм якоря такого генератора

$$I_a = I + I_3. \quad (2.23)$$

В цих генераторів паралельна і послідовна обмотки можуть бути увімкнені узгоджено (магніторушійні сили цих обмоток направлені узгоджено) і зустрічно (їхні магніторушійні сили спрямовані зустрічно). В залежності від цього розрізняють генератори змішаного узгодженого вмикання і генератори змішаного зустрічного вмикання.

В основному в генераторах із змішаним збудженням основна частина магніторушійної сили збудження створюється паралельною обмоткою.

Генератори із паралельним, послідовним і змішаним збудженням називають відповідно *генераторами шунтового, серієсного і компаундного збудження*.

Номінальна потужність, яка споживається обмоткою збудження, визначається з виразу

$$P_{з.ном} = U_{з.ном} \cdot I_{з.ном}, \quad (2.24)$$

а вихідна номінальна потужність генератора –

$$P_{2ном} = U_{ном} \cdot I_{ном}. \quad (2.25)$$

## 2.6 Процес самозбудження генератора з паралельним збудженням

Самозбудження генератора з паралельним збудженням відбувається за дотримання таких умов:

- 1) наявності залишкового магнітного потоку полюсів;
- 2) правильного підключення кінців обмотки збудження або правильного напрямку обертання.

Крім того, опір кола збудження  $R_z$  при даній швидкості обертання  $n$  повинен бути меншим за деяке критичне значення або швидкість обертання при даному  $R_z$  повинна бути вищою деякої критичної величини [2].

Для самозбудження достатньо, щоб залишковий потік складав 2-3% від номінального. Залишковий потік такої величини практично завжди є у машини, яка вже працювала. Машину, яку щойно виготовили, або машину, яка за якимись причинами розмагнітилася, необхідно намагнітити, пропускаючи через обмотку збудження струм від стороннього джерела живлення.

При дотриманні необхідних умов процес самозбудження протікає в такий спосіб. Невелика ЕРС, яка індукується в якорі залишковим магнітним потоком, викликає в обмотці збудження малий струм  $I_z$ . Цей струм викликає збільшення потоку полюсів, як наслідок, збільшення ЕРС, що обумовлює подальше збільшення струму збудження  $I_z$  і т.д. Такий лавиноподібний процес самозбудження продовжується доти, поки напруга генератора не досягне сталого значення.

Якщо підключення кінців обмотки збудження або напрям обертання неправильні, то виникає струм  $I_z$  зворотного напрямку, що викликає

послаблення залишкового потоку і зменшення ЕРС, внаслідок чого самозбудження неможливе. В такому випадку необхідно переключити кінці обмотки збудження або змінити напрям обертання. Щодо дотримання цих умов можна переконатися, стежачи за допомогою вольтметра з малими межами вимірювання за напругою якоря при замиканні і розмиканні кола збудження.

Полярність затискачів генератора при самозбудженні визначається полярністю залишкового потоку. Якщо при заданому напрямку обертання полярність генератора необхідно змінити, то потрібно перемагнітити машину шляхом подачі струму в обмотку збудження від стороннього джерела.

Розглянемо докладніше процес самозбудження на холостому ході.

На рис. 2.14, а крива 1 є характеристикою холостого ходу (XX), а пряма 2 – так званою характеристикою кола збудження або залежністю  $U_3 = R_3 I_3$ , де  $R_3 = \text{const}$  – опір кола збудження, включаючи опір регулювального реостата.

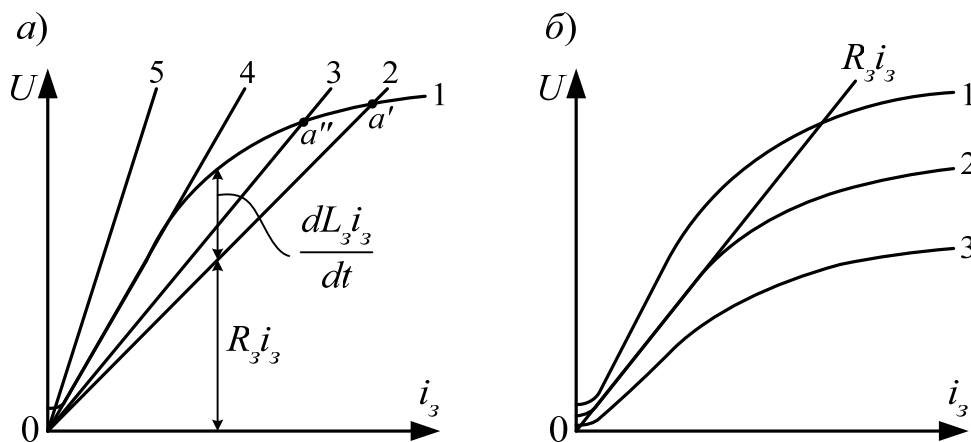


Рисунок 2.14 – Самозбудження генератора з паралельним збудженням при різних опорах кола збудження (а) і при різних швидкостях обертання (б)

У процесі самозбудження  $I_3 \neq \text{const}$ , напруга на кінцях кола збудження

$$U_3 = R_3 I_3 + \frac{d(L_3 I_3)}{dt}, \quad (2.26)$$

де  $L_3$  – індуктивність кола збудження.

Напруга якоря на холостому ході ( $I = 0$ )

$$U = E - I_3 R_{a\Sigma} \quad (2.27)$$

зображається на рис. 2.14, *a* кривою 1. Оскільки струм  $I_3$  малий, то практично  $U = E$ . Але в генератора паралельного збудження  $U = U_3$ . Тому різниця ординат кривої 1 і прямої 2 на рис. 2.14, *a* складає  $\frac{d(L_3 I_3)}{dt}$  і характеризує швидкість і напрям зміни  $I_3$ . Якщо пряма 2 проходить нижче кривої 1, то  $\frac{d(L_3 I_3)}{dt} > 0$ , струм  $I_3$  зростає і машина самозбуджується до напруги, що відповідає на рис. 2.14, *a* точці перетину кривої 1 і прямої 2, у якій  $\frac{d(L_3 I_3)}{dt} = 0$  і тому зростання  $I_3$  припиниться.

З розгляду рис. 2.14, *a* випливає, що зростання  $I_3$  і, як наслідок,  $U_a$  спочатку відбувається повільно, потім прискорюється і до кінця процесу знову сповільнюється. Процес самозбудження припиняється або обмежується в точці  $a'$  внаслідок криволінійності характеристики ХХ. При відсутності насичення напруга  $U$  теоретично зростає до  $U = \infty$ .

Якщо  $R_3$  збільшити, то замість прямої 2 отримаємо пряму 3 (рис. 2.14, *a*). Процес самозбудження при цьому сповільнюється і напруга машини, обумовлена точкою  $a''$ , буде меншою. При подальшому збільшенні  $R_3$  отримаємо пряму 4, дотичну до кривої 1. При цьому машина буде знаходитися на межі самозбудження: при невеликих змінах  $n$  або  $R_3$  (наприклад, внаслідок нагрівання) машина може розвивати невелику напругу або втрачати її. Значення  $R_3$ , що відповідає прямій 4, називається *критичним* ( $R_{3,кр}$ ). При  $R_3 > R_{3,кр}$  (пряма 5) самозбудження неможливе і напруга машини визначається залишковим потоком.

Зі сказаного випливає, що генератор паралельного збудження може працювати тільки за наявності визначеного насичення магнітного кола. За допомогою зміни  $R_3$  можна регулювати  $U$  до значення  $U = U_{мін}$  що відповідає початковій коліна кривої характеристики ХХ. У машинах звичайного виконання  $U_{мін} = (0,65 \div 0,75) U_{ном}$ .

ЕРС  $E$  пропорційна  $n$  і для різних значень  $n_1 > n_2 > n_3$  отримаємо характеристики ХХ, зображені на рис. 2.14, б кривими 1, 2, 3. З цього рисунка видно, що при деякому значенні  $R_3$  у випадку кривої 1 маємо стійке самозбудження, при кривій 2 машина знаходиться на межі самозбудження і при кривій 3 самозбудження неможливе. Тому для кожного даного значення  $R_3$  є таке значення швидкості обертання  $n = n_{кр}$  (крива 2 на рис. 2.14, б), нижче якого самозбудження неможливе. Таке значення  $n = n_{кр}$  називається *критичною швидкістю обертання*.

## 2.7 Рівняння обертових моментів для генератора

Рівняння обертових моментів для сталого режиму роботи генератора має вигляд:

$$M_b = M_0 + M. \quad (2.28)$$

В цьому виразі

$$M_b = \frac{P_1}{\omega} \quad (2.29)$$

є прикладеним до вала генератора моментом обертання первинного двигуна,

$$M = \frac{P_{em}}{\omega} \quad (2.30)$$

– електромагнітний момент, який розвивається якорем, і

$$M_0 = M_{тр} + M_{мг.д} = \frac{P_{мх}}{\omega} + \frac{P_{мг} + P_{д}}{\omega} \quad (2.31)$$

– обертовий момент, що відповідає втратам на тертя ( $M_{тр} = \frac{P_{мх}}{\omega}$ ,  $P_{мх}$  – механічні втрати) і магнітним додатковим втратам ( $M_{мг.д} = \frac{P_{мг} + P_{д}}{\omega}$ ,  $P_{мг}$  – магнітні втрати,  $P_{д}$  – додаткові втрати), які покриваються за рахунок механічної потужності.

В неусталеному режимі, коли швидкість обертання змінюється, виникає динамічний момент обертання

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.32)$$

де  $J$  – момент інерції обертових частин генератора.

Динамічний момент відповідає зміні кінетичної енергії обертових мас.

При збільшенні швидкості обертання момент  $M_{\text{дин}} > 0$  і момент  $M_0 + M$  є гальмівним. У даному випадку кінетична енергія обертових мас збільшується за рахунок роботи первинного двигуна.

Якщо момент  $M_{\text{дин}} < 0$ , то він діє в напрямі обертання і є рушійним, підтримуючи обертання за рахунок зменшення кінетичної енергії обертових мас.

Таким чином, у загальному випадку, при  $n \neq \text{const}$ ,

$$M_{\text{в}} = M_0 + M + M_{\text{дин}}. \quad (2.33)$$

Момент

$$M_{\text{с}} = M_0 + M \quad (2.34)$$

відповідає статичним силам. Його називають *статичним моментом*. При такому трактуванні можна записати

$$M_{\text{в}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}}. \quad (2.35)$$

## 2.8 Класифікація двигунів за способом збудження

Властивості і характеристики двигунів постійного струму істотно залежать від того, як змінюється магнітний потік двигунів при зміні їхнього механічного навантаження. Характер зміни магнітного потоку залежить у свою чергу від числа і способу вмикання обмоток збудження, тобто від способу збудження. В залежності від способу збудження двигуни підрозділяються аналогічно генераторам на двигуни із незалежним, паралельним, послідовним і змішаним збудженням. Схеми двигунів і генераторів з однаковим видом збудження однакові (рис. 2.15).

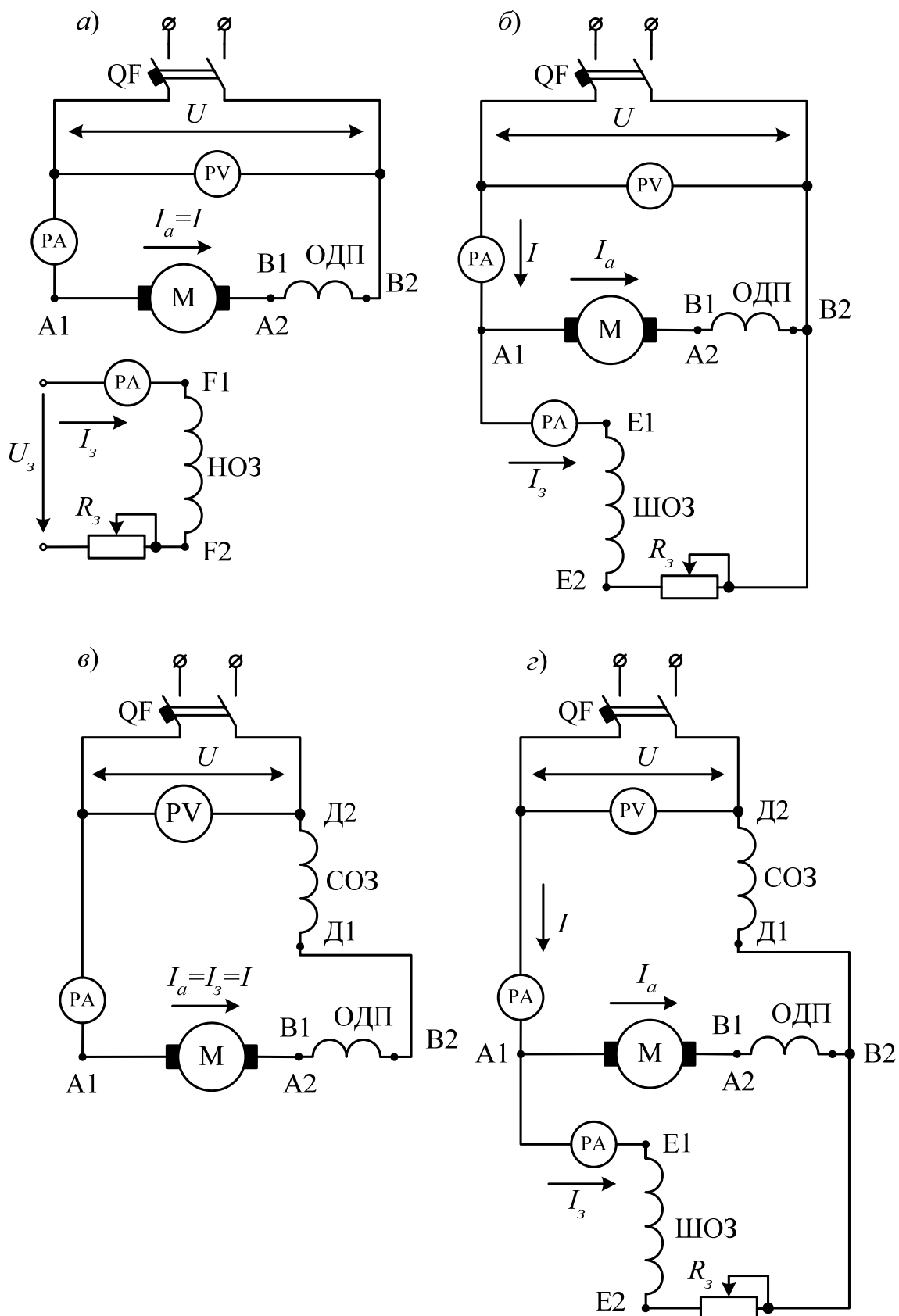


Рисунок 2.15 – Схеми двигунів постійного струму з незалежним (а), паралельним (б), послідовним (в) і змішаним (г) збудженням

На практиці застосування знаходять двигуни всіх вище вказаних способів збуджень.

