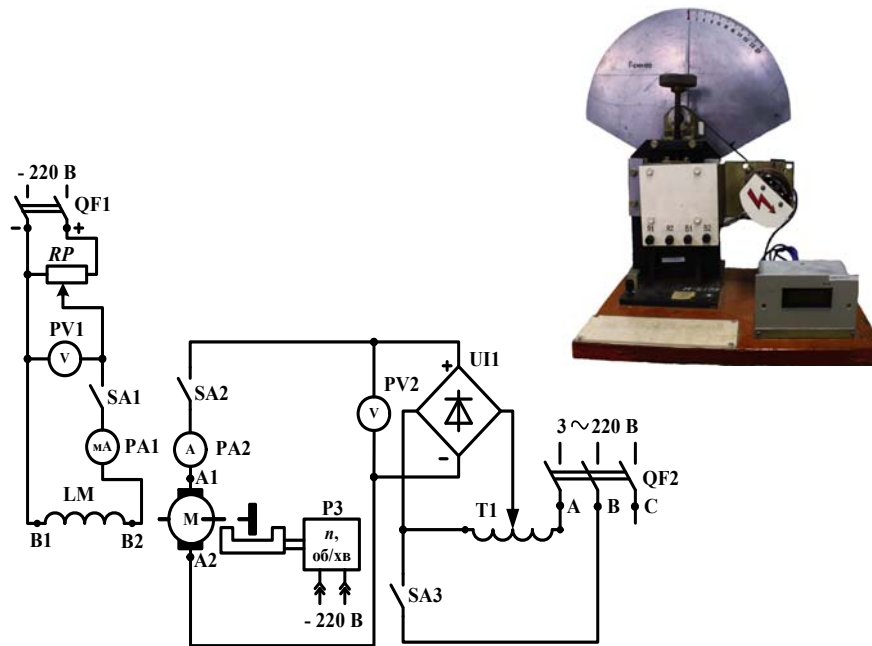


В.В. Грабко, М.П. Розводюк, М.О. Казак

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**
Частина II. Спеціальні електричні машини

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В.В. Грабко, М.П. Розводюк, М.О. Казак

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Частина II. Спеціальні електричні машини

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальності „Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”. Протокол №3 від 26 жовтня 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2006

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., Казак М.О.

Г75 **Експериментальні дослідження електричних машин. Частина II. Спеціальні електричні машини.** Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 155 с.

В навчальному посібнику викладено підходи до експериментальних досліджень електричних машин спеціального виконання. Для кожного лабораторного заняття наведено 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 „Спеціальні електричні машини”. Навчальний посібник рекомендується для студентів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка” спеціальності „Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”.

УДК 621.313

ЗМІСТ

Передмова	8
Вступ	10
Правила роботи в лабораторії електричних машин.....	10
Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт	12
Лабораторна робота №1 ВИПРОБУВАННЯ ТАХОГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	15
1.1 Основні теоретичні відомості	15
1.1.1 Принцип роботи	15
1.1.2 Похибки вихідної характеристики	17
1.1.3 Робота тахогенератора постійного струму як акселерометра.....	22
1.1.4 Основні вимоги до тахогенераторів	24
1.1.5 Переваги й недоліки тахогенераторів постійного струму	24
1.2 Програма лабораторної роботи.....	25
1.3 Будова лабораторного стенда.....	25
1.4 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	29
1.4.1 Зняття вихідних характеристик	29
1.4.2 Зняття зовнішньої характеристики.....	30
1.5 Паспортні дані електричних машин	31
1.6 Зміст звіту.....	31
1.7 Питання для самоконтролю.....	32
Лабораторна робота №2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОНАВЧОГО МІКРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	33
2.1 Основні теоретичні відомості	33
2.1.1 Якірне управління виконавчими мікродвигунами	34
2.1.2 Поліусне управління виконавчими мікродвигунами	41
2.1.3 Порівняння властивостей виконавчих мікродвигунів	46
2.1.4 Основні вимоги до виконавчих мікродвигунів	48

2.2 Програма лабораторної роботи.....	49
2.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	50
2.3.1 Будова лабораторного стенда	50
2.3.2 Розрахункові формули.....	55
2.3.3 Зняття робочих, механічних і регулювальних характеристик мікродвигуна	56
2.3.3.1 При якірному управлінні.....	56
2.3.3.2 При полюсному управлінні.....	58
2.3.4 Теоретичний розрахунок механічних та регулювальних характеристик.....	60
2.4 Паспортні дані електричних машин.....	62
2.5 Зміст звіту.....	62
2.6 Питання для самоконтролю	63

Лабораторна робота №3 ДОСЛІДЖЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО

КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА	64
3.1 Основні теоретичні відомості	64
3.1.1 Будова двигуна	64
3.1.2 Електромагнітний момент при роботі на змінному струмі ...	65
3.1.3 Характеристики двигуна при роботі на змінному струмі.....	66
3.1.4 Комутація при роботі на змінному струмі	68
3.1.5 Переваги універсальних колекторних двигунів.....	70
3.2 Програма лабораторної роботи.....	71
3.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	71
3.3.1 Будова лабораторного стенда	71
3.3.2 Зняття робочих характеристик двигуна на постійному струмі	75
3.3.3 Зняття робочих характеристик двигуна на змінному струмі	76
3.3.4 Розрахункові формули.....	77
3.4 Паспортні дані електричних машин.....	77
3.5 Зміст звіту	78

3.6 Питання для самоконтролю.....	78
Питання до захисту лабораторних занять (модуль I)	80
Лабораторна робота №4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДИКАТОРНОГО	
РЕЖИМУ РОБОТИ БЕЗКОНТАКТНИХ СЕЛЬСИНІВ	84
4.1 Основні теоретичні відомості	84
4.1.1 Будова та принцип роботи сельсинів	84
4.1.2 Режими роботи сельсинів.....	88
4.1.3 Робота однофазних сельсинів в індикаторному режимі	89
4.1.3.1 Принцип дії.....	89
4.1.3.2 ЕРС, струми та магніторушійні сили в обмотках синхронізації	90
4.1.3.3 Синхронізувальний момент сельсина.....	92
4.1.4 Основні похибки сельсинів і способи їх усунення.....	95
4.1.4.1 Основні вимоги до сельсинів.....	95
4.1.4.2 Причини похибок	95
4.1.4.3 Вплив опору лінії зв'язку.....	96
4.1.4.4 Вплив моменту навантаження	96
4.1.4.5 Точність сельсинів-приймачів	97
4.2 Програма лабораторної роботи.....	97
4.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	98
4.3.1 Будова лабораторного стенда	98
4.3.2 Визначення похибок	101
4.3.3 Визначення питомого синхронізувального моменту сельсина-приймача	102
4.3.4 Визначення залежності синхронізувального моменту, струму, потужності сельсина-сенсора, струмів у лінії зв'язку від кута неузгодженості	104
4.4 Паспортні дані електричних машин.....	105
4.5 Зміст звіту.....	105
4.6 Питання для самоконтролю.....	106

Лабораторна робота №5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО

ІНДУКЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА	107
5.1 Основні теоретичні відомості	107
5.1.1 Будова індукційного регулятора	107
5.1.2 Принцип роботи	108
5.1.3 Маркування фаз статора і ротора	114
5.2 Програма лабораторної роботи	117
5.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	117
5.3.1 Будова лабораторного стенда	117
5.3.2 Зняття вихідних характеристик	118
5.4 Паспортні дані електричних машин	121
5.5 Зміст звіту	121
5.6 Питання для самоконтролю	121

Лабораторна робота №6 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОГО

ТРАНСФОРМАТОРА	123
6.1 Основні теоретичні відомості	123
6.1.1 Призначення обертових трансформаторів	123
6.1.2 Будова обертових трансформаторів	124
6.1.3 Принцип дії обертового трансформатора	125
6.1.4 Синусно-косинусний обертовий трансформатор	127
6.1.4.1 Вихідна напруга	127
6.1.4.2 Вторинне симетрування	128
6.1.4.3 Первинне симетрування	130
6.1.5 Лінійний обертовий трансформатор	131
6.1.5.1 Вихідна напруга	131
6.1.5.2 Схема з первинним симетруванням	132
6.1.5.3 Схема з вторинним симетруванням	133
6.1.5.4 Переваги та недоліки різних схем	134
6.1.6 Обертовий трансформатор-побудовник	134
6.1.7 Причини похибок та точність обертових трансформаторів	136

6.2 Програма лабораторної роботи	137
6.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи	138
6.3.1 Будова лабораторного стенда	138
6.3.2 Дослідження синусно-косинусного обертового трансформатора.....	142
6.3.2.1 Дослід холостого ходу	142
6.3.2.2 Синусний обертовий трансформатор без симетрування	143
6.3.2.3 Синусний обертовий трансформатор із первинним симетруванням	144
6.3.2.4 Синусно-косинусний обертовий трансформатор із вторинним симетруванням	144
6.3.2.5 Синусно-косинусний обертовий трансформатор із первинним і вторинним симетруванням	145
6.3.3 Дослідження лінійного обертового трансформатора	146
6.3.4 Дослідження обертового трансформатора-побудовника.....	147
6.4 Паспортні дані електричних машин	149
6.5 Зміст звіту.....	149
6.6 Питання для самоконтролю.....	150
Питання до захисту лабораторних занять (модуль II)	151
Література.....	154

Передмова

Запропонований навчальний посібник складений згідно з програмою дисципліни „Спеціальні електричні машини”, при опануванні якої у лабораторіях навчальних закладів виконуються навчальні випробування електричних машин спеціального виконання. Це допомагає студентам опанувати теоретичні розділи курсу.

Слід зауважити, що в навчальному посібнику увагу зосереджено на мікромашинах. Це пояснюється тим, що кожний регіон має свою специфіку виробництва, залежно від якої використовується той чи інший тип „нестандартних” електричних машин – спеціальних, різновид яких не такий вже й великий порівняно зі стандартними електромашинами. При цьому системи управління електроприводами містять різні типи виконавчих механізмів, якими в більшості випадків є мікромашини.

В процесі лабораторних випробувань студенти знайомляться з конструкцією машин спеціального виконання, стандартними позначеннями обмоток і маркуванням їхніх виводів, набувають навичок складання схем, опановують техніку вимірювань електричних і неелектричних величин за методикою проведення випробувань і оброблення їхніх результатів.

В навчальному посібнику наведено практичні задачі. 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 спеціальних електромашин через обмеженість часу проводяться за скороченою програмою, яка, однак, повинна включати перевірку найважливіших характеристик досліджуваної машини.

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

Автори висловлюють вдячність к.т.н., доценту С.О. Безверхому, к.т.н., доценту І.Ф. Павлову та виносять подяку В.П. Головіну за допомогу в створенні та постановці лабораторних робіт.

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

Вступ

Правила роботи в лабораторії електричних машин

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

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

2. Роботи виконуються бригадами в складі не менше двох чоловік. Призначений бригадир відповідає за дисципліну членів бригади і за виконання ними даних правил.

3. Кожна бригада виконує різні лабораторні роботи у послідовності, зазначеній викладачем. Перед кожною роботою студенти повинні вивчити теоретичні розділи курсу, що відносяться до даної роботи, ознайомитися зі змістом і методикою виконання роботи.

4. На початку кожного заняття проводиться перевірка 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;
- в) 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 за межами лабораторії за допомогою комп'ютера на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 (210×97 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: ліве – 30 мм, праве – 15 мм, верхнє – 20 мм, нижнє – 30 мм.

Графіки будують за допомогою комп'ютера або вручну на міліметровому аркуші паперу. 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. До захисту повинні бути розв'язані всі задачі, вказані викладачем. 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.

Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

В лабораторії кожен студент повинен суворо дотримуватися основних правил техніки безпеки.

1. Кожен студент може виконувати роботу тільки в складі бригади не менше двох 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. Спеціальні електричні машини, які досліджуються, розташовані в лабораторному столі, а виводи початків і кінців всіх їхніх обмоток виводяться на панель столу. Більш докладний опис конструкції лабораторних стендів подається в кожній лабораторній роботі.

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

Подавати напругу живлення на схему після складання або будь-яких Perez'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.

Лабораторна робота №1

ВИПРОБУВАННЯ ТАХОГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

📁 **Мета роботи** | Вивчення будови і принципу роботи тахогенератора постійного струму, зняття його вихідних та зовнішніх характеристик.

1.1 Основні теоретичні відомості

Тахогенератори – електричні мікромашини, що працюють в генераторному режимі і служать для перетворення швидкості обертання в пропорційний електричний сигнал [2].

Тахогенератори постійного струму виконують:

- магнітоелектричними (із постійними магнітами на статорі);
- електромагнітними (із котушками збудження на статорі, живлення яких здійснюється від незалежного джерела постійного струму).

Як якір може використовуватися якір звичайного типу з барабанною обмоткою, а також пустотілий або дисковий із друкованою обмоткою [3].

1.1.1 Принцип роботи

Вхідною характеристикою тахогенератора постійного струму є залежність величини напруги на затискачах якоря U від частоти обертання n (кутової швидкості ω) якоря при незмінному магнітному потоці Φ ($\Phi = \text{const}$) і незмінному опорі навантаження R_n ($R_n = \text{const}$).

При незмінному струмі збудження I_z , тобто при незмінному магнітному потоці Φ , ЕРС E пропорційна частоті обертання:

$$E = k_E \omega = k_E \frac{d\Theta}{dt} = c_e \Phi n, \quad (1.1)$$

де k_E – стала машини, визначається як

$$k_E = c_M \Phi, \quad (1.2)$$

де c_m – конструктивний коефіцієнт:

$$c_m = \frac{Np}{2a\pi}, \quad (1.3)$$

де N – число активних провідників обмотки якоря;

p – число пар полюсів;

a – кількість паралельних віток обмотки якоря);

Θ – кут повороту якоря тахогенератора;

c_e – коефіцієнт, що визначається конструктивними параметрами машини і не залежить від режиму її роботи:

$$c_e = \frac{pN}{60a}. \quad (1.4)$$

Вираз (1.1) є основою для використання машини постійного струму як тахогенератора. Його вихідна напруга

$$U = E - I_a R_{a\Sigma}, \quad (1.5)$$

де I_a – струм якоря;

$R_{a\Sigma}$ – сумарний опір кола якоря.

Оскільки струм якоря визначається співвідношенням

$$I_a = \frac{U}{R_n}, \quad (1.6)$$

то вираз (1.5) набуде вигляду:

$$U = E - U \frac{R_{a\Sigma}}{R_n}. \quad (1.7)$$

Підставляючи вираз (1.1) в (1.7) та здійснивши перетворення, отримаємо рівняння вихідної характеристики тахогенератора:

$$U = \frac{E}{1 + \frac{R_{a\Sigma}}{R_n}} = \frac{k_E \omega}{1 + \frac{R_{a\Sigma}}{R_n}} = \frac{c_e \Phi n}{1 + \frac{R_{a\Sigma}}{R_n}}. \quad (1.8)$$

Вихідні характеристики для різних опорів навантаження при ідеалізованих умовах (вказаних вище) показані на рис. 1.1, а) суцільними лініями. Згідно з (1.8) ці характеристики є лінійними, а їхній кут нахилу до осі абсцис зменшується при зменшенні опору навантаження. З цього можна зробити висновок, що тахогенератори можна застосовувати тільки при незмінному навантаженні, тобто разом із індикатором або іншим пристроєм, на який розрахований даний тахогенератор [3].

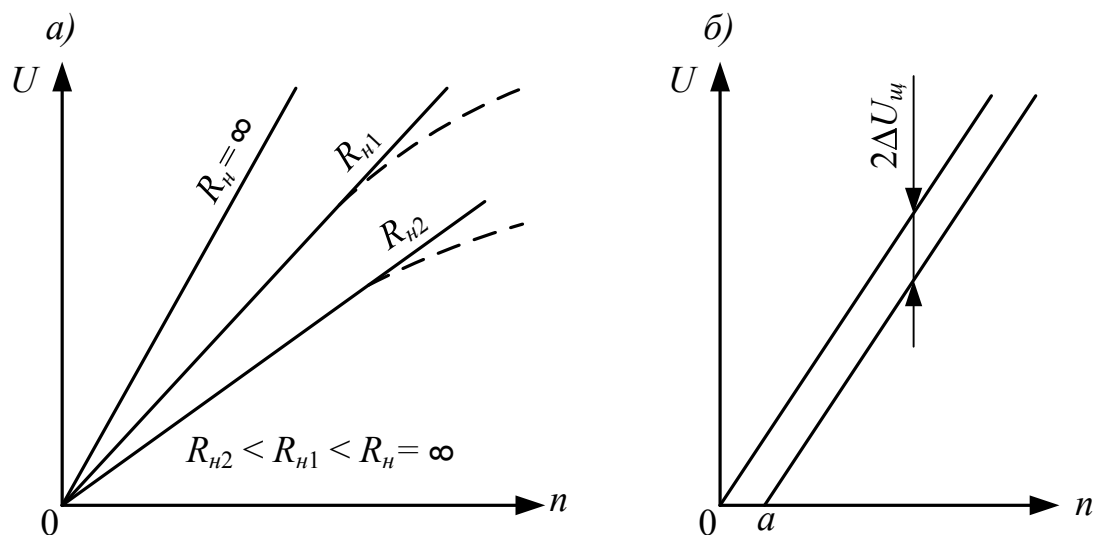


Рисунок 1.1 – Вихідні характеристики тахогенератора постійного струму

1.1.2 Похибки вихідної характеристики

Реальна вихідна характеристика практично відхиляється від лінійного закону (1.8) в результаті:

- 1) розмагнічувальної дії реакції якоря;
- 2) наявності нелінійного опору в перехідному контакті між колектором і щітками;

- 3) зміни струму збудження, обумовленим збільшенням опору обмотки збудження при її нагріванні;
- 4) асиметрії вихідної напруги.

Розмагнічувальна дія реакції якоря проявляється при зростанні частоти обертання n , тому що при цьому підвищується напруга U , збільшується струм I_a тахогенератора, а як наслідок, і магніторушійна сила якоря F_a . Тому при підвищених частотах обертання вихідна напруга U зростає повільніше, ніж збільшується частота обертання (див. штрихові лінії на рис. 1.1, *a*). Щоб зменшити вплив розмагнічувальної дії реакції якоря, у колі навантаження бажано мати максимально великий опір R_n і тахогенератор повинен працювати при невеликих відносних частотах обертання [3].

При роботі тахогенератора на навантаження сталою величиною залишається спад напруги в перехідному щітковому контакті $2\Delta U_{щ}$, а опір цього контакту залежить від величини навантаження. Це впливає з характеру залежності опору графіту, з якого виконують щіткові контакти, від густини струму в ньому. За таких умов напруга на затискачах якоря тахогенератора при навантаженні буде визначатися рівнянням

$$U = E_n - 2\Delta U_{щ} - I_a R_a \Sigma, \quad (1.9)$$

де E_n – ЕРС якоря при навантаженні:

$$E_n = k\omega\Phi_n, \quad (1.10)$$

де Φ_n – результуючий потік при навантаженні:

$$\Phi_n = \Phi - \Phi_p, \quad (1.11)$$

де Φ – потік при холостому ході;

Φ_p – потік, що характеризує розмагнічувальну реакцію якоря і є пропорційним струму якоря.

Підставивши (1.6), (1.10) і (1.11) в (1.9), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 U &= c_m \omega \Phi_n - 2\Delta U_{щ} - U \frac{R_a \Sigma}{R_n} = \\
 &= k_E \omega - c_m k_p \omega \frac{U}{R_n} - 2\Delta U_{щ} - U \frac{R_a \Sigma}{R_n},
 \end{aligned}
 \tag{1.12}$$

де k_p – коефіцієнт пропорційності між струмом якоря і потоком Φ_p .

Розв'язавши отримане рівняння відносно напруги якоря U , отримаємо рівняння вихідної характеристики тахогенератора постійного струму з урахуванням розмагнічувальної дії реакції якоря і при незмінному спаді напруги в щітковому контакті [2]:

$$U = \frac{k_E \omega - 2\Delta U_{щ}}{1 + \frac{c_m k_p + R_a \Sigma}{R_n}}.
 \tag{1.13}$$

Нелінійний характер опору щіткового контакту вносить деяку свою похибку порівняно з ідеалізованою характеристикою I (рис. 1.1, б). При цьому вихідна характеристика 2 залишається лінійною, однак в області малих частот обертання тахогенератор стає нечутливим до зміни Δn – з'являється *зона нечутливості* Oa .

Для зменшення похибки, обумовленої спадом напруги $2\Delta U_{щ}$ під парою щіток, у тахогенераторах застосовують металографітові щітки, у яких величина $2\Delta U_{щ}$ незначна, а в прецизійних тахогенераторах, призначених для лічильно-розв'язувальних пристроїв, – щітки зі срібними й золотими напайками. При використанні таких щіток похибку від впливу величини $2\Delta U_{щ}$ практично можна не враховувати [3].