## 2.9 Рівняння обертових моментів для двигуна

При роботі машини в режимі двигуна напрям кутової швидкості обертання якоря визначається напрямом електромагнітного моменту  $M$  двигуна. При усталеному режимі роботи момент  $M$  двигуна зрівноважується статичним моментом опору  $M_c$ , який виникає на валу двигуна під дією робочої машини. Якщо машина працює в режимі двигуна – статичний момент  $M_c$  є гальмівним і направлений назустріч напрямку обертання якоря.

Електромагнітний момент двигуна

$$M = \frac{P_{em}}{\omega} \quad (2.36)$$

є рушійним і діє в напрямі обертання, витрачається на зрівноваження гальмівних моментів:

- 1) моменту  $M_0$ , який відповідає втратам  $p_{mg}$ ,  $p_d$ ,  $p_{mx}$ , що покривається за рахунок механічної потужності;
- 2)  $M_g$  – моменту навантаження на валу, створюваного робочою машиною або механізмом;
- 2)  $M_{дин}$  – динамічного моменту.

При цьому

$$M_g = \frac{P_2}{\omega}. \quad (2.37)$$

Таким чином,

$$M = M_0 + M_g + M_{дин} \quad (2.38)$$

або

$$M = M_c + M_{дин}, \quad (2.39)$$



де

$$M_c = M_0 + M_\epsilon \quad (2.40)$$

є статичним моментом опору.

При усталеному режимі роботи, коли  $n = \text{const}$  і  $M_{\text{дин}} = 0$ ,

$$M = M_c. \quad (2.41)$$

Корисний обертовий момент двигуна  $M$  (Н·м) може бути виражений через корисну потужність  $P_2$  (кВт) і частоту обертання  $n$  (об/хв):

$$M = 9550 \frac{P_2}{n}. \quad (2.42)$$

## РОЗДІЛ 3

### ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ

#### 3.1 Лабораторне заняття №1П – Дослідження характеристик генераторів постійного струму з незалежним, паралельним і змішаним збудженням

Мета роботи: ознайомитись з конструкцією, принципом дії та основними характеристиками генераторів постійного струму при різних способах їх збудження.

##### 3.1.1 Короткі теоретичні відомості про генератори постійного струму

Властивості електричних машин описуються нелінійними залежностями, які зображаються графічно – характеристичними кривими, або скорочено – *характеристиками* [1]. Основними характеристиками, які визначають властивості генераторів постійного струму, є характеристика холостого ходу, зовнішня, регульовальна, навантажувальна характеристики і характеристика короткого замикання. Всі характеристики генераторів знімаються при постійній частоті обертання  $n = n_{ном} = const$ .

##### 3.1.1.1 Генератор з незалежним збудженням

*Характеристикою холостого ходу* називається залежність вихідної напруги від струму збудження  $U_0 = f(I_3)$  за відсутності струму якоря ( $I_a = 0$ ), для чого коло навантаження повинно бути розімкненим.

В цьому режимі в генераторі відсутні реакція якоря і спад напруги в якірному колі, в зв'язку з чим вихідна напруга  $U_0$  дорівнює ЕРС  $E_0$ , що наводиться в обмотці якоря:

$$U_0 = E_0 = c_m \omega \Phi_0, \quad (3.1)$$

яка при постійній швидкості  $\omega$  пропорційна основному потоку  $\Phi_0$ . Оскільки залежність  $\Phi_0 = f(I_3)$  є кривою намагнічування машини, характеристика холостого ходу повинна повторювати її вигляд. Якщо магнітне коло машини було повністю розмагнічене, то при збільшенні

струму збудження залежність  $U_0 = f(I_z)$  графічно зображається кривою 1 – кривою початкового намагнічування (рис. 3.1).

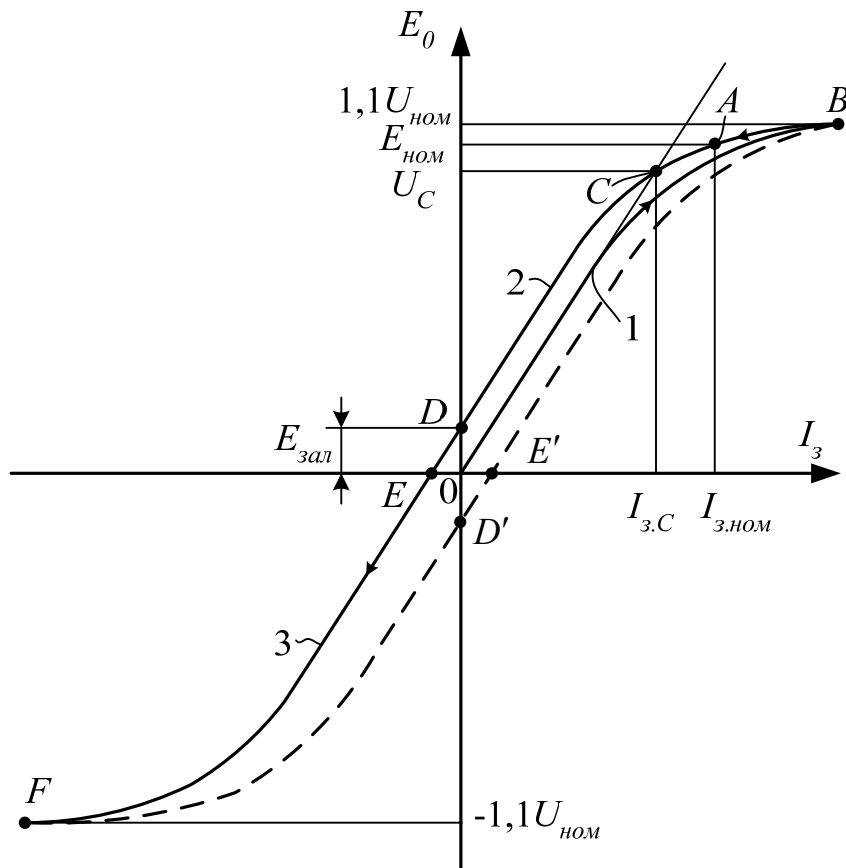


Рисунок 3.1 – Характеристика холостого ходу генератора з незалежним збудженням

Кожному значенню струму збудження  $I_z$  при його зменшенні (крива 2) відповідають дещо більші значення потоку  $\Phi_0$  і ЕРС  $E_0$ , ніж при збільшенні струму збудження. При  $I_z = 0$  генератор має невеликий потік залишкового магнетизму  $\Phi_{зал}$  і відповідну йому ЕРС  $E_{зал}$  (відрізок  $OD$ ). Здебільшого величина залишкової ЕРС  $E_{зал}$  не перевищує  $(2\div 6)\%$  від номінального значення  $E_{ном}$ .

За розрахункову приймають характеристику 1. Точку  $A$ , що відповідає номінальним параметрам генератора, вибирають при розрахунках на „колiні” (на вигині) характеристики холостого ходу. Вибирати точку в області значного насичення феромагнітних матеріалів недоцільно, тому що це призводить до значного збільшення струму, потужності й габаритних розмірів обмотки збудження при незначному збільшенні ЕРС.

Навантажувальна характеристика є залежністю  $U = f(I_z)$  при постійному значенні струму навантаження, здебільшого при  $I_a = I_{ном} = \text{const}$ .

Рівняння генератора в цьому режимі має вигляд:

$$U = E - I_a R_a = E_0 - \Delta E - I_a R_a. \quad (3.2)$$

При постійному струмі навантаження  $I_a$  спад напруги  $I_a R_a = \text{const}$ , де  $\Delta E$  залежить від міри насичення машини, тобто від струму збудження  $I_z$ . При малих  $I_z$  магнітне коло насичене, тому поперечна реакція якоря тільки викривляє основне поле машини, не змінюючи його за величиною, внаслідок чого  $\Delta E = 0$ , а  $U = E_0 - I_a R_a$  (рис. 3.2, ділянка  $ke$  навантажувальної характеристики 1).

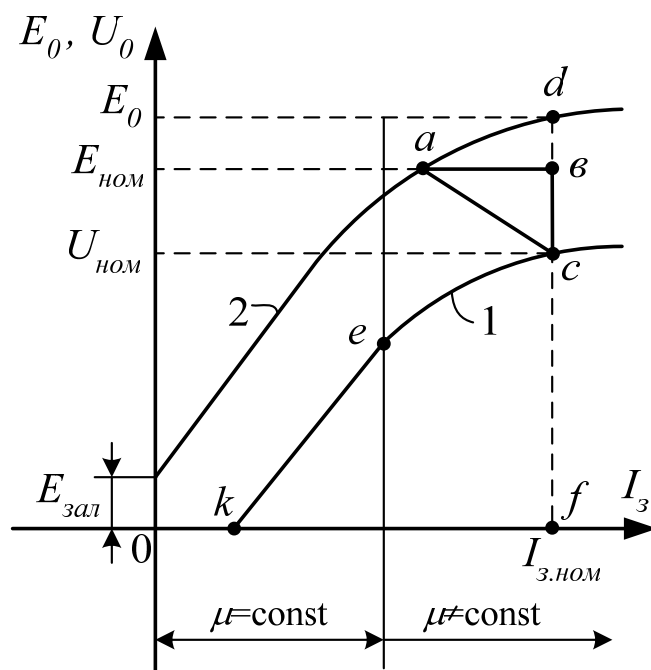


Рисунок 3.2 – Навантажувальна характеристика генератора з незалежним збудженням

При насиченні магнітного кола поперечна реакція якоря починає зменшувати основне магнітне поле машини, а як наслідок, і ЕРС, яка наводиться в обмотці якоря, що враховується в рівнянні величиною  $\Delta E$ . Зі збільшенням струму збудження ступінь зменшення ЕРС  $\Delta E$  також зростає. Внаслідок цього навантажувальна характеристика 1 в ненасиченій області розміщена майже паралельно характеристиці холостого ходу 2, а в зоні

насичення вони поступово розходяться через збільшення  $\Delta E$  (рис. 3.2, ділянка  $ec$ ). Характеристику холостого ходу можемо розглядати як один із випадків навантажувальної характеристики при  $I_a = 0$ .

Наочне уявлення про ці фактори дає характеристичний трикутник  $avc$  (див. рис. 3.2). Для побудови характеристичного трикутника на навантажувальній характеристиці (крива 1) відмічають точку  $c$ , що відповідає номінальній напрузі  $U_{ном}$ . Потім відкладають вертикальний відрізок  $vc$ , рівний спаду напруги в колі якоря при номінальному навантаженні ( $I_{a.ном}R_a$ ) і проводять горизонтальний відрізок  $va$  до перетину з характеристикою холостого ходу (крива 2). З'єднавши точку  $a$  з точкою  $c$ , отримують трикутник  $avc$ , який називають характеристичним. Катет  $vc$  пропорційний струму якоря. Катет  $av$  в масштабі струму збудження є собою розмагнічуючою дією поперечної реакції якоря. Інакше кажучи, він пропорційний тій частині струму збудження генератора, яка йде на компенсацію розмагнічуючої реакції якоря при номінальному режимі роботи.

Відрізок  $fd$  на рис. 3.2 в масштабі напруги відповідає виразу  $E_0 = c_m \omega \Phi_0$ , відрізок  $fc$  – номінальній напрузі  $U_{ном}$ , а відрізок  $vd$  відповідає  $\Delta E$ .

*Зовнішня характеристика* – це залежність  $U = f(I_a)$  за відсутності будь-якого регулювання в колі збудження, тобто при  $R_z = \text{const}$ . Оскільки напруга джерела не змінюється, то не буде змінюватись і струм збудження  $I_z$ , а як наслідок,  $\Phi_0 = \text{const}$  і  $E_0 = c_m \omega \Phi_0 = \text{const}$ .

В режимі холостого ходу ( $I_a = 0$ )  $U_0 = E_0$ , а при збільшенні навантаження напруга почне зменшуватися відповідно до рівняння

$$U = E_0 - \Delta E - I_a R_a. \quad (3.3)$$

При номінальному струмі якоря  $I_{a.ном}$  і струмі збудження  $I_{z.ном}$  напруга на виході генератора повинна бути номінальною. Різниця  $\Delta U_{ном} = U_0 - U_{ном}$  називається *зміною напруги генератора*.

Відповідно до основного рівняння

$$\Delta U_{ном} = \Delta E_{ном} + I_{a.ном} R_a, \quad (3.4)$$

тобто зміна напруги генератора обумовлена:

- 1) зменшенням ЕРС в результаті розмагнічуючої дії реакції якоря;
- 2) спадом напруги в опорах кола якоря.

Величина  $\Delta U_{ном}$  здебільшого виражається у відсотках від номінальної напруги:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{\Delta U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (3.5)$$

В сучасних генераторах  $\Delta U_{ном}$  в основному складає 5–10% номінальної напруги  $U_{ном}$ . Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження подана на рис. 3.3 (крива 1).

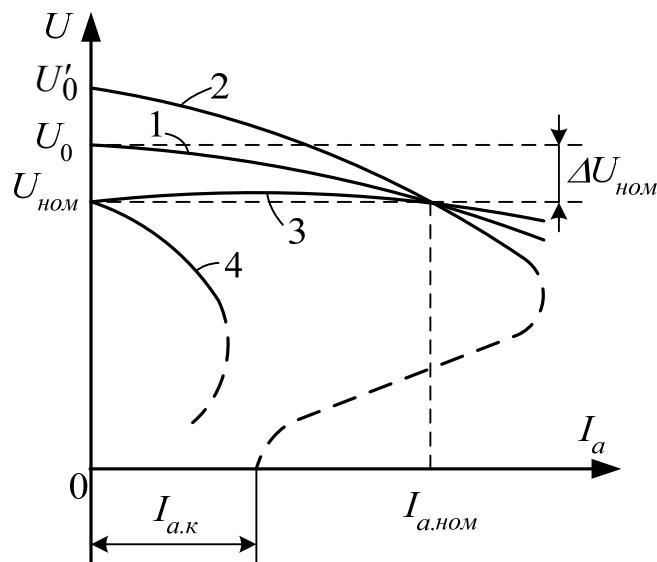


Рисунок 3.3 – Зовнішня характеристика генератора з незалежним збудженням

Зовнішню характеристику можна побудувати за характеристикою холостого ходу і характеристичним трикутником (рис. 3.4).

В координатних осях  $U$ ,  $I_z$  будують спадну частину характеристики холостого ходу і характеристичний трикутник  $авс$ . Характеристичний трикутник розміщують так само, як і на рис. 3.2, тобто його вертикальний катет  $вс$  співпадає з лінією усталеного струму збудження  $I_{з,ном}$ , а вершина  $а$  знаходиться на лінії характеристики холостого ходу; положення вершини  $с$  визначається напругою  $U = U_{ном}$  на затискачах генератора при



напруга на затискачах генератора знижується при збільшенні струму якоря  $I_a$ , що видно із зовнішньої характеристики, то для підтримання його постійним потрібно збільшувати ЕРС  $E_0$  збільшуючи струм збудження.

$$U = E_0 - \Delta E - I_a R_a = c_m \omega \Phi_0 \uparrow - \Delta E - I_a R_a = const. \quad (3.7)$$

Регулювальна характеристика генератора з незалежним збудженням зображена на рис. 3.5 (крива 1).

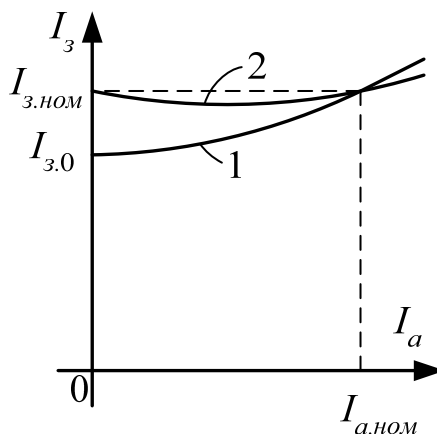


Рисунок 3.5 – Регулювальна характеристика генератора з незалежним збудженням

Характеристика короткого замикання – це залежність  $I_a = f(I_z)$  при  $U = 0$ . При короткому замиканні обмотки якоря генератора його рівняння має вигляд:

$$0 = E_{0к} - I_{a.к} R_a, \quad (3.8)$$

звідки

$$E_{0к} = I_{a.к} R_a, \quad (3.9)$$

а

$$I_{a.к} = \frac{E_{0к}}{R_a} = \frac{k_e \cdot I_z}{R_a}, \quad (3.10)$$



де  $k_e = E_{0к} / I_z$  – коефіцієнт пропорційності ЕРС.

При  $I_{a.к} = I_{a.ном}$  ЕРС  $E_{0к}$  в основному не перевищує 5% номінальної напруги. При цьому магнітне коло машини ненасичене і тому характеристика короткого замикання є прямою лінією (рис. 3.6).

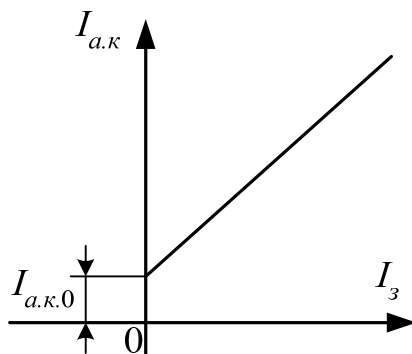


Рисунок 3.6 – Характеристика короткого замикання генератора з незалежним збудженням

Оскільки в машині є залишковий потік, то при  $I_z = 0$  в колі якоря протікає струм короткого замикання  $I_{a.к.0}$ , обумовлений залишковою ЕРС:

$$I_{a.к.0} = \frac{E_{зал}}{R_a} = \frac{c_m \omega \Phi_{зал}}{R_a}. \quad (3.11)$$

### 3.1.1.2 Генератор з паралельним збудженням

*Зовнішня характеристика* генератора з паралельним збудженням, як і генератора з незалежним збудженням, показує як впливає струм навантаження генератора на його напругу без будь-якого регулювання в колі збудження ( $R_z = \text{const}$ ).

На відміну від генератора з незалежним збудженням, в цьому генераторі струм збудження  $I_z$  залежить від вихідної напруги. Зі збільшенням струму навантаження зростає струм якоря  $I_a$ , що призводить до зменшення напруги за рахунок впливу реакції якоря і збільшення спаду напруги  $I_a R_a$ . Але зі зниженням  $U$  зменшується і струм збудження, що викликає зниження основного магнітного потоку  $\Phi_0$  і  $E_0$ , а це, в свою чергу, ще більше знижує вихідну напругу. Таким чином, вихідна напруга

генератора з паралельним збудженням зменшується з ростом навантаження в більшій мірі, ніж в генераторі з незалежним збудженням (див. рис. 3.3, крива 2).

Інші характеристики генератора з паралельним збудженням мають такий самий вигляд, як і в генератора з незалежним збудженням, за винятком характеристики короткого замикання, яку неможливо зняти через те, що при  $U = 0$  струм збудження  $I_z = 0$ .

### 3.1.1.3 Генератор зі змішаним збудженням

Зовнішня характеристика генератора зі змішаним збудженням також показує залежність  $U = f(I_a)$  при  $R_z = \text{const}$ . В цьому генераторі на основних полюсах розміщені дві обмотки – паралельна (шунтова) і послідовна (серієсна), які можна ввімкнути узгоджено або зустрічно. При узгодженому вмиканні їхні потоки додаються, при зустрічному – віднімаються. Напряга генератора визначається рівнянням

$$U = c_m \omega (\Phi_{ш} \pm \Phi_c) - \Delta E - I_a R_a, \quad (3.12)$$

де  $\Phi_{ш}$  – потік, створений струмом паралельної (шунтової) обмотки збудження,

$\Phi_c$  – потік, створений струмом послідовної (серієсної) обмотки збудження.

В режимі холостого ходу  $I_a = 0$ , тому  $c_m \omega \Phi_c = 0$  і вхідна напруга визначається тільки потоком паралельної обмотки  $U_0 = c_m \omega \Phi_{ш}$ . Ця напруга повинна дорівнювати номінальному його значенню, тобто  $U_0 = U_{ном}$ . З цієї умови і визначається величина потоку  $\Phi_{ш}$ .

При збільшенні струму навантаження збільшується  $\Delta E$  і  $I_a R_a$ , але одночасно збільшується і ЕРС  $c_m \omega \Phi_c$ , яка наводиться в обмотці якоря потоком серієсної обмотки. При узгодженому вмиканні ЕРС  $c_m \omega \Phi_c$  призводить до різкого зменшення напруги при збільшенні навантаження (рис. 3.3, крива 4).

Постійна напруга на затискачах генератора змішаного збудження при знятті регулювальної характеристики здебільшого підтримується

регулюванням струму в паралельній обмотці збудження. Якщо за відсутності регулювання в колі збудження (зовнішня характеристика) напруга із зростанням навантаження збільшується, до для її підтримання потрібно зменшувати струм збудження (рис. 3.5, крива 2) і навпаки.

### 3.1.2 Завдання на підготовку до практичного заняття

1. Повторити теоретичний матеріал: будова і принцип дії генератора постійного струму; способи збудження генераторів, умови самозбудження, реакція якоря і її вплив на роботу генератора; основні характеристики генераторів з різними способами збудження.

2. За вказівкою викладача розв'язати задачі із поданих далі.

3. Підготувати протокол лабораторних випробовувань електричних машин.

4. Для електричних машин, які підлягають випробовуванню, записати паспортні дані.

### 3.1.3 Задачі для самостійного розв'язування

Для генератора постійного струму з такими номінальними величинами:

потужність  $P_{ном} = 0,6$  кВт;

напруга  $U_{ном} = 115$  В;

струм  $I_{ном} = 5,1$  А;

частота обертання  $n = 1450$  хв<sup>-1</sup>;

струм збудження паралельної обмотки  $I_{з,ном} = 0,315$  А;

опори обмоток, приведені до робочої температури 75°C:

якоря  $R_{a(75^0)} = 5,5$  Ом;

шунтової  $R_{ш(75^0)} = 322$  Ом;

серієсної  $R_{с(75^0)} = 0,87$  Ом;

коефіцієнт корисної дії  $\eta_{ном} = 76\%$ .

1. Накреслити схему кола збудження генератора з незалежним збудженням (ГНЗ), яка забезпечувала б регулювання струму збудження

(від нуля до номінального його значення) при постійній напрузі джерела живлення.

2. Розрахувати необхідний опір навантаження в номінальному режимі ГНЗ і знайти кількість ступінів навантажувального реостата, який необхідно ввімкнути для цього, якщо опір однієї ступені 70 Ом.

3. Знайти потужність первинного двигуна за даними номінальних величин генератора.

4. Розрахувати величину опору регульовального реостата в номінальному режимі генератора паралельного збудження (ГПарЗ), якщо номінальний струм збудження складає  $I_{з.ном} = 0,315$  А.

5. Для номінального режиму роботи генератора змішаного збудження (ГЗЗ) розрахувати його змінні втрати.

6. Постійні втрати потужності компаундного генератора дорівнюють 20 Вт. Знайти навантаження генератора при максимальному ККД.

7. Знайти значення основної ЕРС ГНЗ в номінальному режимі роботи, якщо зміна ЕРС  $\Delta E$  за рахунок дії поперечної реакції якоря складає 6 В.

8. Залишковий магнітний потік ГНЗ складає 2% від номінального значення основного магнітного потоку. Розрахувати залишковий струм короткого замикання генератора при номінальній частоті його обертання. Номінальне значення основної ЕРС прийняти рівним номінальній напрузі.

9. ГПарЗ працює в режимі навантаження при струмі навантаження 4 А і вихідній напрузі 118 В. Знайти значення струмів збудження і якоря, якщо в колі збудження ввімкнений регульовальний опір 40 Ом.

10. Розв'язати попередню задачу для генератора змішаного збудження.

11. ГПарЗ працює в режимі холостого ходу з номінальною частотою:

- при повністю введеному регульовальному опорі його вихідна напруга значно менша свого номінального значення;
- при виведенні регульовального реостата вихідна напруга спочатку не змінюється, а потім починає швидко збільшуватися;
- при виведенні регульовального реостата до нуля вихідна напруга зменшується;
- при виведенні регульовального реостата до нуля вихідна напруга не зменшується.

Пояснити процеси, що протікають в генераторі у вказаних випадках.

### 3.1.4 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторного стенду, конструкцією досліджуваної машини, записати її номінальні величини і підібрати відповідно до них вимірювальні прилади.

2. Зібрати схему генератора з незалежним збудженням. Шляхом досліджень зняти характеристики:

- холостого ходу;
- навантажувальну;
- зовнішню;
- регульовальну;
- короткого замикання.

3. Зібрати схему генератора з паралельним збудженням і шляхом досліджень зняти зовнішню характеристику.

4. Зібрати схему генератора зі змішаним збудженням і шляхом досліджень зняти характеристики:

- зовнішню при узгодженому і зустрічному вмиканні обмоток збудження;
- регульовальну при узгодженому вмиканні обмоток.

5. За даними пунктів 2–4 побудувати характеристики всіх типів генераторів. Однойменні характеристики генераторів різних типів будувати в одних координатних осях.

6. За характеристиками холостого ходу і навантажувальної побудувати характеристичний трикутник для генератора з незалежним збудженням.

7. Для цього ж генератора побудувати зовнішню характеристику за характеристикою холостого ходу і характеристичним трикутником. Для порівняння в цих же координатних осях побудувати зовнішню характеристику ГПарЗ, зняту дослідним шляхом.

8. Для ГПарЗ визначити критичний опір кола збудження.

9. Зробити висновки з роботи.

### 3.1.5 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Для випробування генераторів різних типів збудження використовується одна машина постійного струму, кінці всіх обмоток якої виведені на похилу панель лабораторного стенду.

Електрична схема лабораторної установки подана на рис. 3.7 [1].

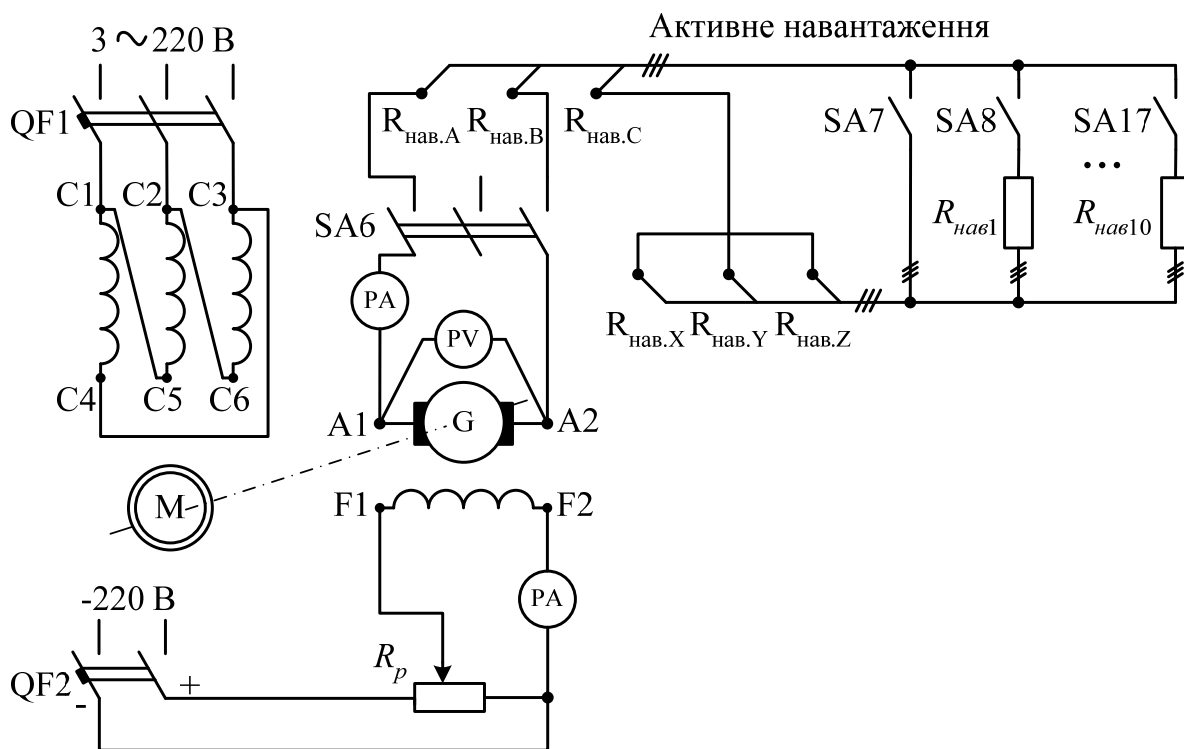


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова лабораторної установки для дослідження генератора постійного струму

Приводним двигуном генератора є трифазний асинхронний двигун, обмотка статора якого складається за схемою трикутника. Для зміни струму якоря генератора використовується активне навантаження. В коло генератора вмикають послідовно три фази цього навантаження. Замикають вимикач SA6. Потім за допомогою наборів перемикачів SA8–SA17 вмикають опори навантаження  $R_{нав1}$ – $R_{нав10}$ .