Нагрівання обмотки збудження тахогенератора призводить до збільшення її опору R_z , внаслідок чого зменшуються струм збудження, магнітний потік і вихідна напруга. Для того, щоб із підвищенням температури обмотки збудження струм збудження змінювався незначно, послідовно з нею включають терморезистор, що стабілізує опір кола обмотки збудження або додатковий резистор з опором $R_{\text{дод}} \gg R_n$,

виконаний із матеріалу з малим температурним коефіцієнтом опору [3]. Крім того, щоб зменшити вплив струму збудження на магнітний потік, тахогенератори часто виконують із сильною насиченістю магнітної системи.

Для підвищення лінійності вихідної характеристики доцільно навантажувати тахогенератор на якомога більший зовнішній опір і використовувати невеликий діапазон швидкостей обертання, тому що в цьому випадку реакція якоря незначна.

Статичний коефіцієнт підсилення тахогенератора, що характеризує співвідношення між вихідною напругою на затискачах обмотки якоря і швидкістю обертання якоря, можна визначити з рівняння (1.12):

$$k_{nidc} = \frac{dU}{d\omega} = \frac{\left(1 + \frac{R_{a\Sigma}}{R_H}\right) k_E + 2\Delta U_{щ} \frac{kk_p}{R_H}}{\left(1 + \frac{R_{a\Sigma} + c_M k_p \omega}{R_H}\right)^2}. \quad (1.14)$$

З останнього рівняння випливає, що в загальному випадку k_{nidc} є нелінійною функцією швидкості обертання якоря. Якщо розмагнічувальною дією реакції якоря в даному випадку можна знехтувати, тобто прийняти $k_p = 0$, то рівняння (1.14) перетвориться до вигляду

$$k_{nidc} = \frac{k_E}{1 + \frac{R_{a\Sigma}}{R_H}}. \quad (1.15)$$

При цьому k_{nidc} не залежить від швидкості обертання якоря, а визначається тільки конструктивними параметрами, напругою збудження машини (через коефіцієнт k_E) і величиною опору навантаження R_H (рис. 1.2) [2].

Асиметрія вихідної напруги в тахогенераторах постійного струму полягає в тому, що при обертанні якоря, замкнутого на навантаження, з

однаковою швидкістю в протилежних напрямках величина вихідної напруги виявляється різною. Наявність асиметрії здебільшого є наслідком технологічної неточності установлення щіток на геометричну нейтраль.

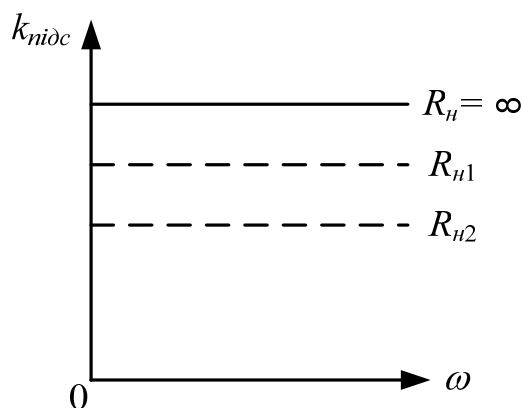


Рисунок 1.2 – Статичний коефіцієнт підсилення тахогенератора постійного струму

Явище асиметрії можна пояснити так. При обертанні якоря за годинниковою стрілкою зі швидкістю ω_c через якір протікає струм I_{ac} і виникає потік реакції якоря Φ_{pc} , повздовжня складова якого додається до головного потоку Φ , збільшуючи його. При обертанні якоря проти годинникової стрілки зі швидкістю $\omega_n = \omega_c$ напрямом ЕРС і струму в якорі змінюється на протилежний. Виникає потік реакції якоря Φ_{pn} , повздовжня складова якого спрямована назустріч головному потоку Φ , зменшуючи його. Внаслідок нерівності результувальних магнітних потоків при протилежних напрямках обертання якоря з'являється асиметрія вихідної напруги. Величину асиметрії A (в відсотках) можна визначити як [2]:

$$A = \frac{U_z - U_n}{\frac{1}{2} \cdot (U_z + U_n)} \cdot 100\%, \quad (1.16)$$

де U_z, U_n – напруги, виміряні на затискачах якоря тахогенератора при його обертанні за годинниковою стрілкою та проти неї, відповідно.

Крутість вихідної характеристики можна визначити з виразу

$$K = \frac{U}{n}. \quad (1.17)$$

В сучасних тахогенераторах $K = (0,005 \div 0,13)$ В/(об/хв.).

Крім того, на якість роботи тахогенератора постійного струму в системі автоматичного регулювання істотно впливає низькочастотна колекторна пульсація вихідної напруги. Вона особливо проявляється в системі автоматичного регулювання при малих швидкостях обертання тахогенератора (підхід системи до стійкого положення), коли період пульсацій стає сумірним із постійною часу виконавчого елемента.

Зазначені причини викликають відхилення вихідної характеристики тахогенератора від ідеалізованої лінійної. При цьому *відносна швидкісна амплітудна похибка* Δu , обумовлена нелінійністю вихідної характеристики, в основному встановлюється при номінальній частоті обертання й визначається як відношення (%)

$$\Delta u = \frac{U_{i\partial} - U_{\partial}}{U_{i\partial}} \cdot 100, \quad (1.18)$$

де $U_{i\partial}$ – вихідна напруга при ідеальних умовах;

U_{∂} – дійсне значення вихідної напруги.

Залежно від класу точності тахогенератора швидкісна амплітудна похибка при номінальній частоті обертання становить $\pm(0,5 \div 3)\%$, а похибка асиметрії $\pm(1 \div 3)\%$.

1.1.3 Робота тахогенератора постійного струму як акселерометра

Тахогенератор постійного струму може бути використаний для вимірювання кутових прискорень, тобто як акселерометр [2]. Для цього до затискачів якоря тахогенератора потрібно підключити послідовний ланцюжок RC (рис. 1.3), а вихідну напругу знімати із затискачів опору R .

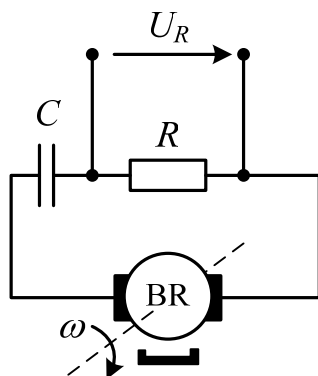


Рисунок 1.3 – Тахогенератор постійного струму в режимі акселерометра

При рівномірній швидкості обертання якоря ємність C заряджена ($U_C = U$), струм через R рівний нулю, а тому вихідна напруга $U_R = 0$. При появі кутового прискорення починає змінюватися напруга U на затискачах якоря пропорційно зміні швидкості:

$$\frac{dU}{dt} = k_{n\text{іdc}} \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.19)$$

Відбувається зарядження або розрядження ємності C і опором R протікає струм I_R , пропорційний швидкості зміни напруги на затискачах якоря:

$$I_R = k_R \frac{dU}{dt}, \quad (1.20)$$

де k_R – коефіцієнт пропорційності.

Враховуючи рівняння (1.19) і вважаючи величину кутового прискорення незмінною, одержуємо залежність струму I_R від прискорення:

$$I_R = \frac{d\omega}{dt} k_{n\text{іdc}} k_R. \quad (1.21)$$

Тоді

$$U_R = I_R R = \frac{d\omega}{dt} k_{n\text{іdc}} k_R R, \quad (1.22)$$

тобто величина вихідної напруги U_R пропорційна кутовому прискоренню якоря тахогенератора.

1.1.4 Основні вимоги до тахогенераторів

До тахогенераторів незалежно від їхнього походження висуваються такі вимоги [2]:

- 1) мінімальна амплітудна похибка, що залежить від відхилення вихідної характеристики від лінійної залежності;
- 2) мінімальна фазова похибка, що залежить від зміни фази вихідної напруги при зміні режиму роботи (у тахогенераторів постійного струму дана похибка відсутня);
- 3) відсутність радіоперешкод;
- 4) безшумність роботи;
- 5) малий момент інерції ротора;
- 6) мала електромагнітна постійна часу;
- 7) експлуатаційна надійність;
- 8) невеликі розміри і вага.

1.1.5 Переваги й недоліки тахогенераторів постійного струму

Переваги тахогенераторів постійного струму:

- малі габарити й маса при великій вихідній потужності;
- відсутність фазової похибки, що обумовлено роботою на активне навантаження.

Крім того, у тахогенераторах з постійними магнітами не потрібне допоміжне джерело електричної енергії для збудження.

Однак порівняно з тахогенераторами змінного струму вони мають ряд недоліків:

- складність конструкції;
- висока вартість, нестабільність вихідної характеристики через наявність ковзного контакту;
- пульсації вихідної напруги й радіоперешкоди, що виникають у результаті комутації струмів щітками.

1.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитись з конструкцією тахогенератора, записати його номінальні величини.

2. При дослідженні роботи тахогенератора постійного струму:

а) зняти вихідні характеристики $U = f(n)$;

б) зняти зовнішню характеристику $U = f(R_n)$;

в) визначити асиметрію вихідної напруги та крутості вихідної характеристики.

3. За даними дослідів 2, а), побудувати залежності $U = f(n)$ та $U = f(R_n)$.

1.3 Будова лабораторного стенда

Для вивчення будови тахогенератора на боковій панелі стенда закріплена панель, на якій він поданий у розібраному стані (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Тахогенератор постійного струму

Зовнішній вигляд самого лабораторного стенда для дослідження тахогенератора постійного струму показаний на рис. 1.5, а на рис. 1.6 – у збільшеному вигляді його передня панель.

Схема електрична принципова для дослідження тахогенератора постійного струму, зібрана на стенді, зображена на рис. 1.7.

Призначення комутаційної та сигнальної апаратури стенда:

- тумблер SA – для подачі живлення на схему;
- тумблер SA1 – для подачі напруги на обмотку управління Y1–Y2 асинхронного двигуна M;
- SA2 – для подачі напруги на обмотку збудження B1–B2 асинхронного двигуна M;

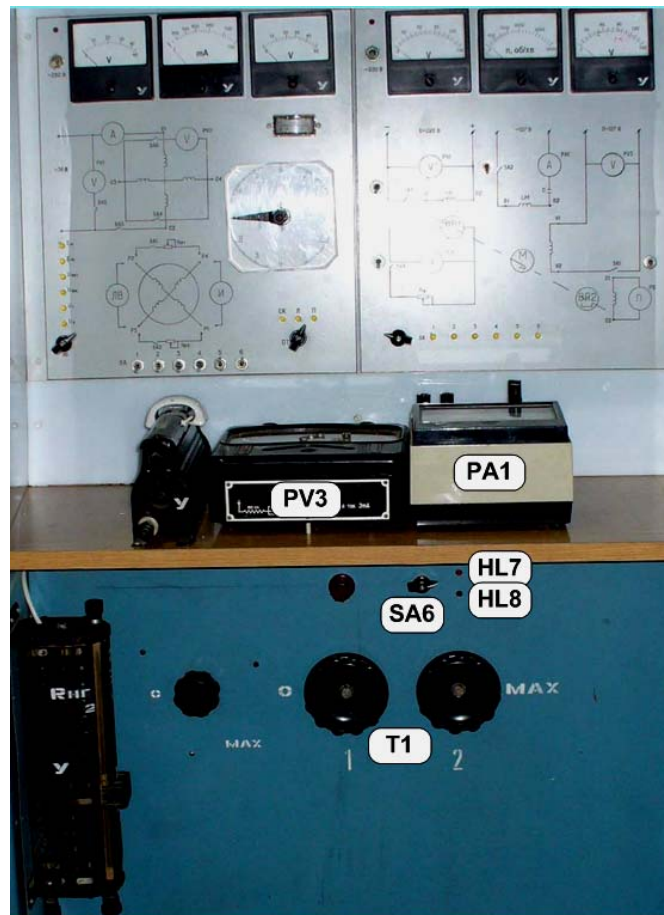


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд станда для дослідження тахогенератора постійного струму

- тумблер SA3 – для подачі постійної напруги на обмотку збудження B1–B2 досліджуваного тахогенератора постійного струму BR1;
- тумблер SA4 – для підключення навантаження R_n до обмотки якоря тахогенератора BR1;
- пакетний перемикач SA5 – для перемикання опорів навантаження R_n (200, 450, 1100, 1300, 1400 та 1600 Ом); про кожне положення перемикача сигналізуватиме світлодіод HL1–HL6 жовтого кольору;
- пакетний перемикач SA6 – для здійснення реверсу асинхронного двигуна M (про напрямок обертання вала двигуна сигнализують відповідні світлодіоди HL7 та HL8, відповідно);

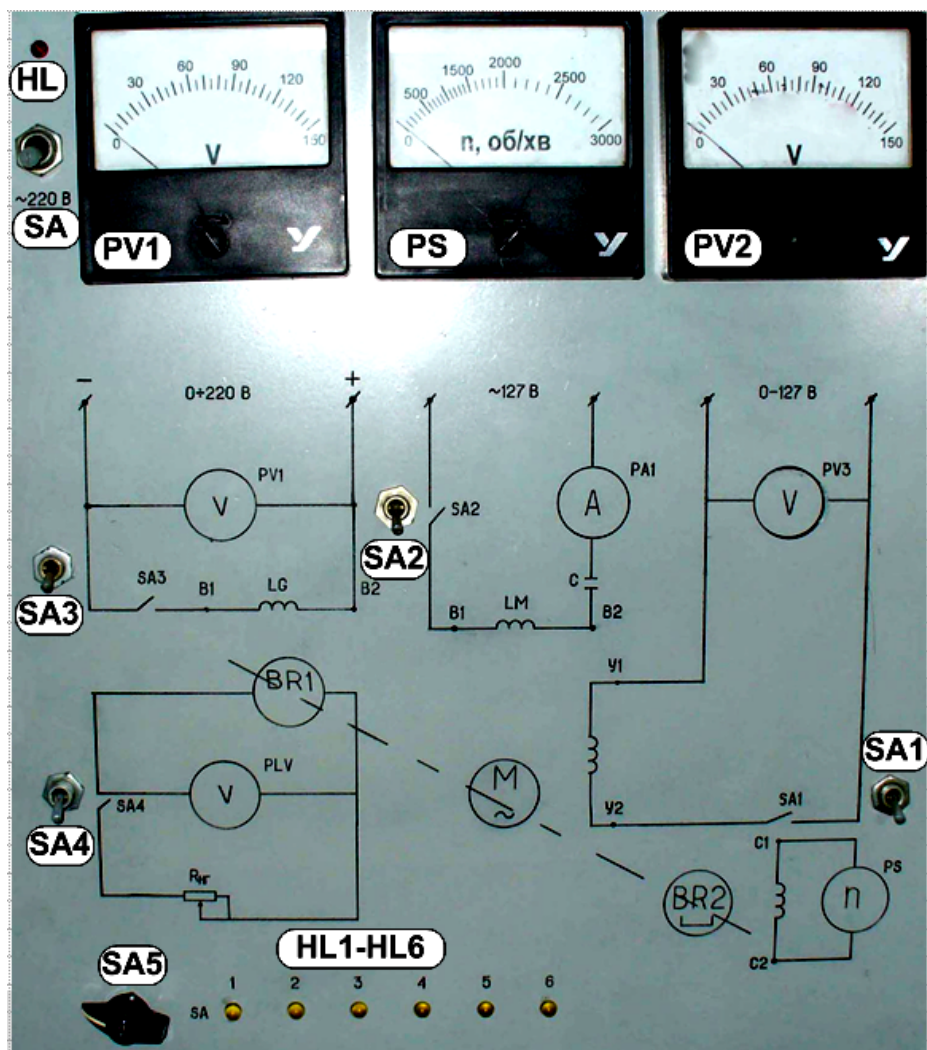


Рисунок 1.6 – Передня панель станда для дослідження тахогенератора постійного струму

Призначення контрольно-вимірювальних приладів:

- амперметр PA1 – для контролю струму збудження асинхронного двигуна;
- вольтметри PV1 та PV2 – для контролю напруг обмотки управління $U_{упр}$ та напруги збудження U_z досліджуваного тахогенератора постійного струму BR1, відповідно;
- вольтметр PV3 – для вимірювання вихідної напруги тахогенератора BR1;
- тахометр PS – для ідентифікації швидкості обертання вала асинхронного двигуна M. Це досягається зняттям величини напруги з обмотки C1–C2 синхронного тахогенератора BR2.

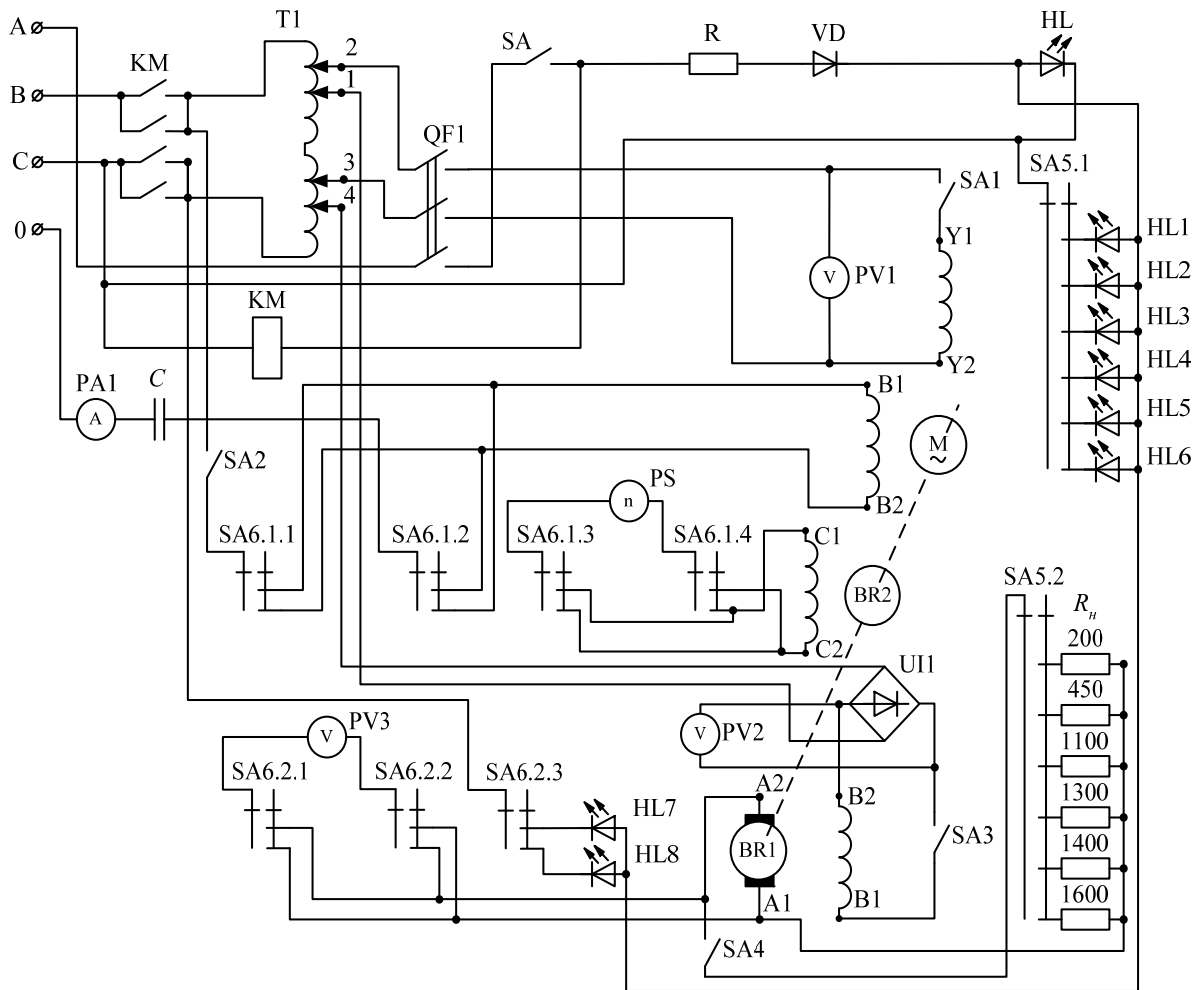


Рисунок 1.7 – Схема електрична принципова стенда для дослідження тахогенератора постійного струму

Призначення електричних машин:

- асинхронний двигун М – для створення обертового руху;
- тахогенератор BR1 – для дослідження;
- тахогенератор BR2 – для контролю частоти обертання асинхронного двигуна М;
- регулятор напруги Т1 – для регулювання напруг на обмотках електричних машин.

Всі електричні машини механічно зв'язані між собою.

1.4 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1.4.1 Зняття вихідних характеристик

Вихідні характеристики тахогенератора $U = f(n)$ знімаються при напрузі збудження тахогенератора $U_3 = U_{3\text{ном}} = \text{const}$ та при різних параметрах навантаження ($R_n = \infty$; 1250 Ом; 450 Ом).