При дослідженні ГНЗ незалежна обмотка F1–F2 через автомат QF2 і регульовальний реостат  $R_p$ , ввімкнений за схемою потенціометра, під'єднується до мережі постійного струму.

2. Характеристику холостого ходу починають знімати з точки, що відповідає  $E_0 \approx 1,3 U_{ном}$  (рис. 3.1, точка B), після чого струм збудження за

допомогою регульовального реостату  $R_p$  повільно зменшують до нуля (точка  $D$ ), де в обмотці якоря наводиться ЕРС  $E_{зал}$  (відрізок  $0D$ ). При цьому знімають дані, що стосуються спадаючої частини характеристики (крива 2). Далі потрібно відключити живлення обмотки збудження, змінити полярність прикладної до неї напруги і знову ввімкнути живлення. Реостатом  $R_p$  повільно збільшують струм збудження в зворотному напрямку доти, поки  $E_0$  не стане рівною нулю (точка  $E$ ). В цій точці необхідно виміряти значення струму збудження (відрізок  $0E$ ). Потім струм збудження плавно збільшувати до значення, при якому  $E_0 \approx 1,3U_{ном}$ . При цьому знімають дані зростаючої частини характеристики (крива 3).

При знятті кожної частини характеристики вимірюють значення  $I_3$  і  $E_0$  в 6-8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дослідні дані для побудови характеристик генератора з незалежним збудженням

Показник	Значення в експериментальній точці								Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$U_0, В$ $I_3, А$									Спадаюча гілка ( $I_a = 0$ )
$U_0, В$ $I_3, А$									Зростаюча гілка ( $I_a = 0$ )
$U, В$ $I_3, А$									Навантажувальна характеристика ( $I_{a,ном} = I_a$ )
$U, В$ $I_a, А$									Зовнішня характеристика ( $I_3 = I_{3,ном} = const$ )
$I_3, А$ $I_a, А$									Регульовальна характеристика ( $U = U_{ном} = const$ )
$I_3, мА$ $I_{a,к}, А$									Характеристика КЗ ( $U = 0$ )

Треба мати на увазі, що при знятті параметрів характеристики холостого ходу струм збудження повинен змінюватись тільки в одному напрямку: зменшуватися на спадаючій частині характеристики і збільшуватися на зростаючій. Недотримання цієї умови приведе до викривлення характеристики. Друга частина характеристики, яка зображена штриховою лінією, будується з міркувань симетрії. Розрахункова характеристика (крива 1) є середньою між ними (див. рис. 3.1).

Внаслідок магнітного гістерезису значення ЕРС при збільшенні й при зменшенні струму збудження виходить неоднаковим при одних і тих самих струмах збудження.

*Навантажувальну характеристику* ГНЗ починають знімати з точки, в якій  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = I_{a.ном}$ ,  $I_z = I_{z.ном}$  (див. рис. 3.2, точка *c*). Потім зменшують опір  $R_{нав}$  навантаження, що приводить при тому самому струмі збудження до збільшення струму якоря  $I_a$ . Оскільки струм якоря повинен залишатися постійним, то його потрібно зменшити і довести до номінального значення зменшенням  $U$  за рахунок зниження струму збудження  $I_z$ . Меншому значенню  $R_{нав}$  будуть відповідати менші значення  $U$  і  $I_z$ . При кожному новому значенні  $R_{нав}$  вимірюють  $U$ ,  $I_z$ , а струм якоря  $I_a = I_{a.ном} = const$ . Всього знімають 6-8 точок. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.

*Зовнішню характеристику* генератора починають знімати з точки, що відповідає номінальному режиму, тобто при  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = I_{a.ном}$ ,  $I_z = I_{z.ном}$ . Потім при незмінному струмі збудження  $I_{z.ном}$  зменшують струм навантаження до нуля, вимірюючи  $U$  і  $I_a$  в 6-8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.

*Регульовальну характеристику* генератора з незалежним збудженням починають знімати з номінального режиму, тобто при  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = I_{a.ном}$ . Потім зменшують струм навантаження до нуля, вимірюючи  $I_z$  і  $I_a$  в 6-8 проміжних точках. Щоб напруга генератора не змінювалась при зміні струму якоря  $I_a$ , треба за допомогою регульовального реостата  $R_p$  встановлювати кожен раз такий струм збудження, при якому  $U = U_{ном}$  і лише після цього потрібно вимірювати струм якоря і струм збудження. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.



Для зняття *характеристики короткого замикання* необхідно за допомогою регульовального реостату  $R_p$  встановити струм збудження  $I_z = 0$ , закортити навантаження за допомогою перемикача SA7. Повільно збільшуючи струм збудження від нуля до значення, при якому струм якоря дорівнює номінальному, вимірюють  $I_{a.к}$  і  $I_{в.к}$  в 3-5 проміжних точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.1.

3. Для отримання схеми генератора з паралельним збудженням необхідно незалежну обмотку F1–F2 відключити від джерела живлення постійного струму і ввімкнути її паралельно обмотці якоря A1–A2 через регульовальний реостат  $R_p$  (рис. 3.8, *a*). В цьому випадку незалежна обмотка F1–F2 стає шунтовою обмоткою E1–E2.

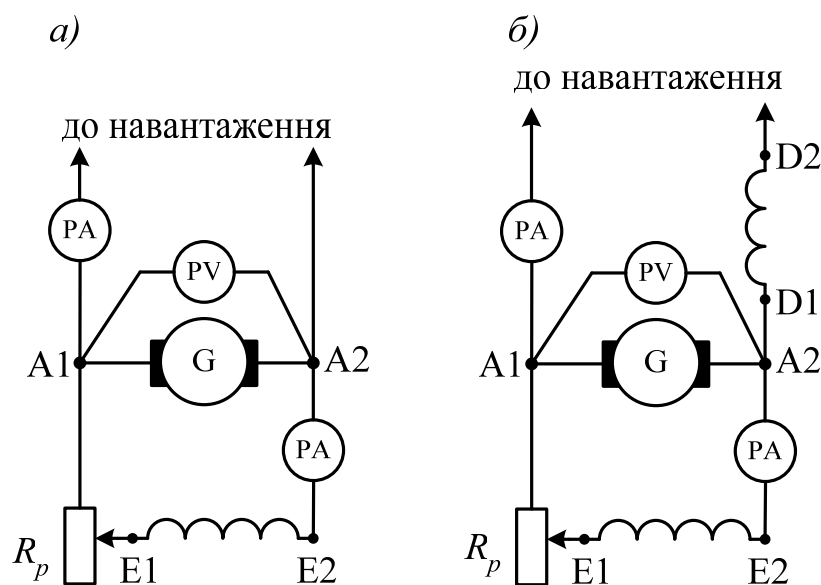


Рисунок 3.8 – Схеми для випробування генератора з паралельним (*a*) і змішаним (*б*) збудженням

*Зовнішню характеристику* генератора з паралельним збудженням починають знімати з номінального режиму, тобто при  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = I_{a.ном}$ . Потім, при незмінному регульовальному реостаті  $R_p$ , зменшують струм навантаження до нуля, вимірюючи  $U$ ,  $I_a$ ,  $I_z$  в 6-8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Дослідні дані для побудови характеристик генератора з паралельним і змішаним збудженням

Показник		Значення у експериментальній точці							Примітка
		1	2	3	4	5	6	7	
ГПарЗ	$U, В$								Зовнішня характеристика ( $R_z = \text{const}$ )
	$I_a, А$								
	$I_z, А$								
ГЗЗ	$U, В$								Зовнішня характеристика при узгодженому вмиканні обмоток збудження ( $R_z = \text{const}$ )
	$I_a, А$								
	$I_z, А$								
ГЗЗ	$U, В$								Зовнішня характеристика при зустрічному вмиканні обмоток збудження ( $R_z = \text{const}$ )
	$I_a, А$								
	$I_z, А$								
ГЗЗ	$I_a, А$								Регульовальна характеристика ( $U = U_{ном} = \text{const}$ )
	$I_z, А$								

4. Для отримання схеми генератора зі змішаним збудженням в коло якоря вмикають послідовну (серієсну) обмотку D1–D2 (рис.3.8, б). Для зустрічного вмикання обмоток збудження необхідно змінити напрям струму в серієсній обмотці збудження.

Дослідним шляхом зовнішню характеристику при узгодженому вмиканні обмоток збудження починають знімати з точки, в якій  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = I_{a.ном}$ . Потім зменшують струм якоря від номінального значення до нуля. При цьому вимірюють  $U$ ,  $I_a$  і  $I_z$  в 6-8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.2. При зміні струму  $I_a$  від  $I_{a.ном}$  до нуля вихідна напруга змінюється незначно.

При зустрічному вмиканні обмоток збудження зовнішню характеристику необхідно починати знімати при  $U = U_{ном}$ ,  $I_a = 0$ . Потім збільшують струм навантаження від нуля до максимально можливого значення, вимірюють  $U$ ,  $I_a$  і  $I_z$  в декількох точках. Результати вимірювань заносять до табл. 3.2. При зустрічному вмиканні напруга швидко знижується зі збільшенням струму навантаження.

Для генератора зі змішаним збудженням регульовальну характеристику знімають лише при узгодженому вмиканні обмоток. Змінюючи навантаження і струм збудження, потрібно встановити номінальні значення напруги  $U = U_{ном}$  і струму якоря  $I_a = I_{a.ном}$ . Далі методика зняття характеристики така ж, як і для генератора з незалежним збудженням. Результати вимірювань заносять до табл. 3.2.

5. Критичний опір генератора з паралельним збудженням визначається з його розрахункової характеристики холостого ходу (див. рис. 3.1, крива 1) [1]. Для цього необхідно провести на початку координат дотичну до кривої розрахункової характеристики холостого ходу. Будь-яка точка на цій дотичній характеризує критичний опір, тому що ця крива є вольт-амперною характеристикою кола збудження  $I_z R_{з.кр} = f(I_z)$ . Отже,  $R_{з.кр} = U/I_z$ . Наприклад, для точки *C* (див. рис. 3.1) будемо мати:

$$R_{кр} = \frac{U_C}{I_{з.С}}. \quad (3.13)$$

### 3.1.6 Питання до захисту

1. Призначення, будова і принцип роботи генератора постійного струму.

2. Схеми збудження генераторів постійного струму. Позитивні якості й недоліки різних схем.

3. Методика зняття характеристик холостого ходу, навантажувальної, зовнішньої, регульовальної і короткого замикання генераторів різних типів. Пояснити вигляд всіх характеристик.

4. Умови і процес самозбудження генераторів з паралельним і змішаним збудженням.

5. Порядок побудови характеристичного трикутника генераторів з незалежним і паралельним збудженням за навантажувальною характеристикою і характеристикою холостого ходу. Фізичний зміст катетів трикутника.

6. Обґрунтування і побудова зовнішньої характеристики генератора з незалежним збудженням за характеристикою холостого ходу та характеристичним трикутником.

7. Пояснити причини розходження зовнішніх характеристик генераторів з незалежним, паралельним і змішаним збудженням.

8. Як зміниться форма зовнішніх характеристик генератора зі змішаним збудженням при узгодженому і зустрічному способах збудження, якщо зменшити кількість витків у послідовній обмотці збудження?

### **3.2 Лабораторне заняття №2П – Дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням**

Мета роботи: вивчити будову електродвигуна постійного струму, процеси пуску, реверсу, регулювання частоти обертання. Набути практичних навичок випробувань двигуна й аналізу його робочих характеристик.

#### **3.2.1 Короткі теоретичні відомості**

У двигуні з паралельним збудженням (див. рис. 2.15, б) обмотка збудження підключена до мережі паралельно з обмоткою якоря. Характерною особливістю цих двигунів є те, що струм збудження  $I_z$  не залежить від струму якоря  $I_a$ , оскільки живлення обмотки збудження еквівалентне незалежному:

$$I_z = \frac{U}{R_z + R_p}. \quad (3.14)$$

За відсутності регулювання, тобто при незмінному опорі в колі обмотки збудження струм збудження  $I_z$  постійний. Тому, нехтуючи розмагнічуючою дією реакції якоря, можна вважати, що і магнітний потік

двигуна не залежить від навантаження ( $\Phi = \text{const}$ ). При цій умові *моментна характеристика* двигуна  $M = f(I_a)$  (рис. 3.9, а)

$$M = c_m \Phi I_a = k_1 I_a, \quad (3.15)$$

де  $k_1 = c_m \Phi = \text{const}$  і *швидкісна характеристика*  $n = f(I_a)$  (рис. 3.9, б)

$$n = \frac{E}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a \Sigma}{c_e \Phi} \quad (3.16)$$

прямолинійні.

*Механічна характеристика* шунтового двигуна описується рівнянням:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M R_a}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (3.17)$$

де  $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}$  – частота обертання двигуна в режимі холостого ходу ( $M = 0$ );

$\Delta n = \frac{M R_a}{c_e c_m \Phi^2}$  – зміна частоти обертання двигуна при навантаженні.

Механічна характеристика двигуна з паралельним збудженням повторює вигляд швидкісної характеристики (рис. 3.9, б) [3].

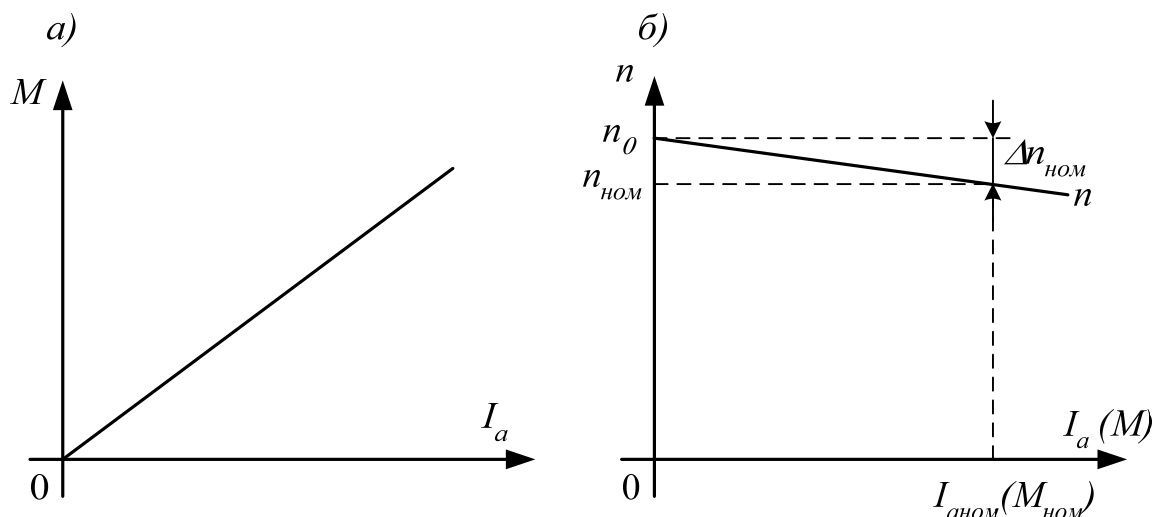


Рисунок 3.9 – Моментна  $M = f(I_a)$  (а), механічна  $n = f(M)$  і швидкісна  $n = f(I_a)$  (б) характеристики двигуна з паралельним збудженням

При постійних  $\Phi$  і  $U$ ,  $n_0 = \text{const}$ , а  $\Delta n$  змінюється пропорційно  $M$ . Зменшення частоти обертання  $\Delta n_{ном}$  при номінальному навантаженні незначне і складає  $(3 \dots 5\%)n_0$ . Така механічна характеристика називається *жорсткою*, тому що швидкість обертання якоря двигуна практично залишається постійною від точки ідеального холостого ходу до гранично допустимого навантаження.

Важливою властивістю розглянутого електричного двигуна є можливість регулювання швидкості в широкому діапазоні. Аналіз рівняння механічної характеристики дозволяє визначити три шляхи регулювання швидкості [1-4]:

- 1) зміною магнітного потоку шляхом зміни струму збудження;
- 2) зміною напруги живлення;
- 3) зміною додаткового опору в колі якоря.

Зміна вказаних параметрів змінює вигляд механічної характеристики. Наприклад, якщо змінити струм збудження, тобто змінити магнітний потік в напрямі його зменшення, то кутова швидкість збільшиться, але механічна характеристика стає менш жорсткою (рис. 3.10, а).

Якщо змінити напругу, наприклад, в напрямі її зменшення, то механічні характеристики будуть паралельними основній або *природній*, але розташовані нижче від неї (рис. 3.10, б).

Якщо в коло якоря ввімкнути додатковий опір, то механічна характеристика пом'якшується. Слід підкреслити, що величина додаткового опору не впливає на кутову швидкість обертання якоря в режимі холостого ходу  $n_0$  (рис. 3.10, в).

Більшу практичну цінність мають так звані *робочі характеристики* двигуна. Вони визначають залежності

$$P_1; I_a; \eta; n; M = f(P_2), \quad (3.18)$$

де  $P_1$  – підведена до двигуна електрична потужність;

$I_a$  – струм обмотки якоря;

$\eta$  – ККД двигуна;

$n$  – частота обертання;

$M$  – електромагнітний момент;

$P_2$  – корисна потужність, яка знімається з вала двигуна.

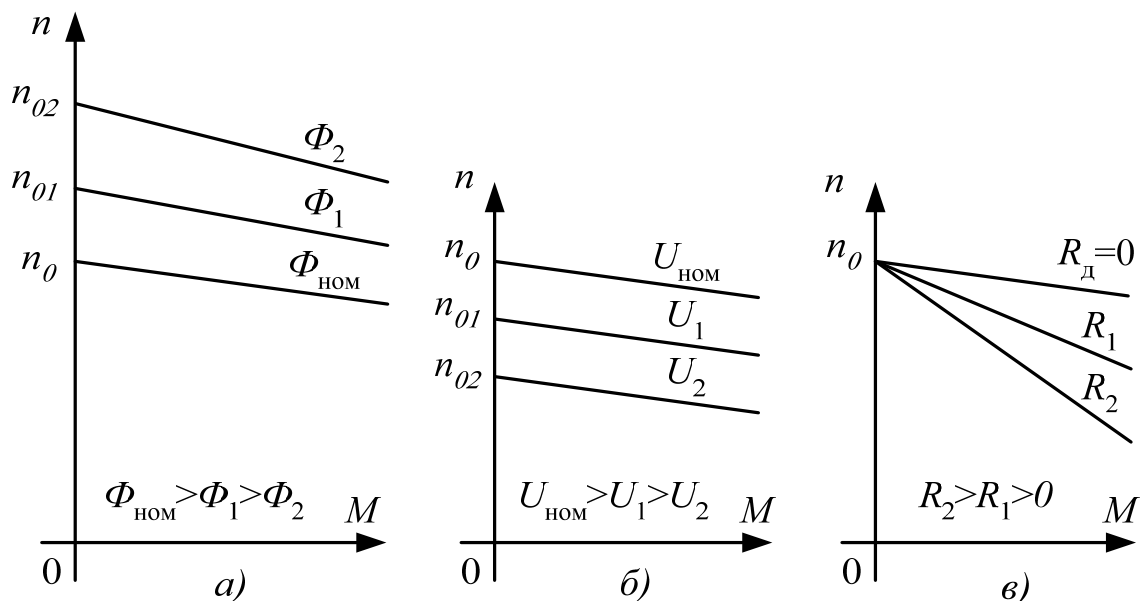


Рисунок 3.10 – Регулювання частоти обертання двигуна з паралельним збудженням: а) – послабленням магнітного потоку; б) – зменшенням напруги; в) – введенням опору в коло якоря

Робочі характеристики знімаються експериментально при  $U = U_{ном} = \text{const}$  та  $I_3 = \text{const}$  в робочому діапазоні корисної потужності  $0 \leq P_2 \leq P_{2ном}$ . Номінальні значення основних величин двигуна наводяться в його паспорті.

В процесі перетворення електричної енергії у механічну частина її витрачається всередині машини, викликаючи нагрівання окремих частин двигуна. Ця частина потужності називається втратами  $\Delta p_\Sigma$  машини. У двигуні підведена потужність  $P_1$ , корисна  $P_2$  і втрати  $\Delta p_\Sigma$  пов'язані співвідношенням:

$$P_1 = P_2 + \Delta p_\Sigma = U(I_a + I_3). \quad (3.19)$$

Всі втрати в двигуні поділяються на постійні  $\Delta p_{пост}$  і змінні  $\Delta p_{зм}$ . До постійних втрат відносяться такі втрати: втрати в колі збудження  $\Delta p_3$ , механічні  $\Delta p_{мех}$  (від тертя в підшипниках, щітках і на вентиляцію машини) і магнітні  $\Delta p_{магн}$  (від гістерезису і від вихрових струмів у магнітопроводі якоря при його обертанні):

$$\Delta p_{пост} = \Delta p_з + \Delta p_{мех} + \Delta p_{магн}. \quad (3.20)$$

До змінних відносяться втрати, що істотно залежать від навантаження двигуна (від струму якоря). Такими втратами є втрати в якірному колі двигуна:

$$\Delta p_{зм} = I_a^2 R_a. \quad (3.21)$$

В режимі холостого ходу ( $P_2 = 0$ ) змінними втратами можна знехтувати через відносно невеликий струм якоря  $I_{a,0}$ . Тому потужність  $P_{10}$ , що споживається у цьому режимі, повністю витрачається на покриття постійних втрат  $P_{1,0} \approx \Delta p_{пост}$ . Отже, вимірявши  $I_{a,0}$  і  $I_з$  в режимі холостого ходу, можна знайти постійні втрати:

$$\Delta p_{пост} = U(I_{a,0} + I_з). \quad (3.22)$$

Зі збільшенням  $P_2$  збільшуються і змінні втрати, тому  $P_1$  збільшується дещо швидше, ніж за прямо пропорційною залежністю (рис. 3.11).

З рівняння (3.19) можна знайти зв'язок між  $I_a$  і  $P_1$ :

$$I_a = \frac{P_1 - UI_з}{U} = \frac{P_1}{U} - I_з. \quad (3.23)$$

Звідси витікає, що  $I_a$  пропорційний  $P_1$ , так як  $U$  і  $I_з$  – постійні. Тому характер залежностей  $I_a = f(P_2)$  і  $P_1 = f(P_2)$  – однаковий. В режимі холостого ходу струм якоря  $I_{a,0}$  визначається тільки механічними та магнітними втратами.

ККД двигуна визначається з рівняння

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta p_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_{пост} + \Delta p_{зм}}{P_1}. \quad (3.24)$$

У режимі холостого ходу ( $P_2 = 0$ )  $\eta = 0$ . При збільшенні навантаження ККД швидко зростає. При деякому значенні  $P_2 = \beta P_{2ном}$  ККД досягає максимального значення  $\eta_{max}$ , а потім повільно зменшується. Максимум ККД завжди настає при такому відносному навантаженні



$$\beta_{max} = \frac{P_2}{P_{2ном}}, \quad (3.25)$$

при якому постійні втрати дорівнюють змінним. В сучасних машинах максимум ККД має місце, як правило, при  $\beta_{max} = 0,4 \div 0,6$ .

Кутова швидкість двигуна (з рівняння рівноваги ЕРС):

$$n = \frac{U - I_a R_{a\Sigma}}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a R_{a\Sigma}}{c_e (\Phi_0 - \Delta\Phi)}. \quad (3.26)$$

При постійних значеннях  $U$ ,  $I_s$  потік  $\Phi_0$  також постійний, внаслідок чого частота обертання при збільшенні  $P_2$  (відповідно і  $I_a$ ) незначно зменшується (рис. 3.11). При великих навантаженнях і насиченому магнітному колі магнітний потік внаслідок розмагнічуючої дії поперечної реакції якоря зменшується на величину  $\Delta\Phi$ . Це може викликати деяке невелике збільшення швидкості. Таке збільшення небажане, бо воно може призвести до нестійкої роботи двигуна. Щоб виключити вплив поперечної реакції, треба виготовляти машину з ненасиченою магнітною системою, що викличе збільшення її габаритів. В машинах з нормальним насиченням

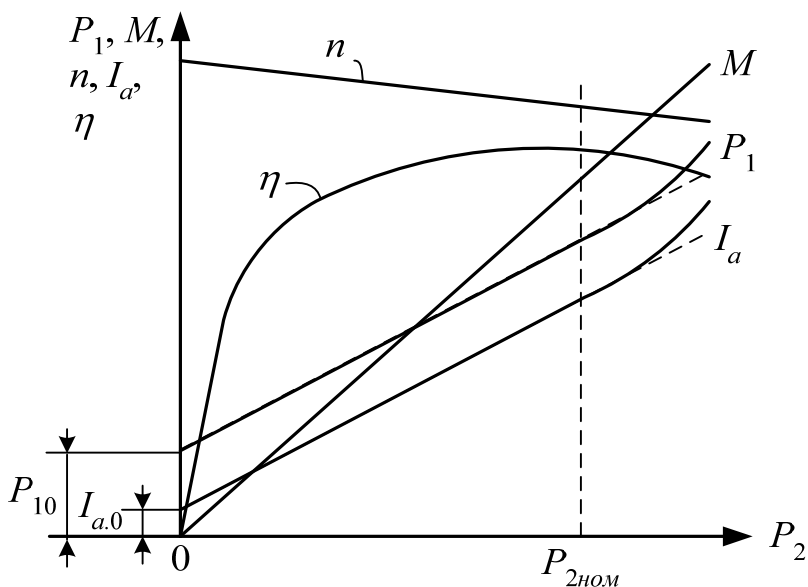


Рисунок 3.11 –Робочі характеристики двигуна з паралельним збудженням

для компенсації  $\Delta P$  використовується невелика послідовно-узгоджено ввімкнена обмотка збудження, яка називається *стабілізуючою*. У цьому й іншому випадках  $\Phi \approx \Phi_0 = \text{const}$ , тому зі збільшенням  $P_2$  частота обертання  $n$  зменшується практично за лінійним законом.

Одночасно зі збільшенням потужності на валу  $P_2$  зростає і момент  $M$ . Оскільки зі збільшенням  $P_2$  і  $M$  частота обертання  $n$  дещо зменшується, то  $M$ , пропорційний  $P_2 / n$ , зростає дещо швидше  $P_2$ .

### 3.2.2 Завдання на підготовку до практичного заняття

1. Повторити теоретичний матеріал; принцип дії, будову двигуна постійного струму, рівняння швидкісної та механічної характеристик, способи пуску і регулювання частоти обертання, регульовальні та робочі характеристики двигуна з незалежним збудженням.

2. За вказівкою викладача розв'язати задачі із поданих далі.

3. Вивчити методику зняття регульовальних і робочих характеристик і підготувати протокол робочих досліджень електричного двигуна з паралельним збудженням.

4. Для електричних машин, які підлягають випробуванню, записати паспортні дані.

### 3.2.3 Задачі для самостійного розв'язування

Для електричного двигуна постійного струму, що має такі номінальні величини:

потужність	$P_{\text{ном}} = 3,4 \text{ кВт};$
напруга	$U_{\text{ном}} = 220 \text{ В};$
струм якоря	$I_{\text{а.ном}} = 17,5 \text{ А};$
напруга збудження	$U_{\text{з.ном}} = 220 \text{ В};$
струм збудження	$I_{\text{з.ном}} = 0,25 \text{ А};$
ККД	$\eta = 0,865;$
частота обертання	$n = 3000/4000 \text{ хв}^{-1};$
збудження паралельне (незалежне);	
опір обмотки якоря	$R_{\text{а}(20^{\circ})} = 0,52 \text{ Ом.}$

1. Розрахувати значення повного номінального струму, що споживається, і номінальну ЕРС обмотки якоря.