Для подачі живлення на стенд необхідно: увімкнути автомат QF1 та тумблер SA; регулятором напруги Т1 встановити номінальні значення напруг обмотки управління U_y (ручка 1 на рис. 1.5) та обмотки збудження U_3 (ручка 2 на рис. 1.5), при цьому напруги контролюються вимірювальними приладами PV1 та PV2 відповідно; по черзі ввімкнути тумблери SA1, SA2 та SA3.

Для зняття вихідних характеристик:

- при $R_n = \infty$ тумблер SA4 має бути в розімкнутому положенні;
- при $R_n = 1250$ Ом тумблер SA4 має бути замкнутий, а пакетний перемикач SA5 – в крайньому правому положенні (повинен загорітися світлодіод HL6);
- при $R_n = 450$ Ом тумблер SA4 має бути замкнутий, а пакетний перемикач SA5 – в другому положенні, про що сигналізуватиме HL2.

Вихідна напруга контролюється вимірювальним приладом PV3. Результати вимірювань занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Експериментальні дані дослідження зняття вихідних характеристик

n , об/хв.	2000	1500	1200	1000	800	600	400	200
U , В при								
$R_n = \infty$								
$R_n = 1600$ Ом								
$R_n = 450$ Ом								

1.4.2 Зняття зовнішньої характеристики

Зовнішня характеристика тахогенератора $U = f(R_n)$ знімається при $U_z = U_{z_{ном}} = \text{const}$, $n = n_{ном} = \text{const}$.

Порядок подачі живлення на стенд такий самий, як і в попередньому випадку.

Для зняття зовнішньої характеристики необхідно замкнути тумблер SA4, а пакетним перемикачем SA5 послідовно змінювати опір навантаження R_n з 200 Ом до 1600 Ом (кожному значенню R_n загорання відповідного світлодіода HL2–HL6 жовтого кольору). При її знятті необхідно враховувати опір вольтметра R_V , включеного на затискачі якірної обмотки. Тоді повний опір навантаження буде визначатися співвідношенням:

$$R'_n = \frac{R_n \cdot R_V}{R_n + R_V}. \quad (1.23)$$

Результати вимірювань занести до табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Експериментальні дані зовнішньої характеристики тахогенератора

Параметри	Значення					
R_V , кОм	100					
R_n , Ом	200	450	1100	1300	1400	1600
R'_n , Ом						
U , В						

Встановивши номінальні значення опору навантаження і частоти обертання, виміряти напругу (PV3) при правому та лівому обертанні асинхронного двигуна М. Для цього необхідно перемкнути пакетний перемикач SA6: якщо горить HL8, то двигун обертається у правому напрямі обертання (за годинниковою стрілкою); якщо горить HL7 – то у лівому напрямі обертання (проти годинникової стрілки).

Асиметрію вихідної напруги визначити за формулою (1.16), а крутість вихідної характеристики – за формулою (1.17).

1.5 Паспортні дані електричних машин

Тахогенератор постійного струму:

$$U_{з.ном} = 110 \text{ В}; I_{а.ном} = 0,1 \text{ А}; R_{н.ном} = 450 \text{ Ом}; n_{ном} = 1500 \text{ об/хв}; E_{а.ном} = 75 \text{ В}.$$

Приводний двигун – асинхронний двигун з порожнистим ротором:

$$P_{ном} = 9 \text{ Вт}; U_{з.ном} = 110 \text{ В}; U_{у.ном} = 125 \text{ В}; I_{у.ном} = 0,25 \text{ А}; I_{з.ном} = 0,6 \text{ А};$$

$$n_{ном} = 1750 \text{ об/хв}; n_0 = 2500 \text{ об/хв}; M_{ном} = 0,04 \text{ Нм}; \eta = 17\%; f = 50 \text{ Гц};$$

$$C_p = 2,5 \text{ мкФ}.$$

Регулятор напруги:

тип – ОСН-20-220-75УХЛ4; $U_{ном} = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; I_n = 20 \text{ А};$ число фаз – 1; регульована напруга – $5 \div 240 \text{ В};$ клас ізоляції А.

1.6 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Програма лабораторної роботи.
5. Паспортні дані електричних машин, перелік використаних приладів.
6. Схема дослідної установки.
7. Таблиці з дослідними та розрахунковими даними.
8. Побудувати в одних координатних осях вихідні характеристики тахогенератора $U = f(n)$ при $U_z = \text{const}$ у діапазоні частот обертання двигуна від $0,1n_n$ до $1,2n_n$:
 - а) для холостого ходу ($R_n = \infty$);
 - б) при $R_n = 1600 \text{ Ом};$
 - в) при $R_n = 450 \text{ Ом}.$

Побудувати зовнішню характеристику тахогенератора $U = f(R_n)$ за даними дослідів 2.4.2 при $n = \text{const}$. В діапазоні зміни опору навантаження R_n від 1600 Ом до $450 \text{ Ом}.$

9. Розрахувати крутість вихідної характеристики тахогенератора та визначити зону нечутливості.
10. Визначити асиметрію вихідної напруги тахогенератора.
11. За результатами роботи зробити висновки.

1.7 Питання для самоконтролю



1. Будова, принцип дії та призначення тахогенератора постійного струму.
2. Вихідна характеристика тахогенератора. Причини її нелінійності.
3. Причина виникнення зони нечутливості тахогенератора та спосіб її зменшення.
4. Види похибок тахогенератора постійного струму електромагнітного і магнітоелектричного типів збудження та способи їх зменшення.
5. Причина виникнення асиметрії вихідної напруги тахогенератора.
6. Переваги й недоліки тахогенератора постійного струму.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОНАВЧОГО МІКРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

📁 **Мета роботи** Вивчення будови й принципу роботи виконавчого мікродвигуна постійного струму; зняття робочих, механічних і регулювальних характеристик мікродвигуна з якірним і полюсним управлінням.

2.1 Основні теоретичні відомості

Виконавчими двигунами називають електричні мікродвигуни, призначені для перетворення підведеного до них електричного сигналу (напруги управління) в кутове переміщення (або швидкість) вала.

Виконавчі двигуни постійного струму бувають із незалежним електромагнітним збудженням або із збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні).

У виконавчих двигунах постійного струму обмотки якоря й головних полюсів живляться від двох незалежних джерел струму. Одна з них (умовно називається *обмоткою збудження*) підключена постійно до джерела з незмінною напругою U_z , а на іншу (*обмотку управління*) подається напруга управління U_y тільки при необхідності обертання вала двигуна [3]. Залежно від того, на яку обмотку подається керувальний сигнал, розрізняють два способи управління виконавчими двигунами:

- 1) якірне;
- 2) полюсне.

У деяких випадках застосовують виконавчі двигуни з постійними магнітами, у яких керувальний сигнал подається на обмотку якоря. Виконавчі двигуни в основному працюють у перехідному режимі; для них характерні часті пуски, зупинки й реверси.

2.1.1 Якірне управління виконавчими мікродвигунами

При якірному управлінні виконавчими двигунами (рис. 2.1) обмоткою управління є обмотка якоря, тобто напруга управління U_y подається на обмотку якоря. Магнітний потік збудження Φ створюється струмом, що протікає по обмотці збудження головних полюсів (рис. 2.1, а), або постійними магнітами (рис. 2.1, б). У першому випадку обмотка збудження постійно підключена до незалежного джерела живлення з напругою U_3 , що дорівнює номінальній напрузі двигуна. Для даного способу управління $\Phi = \text{const}$. Регулювання швидкості обертання якоря ω здійснюється зміною напруги U_y на затискачах якоря. При аналізованні характеристик розмагнічувальною дією реакції якоря нехтуємо.

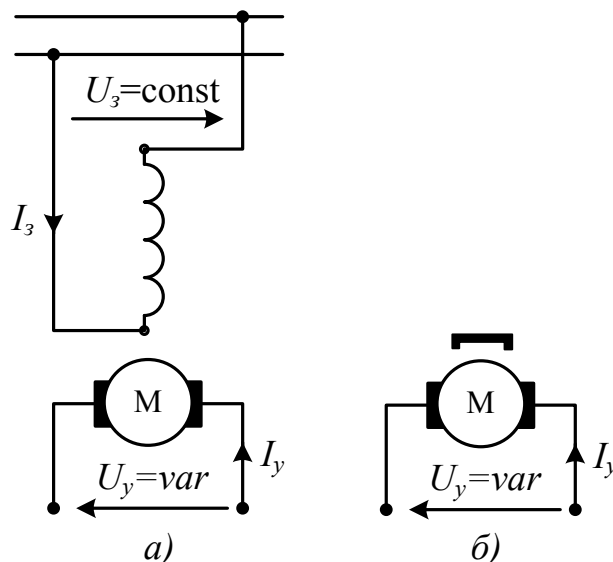


Рисунок 2.1 – Схеми вмикання виконавчих двигунів постійного струму при якірному управлінні

Для виконавчих мікродвигунів важливим параметром є коефіцієнт сигналу:

$$\alpha = \frac{U_y}{U_3}. \quad (2.1)$$

Для двигунів із постійними магнітами $\alpha = U_y / U_{ном}$. Величина α змінюється в діапазоні $0 \div 1,25$.

Коли напруга $U_y = 0$, струм в обмотці якоря I_y та обертовий момент двигуна M рівні нулю. Тому самохід двигуна виключається. Явище самоходу полягає в тому, що двигун продовжує створювати обертовий момент і його ротор продовжує обертатися при знятому сигналі управління. Змінюючи напругу U_y , можна регулювати частоту обертання двигуна.

Оскільки магнітне коло виконавчих двигунів виконують ненасиченим, то при $U_3 = \text{const}$ магнітний потік

$$\Phi = k_\Phi I_3 = k'_\Phi U_3, \quad (2.2)$$

де k_Φ і k'_Φ – постійні, що залежать від параметрів обмотки збудження (опору й числа витків) і магнітного опору магнітного кола машини [3].

Індуковану в обмотці якоря ЕРС E з врахуванням (2.2) можна подати у вигляді

$$E = c_e \Phi n = c_e k'_\Phi U_3 n. \quad (2.3)$$

Тоді струм якоря з врахуванням (2.1) та (2.3)

$$I_y = \frac{U_y - E}{R_y} = \frac{\alpha U_3 - c_e k'_\Phi U_3 n}{R_{a\Sigma}}, \quad (2.4)$$

де $R_y = R_{a\Sigma}$ – сумарний опір кола якоря.

Оскільки $I_a = I_y$, то обертовий момент двигуна

$$M = c_m k_\Phi I_y = c_m k'_\Phi U_3 I_y. \quad (2.5)$$

Підставивши (2.4) в (2.5), отримаємо:

$$M = \frac{c_m k'_\Phi \alpha U_3^2 - c_m c_e k'_\Phi{}^2 U_3^2 n}{R_{a\Sigma}}. \quad (2.6)$$

Для зручності аналізування характеристик виконавчого мікродвигуна перейдемо до відносних одиниць.

За базову одиницю приймемо пусковий момент M_n , при якому $n = 0$ і $\alpha = 1$ [3]. За таких умов пусковий момент відповідно до (2.6)

$$M_n = \frac{c_m k'_\Phi U_3^2}{R_{a\Sigma}}, \quad (2.7)$$

а відносне значення моменту –

$$m = M/M_n = \alpha - c_e k'_\Phi n. \quad (2.8)$$

Якщо знехтувати втратами, то в режимі холостого ходу $E = U_3$. Тоді якщо в (2.3) замість E покласти U_3 , отримаємо частоту обертання ідеального холостого ходу:

$$n_{0\ id} = \frac{U_3}{c_e \Phi} = \frac{U_3}{c_e k'_\Phi U_3} = \frac{1}{c_e k'_\Phi}, \quad (2.9)$$

а відносна частота обертання буде визначатися як

$$v = \frac{n}{n_{0\ id}} = c_e k'_\Phi n. \quad (2.10)$$

Підставивши отримане значення (2.10) в (2.8), отримаємо рівняння механічної характеристики у відносних одиницях:

$$m = \alpha - v. \quad (2.11)$$

При постійному коефіцієнті сигналу $\alpha = \text{const}$ вираз (2.11) є рівнянням механічної характеристики $v = f(m)$ виконавчого двигуна з якірним управлінням, а при постійному моменті $m = \text{const}$ – рівнянням регульовальної характеристики $v = f(\alpha)$. З рівняння (2.11) випливає, що механічні і регульовальні характеристики при якірному управлінні – лінійні (рис. 2.2).

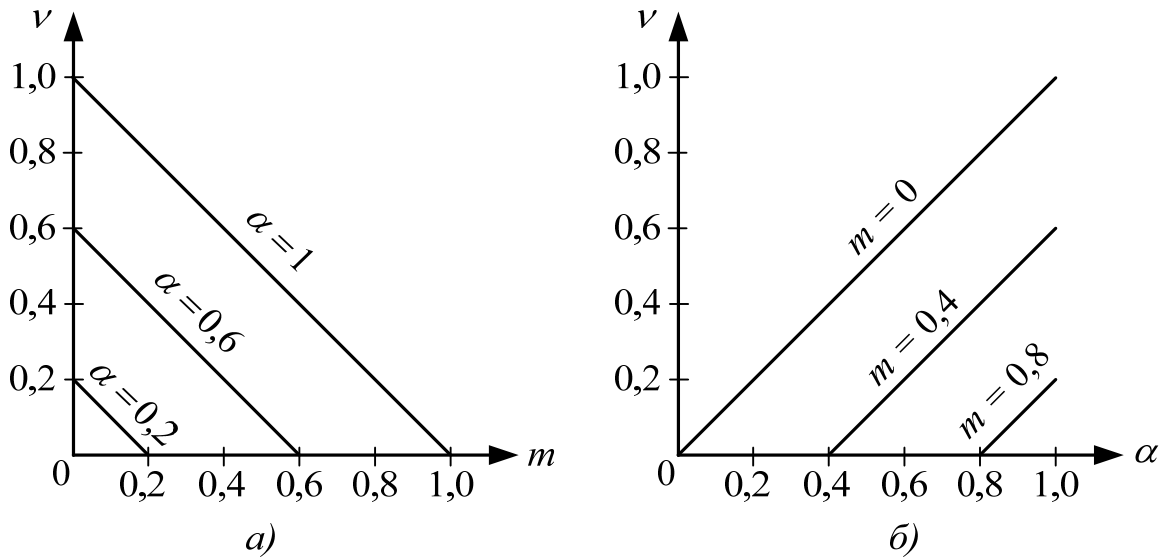


Рисунок 2.2 – Механічні (а) і регульовальні (б) характеристики виконавчого двигуна з якірним управлінням

Механічні характеристики (рис. 2.2, а) забезпечують статичну стійкість роботи двигуна при якірному управлінні на всьому діапазоні швидкостей $\alpha = 0 \div 1$. Жорсткість механічних характеристик залишається незмінною при будь-якому коефіцієнті сигналу. Максимальний обертовий момент двигун розвиває при пуску [2]. Величина пускового моменту у відносних одиницях, згідно (2.11), дорівнює коефіцієнту сигналу:

$$m_n = \alpha, \quad (2.12)$$

тобто пусковий момент прямо пропорційний напрузі управління.

Якірний спосіб управління забезпечує лінійну залежність швидкості обертання якоря від напруги управління при будь-якому статичному моменті навантаження на валі (рис. 2.2, б). Слід зазначити, що регульовальна характеристика ненавантаженого двигуна починається з нуля тільки в ідеальному випадку, коли механічні втрати двигуна дорівнюють нулю. У реальних виконавчих двигунів у режимі холостого ходу якір починає обертатися при заданій напрузі управління, відмінній від нуля. Ця напруга називається *напругою рушання* U_p . Величина U_p залежить від рушійного моменту тертя двигуна і визначає зону

нечутливості. Для виконавчих двигунів як постійного, так і змінного струму величина U_p не повинна перевищувати 5% $U_{ном}$ [2].

Властивості механічних і регулювальних характеристик можна виразити трьома коефіцієнтами, що визначають виконавчий двигун як окрему ланку системи автоматичного регулювання [2].

1. *Коефіцієнт внутрішнього демпфування* k_D – характеризує величину і знак власного демпфування моменту, що розвивається двигуном при зміні швидкості обертання ротора. Він рівний похідній від моменту за швидкістю в даній точці або тангенсу кута нахилу характеристики $M = f(n)$:

$$k_D = \frac{dM}{dn}. \quad (2.13)$$

На стійкій ділянці механічної характеристики коефіцієнт внутрішнього демпфування завжди від'ємний. Це означає, що демпфувальний момент протилежний за знаком приросту швидкості і протидіє йому. Чим ближче значення k_D до додатної області, тим гірша статична стійкість двигуна. Величина k_D не залежить від швидкості обертання ротора при лінійних механічних характеристиках і не залежить від напруги управління при постійній жорсткості механічних характеристик. Для якірного управління виконавчим двигуном постійного струму k_D визначається з виразу (2.11):

$$k_D = \frac{dm}{dv} = -1 \quad (2.14)$$

і не залежить ні від швидкості, ні від коефіцієнта сигналу.

2. *Коефіцієнт пропорційності* між пусковим моментом і напругою управління

$$k_n = \frac{dM_n}{dU_y}. \quad (2.15)$$

При пропорційному зростанні напруги управління і пускового моменту коефіцієнт k_n буде незмінним. Для якірного управління він визначається з виразу (2.12):

$$k_n = \frac{dm_n}{d\alpha} = 1 \quad (2.16)$$

і не залежить від коефіцієнта сигналу.

3. Статичний коефіцієнт підсилення для виконавчих двигунів

$$k_{n\text{іdc}} = \frac{dn}{dU_y} \quad (2.17)$$

При лінійній регульовальній характеристиці цей коефіцієнт постійний і чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу характеристики. У випадку якірного управління з виразу (2.11) одержуємо

$$k_{n\text{іdc}} = \frac{dv}{d\alpha} = 1. \quad (2.18)$$

Тут статичний коефіцієнт підсилення не залежить від моменту на валові двигуна.

Потужність управління

$$P_y = U_y I_y = \alpha U_3 \frac{\alpha U_3 - v U_3}{R_{a\Sigma}} = \frac{\alpha U_3^2}{R_{a\Sigma}} (\alpha - v). \quad (2.19)$$

Для переходу в область відносних одиниць за базову одиницю беремо потужність управління $P_{y.k}$ при короткому замиканні, при якому $v=0$ і $\alpha=1$:

$$P_{y.k} = U_3^2 / R_{a\Sigma}. \quad (2.20)$$

Тоді потужність управління у відносних одиницях

$$p_y = \frac{P_y}{P_{y,k}} = \alpha(\alpha - \nu). \quad (2.21)$$

Аналіз останнього виразу показує, що потужність управління p_y різко зростає зі збільшенням коефіцієнта сигналу (рис. 2.3, а).

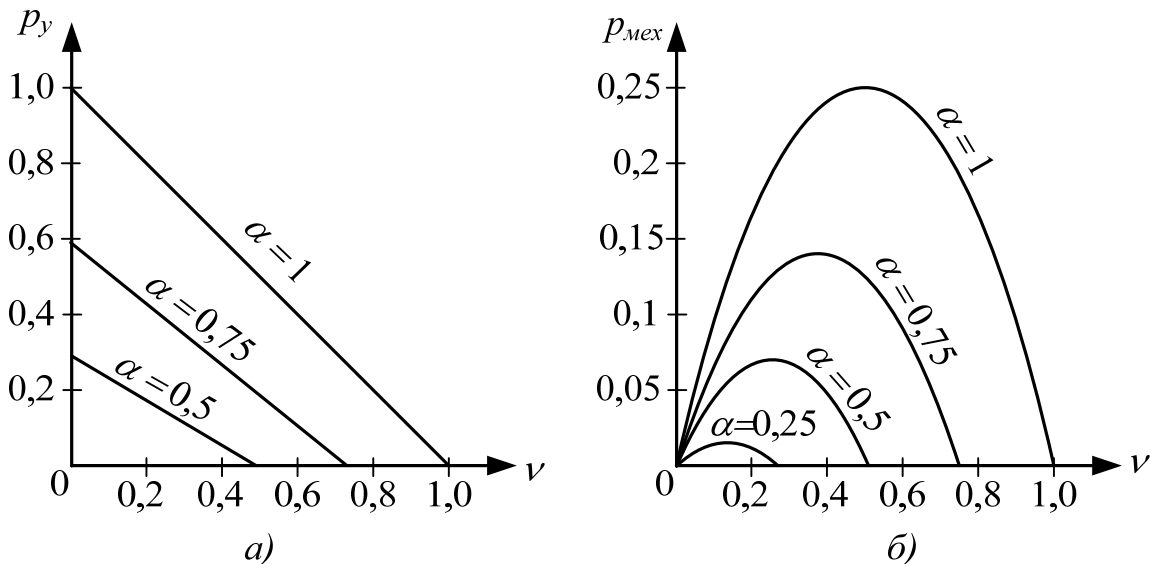


Рисунок 2.3 – Залежності потужності управління (а) і механічної потужності (б) від частоти обертання при якірному управлінні

Потужність збудження (при опорі обмотки збудження R_3)

$$P_3 = U_3 I_3 = U_3^2 / R_3 \quad (2.22)$$

при якірному управлінні постійна й не залежить від α і ν .