2. Визначити струм якоря при прямому пуску і його кратність по відношенню до номінального струму.

3. Розрахувати опір пускового реостата для виконання реостатного пуску двигуна при номінальному навантаженні на валу. Пусковий струм не повинен перевищувати  $1,5I_{a.ном}$ .

4. Двигун працює в номінальному режимі:

а) який додатковий опір необхідно ввести в коло якоря, щоб частота обертання зменшилась у 2 рази?

б) як повинен змінитися магнітний потік двигуна при незмінному моменті навантаження на валу, щоб частота його обертання збільшилась на 20%? Знайти струм якоря в % до початкового при новій частоті обертання. Зміною втрат знехтувати;

в) для попереднього випадку визначити значення моменту навантаження при знайденому значенні магнітного потоку і номінальному значенні струму якоря;

г) знайти значення частоти обертання двигуна, якщо підведена до обмотки якоря напруга зменшилась на 40% при незмінному значенні магнітного потоку;

д) визначити значення частоти обертання, якщо підведена до двигуна напруга зменшилась у 2 рази. Залежність між магнітним потоком і струмом збудження вважати лінійною.

5. Для номінального режиму роботи розрахувати електромагнітну і підведену до двигуна потужності та його електромагнітний момент.

6. Для номінального режиму роботи розрахувати змінні втрати, постійні втрати, максимальний ККД, якщо відомо, що максимум ККД виникає при струмі якоря, що дорівнює 0,6 від його номінального значення.

7. Двигун працює в режимі холостого ходу при номінальному струмі збудження. Струм якоря при цьому складає 22% від його номінального значення. Визначити постійні втрати в двигуні.

### 3.2.4 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією двигуна, що підлягає випробовуванню, записати його номінальні величини і підібрати відповідно до них вимірювальні прилади.

2. Зібрати схему двигуна з паралельним збудженням і здійснити його пуск.

3. Дослідним шляхом зняти робочі характеристики двигуна:

а) при  $U = U_{ном}; I_3 = I_{3.ном}; R_d = 0$  (природна);

б) при  $U = U_{ном}; I_3 = I_{3min}; R_d = 0$ ;

в) при  $U = U_{ном}; I_3 = I_{3.ном}; R_d = const$ .

4. Дослідним шляхом зняти регульовальну характеристику двигуна  $n = f(I_3)$  в режимі холостого ходу ( $M_c = 0$ ).

5. За результатами, отриманими в п. 3а в одних координатних осях побудувати робочі характеристики двигуна  $n, I_a, P_1, M_2, \eta = f(P_2)$ .

6. За результатами, отриманими в п. 3а, 3б, 3в побудувати в одних координатних осях механічні характеристики  $n = f(M)$ .

7. Зробити висновки з роботи.

### 3.2.5 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Для випробування використовується двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3.12).

В реальних умовах експлуатації двигун приводить в обертання деяку робочу машину, яка створює протидіючий (гальмівний) момент опору  $M_c$ . Зі збільшенням  $M_c$  повинен збільшуватися і обертовий момент двигуна  $M$  за рахунок збільшення струму якоря.

В усталеному режимі роботи  $n = const$  момент двигуна врівноважується моментом навантаження, тобто  $M = M_c$ . При зміні  $M_c$  ця рівність порушується, що призводить до зміни частоти обертання і відповідної зміни моменту двигуна. При деякій частоті обертання момент знову врівноважується і настає новий усталений режим.

В умовах лабораторії момент навантаження на валу двигуна створюють за допомогою електричних генераторів, електромагнітний момент яких завжди направлений проти напрямку обертання вала двигуна, тобто є

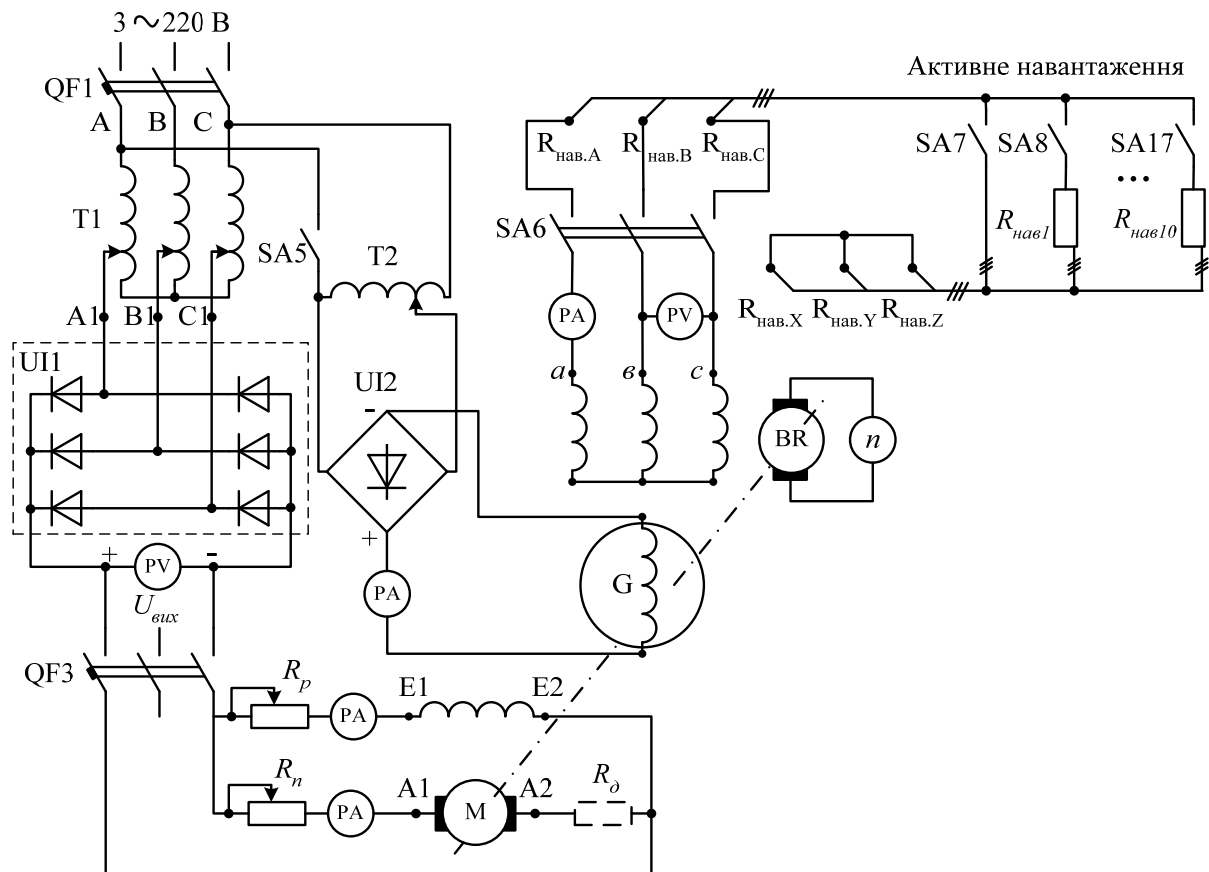


Рисунок 3.12 – Схема електрична принципова лабораторної установки для дослідження двигуна постійного струму з паралельним збудженням

гальмівним. У цій роботі гальмівний момент на валу двигуна створює трифазний синхронний генератор. Цей генератор має на роторі обмотку збудження, яка живиться постійним струмом. Джерелом постійного струму служить однофазний двоперіодний випрямляч UI2. Зміна напруги, що підводиться до випрямляча UI2, регулюється за допомогою ЛАТРа T2. Змінюючи струм збудження в обмотці ротора за допомогою ЛАТРа T2, можна регулювати напругу на затискачах трифазної обмотки статора. До обмотки статора синхронного генератора підключається трифазне активне навантаження  $R_{нав1}-R_{нав10}$ . Перш ніж вмикати опір фаз навантаження за допомогою набору перемикачів SA7–SA17, необхідно ввімкнути перемикач SA6.

При зміні струму в обмотці статора буде змінюватись електромагнітний момент генератора, який є гальмівним для двигуна. Частота обертання двигуна контролюється тахогенератором BR.

2. Пуск двигуна здійснюється на холостому ході, для чого повинно бути вимкненим живлення обмотки збудження генератора навантаження  $G$  і розірване коло статорної обмотки (вимкнені опори навантаження  $R_{нав1}-R_{нав10}$ ).

Ручка пускового реостата  $R_n$  повинна знаходитися в нульовому положенні ( $R_n = \infty$ ), а ручка регулювального реостата  $R_p$  – у положенні, що відповідає  $I_3 = I_{3,max} = \text{const}$ . Ввімкнути QF1 і за допомогою трансформатора регульованої напруги (РНТ) Т1 встановити напругу двигуна  $U_{вих} = U_{ном}$ .

Потім увімкнути автомат QF3 і повільно повертати ручку пускового реостата (зменшуючи  $R_n$  до нуля), розігнати двигун до номінальної частоти обертання.

Далі перемикачем SA5 подати живлення на ЛАТР Т2, за допомогою якого встановити номінальну напругу синхронного генератора.

3. Зняти робочі і механічні характеристики двигуна для різних умов:

а) природні характеристики знімають при  $U = U_{ном}$ ,  $I_{3,ном} = I_{3,max}$  і  $R_\delta = 0$ . Зменшуючи опір навантаження синхронного генератора і регулюючи його струм збудження (при необхідності), змінюють момент навантаження на валу двигуна від нуля до номінального. При цьому струм якоря двигуна змінюється від  $I_{a,0}$  до  $I_{a,ном}$ .

В указаному діапазоні вимірюють напругу двигуна  $U$ , його струм якоря  $I_a$ , струм збудження  $I_3$ , напругу генератора  $U_1$  і струм навантаження генератора  $I_G$  в 6-8 точках і результати вимірювань заносять до табл. 3.3.

б) знімають характеристики  $U = U_{ном}$ ,  $I_3 = I_{3,min}$ ,  $R_\delta = 0$ , для чого ручку регулювального реостата двигуна встановлюють в положення, в якому  $I_3 = I_{3,min}$  ( $R_p = R_{p,max}$ ). При цьому зменшується магнітний потік основних полюсів і збільшується частота обертання якоря двигуна, а напруга навантажувального генератора може збільшитися до  $U > U_{ном}$ . За допомогою ЛАТРа Т2 необхідно її зменшувати до  $U_{ном}$ . Методика зняття робочих і механічних характеристик двигуна така ж, як і в попередньому випадку. Момент навантаження на валу двигуна збільшувати до тих пір, поки струм його якоря не буде дорівнювати номінальній величині  $I_a = I_{a,ном}$ .

в) для зняття характеристики при  $U = U_{ном}$ ,  $I_3 = I_{3.ном}$ ,  $R_0 = const$  необхідно за допомогою ЛАТРа Т2 встановити напругу генератора  $U_G = 0$ , зупинити двигун, знявши з нього напругу автоматом QF3 і QF1. Ручки реостатів встановити: пускового  $R_n$  – в нульове положення, регулювального  $R_p$  – в положення, в якому  $I_3 = I_{3.max}$ . В коло якоря двигуна ввімкнути додатковий опір  $R_0$ . Ввімкнути QF1 і за допомогою РНТ Т1 встановити  $U_{вих} = U_{ном}$ . Потім увімкнути автомат QF3 і повільним поворотом ручки пускового реостата (зменшуючи  $R_n$  до нуля) до самого крайнього положення здійснити реостатний пуск двигуна, розганяючи його до номінальної частоти обертання.

Далі вимикачем SA5 подати живлення на ЛАТР Т2, за допомогою якого встановити номінальну напругу синхронного генератора G.

Зняття робочих та механічних характеристик двигуна здійснювати за тією ж методикою і в тому ж діапазоні зміни навантаження, що і в попередніх дослідах.

Результати вимірювань занести до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Дослідні та розрахункові дані для побудови робочих і механічних характеристик двигуна постійного струму з паралельним збудженням

Експериментальна точка	Дослідна величина						Розрахункова величина						Примітка
	$U$ , В	$I_a$ , А	$I_3$ , А	$U_G$ , В	$I_G$ , А	$n$ , хв <sup>-1</sup>	$P_1$ , Вт	$P_G$ , Вт	$\eta$ , в.о.	$P_2$ , Вт	$n$ , хв <sup>-1</sup>	$M$ , Н·м	
1													$U = U_{ном}$ ; $I_3 = I_{3.ном}$ ; $R_0 = 0$
...													
8													
1													$U = U_{ном}$ ; $I_3 = I_{3.min}$ ; $R_0 = 0$
...													
8													
1													$U = U_{ном}$ ; $I_3 = I_{3.ном}$ ; $R_0 = const$
...													
6													

4. Зняти регулювальну характеристику.

Регулювальна характеристика двигуна – це залежність  $n = f(I_3)$  при  $U = U_{ном}$ . В лабораторній роботі її знімають тільки в режимі холостого ходу двигуна ( $M_c = 0$ ). В цьому випадку струм генератора  $I_G = 0$ , для цього знімається живлення з обмотки збудження навантажувального генератора шляхом відключення перемикача SA5. Характеристику починають знімати з точки, в якій  $R_p = 0$  ( $I_3 = I_{3,max}$ ).

Далі плавним поворотом ручки  $R_p$  струм збудження зменшують до  $I_3 = I_{3,min}$ . В цьому діапазоні вимірюють струм збудження двигуна  $I_3$ , його частоту обертання  $n$  і струм якоря  $I_a$  в 6-8 точках.

Результати вимірювань заносять до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Дослідні дані для побудови регулювальної характеристики двигуна з паралельним збудженням

Показник	Значення у експериментальній точці								Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$I_3, A$									$M_c = 0$
$I_a, A$									
$n, об/хв$									
$\omega, рад/с$									

5. Основні розрахункові формули:

підведена до двигуна потужність

$$P_1 = U(I_a + I_3); \quad (3.27)$$

потужність генератора навантаження

$$P_G = \sqrt{3}U_G I_G; \quad (3.28)$$

ККД двигуна

$$\eta = \sqrt{\frac{P_G}{P_1}}; \quad (3.29)$$



корисна потужність на валу двигуна

$$P_2 = \eta P_1; \quad (3.30)$$

кутова швидкість обертання двигуна

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad (3.31)$$

корисний момент на валу двигуна

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = 9,55 \frac{P_2}{n}. \quad (3.32)$$

### 3.2.6 Питання до захисту

1. Будова і принцип дії двигуна постійного струму.
2. Способи пуску двигунів постійного струму, їх суть. Фізичні процеси у двигуні при пуску.
3. Теоретично пояснити вигляд всіх характеристик двигуна з паралельним збудженням.
4. Втрати у двигуні і ККД. Максимальний і номінальний ККД.
5. Умови стійкості роботи двигуна і робочої машини при різних моментах статичного навантаження.
6. Фізична суть явища „розносу” двигуна з паралельним збудженням.
7. Способи регулювання частоти обертання двигуна з паралельним збудженням. Фізичні процеси, які протікають у двигуні під час регулювання при постійному моменті навантаження на валу.

### 3.3 Лабораторне заняття №3П – Дослідження двигунів постійного струму з послідовним збудженням

Мета роботи: вивчити будову електродвигуна, процеси його пуску і регулювання частоти обертання, а також методику його випробувань у різних режимах.

### 3.3.1 Короткі теоретичні відомості про двигун послідовного збудження

У двигуні з послідовним збудженням (див. рис. 2.15, в) струм, який споживається двигуном з мережі, протікає по обмотці якоря й по обмотці збудження, тобто  $I_a = I_z = I$ . Внаслідок цього зміна моменту навантаження на валу двигуна, що призводить до зміни струму  $I_a$ , викликає також одночасну зміну основного магнітного потоку машини, який пов'язаний зі струмом збудження  $I_z$  кривою намагнічування (рис. 3.13).

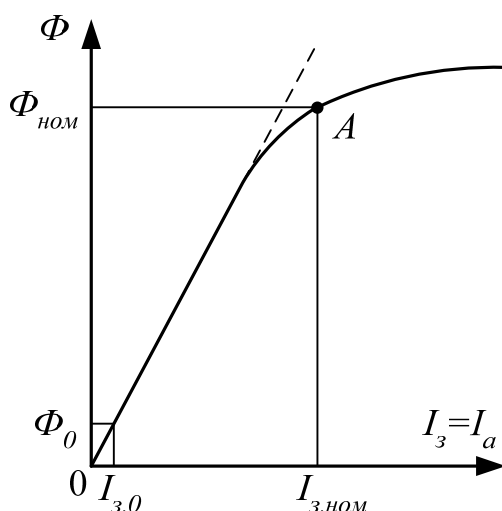


Рисунок 3.13 – Магнітна характеристика машини

Точка  $A$ , що відповідає номінальному режиму, здебільшого знаходиться на згині кривої намагнічування, тобто на початку насичення. Якщо знехтувати насиченням магнітного кола, то з невеликою похибкою залежність  $\Phi = f(I_z)$  можна вважати лінійною, тобто  $\Phi = k_\Phi I_z = k_\Phi I_a$ , де  $k_\Phi$  – коефіцієнт пропорційності потоку (в значному діапазоні навантаження залишається практично сталим) [1, 2].

Для ненасиченого магнітного кола  $k = \text{const}$ ; при насиченні  $k$  дещо зменшується зі збільшенням  $I_a$ .

Основний магнітний потік у двигуні з послідовним збудженням змінюється від номінального значення  $\Phi_{\text{ном}}$  при номінальному навантаженні до досить малого  $\Phi_0$  в режимі холостого ходу, оскільки в цьому режимі  $I_a \ll I_{a,\text{ном}}$ . При аналізі характеристик двигуна часто приймають  $I_{a,\text{ном}} \approx 0$  і  $\Phi_0 \approx 0$ .

Графічне зображення швидкісної характеристики двигуна  $n = f(I_a)$  (рис. 3.14) має форму гіперболи, оскільки частота обертання

$$n = \frac{U - R_{a\Sigma} I_a}{c_e \Phi} = \frac{U - R_{a\Sigma} I_a}{c_e k_\phi I_a} = \frac{U}{c_e k_\phi I_a} - \frac{R_{a\Sigma}}{c_e k_\phi}, \quad (3.33)$$

де  $R_{\Sigma}$  – сумарний опір якірного кола.

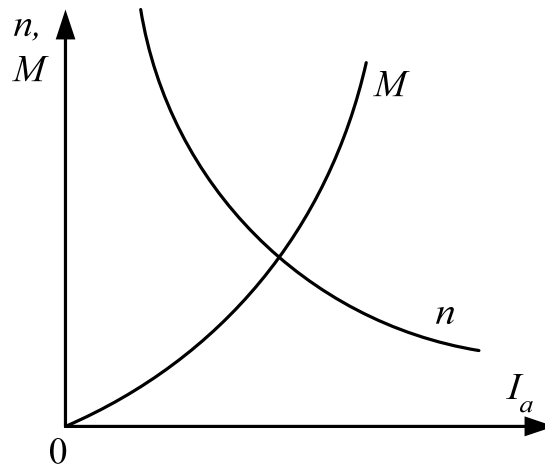


Рисунок 3.14 – Швидкісна  $n = f(I_a)$  і моментна  $M = f(I_a)$  характеристики двигуна послідовного збудження

Струм якоря двигуна

$$I_a = \frac{P_1}{U} = \frac{P_2 + \Delta p_{\Sigma}}{U}, \quad (3.34)$$

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{пост} + \Delta p_{зм}, \quad (3.35)$$

де  $\Delta p_{\Sigma}$  – сумарні втрати двигуна;

$\Delta p_{пост}$  – постійні втрати;

$\Delta p_{зм}$  – змінні втрати.

Зміст постійних і змінних втрат такий самий, що й у двигуні з паралельним збудженням. Вони відрізняються тим, що втрати в обмотці збудження  $\Delta p_z$  відносяться до змінних втрат і входять до втрат якірного кола.

Максимум ККД також настає при рівності постійних і змінних втрат. Слід зазначити, що в двигуні з послідовним збудженням всі втрати є

змінними, тобто залежними від навантаження. Дійсно, магнітні  $\Delta p_{\text{магн}}$  втрати, що є сумою втрат від гістерезису  $\Delta p_{\text{гіст}}$  і вихрових струмів  $\Delta p_{\text{вих.с.}}$ , залежать від індукції і частоти перемагнічування якоря:

$$\Delta p_{\text{магн}} = \Delta p_{\text{гіст}} + \Delta p_{\text{вих.с.}} = c_{\text{гіст}} f B^2 + c_{\text{вих.с.}} f^2 B^2, \quad (3.36)$$

де  $c_{\text{гіст}}$  і  $c_{\text{вих.с.}}$  – постійні коефіцієнти, що залежать від марки сталі і товщини її листів;

$f = pn$  – частота перемагнічування сталі;

$B$  – індукція магнітного потоку.

Зі зростанням навантаження  $P_2$  збільшується індукція  $B$ , а частота  $f$  зменшується пропорційно  $n$ . В цілому магнітні втрати збільшуються. Механічні втрати  $\Delta p_{\text{мех}}$  зі зростанням навантаження знижуються, тому що вони залежать від швидкості обертання. Сума магнітних і механічних втрат практично не змінюється і розглядається як постійні втрати, тобто  $\Delta p_{\text{пост}} = \Delta p_{\text{магн}} + \Delta p_{\text{мех.}}$ .

Підставивши значення  $I_a$  (3.34) у вираз частоти обертання (3.33), отримаємо

$$n = \frac{U^2}{c_e k_\phi (P_2 - \Delta p_\Sigma)} - \frac{R_{a\Sigma}}{c_e k_\phi}. \quad (3.37)$$

У номінальному режимі  $P_{2\text{ном}} \gg \Delta p_\Sigma$ , тому

$$n = \frac{U^2}{c_e k_\phi P_{2\text{ном}}} - \frac{R_{a\Sigma}}{c_e k_\phi} \approx \frac{U^2}{c_e k_\phi P_{2\text{ном}}}. \quad (3.38)$$

Зі зменшенням  $P_2$  кутова швидкість двигуна різко зростає і в режимі холостого ходу в декілька разів перевищує номінальну (через те, що  $P_2 = 0$ ). Тому

$$n_0 = \frac{U^2}{c_e k_\phi \Delta p_{\text{пост}}}, \quad \Delta p_{\text{пост}} \ll P_{2\text{ном}}. \quad (3.39)$$

Графік моментної характеристика  $M = f(I_a)$  має форму параболи (рис. 3.14), оскільки електромагнітний момент

$$M = c_m \Phi I_a = c_m k_\phi I_a^2. \quad (3.40)$$

При  $I_a > I_{ном}$  моментна характеристика є лінійною, оскільки

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (3.41)$$

Механічні характеристики  $n = f(M)$  (рис. 3.15, а) можна побудувати на основі залежностей  $n = f(I_a)$  і  $M = f(I_a)$  або визначивши значення  $I_a$  з (3.40) і підставивши його в (3.33):

$$n = \frac{U}{c_e k_\phi \sqrt{\frac{M}{c_m k_\phi}}} - \frac{R_a \Sigma}{c_e k_\phi}. \quad (3.42)$$

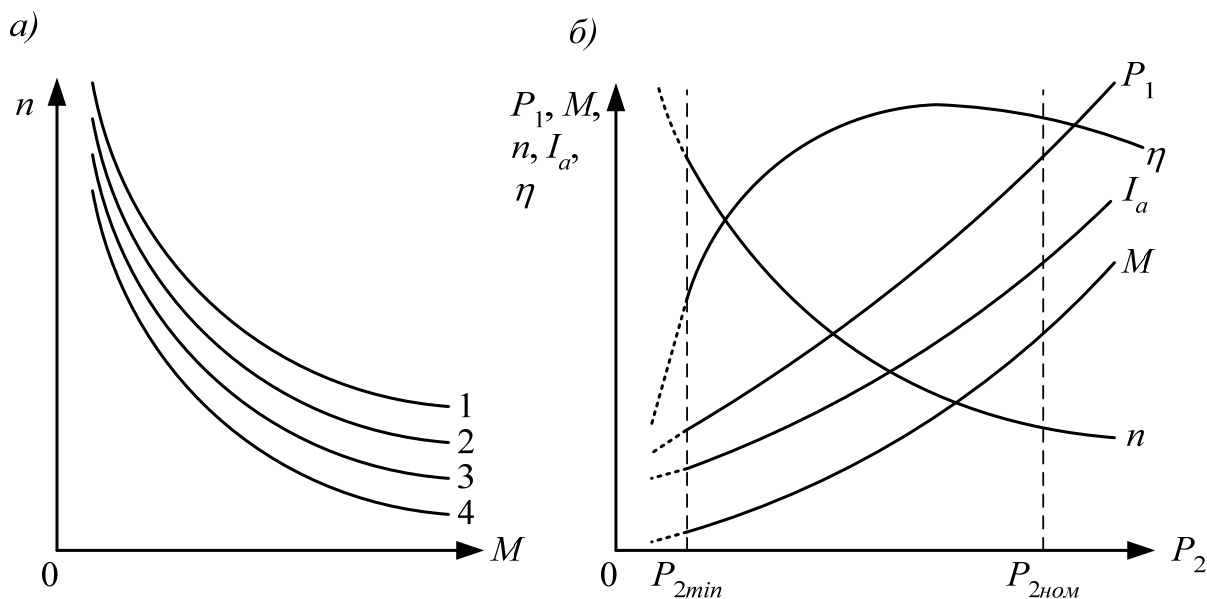


Рисунок 3.15 – Механічні (а) і робочі (б) характеристики двигуна з послідовним збудженням

При  $I_a > I_{ном}$  залежність  $n = f(M)$  стає лінійною.

Робочі характеристики двигуна з послідовним збудженням наведені на рис. 3.15, б. Залежності  $n = f(P_2)$ ,  $M = f(P_2)$  є нелінійними; залежності

$P_1 = f(P_2)$ ,  $I_a = f(P_2)$  і  $\eta = f(P_2)$  мають наближений характер до аналогічних характеристик двигунів з паралельним збудженням.

Механічні характеристики двигуна з послідовним збудженням (як природна, так і штучні) є м'якими і мають гіперболічний характер. При малих навантаженнях частота обертання  $n$  різко зростає і може перевищити максимально допустиме значення. В такому випадку говорять, що двигун йде в „рознос”. Таке явище може викликати пошкодження двигуна (руйнування обмотки якоря, коловий вогонь на колекторі й ін.). Тому при роботі з двигуном послідовного збудження потрібно стежити за тим, щоб на його валу завжди був протидіючий момент (момент статичного навантаження). Мінімально допустиме навантаження складає  $(0,2 \div 0,25)I_{ном}$ . Холостий хід допускається лише для двигунів малої потужності (десятки ват).

Незважаючи на існуючі недоліки, двигуни з послідовним збудженням широко використовують в електроприводах, в яких момент статичного навантаження змінюється в широких межах, а також в електроприводах з важкими умовами пуску.

Регулювання частоти обертання двигунів з послідовним збудженням, як і двигунів з паралельним збудженням, можливе трьома способами:

1) зміною потоку збудження  $\Phi$ . В двигунів з послідовним збудженням це можна реалізувати вмиканням шунтуючого реостата ( $R_w$ ) паралельно обмотці збудження. При цьому магнітний потік буде зменшуватися, а частота обертання – збільшуватися.

2) зміною опору кола якоря. Вмикаючи в коло якоря пускові реостати з опорами  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$  і  $R_{n3}$  крім природної характеристики 1 (рис. 3.15, *a*) можна отримати реостатні характеристики 2, 3 і 4, причому, чим більше значення  $R_n$ , тим нижче розміщується характеристика, тобто стає „м'якшою”;

3) зміною напруги. Як і в двигунах з паралельним збудженням, це можливо тільки в напрямі зменшення швидкості обертання, тому що напругу відносно номінальної можна тільки зменшувати. Якщо на загальне навантаження працюють два двигуни, то їх можна переключати з паралельного з'єднання на послідовне. Напруга на кожному двигуні при цьому зменшується вдвоє, відповідно зменшується і частота обертання.

### 3.3.2 Завдання на підготовку до практичного заняття

1. Повторити теоретичний матеріал стосовно двигунів постійного струму з послідовним збудженням: принципову схему, способи пуску і регулювання кутової швидкості, вирази електромагнітного моменту і частоти обертання, механічну і робочі характеристики, порівняння з двигунами з паралельним збудженням, області застосування.