Механічна потужність виконавчого двигуна у відносних одиницях є добутком відносної частоти обертання на відносний момент:

$$p_{\text{мех}} = \nu m = \nu(\alpha - \nu). \quad (2.23)$$

Величини максимальної механічної потужності $p_{\text{мех макс}}$ і відносної частоти обертання $\nu_{\text{кр}}$, при якій вона має місце, можна визначити, поклавши $dp_{\text{мех}} / d\nu = 0$. При цьому

$$\begin{aligned} p_{\text{мех.макс}} &= \alpha^2 / 4; \\ v_{\text{кр}} &= \alpha / 2. \end{aligned} \quad (2.24)$$

На рис. 2.3, б) показані залежності $p_{\text{мех}} = f(v)$ при різних значеннях коефіцієнта сигналу. Максимум механічної потужності пропорційний α^2 , тому робота при малих α призводить до поганого використання номінальної потужності двигуна. Отже, при якірному управлінні керувальний пристрій, що подає на двигун сигнал управління U_y , повинен мати досить велику потужність.

2.1.2 Поліусне управління виконавчими мікродвигунами

При даному управлінні (рис. 2.4) напруга управління U_y подається на обмотку головних полюсів. Обмотка якоря постійно включена на напругу мережі U_3 і по ній протікає струм I_3 . Для обмеження струму якоря при $n = 0$ у його коло часто включають додатковий резистор R_d [3]. Регулювання частоти обертання здійснюють зміною напруги управління $U_y = \alpha U_3$, тобто зміною магнітного потоку Φ двигуна. При $\alpha = 0$ у машині є невеликий залишковий потік, а отже, і невеликий електромагнітний момент. Тому для уникнення самоходу до вала двигуна повинен бути прикладений гальмівний момент, що перевищує електромагнітний момент при $\alpha = 0$.

Припустимо, як і раніше, що магнітне коло машини ненасичене, тоді

$$\Phi = k'_\Phi U_y = k'_\Phi \alpha U_3. \quad (2.25)$$

Струм якоря

$$I_3 = \frac{U_3 - E}{R_3} = \frac{U_3 - c_e k'_\Phi \alpha U_3 n}{R_{a\Sigma}}. \quad (2.26)$$

Обертовий момент двигуна

$$M = c_m \Phi I_3 = c_m k'_\Phi \alpha U_3 I_3 \quad (2.27)$$

або з врахуванням (2.26)

$$M = \frac{c_m k'_\phi U_3^2}{R_{a\Sigma}} \alpha (1 - \alpha c_e k'_\phi n). \quad (2.28)$$

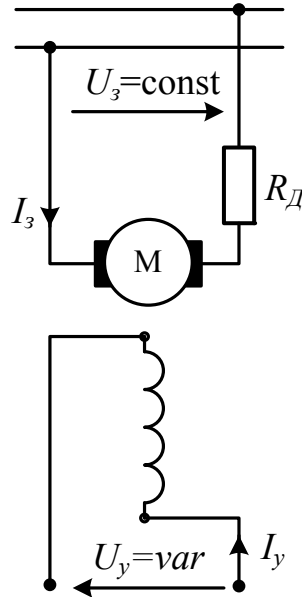


Рисунок 2.4 – Схема включення виконавчих двигунів постійного струму при полюсному управлінні

При $n = 0$ і $\alpha = 1$

$$M_n = \frac{c_m k'_\phi U_3^2}{R_{a\Sigma}}. \quad (2.29)$$

Тоді відносне значення моменту

$$m = M/M_n = \alpha (1 - \alpha c_e k'_\phi n). \quad (2.30)$$

З врахуванням (2.10) рівняння *механічної характеристики* набуває вигляду

$$v = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}. \quad (2.31)$$

Рівняння (2.31) є лінійним відносно v , внаслідок чого механічні характеристики можна побудувати за двома відомими точками [3].

Здебільшого як одну з них беруть точку, що відповідає режиму короткого замикання (пуск двигуна) з координатами $v_n = 0$ і $m_n = \alpha$, як другу – точку, що відповідає режиму холостого ходу з координатами $m_0 = 0$ і $v_0 = 1/\alpha$.

На рис. 2.5, а) показані механічні характеристики виконавчого двигуна з полюсним управлінням при різних значеннях α . На відміну від характеристик двигуна з якірним управлінням вони перетинаються, що призводить до неоднозначної залежності частоти обертання від коефіцієнта сигналу (ту саму частоту обертання можна одержати при двох значеннях α).

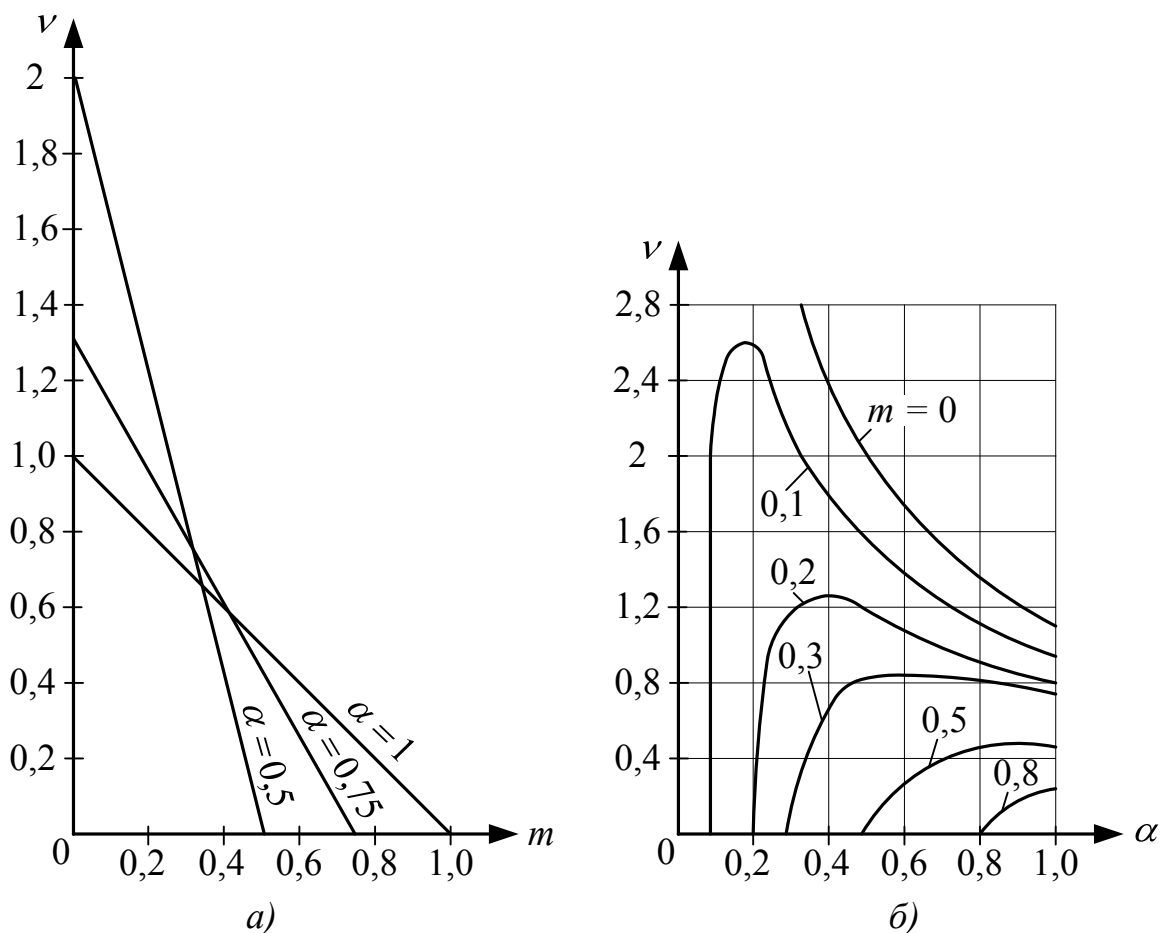


Рисунок 2.5 – Механічні (а) й регульовальні (б) характеристики виконавчого двигуна з полюсним управлінням

Рівняння *регульовальної характеристики* у відносних одиницях можна одержати з (2.31), розв'язуючи його відносно v :

$$v = \frac{\alpha - m}{\alpha^2}. \quad (2.32)$$

На рис. 2.5, б) показані регулювальні характеристики при різних значеннях m . Ці характеристики нелінійні, а деякі з них і неоднозначні.

Коефіцієнт сигналу $\alpha_{кр}$, при якому відносна частота обертання v досягає максимуму, можна знайти, поклавши $dv / d\alpha = 0$. При цьому одержимо

$$\begin{aligned} \alpha_{кр} &= 2m, \\ v_{макс} &= 1/(4m). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Звичайно коефіцієнт сигналу α змінюється від 0 до 1. У цих межах регулювальна характеристика буде мати максимум, якщо відносний момент $m \leq 0,5\alpha_{кр} = 0,5(1 \div 0)$.

Тому при $m < 0,5$ регулювальні характеристики неоднозначні й практично неможливо застосовувати виконавчий двигун з полюсним управлінням в автоматичних пристроях. Із цієї причини полюсне управління використовують лише при $m \geq 0,5$.

Коефіцієнт внутрішнього демпфування відповідно з (2.13) і (2.32)

$$k_D = -\alpha^2 \quad (2.34)$$

має від'ємне значення при будь-якому коефіцієнті сигналу. Тому статична стійкість роботи двигуна забезпечена при будь-якій напрузі управління у всьому робочому діапазоні швидкостей. Із зменшенням коефіцієнта сигналу стійкість знижується. Одночасно зменшується і жорсткість механічних характеристик.

Величина пускового моменту у відносних одиницях дорівнює, як і при якірному управлінні, коефіцієнту сигналу, тобто прямо пропорційна напрузі управління. *Коефіцієнт пропорційності* пускового моменту $k_n = 1$.

Статичний коефіцієнт підсилення при полюсному управлінні є нелінійною функцією коефіцієнта сигналу, оскільки його вираз відповідно з (2.17) і (2.32) має вигляд:

$$k_{\text{підс}} = \frac{2m - \alpha}{\alpha^3}. \quad (2.35)$$

Особливістю регулювальних характеристик двигунів з полюсним управлінням є також те, що швидкість ідеального холостого ходу ($m = 0$) прямує до нескінченності при прямуванні коефіцієнта сигналу до нуля. У реальному двигуні ця швидкість обмежена, тому що до вала завжди прикладений момент тертя щіток на колекторі й у підшипниках і момент опору повітря. Однак при малому значенні цих моментів швидкість може значно перевищити допустиму для двигуна за механічною міцністю („рознос” двигуна). Обертний момент у цьому випадку, коли напруга управління дорівнює нулю, створюється за рахунок взаємодії потоку залишкового магнетизму полюсів і струму в якорі. Тому при полюсному управлінні теоретично можливий самохід. Якщо момент опору на валі виявиться більшим за обертний момент від потоку залишкового магнетизму, то якор зупиниться.

Потужність управління

$$P_y = U_y I_y = \frac{U_y^2}{R_y} = \frac{\alpha^2 U_3^2}{R_y} \quad (2.36)$$

пропорційна квадрату коефіцієнта сигналу й не залежить від частоти обертання.

Механічна потужність у відносних одиницях

$$p_{\text{мех}} = mv = (\alpha - \alpha^2 v)v. \quad (2.37)$$

Максимум механічної потужності й відносну частоту обертання $v_{\text{кр}}$, при якій вона має місце, можна знайти з умови $dp_{\text{мех}} / dv = 0$, звідки [3]

$$P_{\text{мех}} = \left(\alpha - \alpha^2 \cdot \frac{0,5}{\alpha} \right) \cdot \frac{0,5}{\alpha} = 0,25; \quad (2.38)$$

$$v_{\text{кр}} = 0,5 / \alpha.$$

Тому при полюсному управлінні максимальне значення механічної потужності не залежить від коефіцієнта сигналу (рис. 2.6) і робота двигуна при малих коефіцієнтах сигналу не позначається на використанні його номінальної потужності.

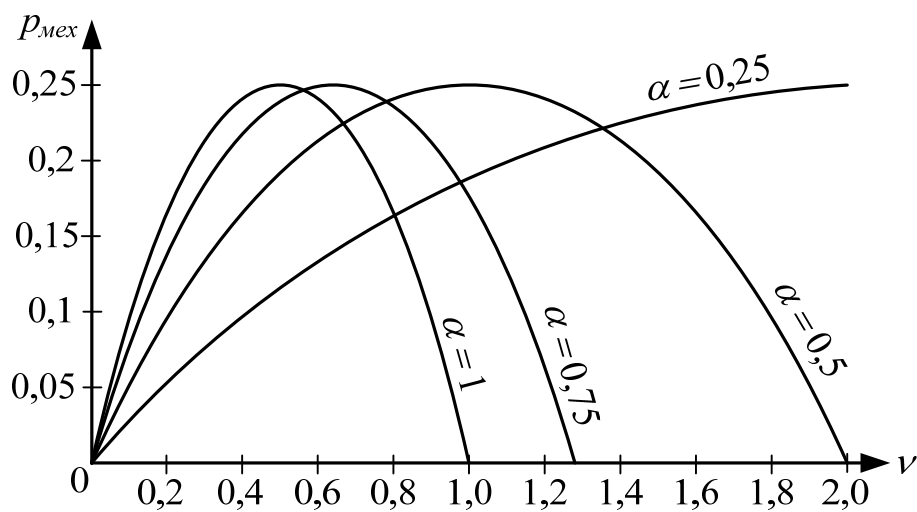


Рисунок 2.6 – Залежність механічної потужності від частоти обертання при полюсному управлінні

2.1.3 Порівняння властивостей виконавчих мікродвигунів

Виконавчі двигуни постійного струму мають порівняно високий ККД. Габарити і вага в 2–4 рази менші, ніж в однакових за потужністю виконавчих асинхронних двигунів.

Переваги якірного управління:

- 1) лінійність і однозначність регульовальних характеристик при будь-якому значенні моменту;
- 2) сталість статичного коефіцієнта підсилення;
- 3) постійна жорсткість механічних характеристик при різних значеннях сигналу управління;

- 4) вище значення коефіцієнта внутрішнього демпфування при довільній напрузі управління, що забезпечує менший час протікання перехідних електромеханічних процесів (розгону, реверса і т.д.)
- 5) струм через щітковий контакт проходить тільки при обертанні якоря, що запобігає пригорянню колектора від місцевого нагрівання при нерухомому якорі;
- 6) індуктивність обмотки якоря значно менша індуктивності обмотки головних полюсів (менше число витків), що забезпечує вище швидкість електромагнітних перехідних процесів;
- 7) неможливість самоходу.

Переваги полюсного управління:

- 1) невелика потужність управління;
- 2) гарне використання машини при малих коефіцієнтах сигналу α , тому що максимальна механічна потужність не залежить від величини α .

Переваги якірною способу управління настільки значні, що в більшості схем використовується саме цей спосіб.

Істотний недолік виконавчих двигунів постійного струму при обох способах управління полягає у досить низькій надійності внаслідок наявності ковзного перехідного контакту колектор-щітки. Крім того, у результаті іскріння, що виникає під щітками колекторної машини, утворюється безперервний спектр високочастотних коливань, що вносять перешкоди у роботі близько розташованого радіообладнання.

У колекторному двигуні мають місце пульсації ЕРС і струму якоря. Ці пульсації викликають у мережі підключених до неї приймачів вищі гармоніки струму і напруги, що шкідливо впливає на роботу приймачів і пристроїв автоматики, розташованих поблизу.

Застосовуються в основному два методи зменшення радіоперешкод, створюваних контактом колектор-щітки виконавчого двигуна, і захисту мережі від гармонік, що виникають внаслідок пульсації ЕРС якоря:

- екранування;
- електричні фільтри.

Також необхідно відмітити, що рівняння механічних і регулювальних характеристик виконавчих двигунів постійного струму були отримані без врахування реакції якоря. В реальній машині лінійність механічних і регулювальних характеристик порушується внаслідок розмагнічувальної дії реакції якоря.

Жорсткість механічних характеристик виконавчих двигунів постійного струму знижується із зменшенням потужності двигунів, тому що при цьому збільшується опір обмотки якоря і знижується ККД.

2.1.4 Основні вимоги до виконавчих мікродвигунів

Сфера застосування кожного виконавчого двигуна визначається особливостями систем автоматичного регулювання, їх призначенням, умовами роботи й вимогами до двигунів як до елементів схеми.

Основні вимоги до виконавчих двигунів:

- 1) статична стійкість і лінійність механічних характеристик у всьому робочому діапазоні швидкостей;
- 2) лінійна залежність швидкості обертання ротора від електричного сигналу управління на всьому робочому діапазоні;
- 3) відсутність самоходу;
- 4) швидкодія;
- 5) мала потужність управління при значній механічній потужності на валі, тобто високий коефіцієнт підсилення за потужністю (вимога викликана обмеженою потужністю джерел сигналу управління – в основному електронних);
- 6) великий пусковий момент;
- 7) експлуатаційна надійність;
- 8) відсутність радіоперешкод;
- 9) малі габарити і вага.

2.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитись з обладнанням лабораторної установки, конструкцією досліджуваного двигуна і записати його паспортні дані. Ознайомитись з конструкцією і роботою моментоміра.

2. Зібрати схему лабораторної установки, запустити двигун на холостому ході і здійснити його реверс.

3. Експериментальним шляхом зняти характеристики двигуна *при якірному управлінні*:

а) механічні характеристики $(I_z; I_y; P_2; \eta; M) = f(n)$ при

- $U_{з.ном} = \text{const}$;
- $U_y = U_{з.ном} = \text{const}$ ($\alpha = 1$);
- $U_y = 0,5U_{з.ном} = 0,5U_{з.ном} = \text{const}$ ($\alpha = 0,5$);

б) регульовальні характеристики $(I_z; I_y; n) = f(U_y)$ при

- $M = 0$;
- $M = 0,5M_n$ ($m = 0,5$);

при полюсному управлінні:

а) механічні характеристики $(I_z; I_y; P_2; \eta; M) = f(n)$ при

- $U_{з.ном} = \text{const}$;
- $U_y = 0,5U_{з.ном} = \text{const}$ ($\alpha = 0,5$);

б) регульовальні характеристики $(I_z; I_y; n) = f(U_y)$ при

- $M = 0$ ($m = 0$);
- $M \approx 0,2M_n$ ($m \approx 0,2 = \text{const}$);
- $M \approx 0,5M_n$ ($m \approx 0,5 = \text{const}$).

4. Розрахувати теоретично у відносних одиницях механічні та регульовальні характеристики при умовах, за яких вони знімались дослідним шляхом.

5. Графічна частина:

а) за даними п. 3, а) та п. 4 побудувати у відносних одиницях дослідні та теоретичні (розрахункові) механічні характеристики двигуна $m = f(\nu)$ при якірному та полюсному управліннях для $\alpha = 1$ та $\alpha = 0,5$ в одних координатних осях;

б) за даними п. 3, а) в окремих осях побудувати у відносних одиницях робочі характеристики двигуна $(P_2; \eta) = f(\nu)$, зняті дослідним шляхом при якірному та полюсному управліннях;

в) за даними п. 3, б) та 4 побудувати у відносних одиницях дослідні та розрахункові регульовальні характеристики $(\nu) = f(\alpha)$:

- при якірному управлінні – в одних координатних осях;
- при полюсному управлінні – в інших.

2.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

2.3.1 Будова лабораторного стенда

Як досліджувана машина використовується виконавчий двигун постійного струму з нормальним барабанним якорем типу СЛ-261 (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Будова мікродвигуна постійного струму

Зовнішній вигляд стенда з його дослідження показано на рис. 2.8, а його схема електрична принципова – на рис. 2.9.

Живлення обмотки якоря двигуна (виводи А1–А2) здійснюється випрямленою регульованою напругою від випрямляча V11, підключеного до виходу регулятора напруги T1.

Регульована постійна напруга на обмотку збудження двигуна (виводи В1–В2) подається через потенціометр RP, підключений до мережі постійної напруги $U = 220$ В автоматом QF1.