2. Розв'язати за вказівкою викладача задачі із поданих далі.

3. Вивчити методику зняття робочих характеристик і підготувати протокол лабораторних досліджень електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням.

### 3.3.3 Задачі для самостійного розв'язування

Для електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням, який характеризується наступними номінальними величинами:

потужність  $P_{ном} = 1$  кВт;

напруга  $U_{ном} = 220$  В;

струм якоря  $I_{а ном} = 7$  А;

ККД  $\eta = 0,71$ ;

частота обертання  $n_{ном} = 350$  об/хв.;

опір обмотки якоря  $R_{a(20^0)} = 6,1$  Ом;

опір обмотки збудження  $R_{z(20^0)} = 8,6$  Ом.

1. Визначити номінальну потужність, яка споживається двигуном, електромагнітну потужність, корисний момент на валу й електромагнітний момент.

2. Розрахувати сумарні й електричні втрати двигуна, втрати у якорній обмотці та в обмотці збудження, суму механічних й магнітних втрат для номінального режиму його роботи.

3. Обчислити ЕРС двигуна в номінальному режимі, величину навантаження, при якому ККД має максимальне значення, і величину максимального ККД (значення постійних і змінних втрат узяти з попередньої задачі).

4. При роботі двигуна в номінальному режимі:

а) визначити величину додаткового опору, який необхідно ввести в коло якоря, щоб частота його обертання при незмінному моменті навантаження на валу зменшилася в два рази;

б) знайти частоту обертання двигуна при зменшенні напруги живлення на 30% і незмінному моменті навантаження на валу.

Вказівка. Другим членом виразу механічної характеристики (3.42) знехтувати;

в) визначити частоту обертання двигуна при незмінному моменті навантаження, якщо обмотка збудження шунтована резистором, опір якого дорівнює власному опору обмотки збудження;

г) для попереднього випадку знайти значення моменту навантаження на валу, при якому струм в обмотці якоря не буде перевищувати номінальний.

5. Визначити величину опору пускового реостата, що обмежує пусковий струм до значення  $2I_{a\text{ном}}$ .

6. Знайти таке значення опору, необхідне для шунтування обмотки збудження, щоб при роботі двигуна з номінальним навантаженням його частота обертання збільшилася на 20%. Як при цьому зміниться струм якоря двигуна? Визначити його значення і порівняти з номінальним.

### 3.3.4 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, конструкцією машини, яка підлягає випробуванню, й електромагнітного гальма. Записати їхні номінальні величини, згідно з якими підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. Зібрати схему двигуна з послідовним збудженням і здійснити його пуск.

3. Дослідним шляхом зняти робочі характеристики двигуна:

а) при  $U = U_{\text{ном}}$ ;  $R_d = 0$  і повному полі збудження ( $R_{ш} = \infty$ );

б) при  $U = U_{\text{ном}}$ ;  $R_d = 0$  і послабленому полі ( $R_{ш} = \text{const}$ );

в) при  $U = U_{\text{ном}}$ ;  $R_d = \text{const}$  і  $R_{ш} = \infty$ ;

г) при  $U < U_{\text{ном}}$ ;  $R_d = 0$  і  $R_{ш} = \infty$ .



4. За результатами п. 3,а побудувати робочі характеристики двигуна  $P_1$ ,  $I_a$ ,  $\eta$ ,  $M_2$ ,  $n = f(P_2)$ .

5. За результатами пунктів 3,а – 3,г в одній системі координат побудувати механічні характеристики  $n = f(M_2)$ .

6. Зробити висновки по роботі.

### 3.3.5 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, конструкцією і принципом роботи випробовуваного двигуна й електромагнітного гальма. Живлення двигуна постійним струмом здійснюється від трифазного випрямного моста, підключеного до виходу трифазного регулятора напруги РНТ Т1.

2. В лабораторній роботі досліджується двигун послідовного збудження, навантаження на валу якого створюється електромагнітним гальмом VB. Принципова схема лабораторної установки зображена на рис. 3.16.

Пуск двигуна здійснюється за допомогою пускового реостата  $R_n$  – реостатний пуск. Додатковий опір  $R_o$  може вводитися в коло двигуна для регулювання його частоти обертання. З цією метою паралельно обмотці збудження двигуна вмикають шунтуючий резистор  $R_{ш}$ . Щоб змінити навантаження на валу двигуна, необхідно за допомогою ЛАТРа Т2 змінювати струм у котушках збудження електромагнітного гальма VB. Якщо струм в котушках збудження гальма відсутній, то двигун працюватиме в режимі, близькому до холостого ходу, тому що на його валу буде обертатися тільки сталевий диск гальма, який створює невеликий протидіючий момент. Тому перед кожним пуском двигуна при повністю введеному пусковому реостаті (ручка  $R_n$  в нульовому положенні) для виключення режиму, близького до холостого ходу, необхідно створити навантажувальний момент на його валу, ЛАТРОм Т2 встановлюючи в обмотці збудження електромагнітного гальма VB струм  $I_z \approx 1$  А. Для цього вмикають автоматичний вимикач QF1, вимикачі SA1 і SA3. За допомогою РНТ Т1 встановлюють номінальну напругу двигуна  $U_{ном}$ . Вмикаючи автоматичний вимикач QF4, здійснюють реостатний пуск двигуна,

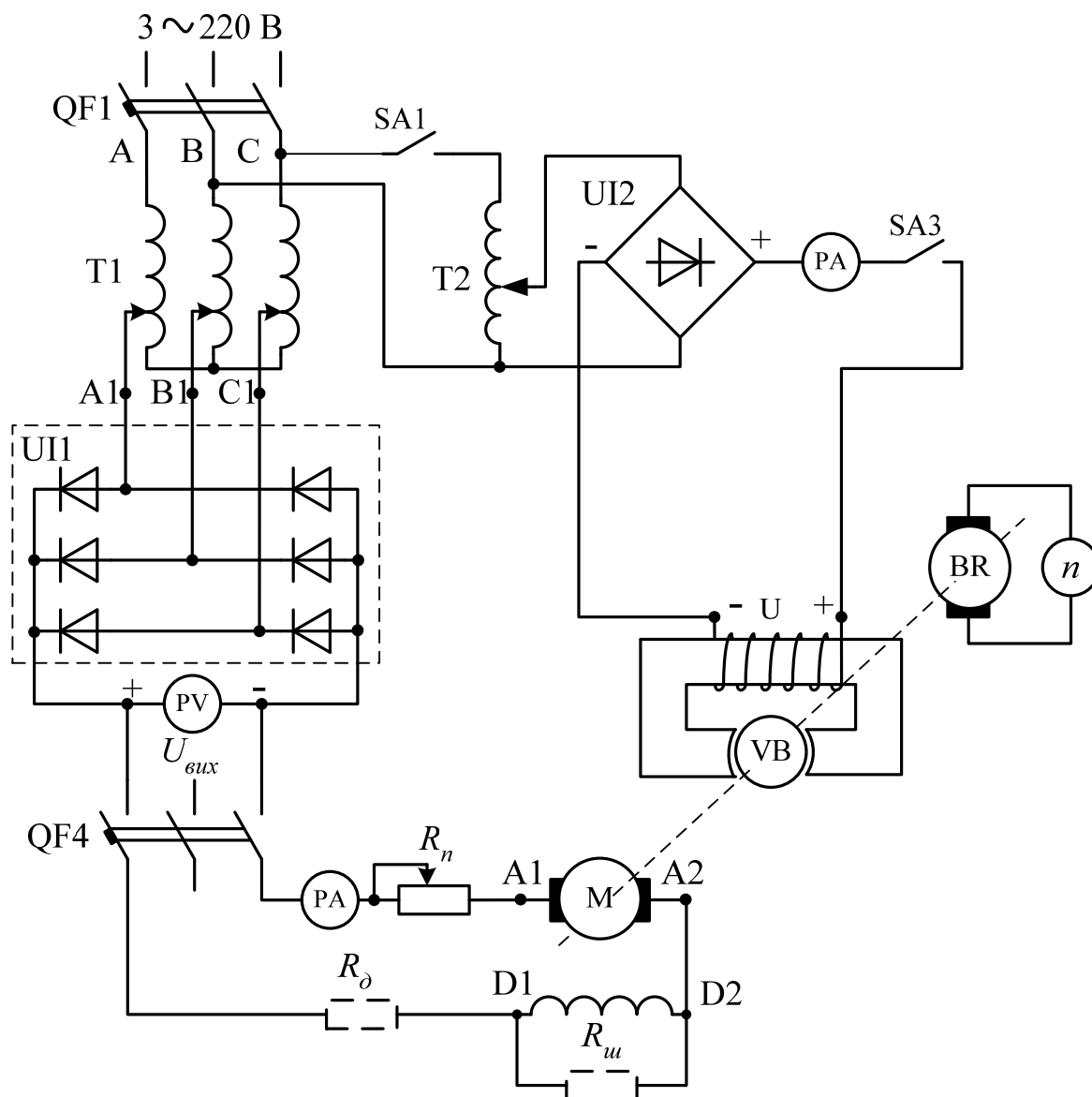


Рисунок 3.16 – Схема електрична принципова лабораторної установки для дослідження двигуна постійного струму послідовного збудження

зменшуючи  $R_n$  до нуля. Всі процеси в двигуні при пуску і при зміні навантаження на валу протікають аналогічно описаним для шунтового двигуна.

3. Робочі і механічні характеристики двигуна знімають у такій послідовності:

а) природні характеристики знімають при  $U = U_{ном}$ ,  $R_{ш} = \infty$  і  $R_{д} = 0$ . За описаною методикою запускають двигун. Змінюючи струм збудження гальма, струм якоря двигуна доводять до  $I_a = I_{a ном}$ . Потім зменшують момент навантаження на валу двигуна доти, доки частота обертання його

не досягне величини  $1,5n_{ном}$ . В цьому діапазоні вимірюють  $U, I_a, n, M_2$  в 5-6 точках. Результати заносять до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Дослідні та розрахункові дані для побудови робочих характеристик двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Експериментальна точка	Дослідна величина					Розрахункова величина				Примітка
	$U,$ В	$I_a,$ А	$n,$ хв <sup>-1</sup>	$M_2,$ Н·м	$I_{з.галм},$ А	$P_1,$ Вт	$\omega,$ рад/с	$P_2,$ Вт	$\eta,$ в.о.	
1										$U = U_{ном};$ $R_\delta = 0;$ $R_{ш} = \infty$
...										
6										
1										$U = U_{ном};$ $R_\delta = 0;$ $R_{ш} = const$
...										
6										
1										$U = U_{ном};$ $R_\delta = const;$ $R_{ш} = \infty$
...										
6										
1										$U < U_{ном};$ $R_\delta = 0;$ $R_{ш} = \infty$
...										
6										

Після закінчення досліду необхідно зупинити двигун, вимкнувши QF1, і поступово перевести ручку пускового реостата  $R_n$  у нульове положення, в якому  $R_n = R_{n\ max}$ .

б) зняття характеристик двигуна при  $U = U_{ном}, R_\delta = 0, R_{ш} = const$ . При відключеному двигуні його обмотка збудження шунтується постійним опором  $R_{ш}$  (див. рис. 3.16). При цьому частина струму обмотки збудження відгалужується в шунт і поле машини послаблюється. Це приводить до збільшення частоти обертання при тому ж навантаженні на валу двигуна, що й у попередньому досліді. Методика пуску і проведення досліду зі

зняття характеристик аналогічна попередньому дослідю. Дані дослідю заносять до табл.3.5.

в) зняття характеристик при  $U = U_{ном}$ ,  $R_d = const$ ,  $R_{ш} = \infty$ . При непрацюючому двигуні відключають шунтуючий опір ( $R_{ш} = \infty$ ), в коло якоря двигуна вводять постійний за величиною додатковий опір  $R_d$  (див. рис. 3.16). Здійснюється реостатний пуск за методикою, викладеною в п.2, і знімаються характеристики. Дані дослідю заносять до табл. 3.5.

г) зняття характеристик при  $U < U_{ном}$ ,  $R_d = 0$ ,  $R_{ш} = \infty$ . При відключеному двигуні ( $R_{н max}$ ) додатковий опір відключається. При  $U = U_{ном}$  здійснюється реостатний пуск. Після повного розгону двигуна за допомогою РНТ Т1 напруга на ньому зменшується до  $U = U_{ном}/2$ . Далі знімають характеристики за методикою, викладеною у п. 3,а. Дані заносять до табл. 3.5.

#### 4. Основні розрахункові формули:

споживана двигуном потужність

$$P_1 = UI_a; \quad (3.43)$$

кутова швидкість обертання

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad (3.44)$$

потужність навантаження на валу двигуна

$$P_2 = \omega M_2; \quad (3.45)$$

коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.46)$$

### 3.3.6 Питання до захисту

1. Будова і принцип роботи двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Область застосування.

2. Способи пуску двигунів постійного струму. Суть реостатного пуску двигунів.

3. Теоретично пояснити вигляд робочих і механічної характеристик двигуна з послідовним збудженням.

4. Аналіз втрат і характеристики ККД у двигуні з послідовним збудженням.

5. Причини неможливості роботи двигуна з послідовним збудженням в режимі холостого ходу.

6. Способи регулювання швидкості двигуна з послідовним збудженням. Фізичні процеси, що відбуваються в регульованому двигуні при постійному моменті навантаження на валу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Электрические машины». Ч.IV. Машины постоянного тока / Сост. И.Ф. Павлов, С.А. Безверхий, В.И. Нагул, В.П. Головин. - Винница: ВПИ, 1990. – 64 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
4. Электрические машины: В 2-х ч. Ч.2: Учеб. для электотехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.

Навчальне видання

**Володимир Віталійович Грабко**

**Михайло Петрович Розводюк**

**Ігор Васильович Грабенко**

**Експериментальні дослідження електричних машин**

**Частина I. Машини постійного струму**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено М.П. Розводюком

Редактор Т.О. Старічек

Навчально-методичний відділ ВНТУ

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку

Формат 29,7 x 42 ¼

Друк різнографічний

Тираж \_\_\_\_\_ прим.

Зам № \_\_\_\_\_

Гарнітура Time New Roman

Ум. друк. арк. 3,9

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