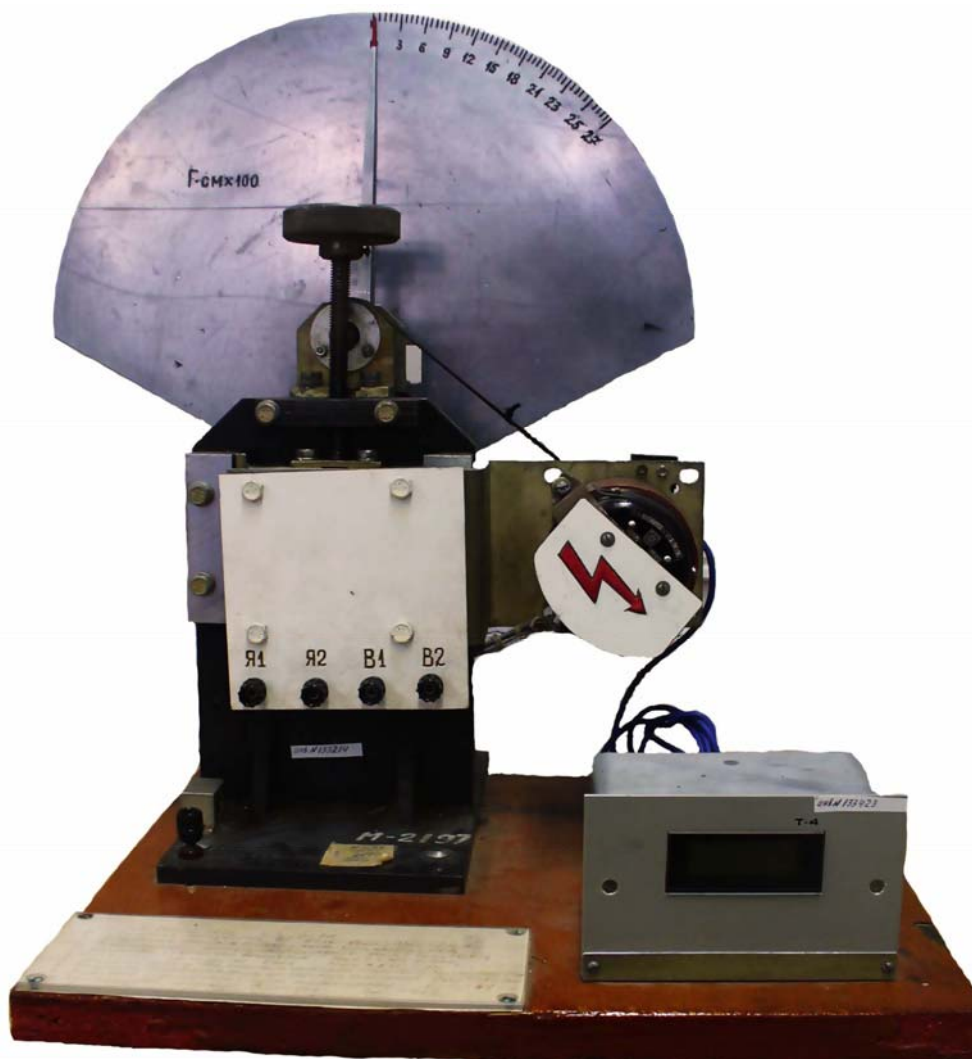


Рисунок 2.8 – Стенд для дослідженню виконавчого мікродвигуна постійного струму

Двигун із шківом на його валу закріплений за допомогою гвинта на плиті гальма-моментоміра. Плита має можливість рухатися. Разом із шківом, в канавці якого розміщений нитковий ремінь, виточений диск з прямокутними отворами. Цей диск при обертанні якоря двигуна рухається в прорізі фотосенсора, сигнал якого, пропорційний швидкості обертання, знаходить на показчик електронного тахометра. Після зміни напруги або моменту навантаження на валі двигуна вимірювання його швидкості обертання за тахометром необхідно проводити через деякий проміжок часу. Це пов'язано з тим, що на диску, що обертається в прорізі фотодатчика, є лише вісім отворів, а швидкість двигуна достатньо висока. Тому для накопичення кількості імпульсів, що несуть інформацію про

швидкість обертання вала двигуна на табло тахометра, потрібний час 5...10 секунд.

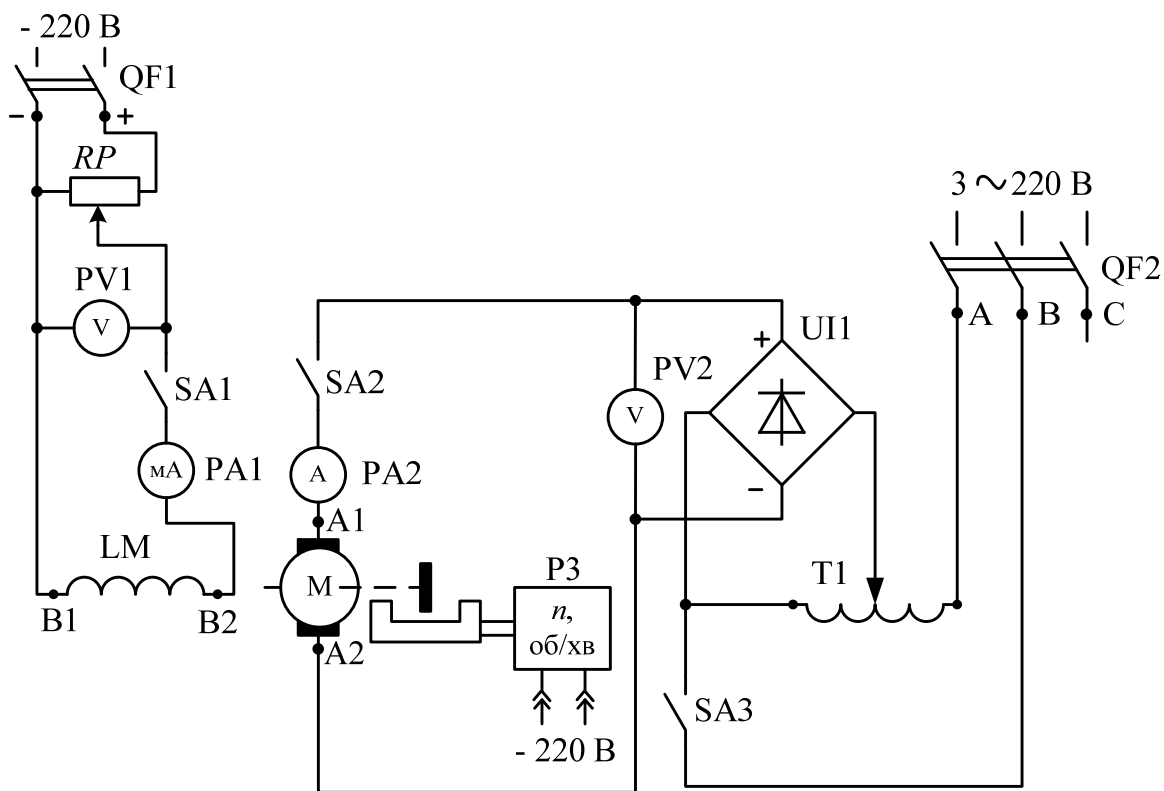


Рисунок 2.9 –Схема електрична принципова лабораторної установки із дослідження виконавчого мікродвигуна постійного струму

Для створення моменту навантаження на валові двигуна використовується гальмівний пристрій, конструкція якого показана на рис. 2.10. Він же й дозволяє вимірювати величину моменту навантаження. До гальма 1 прикріплена стальна пластина 2, а до неї приварені дві вертикальні сталеві стійки 3 і 4. Зверху на стійках закріплені болтами дві однакові опори 5 із підшипниками, що служать опорами для валу 6.

На валові жорстко закріплений вантаж 7, шків 8 і стрілка 15 манометра.

Досліджуваний двигун 20 закріплений між двома плитами: сталлюю 13 і текстолітовою 14, які чотирма болтами прикріплені до сталевій плити 9. Остання може переміщуватися в вертикальному напрямку по двох сталевих напрямних 12, прикріплених до стійки 4 двома болтами кожна.

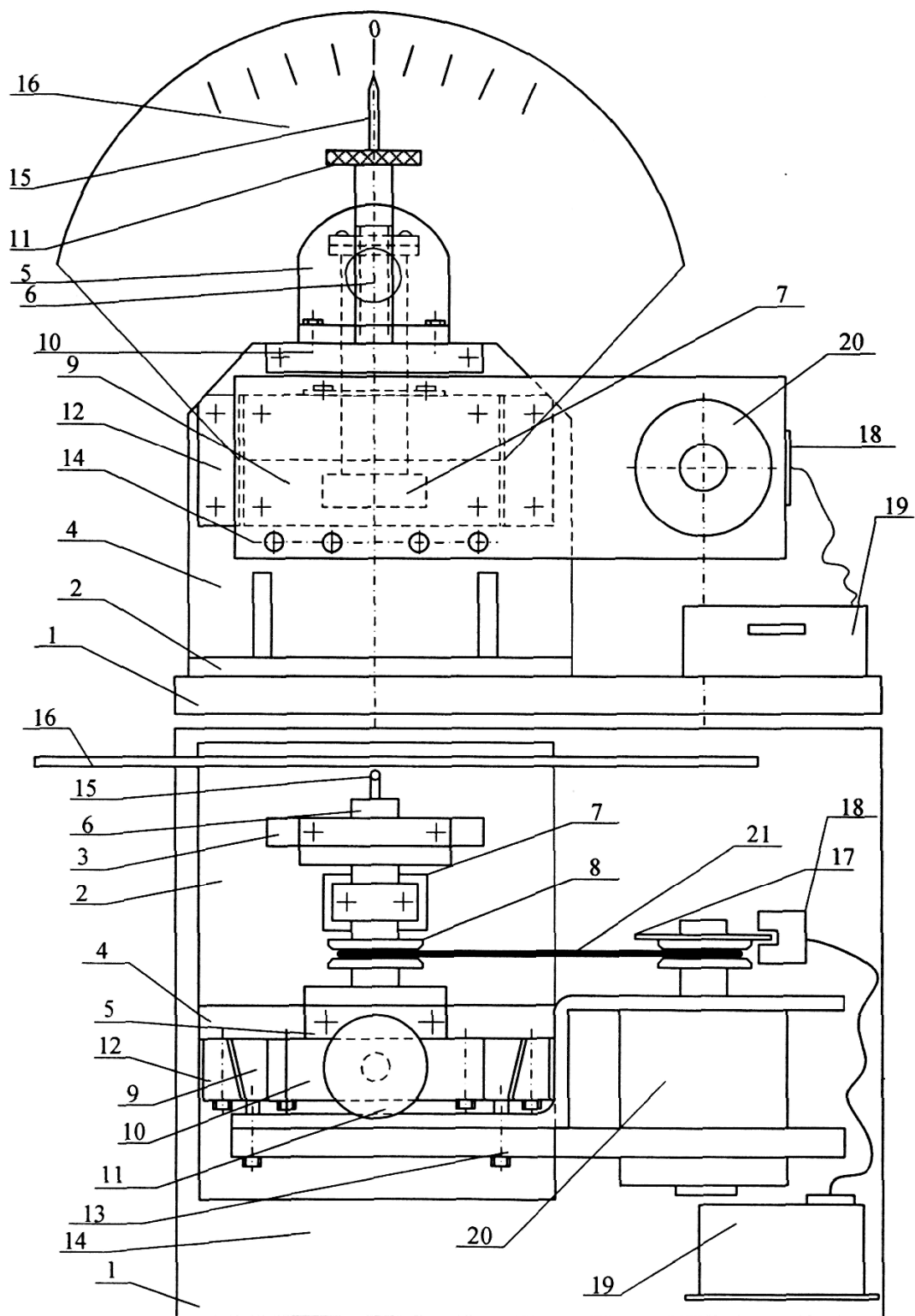


Рисунок 2.10 – Будова гальмівного пристрою двигуна

Її переміщення разом з двигуном здійснюється гвинтом 11, при обертанні якого в сталій накладці 10 з різьбою відбувається підймання чи опускання плити 9 і, відповідно, двигуна. При цьому змінюється натяг

ременя 21, що надітий на шків 8 манометра та шків двигуна, внаслідок чого відбувається відхилення вантажу 7 і вимірювальної стрілки 15. При цьому вантаж створює момент, який врівноважує момент двигуна. Величина моменту відраховується по шкалі 16, відградуєваної в г·см.

На вихідному кінці вала двигуна разом із шківом закріплений диск 17 з отворами, при обертанні якого фотосенсор 18 генерує сигнали і передає їх цифровому тахометру 19, що вимірює частоту обертання двигуна в об/хв.

При створенні навантаження, близького до номінального та більшого за нього, можливе злипання ремня в канавці шківа двигуна, в результаті чого покази стрілки моментоміра будуть несталими. Для усунення коливань стрілки необхідно змастити ремінь гальма графітовою змазкою.

Для запуску двигуна на холостому ході потрібно обертанням гвинта гальма-моментоміра послабити ремінь (до провисання), що натягнутий на шків гальма і двигуна. При виключених тумблерах SA1 та SA2, перемикач переключити на вольтметр PV2, за допомогою якого можна виміряти напругу на якірній обмотці двигуна. Включивши автомати QF1 та QF2, за допомогою потенціометра RP та лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) T1 встановити (контролюючи вольтметрами PV1 і PV2) номінальні напруги обмоток збудження та якоря, відповідно. Вилку шнура живлення тахометра увімкнути в розетку з $U = 220$ В. Послідовним включенням тумблерів SA1 і SA2 замкнути кола обмоток збудження і якоря, здійснити його запуск.

Змінивши напрямок обертання якоря двигуна, здійснити його реверс (це можна реалізувати шляхом зміни напрямку струму в обмотці збудження чи в обмотці якоря двигуна). Для цього необхідно, вимкнувши автомати живлення QF1 і QF2, поміняти місцями провідники на виводах обмотки збудження B1–B2 або якоря A1–A2 (але не одночасно). Включити автомати QF1 і QF2, запустити двигун і впевнитись, що якір двигуна змінив свій напрямок обертання на зворотний. Після цього підрегулювати напруги на обмотках двигуна до номінальних значень та зняти його характеристики.

2.3.2 Розрахункові формули

Коефіцієнт сигналу:

$$\alpha = \frac{U_y}{U_{з ном}}. \quad (2.39)$$

Момент та частота обертання, виражені в відносних одиницях, розраховуються за формулами (3.8) та (3.10), відповідно. При цьому частоту обертання при ідеалізованому холостому ході можна визначити як

$$n_{0 id} = n \frac{U_{у ном}}{U_{у ном} - I_y R_a}, \quad (2.40)$$

де n і I_y – частота обертання і струм управління, відповідно, в довільному режимі навантаження при $\alpha = 1$.

Частота обертання $n_{0 id}$ має бути більшою швидкості реального холостого ходу (при $\alpha = 1$ та $M = 0$) на 1–2%.

Потужність збудження та потужність управління визначаються за формулами (2.22) та (2.19), відповідно.

Споживана двигуном потужність:

$$P_1 = P_3 + P_y. \quad (2.41)$$

Корисна потужність на валі, Вт:

$$P_2 = 1,028 Mn \cdot 10^{-5}. \quad (2.42)$$

Відносна корисна потужність на валі, в.о.:

$$P_2^* = \frac{P_2}{P_{y.к}}. \quad (2.43)$$

ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.44)$$

2.3.3 Зняття робочих, механічних і регулювальних характеристик мікродвигуна

2.3.3.1 При якірному управлінні

Механічні характеристики двигуна $(I_z; I_y; P_2; \eta; M) = f(n)$ при $U_{z\text{ ном}} = \text{const}$ якірному управлінні знімаються в такій послідовності.

Напруга на обмотці збудження за допомогою потенціометра RP встановлюється рівною $U_z = U_{z\text{ ном}}$ і підтримується постійною у всіх режимах роботи. Характеристики знімаються для двох значень коефіцієнта сигналу:

- $\alpha = 1$ ($U_y = U_{y\text{ ном}} = U_{z\text{ ном}} = \text{const}$);
- $\alpha = 0,5$ ($U_y = 0,5U_{y\text{ ном}} = 0,5U_{z\text{ ном}} = \text{const}$).

В обох випадках дослід починається з режиму холостого ходу, коли натяг ременя відсутній і стрілка манометра знаходиться на нульовій поділці шкали. Якщо стрілка відхиляється від нуля на шкалі, то необхідно виставити її в нульову позначку шляхом регулювання гвинта під плитою, на якій закріплений манометр.

В цьому випадку записують покази всіх приладів. Потім обертають гвинт навантажувального пристрою, збільшують гальмівний момент на валі двигуна. При $\alpha = 1$ дослід проводиться до струму якоря $I_a = I_y = 1,2I_{a\text{ ном}}$ для запобігання надмірного перегрівання двигуна. При $\alpha = 0,5$ дослід можна проводити до повного загальмовування двигуна ($n = 0$ – режим короткого замикання).

Дані заносять до табл. 2.1.

Регулювальні характеристики двигуна $(I_z; I_y; n) = f(U_y)$ при $M = \text{const}$ в схемі з якірним управлінням знімаються за тією ж схемою при

- постійному моменті на валі $M = 0$ (холостий хід);
- $M \approx 0,5M_n$ ($m \approx 0,5$).

Таблиця 2.1 – Експериментальні та розрахункові дані для побудови механічних характеристик

Схема управл.	α	№ точ.	Дослід						Розрахунок							
			U_z , В	U_y , В	I_z , А	I_y , А	M , г·см	n , хв ⁻¹	α , в.од	m , в.од	ν , в.од	P_z , Вт	P_y , Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_2^* , в/од
Якірне управління	1	1.														
		2.														
		...														
		7.														
	0,5	1.														
		2.														
		...														
		7.														
Полосне управління	1	1.														
		2.														
		...														
		7.														
	0,5	1.														
		2.														
		...														
		7.														

Напруга на обмотці збудження за допомогою потенціометра RP встановлюється рівною $U_z = U_{z\text{ном}}$ та підтримується в кожному з обох дослідів постійною.

Перша точка в дослідах знімається при нарузі управління $U_y = U_{y\text{ном}} = U_{z\text{ном}}$ ($\alpha = 1$). Далі ця напруга знижується до напруги зрушення $U_{zр}$, при якій двигун з тим самим навантаженням на валі зупиняється ($n = 0$, $\alpha = U_{yзр}/U_{z\text{ном}} = \alpha_{зр}$).

В зв'язку з тим, що регульовальні характеристики при якірному управлінні лінійні, то в діапазоні від $\alpha = 1$ до $\alpha = \alpha_{зр}$ достатньо зняти 3-4 точки. Дані вимірювань занести до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Експериментальні та розрахункові дані для побудови регулювальних характеристик

Схема управл.	m	№ точ.	Дослід				Розрахунок			
			$U_{з ном},$ В	$U_y,$ В	$I_z,$ А	$I_y,$ А	$M,$ Г·см	$n,$ хв ⁻¹	$\alpha,$ в.од	$t,$ в.од
Якірне управління	0	1.								
		2.								
		3.								
		4.								
	0,5	1.								
		2.								
		3.								
		4.								
Полюсне управління	0	1.								
		2.								
		...								
		7.								
	0,2	1.								
		2.								
		...								
		7.								
	0,5	1.								
		2.								
		...								
		7.								

2.3.3.2 При полюсному управлінні

При полюсному управлінні характеристики знімаються за тією самою схемою (рис. 2.7).

Механічні характеристики ($I_z; I_y; P_2; \eta; M$) = $f(n)$ при $\alpha = \text{const}$.

При полюсному управлінні напругою збудження є напруга, що підводиться до обмотки якоря і підтримується за допомогою ЛАТРа Т1 постійною $U_3 = U_{з ном} = \text{const}$ протягом усіх дослідів із зняття механічних та

регульовальних характеристик. Напруга управління подається на обмотку полюсів.

Механічні характеристики знімаються тільки при $\alpha = 0,5$, так як при $\alpha = 1$ вони такі ж, як при якірному управлінні.

Методика зняття характеристик при $\alpha = 0,5$ ($U_y = 0,5U_{зном}$) така ж, як і для аналогічних характеристик при якірному управлінні. Результати дослідів заносяться до табл. 2.1.

Регульовальні характеристики ($I_z; I_y; n$) = $f(U_y)$. Оскільки регульовальні характеристики при полюсному управлінні нелінійні, то для отримання точніших їхніх графіків, необхідно в дослідах знімати більшу кількість точок, особливо при наявності навантаження на валові двигуна $m \approx 0,2$.

На холостому ході $M = m = 0$ регульовальна характеристика знімається в такому порядку. За допомогою лабораторного автотрансформатора Т1 на якірній обмотці двигуна встановлюється номінальна напруга, яка протягом дослідів підтримується постійною $U = 0,5U_{зном} = \text{const}$.

Напруга управління на обмотці полюсів за допомогою потенціометра РР встановлюється номінальною ($U_y = U_{yном} = U_{зном}$, тобто $\alpha = 1$) і знімається перша точка. Потім вона зменшується до тих пір, доки швидкість двигуна не досягне $n \approx 1,5n_{ном}$. При цьому знімається 6-7 точок і результати заносяться до табл. 2.2.

Регульовальна характеристика при навантаженні $m \approx 0,2$ знімається в такій послідовності. При обертанні двигуна та $\alpha = 1$ ($U_{yном} = U_{зном}$) за допомогою гальмівного пристрою створюється навантаження на валові $M = 0,2M_n$ ($m \approx 0,2$), яке протягом дослідів підтримується постійним.

При напругах $U_{yном} = U_{зном}$ ($\alpha = 1$) знімається перша точка. Потім напруга на якорі зберігається постійною $U = U_{зном} = \text{const}$, а напруга на обмотці полюсів за допомогою РР знижується. При цьому швидкість двигуна спочатку збільшується, при деякій напрузі $U_{зр}$ досягає максимальної величини v_{max} , а потім починає швидко знижуватись при різкому збільшенні струму в колі якора. При подальшому зниженні U_y швидкість двигуна знизиться до нуля ($n = 0$, $v = 0$ при $U_y = U_{yзр}$).

При навантаженні $m = \text{const}$ в діапазоні від $\alpha = 1$ до $\alpha = \alpha_{зр}$ знімається 6-7 точок, в тому числі точка, що відповідає максимальній швидкості (v_{max} при $U_{зр}$). Для запобігання сильному перегріву двигуна після досягнення частоти обертання n_{max} (v_{max}) зняти лише 1-2 точки, а потім швидко зменшити напругу управління, при цьому записати напругу зрушення $U_{зр}$ (при $n = 0$).

Якщо двигун при знятті регулювальної характеристики сильно нагрівся, то перед проведенням досліду при навантаженні $m \approx 0,5$ дати йому остигнути протягом 20-25 хвилин, вимкнувши живлення обох обмоток.

Регулювальна характеристика при навантаженні $M = 0,5M_n$ ($m \approx 0,5$) знімається при нарузі на якорі $U_{з ном} = \text{const}$ у діапазоні зміни напруги на обмотці полюсів від $U_{у ном} = U_{з ном}$ ($\alpha = 1$) та $n = n_{max}$ (при цьому навантаженні) до напруги зрушення $U_{зр}$ при $n = 0$. В цьому діапазоні знімається 6-7 точок і результати вимірювань заносяться до табл. 2.2.

2.3.4 Теоретичний розрахунок механічних та регулювальних характеристик

Теоретичний розрахунок механічних характеристик $m = f(v)$ при $\alpha = \text{const}$ виконується за формулою (2.11) для якорного управління та формулою (2.31) – для полюсного управління.

Теоретичний розрахунок регулювальних характеристик $v = f(\alpha)$ виконується за формулою

$$v = \alpha - m$$

для якорного управління та формулою (2.32) – для полюсного управління.

Результати розрахунків подаються в табличному (табл. 2.3, табл. 2.4) та графічному варіантах. В табл. 2.3 та табл. 2.4 наведені лише початкові та кінцеві значення α та v . Проміжні значення потрібно брати із дослідних даних.

Таблиця 2.3 – Теоретичний розрахунок механічних характеристик

Схема управління	Величина	Значення величини					
Якірне управління	α		1			0,5	
	v	1		0	0,5		0
	$m = \alpha - v$		0	1	0		0,5
Полюсне управління	α	0,5					
	v	2					0
	$m = \alpha - v$	0					0,5

Таблиця 2.4 – Теоретичний розрахунок регулювальних характеристик

Схема управління	Величина	Значення величини						
Якірне управління	α	0			0,5			
	v	1			0	1		0,5
	$v = \alpha - m$	1			0	0,5		0
Полюсне управління	m	0			0,5			
	v	1			0	1		0,5
	$v = (\alpha - m)/\alpha^2$	1			0	0,5		0
	m	0,2						
	v	1						0,2
	$v = (\alpha - m)/\alpha^2$	0,8						0

2.4 Паспортні дані електричних машин

Універсальний колекторний двигун:

тип СЛ261ТВ; $P_{2ном} = P_{яном} = 24$ Вт; $U_{зном} = U_{уном} = 110$ В; $I_{зном} = 0,056$ А;
 $I_{яном} = 0,41$ А; $n_{ном} = 4300$ хв⁻¹; $M_{ном} = 640$ Г·см; $M_n = 2450$ Г·см; $P_{укз} = 154$ Вт;
 $R_a = R_y = 49$ Ом; $\eta = 41\%$.

2.5 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Програма лабораторної роботи.
5. Паспортні дані електричних машин, перелік використаних приладів.
6. Схема дослідної установки.
7. Таблиці з дослідними та розрахунковими даними.
8. Розрахувати теоретично у відносних одиницях механічні та регульовальні характеристики при умовах, за яких вони знімалися дослідним шляхом. (Навести основні розрахункові формули та приклад розрахунку однієї точки для кожної характеристики).
9. За даними п.2.2 (п.3, а) та 4) побудувати у відносних одиницях в одних координатних осях дослідні та теоретичні (розрахункові) механічні характеристики двигуна $m = f(v)$ при якірному та полюсному управлінні для $\alpha = 1$ та $\alpha = 0,5$.
10. За даними п.2.2 (п.3, а) та 4) побудувати у відносних одиницях в окремих координатних осях робочі характеристики двигуна $(P, \eta) = f(v)$, зняті дослідним шляхом при якірному та полюсному управлінні.
11. За даними п.2.2 (п.3, б) та 4) побудувати у відносних одиницях дослідні та розрахункові регульовальні характеристики $v = f(\alpha)$:
 - при якірному управлінні – в одних координатних осях;
 - при полюсному управлінні – в інших.

12. За результатами роботи зробити висновки.

2.6 Питання для самоконтролю



1. Будова та принцип дії виконавчих двигунів постійного струму.
2. Механічні та регулювальні характеристики виконавчого двигуна постійного струму при якірному та полюсному управліннях.
3. Переваги й недоліки різних схем управління виконавчим двигуном.
4. Пояснити характер залежності $P_{2*} = f(\nu)$ при якірному та полюсному управліннях. Від чого залежить величина P_{2max} ?
5. Методика зняття механічних та регулювальних характеристик.
6. Фізичні процеси, що протікають у двигуні при зміні моменту навантаження.

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА

📁 **Мета роботи** Ознайомитися з будовою, принципом дії універсального колекторного двигуна; набути практичних навичок із зняття робочих та механічних характеристик й вміння аналізувати їх.

3.1 Основні теоретичні відомості

Універсальні колекторні двигуни – двигуни, що можуть працювати як від мережі постійного струму, так і від однофазної мережі змінного струму.

3.1.1 Будова двигуна

Універсальний колекторний двигун має будову таку саму, як і двигун постійного струму з послідовним збудженням. Відмінність універсального двигуна від машини постійного струму полягає в тому, що магнітна система виконана повністю шихтованою, а котушки обмотки збудження мають дві секції й проміжні виводи (рис. 3.1).

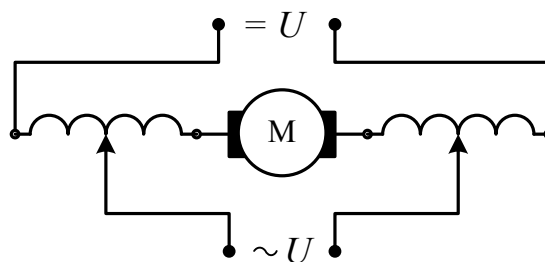


Рисунок 3.1 – Схема вмикання універсального колекторного двигуна

Виконання статора й ротора машини шихтованими обумовлене тим, що при роботі на змінному струмі вони пронизуються змінним магнітним потоком; секціонування ж обмотки збудження викликане тим, що в цьому режимі через спад напруги в індуктивному опорі двигуна номінальна частота обертання виявляється меншою, ніж при роботі на постійному

струмі. Для вирівнювання частот обертання при роботі на постійному струмі в коло якоря включають всі витки обмотки збудження, а при роботі на змінному – тільки частину їх, внаслідок чого відповідно зменшується магнітний потік машини [2, 3].

В універсальних колекторних двигунах, що випускають вітчизняною промисловістю, обмотку збудження розділяють на дві частини й включають по обидва боки якоря. Таке включення (симетрування обмотки) дозволяє зменшити радіоперешкоди, викликані двигуном.

При роботі на постійному струмі універсальний колекторний двигун поводить себе так само, як і двигун постійного струму з послідовним збудженням. Робота ж двигуна на змінному струмі має ряд специфічних особливостей.

3.1.2 Електромагнітний момент при роботі на змінному струмі

При роботі на змінному струмі струм якоря i_a і магнітний потік Φ змінюються за синусоїдальним законом [3]:

$$i_a = I_{am} \sin \omega t = \sqrt{2} I_a \sin \omega t; \quad (3.1)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \gamma), \quad (3.2)$$

де γ – кут, що виникає через втрати потужності в сталі.

Миттєве значення електромагнітного моменту [3]

$$\begin{aligned} m &= c_m \Phi_m \sin(\omega t - \gamma) I_{am} \sin \omega t = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} c_m \Phi_m I_a \cos \gamma - \frac{\sqrt{2}}{2} c_m \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Графіки зміни струму i_a , магнітного потоку Φ і електромагнітного моменту m показані на рис. 3.2. Очевидно, що момент двигуна можна подати у вигляді двох складових:

постійної

$$M_{ном} = 0,5\sqrt{2} c_m \Phi_m I_a \cos \gamma \quad (3.4)$$

і змінної, яка змінюється з подвійною частотою,

$$M_{зм} = 0,5\sqrt{2}c_m \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma). \quad (3.5)$$

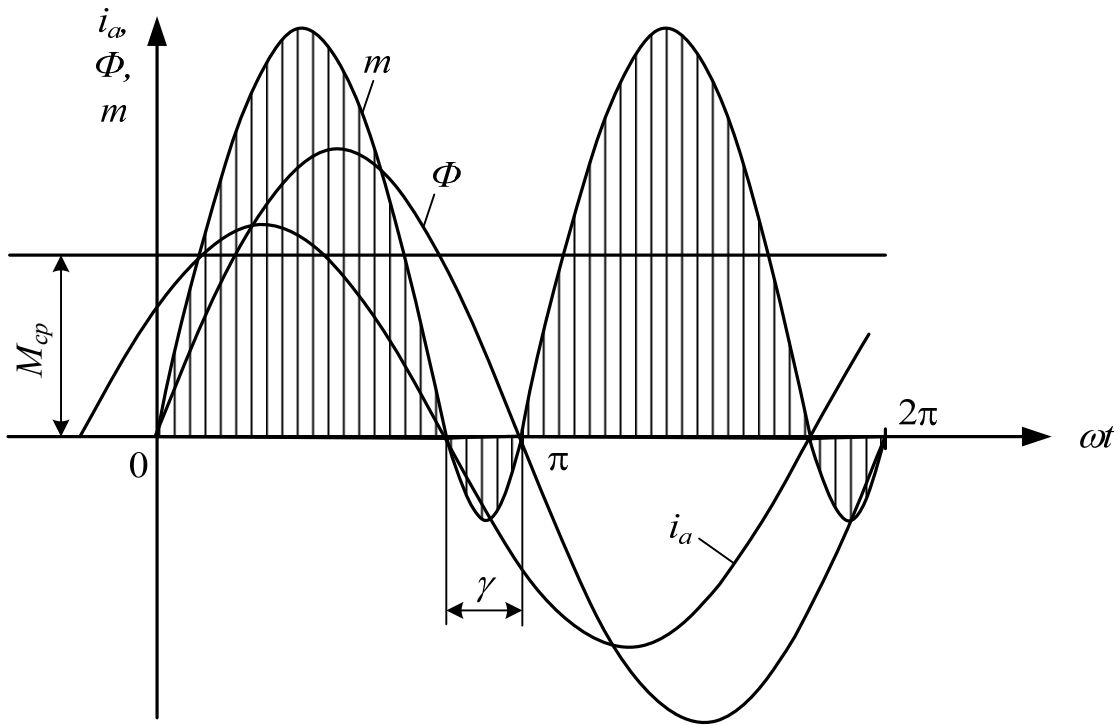


Рисунок 3.2 – Графіки зміни струму, потоку і електромагнітного моменту універсального колекторного двигуна при роботі на змінному струмі

Електромагнітний момент двигуна є змінним, а в окремі проміжки часу навіть гальмівним, однак якір двигуна обертається з рівномірною частотою, тому що він має порівняно великий момент інерції. Середнє значення моменту

$$M_{cp} = M_{пост} = 0,5\sqrt{2}c_m \Phi_m I_a \cos \gamma = c'_m \Phi_m I_a. \quad (3.6)$$

3.1.3 Характеристики двигуна при роботі на змінному струмі

Рівняння балансу напруг можна записати у вигляді

$$\dot{U} + \dot{E} = \dot{I}_a R_{a\Sigma} + j\dot{I}_a x_{a\Sigma}, \quad (3.7)$$

де $R_{a\Sigma}$ і $x_{a\Sigma}$ – сумарні активний і реактивний опори в колі обмотки якоря.

ЕРС, індукована в обмотці якоря,

$$E = c'_e \Phi_m n. \quad (3.8)$$

Підставивши (3.7) в (3.8) та здійснивши перетворення, отримаємо рівняння швидкісної характеристики:

$$n = \frac{E}{c'_e \Phi_m} = \frac{I_a R_{a\Sigma} + j I_a x_{a\Sigma} - U}{c'_e \Phi_m}. \quad (3.9)$$

Оскільки спосіб збудження машини при роботі на постійному й змінному струмі залишається незмінним, то механічні характеристики двигуна при роботі у двох зазначених режимах будуть приблизно однаковими. Однак при роботі на змінному струмі за рахунок наявності в чисельнику (3.9) $j I_a x_{a\Sigma}$ механічна характеристика двигуна зсувається в область більш низьких частот обертання (рис. 3.3, а), крива 2). Для того щоб наблизити її до механічної характеристики, що має місце при роботі на постійному струмі (крива 1), частину витків обмотки збудження при переході на живлення змінним струмом відключають, тобто зменшують магнітний потік машин. При цьому забезпечується однакова номінальна частота обертання двигуна в обох режимах роботи (крива 3).

Через зменшення магнітного потоку двигуна при роботі на змінному струмі його магнітна система виявляється менш насиченою, ніж при роботі на постійному струмі. Тому при роботі в розглянутому режимі залежність $M = f(I_a)$ наближається до параболічної; залежність $n = f(I_a)$ – до гіперболічної у більшому діапазоні зміни струму, ніж при постійному струмі, а механічна характеристика стає більш м'якою.

Робочі характеристики двигуна (рис. 3.3, б) при його роботі на постійному (суцільні лінії) і змінному (штрихові лінії) струмі мають приблизно однакову форму. При змінному струмі струм якоря більший, ніж на постійному струмі, через появу реактивної складової й збільшення активної складової внаслідок зростання втрат у сталі [3]. Із цих самих причин ККД двигуна на змінному струмі менший, ніж на постійному.

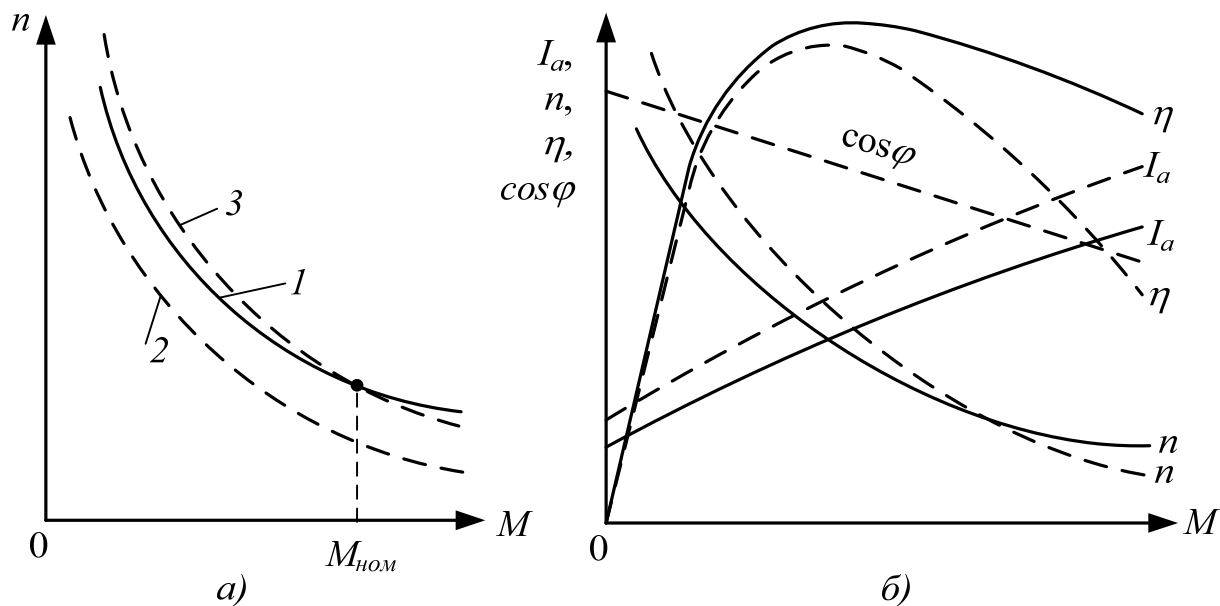


Рисунок 3.3 – Механічні й робочі характеристики універсального колекторного двигуна

Регулювання частоти обертання при роботі на постійному струмі здійснюють шляхом включення в коло якоря реостата, зміни напруги живлення й струму збудження (шляхом шунтування обмотки збудження реостатом). На змінному струмі регулювання частоти обертання здійснюють в основному зміною напруги живлення; рідше – включенням реостата в коло якоря.

3.1.4 Комутація при роботі на змінному струмі

У цьому випадку в секції, що комутується, крім реактивної ЕРС e_p індукується ще трансформаторна ЕРС e_{mp} , тому що ця секція пронизується змінним магнітним потоком. Реактивна ЕРС виникає так само, як й у машині постійного струму, в результаті зміни струму i_a у секції, що комутується, при переході її з однієї паралельної вітки в іншу. Однак у цьому випадку струми у кожній паралельній вітці не залишаються постійними, а змінюються за синусоїдальним законом [3]

$$i_a = I_{am} \sin \omega t = \frac{\sqrt{2}}{2a} I_a \sin \omega t. \quad (3.10)$$

Тому реактивна ЕРС e_p , пропорційна похідній di/dt , залежить від величини струму i_a у момент комутації, тобто в різні моменти часу вона буде різною. Якщо знехтувати періодом комутації T_k порівняно із часом T_0 між двома послідовними комутаціями, то можна вважати, що похідна

$$\frac{di}{dt} = \frac{2i_a}{T_k} = \frac{\sqrt{2}}{aT_k} I_a \sin \omega t, \quad (3.11)$$

а реактивна ЕРС

$$e_p = -L_p \frac{di}{dt} = -\frac{\sqrt{2}}{aT_k} I_a L_p \sin \omega t = e_{pm} \sin \omega t, \quad (3.12)$$

де L_p – результувальна індуктивність секції, що визначає величину реактивної ЕРС;

$e_{pm} = -\sqrt{2} I_a L_p / aT_k$ – максимальне значення реактивної ЕРС, яке має місце при максимальному струмі якоря I_{am} .

Таким чином, реактивна ЕРС збігається за фазою зі струмом якоря. Вона пропорційна частоті обертання n і струму якоря I_a , так само як у машинах постійного струму.

Трансформаторна ЕРС індукується в комутувальній секції змінним магнітним потоком машини. Оскільки магнітний потік змінюється за законом $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то при установленні щіток на геометричну нейтраль [3]

$$e_{mp} = 2\pi f w_c \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2), \quad (3.13)$$

де w_c – число витків у секції.

Якщо не враховувати незначного кута γ , то e_{mp} буде зсунута відносно e_p на 90° . Результувальна ЕРС у комутувальній секції буде змінюватися за синусоїдальним законом й у деякі моменти часу буде мати максимальне значення

$$e_{резт} = \sqrt{e_{рт}^2 + e_{тпт}^2}. \quad (3.14)$$

Встановлення додаткових полюсів забезпечує компенсацію реактивної ЕРС. Трансформаторна ж ЕРС залишається некомпенсованою й створює додатковий струм, що замикається через щітки. Це погіршує комутацію машини, а тому може викликати небезпечне іскріння й значні радіоперешкоди. Особливо несприятливі умови виникають при пуску двигуна, коли трансформаторна ЕРС досягає великого значення через збільшені значення пускового струму й потоку збудження [3].

Із зазначеної причини колекторні машини змінного струму середньої й великої потужностей не одержали широкого застосування. У колекторних двигунах малої потужності трансформаторна ЕРС невелика й практично не обмежує їх навантаження, як це має місце в більш потужних машинах. Однак термін служби щіток, колектора й всієї машини при роботі на змінному струмі скорочується порівняно з терміном служби на постійному струмі.

3.1.5 Переваги універсальних колекторних двигунів

Універсальні колекторні двигуни досить широко застосовуються завдяки такому [2]:

- 1) працюють від мереж як постійного, так і змінного струму;
- 2) при роботі від будь-якого з джерел можна просто, плавно і в широкому діапазоні регулювати швидкість обертання якоря зміною напруги, що підводиться до двигуна, шунтуванням якоря чи обмотки збудження активним опором;
- 3) дозволяють одержувати при промисловій частоті дуже високу швидкість обертання якоря (до 2000 рад/сек), недосягну при застосуванні синхронних і асинхронних двигунів без підвищувального редуктора.

В автоматичних системах, обчислювальних пристроях і приладах універсальні колекторні двигуни застосовуються в основному як допоміжні.

3.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою двигуна, записати його паспортні дані, на основі яких підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. Зняти робочі характеристики двигуна $(n, P_1, I_1, P_2, \eta) = f(M_2)$ на постійному струмі:

- а) при $U = U_{ном} = \text{const}$;
- б) при $U = 220 \text{ В} = \text{const}$.

3. Зняти робочі характеристики двигуна $(n, P_1, I_1, \cos \varphi_2, P_2, \eta) = f(M_2)$ на змінному струмі:

- а) при $U = U_{ном} = \text{const}$;
- б) при $U = 220 \text{ В} = \text{const}$.

4. Побудувати в одній системі координат:

- а) робочі характеристики двигуна за даними підпунктів 2, а) та 3, а);
- б) механічні характеристики $n = f(M)$ за даними підпунктів 2, а), 2, б) та 3, а).

3.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

3.3.1 Будова лабораторного стенда

Зовнішній вигляд лабораторного стенда для дослідження універсального колекторного двигуна показаний на рис. 3.4, а на рис. 3.5 – у збільшеному вигляді його передня панель. Для вивчення будови такого двигуна на боковій панелі стенду закріплена панель, на якій він поданий у розібраному стані (рис. 3.6).

Схема електрична принципова стенда для дослідження універсального колекторного двигуна зображена на рисунку 3.7.

Призначення контрольно-вимірювальних приладів:

- вольтметр PV1 – для вимірювання напруги живлення двигуна М;
- вольтметр PV2 – для вимірювання вихідної напруги генератора G;

- амперметр PA1 – для вимірювання струму двигуна M;

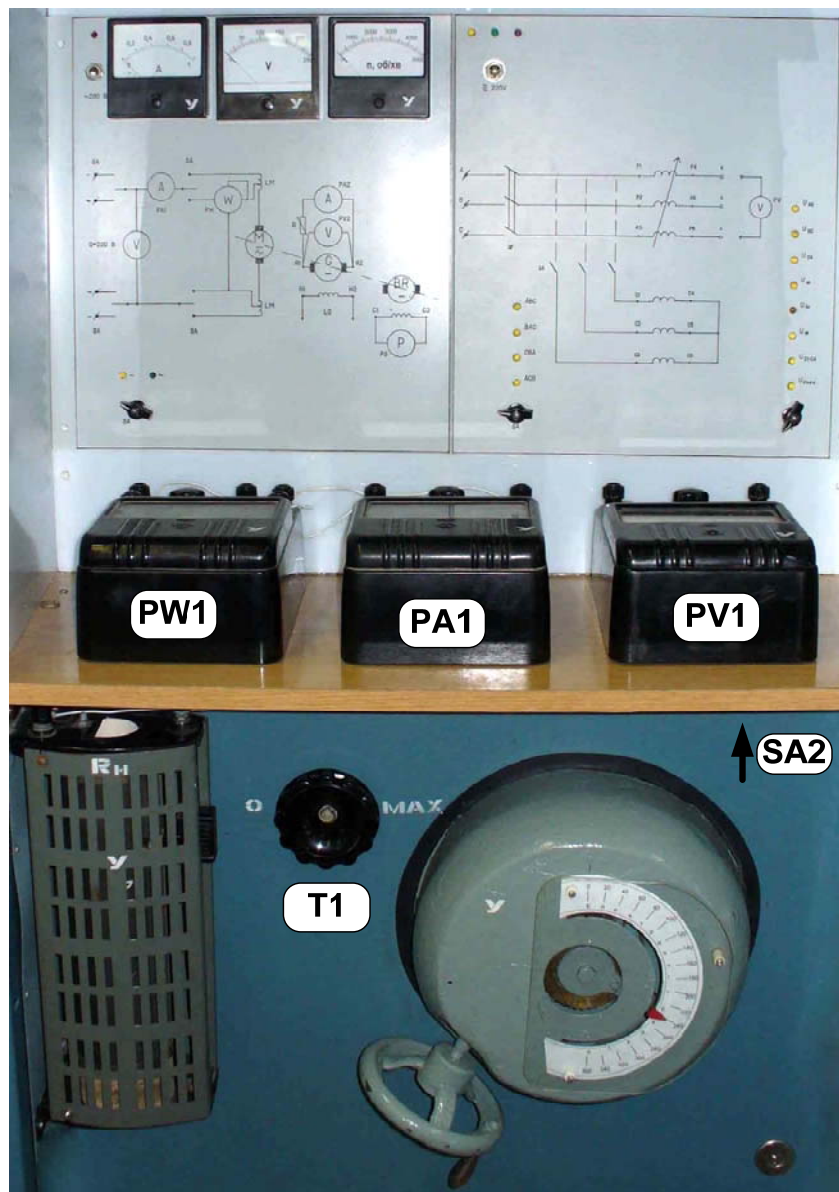


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд лабораторного стенда для дослідження універсального колекторного двигуна та індукційного регулятора

- амперметр PA2 – для вимірювання струму навантаження генератора G;
- ватметр PW1 – для вимірювання потужності двигуна M;
- тахометр PS – для вимірювання кількості обертів двигуна M.

Призначення сигнально-комутувальної апаратури:

- тумблер SA – для подачі живлення на схему;

- тумблер SA2 – для ввімкнення вольтметра PV1 (знаходиться під панеллю стенда);
- пакетний перемикач SA1 – для підключення двигуна М до постійного чи змінного струму;
- світлодіод HL – для сигналізування подачі живлення на схему;
- світлодіоди HL1, HL2 – для сигналізування підключення двигуна М до постійного чи змінного струму.

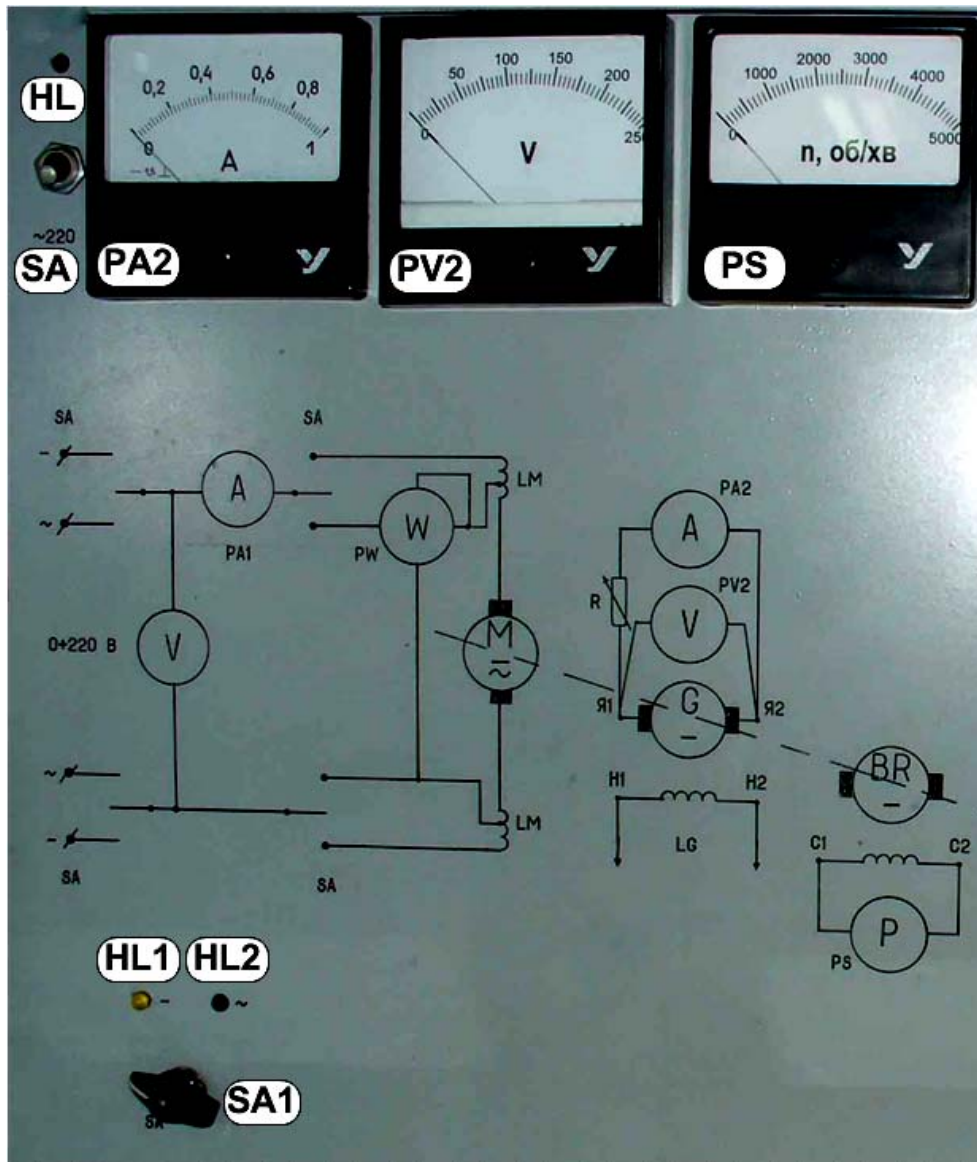


Рисунок 3.5 – Передня панель стенда для дослідження універсального колекторного двигуна



Рисунок 3.6 – Будова універсального колекторного двигуна

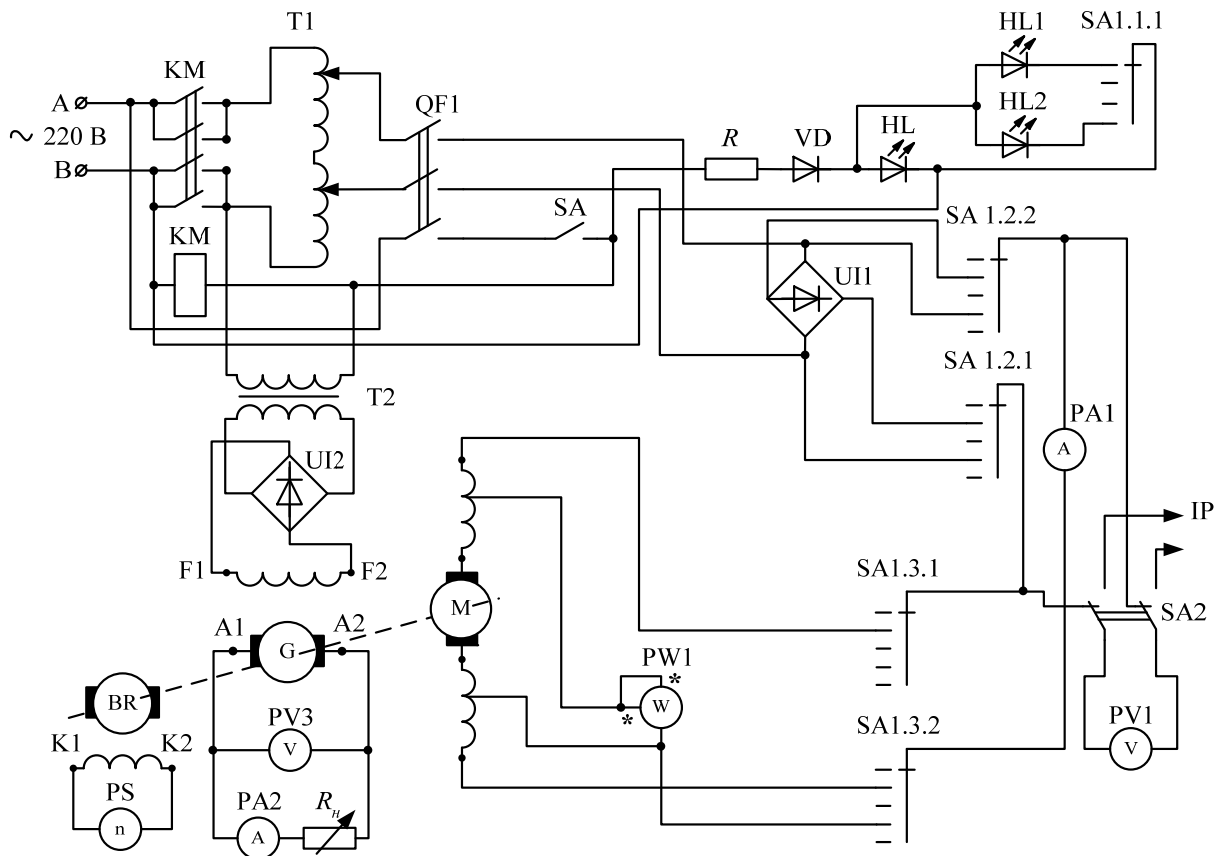


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова стенда для дослідження універсального колекторного двигуна

3.3.2 Зняття робочих характеристик двигуна на постійному струмі

1. Зняти робочі характеристики універсального колекторного двигуна на постійному струмі:

а) при $U = U_{ном} = 220$ В. Ручку регулятора напруги Т1 (рис. 3.4) встановити в нульове положення; движок навантажувального реостата R_n встановити в середнє положення; увімкнути тумблер SA (повинна загорітися червона лампочка HL) та перемкнути пакетний перемикач SA1 у перше положення, при якому загоріться жовтий світлодіод HL1. Збільшуючи за допомогою регулятора напруги Т1 напругу на двигуні від нуля до $U = U_{ном}$ розігнати двигун. Змінюючи опором R_n швидкість двигуна від 3500 об/хв до струму двигуна $I_1 = 1,2 I_{ном}$ зняти робочі характеристики в 6–7 точках. Результати вимірювань занести до табл. 3.1.

б) при $U = 0,9U_{ном} = 200$ В, для чого за допомогою регулятора напруги Т1 знизити напругу на двигуні. Змінюючи навантаження двигуна від величини, що відповідає швидкості n_{max} при зниженій нарузі, до $I_1 = I_{ном}$ зняти робочі характеристики двигуна. Результати вимірювань занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментальні та розрахункові дані для побудови регулювальних характеристик, знятих на постійному струмі

№ точ.	Дослідні величини					Розрахункові величини					Примітка
	U , В	I_1 , А	U_G , В	I_G , А	n , хв ⁻¹	P_1 , Вт	P_G , Вт	η , %	P_2 , Вт	M_2 , Н·м	
1											$U = U_{ном}$
...											
7											
1											$U = 0,9U_{ном}$
...											
7											

Зупинити двигун, перевівши ручку регулятора напруги Т1 в нульове положення.

3.3.3 Зняття робочих характеристик двигуна на змінному струмі

Зняти робочі характеристики універсального колекторного двигуна на змінному струму при:

а) $U = U_{ном}$;

б) $U = 0,9U_{ном}$.

Для цього пакетний перемикач SA1 перевести у друге положення, при якому повинен загорітися зелений світлодіод HL2. Запуск двигуна та зняття робочих характеристик виконати аналогічно до попередніх дослідів. Результати вимірювань занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Експериментальні та розрахункові дані для побудови регульовальних характеристик, знятих на змінному струмі

№ точ.	Дослідні величини						Розрахункові величини						Примітка
	$U,$ В	$I_1,$ А	$P_1,$ Вт	$U_{Г},$ В	$I_{Г},$ А	$n,$ хв ⁻¹	$P_1,$ Вт	$P_{Г},$ Вт	$\eta,$ %	$\cos\varphi_1$	$P_2,$ Вт	$M_2,$ Н·м	
1													$U=U_{ном}$
2													
...													
7													
1													$U=0,9U_{ном}$
2													
...													
7													

3.3.4 Розрахункові формули

Потужність, що підводиться до двигуна:

$$P_1 = UI_1. \quad (3.15)$$

Потужність, яка знімається з генератора:

$$P_G = U_G I_G. \quad (3.16)$$

ККД двигуна взято рівним ККД генератора:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_G}{P_1}}. \quad (3.17)$$

Корисна потужність на валі двигуна:

$$P_2 = \eta P_1. \quad (3.18)$$

Корисний момент на валі двигуна:

$$M_2 = 9,55 P_2 / n. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{UI_1}. \quad (3.20)$$

Потужність P_1 вимірюється ватметром.

3.4 Паспортні дані електричних машин

Навантажувальний генератор постійного струму:

Тип МУН-2

$P_{ном} = 75$ Вт, $U_{ном} = 100$ В, $I_{a ном} = 0,75$ А, $I_z = 0,9$ А, $n_{ном} = 3500$ хв⁻¹, збудження незалежне.

Тахогенератор синхронний:

Тип КГ-11

$$n_{ном} = 3500 \text{ хв}^{-1}.$$

Універсальний колекторний двигун:

Тип МУН-2

Струм: постійний – $P_{ном} = 100 \text{ Вт}$, $U_{ном} = 220 \text{ В}$, $I_{ном} = 0,9 \text{ А}$, $\eta_{ном} = 54\%$;

змінний – $P_{ном} = 80 \text{ Вт}$, $U_{ном} = 220 \text{ В}$, $I_{ном} = 1,2 \text{ А}$, $n_{ном} = 2200 \text{ хв}^{-1}$,
 $\cos\varphi_{ном} = 0,6$; $f = 50 \text{ Гц}$.

3.5 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Програма лабораторної роботи.
5. Паспортні дані електричних машин та перелік використаних приладів.
6. Схема дослідної установки.
7. Таблиці з дослідними та розрахунковими даними.
8. За даними п. 4.2 (підпункти 2, а); 3, а) побудувати в одній системі координат робочі характеристики двигуна n , P_1 , I_1 , $\cos\varphi_1$, M_2 , $\eta = f(P_2)$.
9. За даними п.4.2 (підпункти 2, а); 2, б); 3, а); 3, б) побудувати механічні характеристики $n = f(M_2)$.
10. За результатами роботи зробити висновки.

3.6 Питання для самоконтролю



1. Будова, електрична схема та принцип дії універсального колекторного двигуна на постійному струмі.
2. В чому полягає особливість конструкції універсального колекторного двигуна?
3. Поясніть, для чого необхідно мати регульоване число витків

обмотки збудження?

4. Як змінюється момент універсального колекторного двигуна при роботі на змінному струмі?
5. Рівняння та векторна діаграма універсального колекторного двигуна при роботі на змінному струмі.
6. Особливості комутації універсального колекторного двигуна при роботі на змінному струмі.
7. Способи регулювання швидкості універсального колекторного двигуна, переваги та недоліки кожного з них.
8. Переваги та недоліки універсального колекторного двигуна, області його застосування.

Питання до захисту лабораторних занять (модуль I)

1. Схема універсального колекторного двигуна з послідовним збудженням, принцип роботи.
2. Механічні характеристики виконавчого двигуна постійного струму, що забезпечують статичну стійкість роботи двигуна при якірному управлінні у всьому діапазоні швидкості $v = 0 \div 1$.
3. Класифікація тахогенераторів постійного струму за системою збудження.
4. Реверс виконавчих асинхронних двигунів (схема).
5. Векторна діаграма однофазного колекторного двигуна з послідовним збудженням.
6. Схема включення виконавчого двигуна постійного струму при якірному управлінні.
7. Основні вимоги до тахогенераторів.
8. Недоліки виконавчих асинхронних двигунів з порожнистим ротором.
9. Схема однофазного колекторного двигуна з послідовним збудженням із компенсаційною обмоткою і додатковими полюсами.
10. Регульовальні характеристики виконавчого двигуна постійного струму з якірним управлінням.
11. Причини відхилень реальної вихідної характеристики від лінійної в тахогенераторах постійного струму.
12. Переваги виконавчих асинхронних двигунів з порожнистим ротором.
13. Природна швидкісна характеристика двигуна постійного струму з послідовним збудженням.
14. Схема включення виконавчого двигуна постійного струму при полюсному управлінні.
15. Фізичний зміст асиметрії вихідної напруги тахогенератора.
16. Схема амплітудно-фазового управління з конденсатором в колі збудження виконавчих асинхронних двигунів (схема, векторна діаграма).

17. Схеми регулювання швидкості обертання двигуна послідовного збудження: шунтуванням обмотки збудження, шунтуванням якоря, включенням додаткового опору в коло якоря.
18. Залежності корисної потужності, потужності управління, потужності збудження, повної споживаної потужності у виконавчих двигунах постійного струму з якірним управлінням.
19. Принципова схема для пояснення явища асиметрії вихідної напруги тахогенератора постійного струму.
20. Залежність обертового моменту асинхронного двигуна від критичного ковзання при $s < 1$, $s > 1$.
21. Схема універсального колекторного двигуна для зменшення радіоперешкод.
22. Переваги і недоліки виконавчого двигуна постійного струму з якірним управлінням.
23. Принцип роботи колекторної машини постійного струму.
24. Схема та векторна діаграма амплітудного управління виконавчого асинхронного двигуна.
25. Область застосування, переваги і недоліки універсальних колекторних двигунів.
26. Аналіз рівняння механічних характеристик виконавчого двигуна постійного струму з якірним управлінням.
27. Вихідні характеристики тахогенератора постійного струму.
28. Схема конструкції виконавчого асинхронного двигуна з порожнистим немагнітним ротором.
29. Механічні характеристики універсального колекторного двигуна.
30. Схема включення виконавчого двигуна постійного струму при полюсному управлінні.
31. Рівняння вихідної характеристики тахогенератора постійного струму з врахуванням розмагнічувальної дії реакції якоря, постійність спаду напруги в щітковому контакті.
32. Залежність середнього значення обертового моменту універсального колекторного двигуна при живленні двигуна від мережі (формула).

33. Аналіз регулювальних характеристик виконавчого двигуна постійного струму з якірним управлінням.
34. Статичний коефіцієнт підсилення тахогенератора постійного струму (графік, формула).
35. Схема та векторна діаграма фазового управління виконавчих асинхронних двигунів.
36. Графік зміни струму універсального двигуна.
37. Самохід виконавчого двигуна постійного струму з полюсним управлінням (фізичний зміст).
38. Призначення теплочуттєвих магнітних шунтів в тахогенераторі постійного струму.
39. Схема та векторна діаграма просторового управління виконавчих асинхронних двигунів.
40. Графік зміни магнітного потоку універсального двигуна.
41. Схема виконавчого двигуна постійного струму з фільтром для зменшення радіоперешкод.
42. Переваги тахогенераторів постійного струму.
43. Механічні характеристики виконавчих асинхронних двигунів при амплітудному управлінні з коефіцієнтами сигналу $\alpha = (1; 0,5)$.
44. Графік зміни обертового моменту універсального двигуна.
45. Аналіз характеристик для отримання рівняння регулювальних характеристик з полюсним управлінням виконавчого двигуна постійного струму.
46. Недоліки тахогенератора постійного струму.
47. Схема заміщення виконавчого асинхронного двигуна для визначення струмів в обмотках статора і ротора.
48. Графік зміни середнього значення обертового моменту універсального двигуна.
49. Аналіз характеристик для отримання рівняння механічних характеристик з полюсним управлінням виконавчого двигуна постійного струму.
50. Принцип зворотності машин постійного струму.

51. Механічні характеристики виконавчого асинхронного двигуна при фазовому управлінні.
52. Принципова схема трифазного колекторного двигуна з паралельним збудженням та подвійним комплектом щіток.
53. Регулювальні характеристики виконавчого двигуна постійного струму з полюсним управлінням.
54. Залежності ЕРС якоря тахогенератора постійного струму від навантаження (формула).
55. Регулювальні характеристики виконавчих асинхронних двигунів при амплітудному управлінні при $m = (0; 0,5)$.
56. Принцип регулювання швидкості обертання трифазного колекторного двигуна з паралельним збудженням і подвійним комплектом щіток.
57. Механічні характеристики виконавчого двигуна постійного струму з полюсним управлінням.
58. Рівняння вихідної характеристики ідеального тахогенератора.
59. Регулювальні характеристики виконавчого асинхронного двигуна при фазовому управлінні при $m = (0; 0,5)$.

Лабораторна робота №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДИКАТОРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ БЕЗКОНТАКТНИХ СЕЛЬСИНІВ

📁 *Мета роботи*

Вивчення будови і принципу роботи безконтактних сельсинів; визначення похибок, питомого синхронізувального моменту сельсина-приймача, залежностей синхронізувального моменту, струму, потужності сельсина-сенсора, струмів у лінії зв'язку від кута розбіжності.

4.1 Основні теоретичні відомості

4.1.1 Будова та принцип роботи сельсинів

Електричні машини синхронного зв'язку використовуються для синхронного й синфазного повороту (обертання) двох або декількох осей, механічно незв'язаних між собою [3]. Між пристроєм, що задає кут (*сенсором*), і пристроєм, що приймає передану величину (*приймачем*), існує тільки електричний зв'язок. Цей електричний зв'язок між сенсором і приймачем називають *лінією зв'язку*. Тому синхронний зв'язок складається із трьох основних елементів: сенсора *С*, лінії зв'язку й одного або декількох приймачів *П*. Передача кутової величини в такій системі відбувається синхронно, синфазно й плавно [2]. Як сенсори і приймачі у системах синхронного зв'язку найчастіше використовуються електричні мікромашини – *сельсини*.

Система синхронного зв'язку працює так, що при повороті ротора сельсина-сенсора на деякий кут Θ_C ротор сельсина-приймача повертається на такий самий кут Θ_P . Отже, система прагне ліквідувати неузгодженість між положеннями роторів сенсора й приймача, що характеризується *кутом неузгодженості* $\Theta = \Theta_C - \Theta_P$, і в ідеальному випадку звести кут Θ до нуля.

Системи синхронного зв'язку поділяють на два основних види:

- синхронного повороту (передачі кута),
- синхронного обертання (електричного вала).

Сельсини можуть бути як однофазними, так і трифазними. Останні конструктивно виконуються так само, як і асинхронні двигуни з контактними кільцями. Їх використовують у схемах електричного вала, де необхідно мати строге синхронне й синфазне обертання двох двигунів, віддалених один від одного.

Однофазні сельсини за конструкцією й наявністю ковзного контакту можна розділити на *контактні та безконтактні*. В таких сельсинах обмотка синхронізації виконується трифазною.

Контактні сельсини складаються із двох частин: статора й ротора. На статорі (або на роторі) розташовується однофазна обмотка збудження (первинна обмотка); на роторі (або на статорі) – обмотка синхронізації (вторинна обмотка).

В однофазних сельсинах обмотка збудження створює пульсуючий магнітний потік, який, проходячи по магнітопроводу сельсина, перетинає обмотки синхронізації й наводить у них ЕРС, що залежать від кута повороту ротора. Оскільки при повороті ротора взаємна індуктивність між обмоткою збудження й обмоткою синхронізації плавно змінюється за законом косинуса, то в обмотці синхронізації будуть наводитися ЕРС, пропорційні косинусу кута повороту ротора [2].

Обмотка синхронізації завжди виконується розподіленою. Обмотка збудження може бути виконана як розподіленою, так і зосередженою. Але більш прийнятною є зосереджена обмотка, тому що в цьому випадку характеристика моменту має меншу крутість. Щоб одержати самосинхронізацію в межах одного оберту число пар полюсів сельсинів вибирають рівним одиниці.

Оскільки магнітне поле в сельсинах змінне, то статор і ротор збирають з ізольованих листів електротехнічної сталі. Для збільшення надійності контакту й зменшення його перехідного опору кільця і щітки, до яких підключається обмотка ротора, в основному виконуються із сплаву срібла. Число контактних кілець і щіток залежить від місця розташування

обмоток; сельсини з обмоткою збудження на роторі мають два контактних кільця; з обмоткою збудження на статорі – три контактних кільця. В деяких типах сельсинів-приймачів на явнополюсному роторі по поперечній осі розміщують короткозамкнену демпферну обмотку, яка забезпечує швидке затухання власних коливань ротора при переході з одного положення в друге. При відсутності електричного демпфера на валі ротора сельсина-приймача встановлюють механічні демпфери (фрикційні, пружинні або рідинно-ртутні).

Принцип роботи сельсина не залежить від місця розташування кожної з обмоток (на статорі або на роторі). Однак у сельсинах з обмоткою збудження на статорі:

а) у колі обмоток синхронізації є перехідні опори ковзних контактів; зміна перехідного опору вносить похибку в роботу систем синхронної передачі кута, а при виході з ладу кожного із трьох ковзних контактів робота системи порушується повністю;

б) при малій напрузі в обмотці синхронізації більша ймовірність втрати контакту;

в) до моменту тертя на валі сельсина входить і момент тертя трьох щіток по кільцях;

г) неможливо встановити демпферну обмотку. Це змушує встановлювати механічний демпфер для гасіння коливань ротора, що ускладнює конструкцію сельсинів.

У сельсинах з обмоткою збудження на роторі:

а) опори перехідних контактів входять у коло обмоток збудження; у цьому випадку зміна опорів практично не позначається на точності роботи системи, а вихід із ладу ковзних контактів не призводить до повного порушення синхронної передачі, хоча точність передавання значно знижується: сельсин за таких умов працює як синхронний реактивний двигун;

б) у колі ковзних контактів діє відносно висока напруга збудження, ймовірність втрати контакту від корозії кілець знижується;

в) менший момент тертя на валі й менша довжина сельсина, тому що ковзних контактів усього два;

г) можливе встановлення простої демпферної обмотки на роторі.

До недоліків сельсинів із обмоткою збудження на роторі відноситься те, що через щітки постійно проходить струм збудження, а в сельсинах із обмоткою збудження на статорі значні струми проходять через щітки лише в момент відпрацювання кута. Однак струми збудження сельсинів в основному невеликі і тому цей недолік можна вважати не суттєвим.

З викладеного видно, що сельсини з обмоткою збудження на роторі мають значні переваги.

В однофазних безконтактних сельсинах обмотка збудження і трифазна обмотка синхронізації розташовані на статорі, внаслідок чого відпадає потреба в ковзних контактах. Ротор безконтактного сельсина має два сталевих пакети, розділених навскісним проміжком з немагнітного матеріалу. Пакети ротора зібрані зі сталевих листів, які розміщені в площині, паралельній осі вала. На статорі розташований сталевий пакет з розподіленою обмоткою синхронізації, два бокових кільця (тороїди), дві тороїдні котушки обмотки збудження і зовнішній магнітопровід. Сталевий пакет, в якому розміщується обмотка синхронізації, і тороїди зібрані з листів, розташованих перпендикулярно осі вала, а зовнішній магнітопровід – з листів, розташованих паралельно осі вала. Відповідно, у всіх елементах магнітної системи сельсина площина листів паралельна напрямку силових магнітних ліній. Тороїдні котушки обмотки збудження повинні бути ввімкненні так, щоб напрямок струму в них в даний момент часу був узгодженим.

Недоліком безконтактних сельсинів є гірше використання матеріалів порівняно з контактними сельсинами через великі потоки розсіяння і збільшений струм холостого ходу. При однаковому питомому синхронізувальному моменті вага безконтактного сельсина приблизно в 1,5 рази більше, ніж контактного.

4.1.2 Режими роботи сельсинів

Розрізняють два основних режими роботи сельсинів: індикаторний та трансформаторний.

Індикаторний режим застосовують в тому випадку, коли до ведучої осі прикладений досить малий момент опору. При роботі системи поворот ротора сельсина-сенсора на деякий кут Θ_C приводить до появи в обмотці синхронізації сельсина-приймача синхронізувального моменту, під дією якого ротор прагне повернутися на такий самий кут Θ_D . Синхронізувальний момент виникає при наявності між роторами обох сельсинів кута неузгодженості Θ . В ідеальному випадку синхронізувальний момент прагне повернути ротор приймача в точно таке ж положення, що займає сенсор, тобто точно відпрацювати заданий кут Θ_C . Але практично через наявність тертя і механічного навантаження на валі приймача між осями сенсора і приймача завжди є деякий кут неузгодженості, який характеризує ступінь точності синхронної передачі кута.

Трансформаторний режим застосовують тоді, коли до ведучої осі прикладений значний момент опору, тобто коли потрібно обертати деякий механізм. В цьому випадку сельсин-приймач відпрацьовує заданий кут не самостійно, а за допомогою електрично і механічно зв'язаного з ним виконавчого двигуна. При роботі системи синхронної передачі кута неузгодженість положень роторів сенсора і приймача приводить до появи на затискачах обмотки збудження приймача вихідної напруги, яка подається на обмотку управління виконавчого двигуна. Внаслідок цього двигун повертає ведену вісь; в ідеальному випадку він повертає її до зникнення неузгодженості.

Сельсини можуть працювати в режимі повороту і в режимі обертання. В першому випадку кут неузгодженості між осями сенсора і приймача після відпрацювання заданого кута повороту характеризує *статичну похибку* системи синхронного зв'язку. В другому випадку ротор приймача обертається з тією ж швидкістю, що і ротор сенсора, а кут неузгодженості,

що виникає між ними в процесі обертання, характеризує *динамічну точність* системи.

4.1.3 Робота однофазних сельсинів в індикаторному режимі

4.1.3.1 Принцип дії

При індикаторному режимі на валі сельсина-приймача є незначний момент опору, тому для повороту ротора приймача в напрямку повороту ротора сенсора потрібен невеликий обертовий момент, який може бути отриманий від самого сельсина-приймача без допоміжних підсилювальних пристроїв [3].

При роботі сельсинів в розглянутому режимі обмотки збудження від сельсина-сенсора *С ОЗС* і сельсина-приймача *П ОЗП* увімкнуті в загальну мережу змінного струму (рис. 4.1), а обмотки синхронізації з'єднані між собою лінією зв'язку *ЛЗ*.

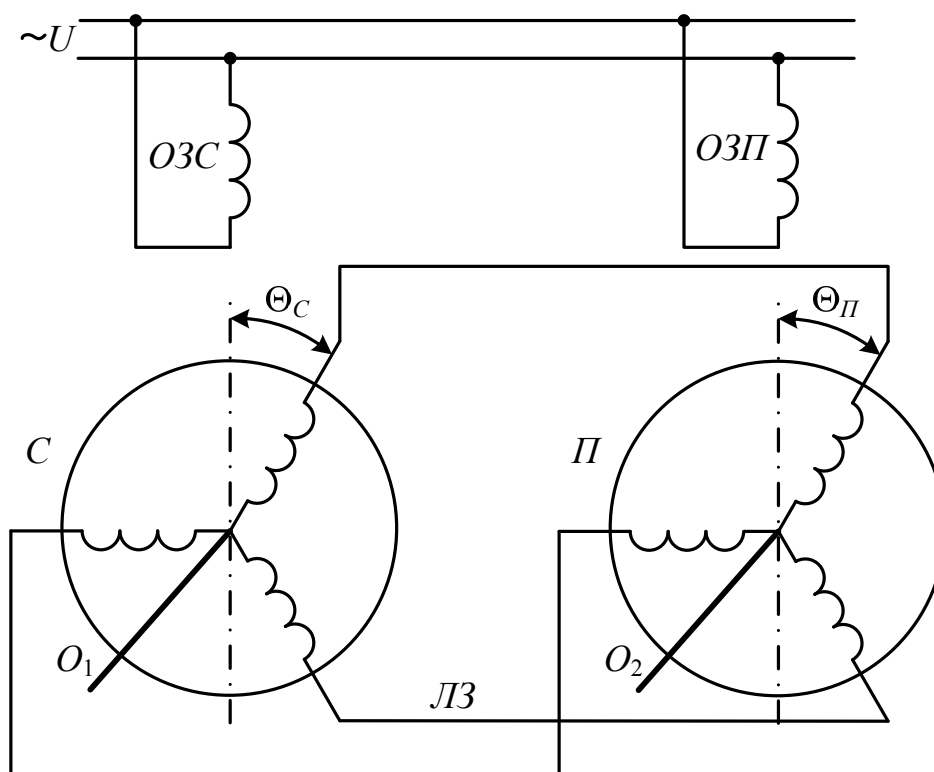


Рисунок 4.1 – Схема ввімкнення сельсинів при їх роботі в індикаторному режимі

Пульсуючі магнітні потоки, які створюються обмотками збудження сенсора і приймача, індукують ЕРС в трьох фазах обмоток синхронізації. Якщо між ротором сенсора і приймача є деякий кут неузгодженості Θ , то по обмотках синхронізації будуть протікати струми, які, взаємодіючи з потоком збудження, створюють у сенсорі і приймачі синхронізувальні моменти. Ці моменти протилежно напрямлені (зустрічні) і прагнуть звести до нуля кут неузгодженості Θ . Зазвичай ротор сенсора загальмований, тому його синхронізувальний момент сприймається механізмом, що повертає ведучу вісь O_1 ; синхронізувальний момент приймача повертає його ротор в ту саму сторону і на той самий кут, на який повертається ротор сенсора [3].

4.1.3.2 ЕРС, струми та магніторушійні сили в обмотках синхронізації

В трьох фазах обмотки синхронізації сенсора потік збудження Φ_3 індукує ЕРС [3]:

$$\begin{cases} E_{1C} = E_{2\max} \cos \Theta_C; \\ E_{2C} = E_{2\max} \cos (\Theta_C + 120^\circ); \\ E_{3C} = E_{2\max} \cos (\Theta_C - 120^\circ), \end{cases} \quad (4.1)$$

де $E_{2\max}$ – максимальне значення ЕРС, що індукується в фазі ротора (обмотці синхронізації):

$$E_{2\max} = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{zm}, \quad (4.2)$$

де f_1 – частота мережі;

w_2 – кількість витків в фазі обмотки синхронізації;

$k_{об2}$ – обмотковий коефіцієнт обмотки синхронізації;

Φ_{zm} – максимальне значення потоку збудження.

Оскільки обмотка збудження приймача підключена до тієї самої мережі однофазного струму, що й обмотка збудження сенсора, то в фазах його обмотки синхронізації будуть індукуватися ЕРС:

$$\begin{cases} E_{1\Pi} = E_{2\max} \cos \Theta_{\Pi}; \\ E_{2\Pi} = E_{2\max} \cos(\Theta_{\Pi} + 120^\circ); \\ E_{3\Pi} = E_{2\max} \cos(\Theta_{\Pi} - 120^\circ). \end{cases} \quad (4.3)$$

Через те, що ЕРС в однойменних фазах сенсора й приймача направлені по контуру, утвореному проводами ліній зв'язку зустрічно, то струми в фазах сенсора і приймача:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E_{1C} - E_{1\Pi}}{Z_2} = \frac{E_{2\max}}{Z_2} (\cos \Theta_C - \cos \Theta_{\Pi}) = \\ \quad \quad \quad = I_{2\max} (\cos \Theta_C - \cos \Theta_{\Pi}); \\ I_2 = I_{2\max} [\cos(\Theta_C + 120^\circ) - \cos(\Theta_{\Pi} + 120^\circ)]; \\ I_3 = I_{2\max} [\cos(\Theta_C - 120^\circ) - \cos(\Theta_{\Pi} - 120^\circ)]; \end{cases} \quad (4.4)$$

де Z_2 – загальний опір послідовно увімкнених фаз сенсора і приймача;

$I_{2\max} = E_{2\max} / Z_2$ – найбільше діюче значення струму в фазі синхронізувальної обмотки.

При $\Theta = 0$ намагнічувальні сили в сенсорі та приймачі будуть рівні нулю, тому що ЕРС в фазах обмоток синхронізації сенсора і приймача взаємно компенсуються і струм у цих фазах відсутній.

При наявності кута неузгодженості з'являються струми і магніторушійні сили ротора, величини яких в сенсорі F_C та в приймачі F_{Π} однакові [3]:

$$\begin{aligned} F_C = F_{\Pi} &= \sqrt{F_d^2 + F_q^2} = \frac{3}{2} F_{2\max} \sqrt{(1 - \cos \Theta)^2 + \sin^2 \Theta} = \\ &= \frac{3}{2} F_{2\max} \sqrt{2 - 2 \cos \Theta} = 3 F_{2\max} \sin \frac{\Theta}{2}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де F_d і F_q – повздовжня і поперечна складові магніторушійної сили, відповідно;

$F_{2\max} = 0,9I_{2\max}w_2k_{об}$ – максимальне значення магніторушійної сили, створеної однією фазою обмотки синхронізації.

4.1.3.3 Синхронізувальний момент сельсина

Повздовжні складові магніторушійних сил F_{Cd} і F_{Pd} ротора сенсора і приймача викликають в їхніх обмотках збудження компенсаційні струми, намагнічувальна сила яких компенсує дію намагнічувальних сил F_{Cd} і F_{Pd} . Поперечні складові F_{Cq} і F_{Pq} , що залишились некомпенсованими, взаємодіють з потоками статора, створюючи в сенсорі й в приймачі синхронізувальні моменти.

Часова векторна діаграма для ротора сельсина (рис. 4.2) подібна векторній діаграмі для ротора асинхронного двигуна. Поперечна складова магніторушійної сили \dot{F}_q ротора збігається за фазою зі струмом ротора $\dot{I}_{2\max}$ і відстає від вектора потоку збудження $\dot{\Phi}_3$ на кут $\beta = 90^\circ + \psi_2$. Величину і напрямок синхронізувального моменту можна визначити так само, як і в звичайній асинхронній машині, вважаючи, що момент створюється активною складовою струму ротора. Синхронізувальні моменти в сенсорі й приймачі направлені в різні сторони і прагнуть повернути обидва ротори в узгоджене положення. На ротор сенсора діє момент $M_{сн.С.}$, який намагається повернути ротор в початкове положення, а на ротор приймача – момент $M_{сн.П.}$, що тягне його в сторону повороту ротора сенсора.

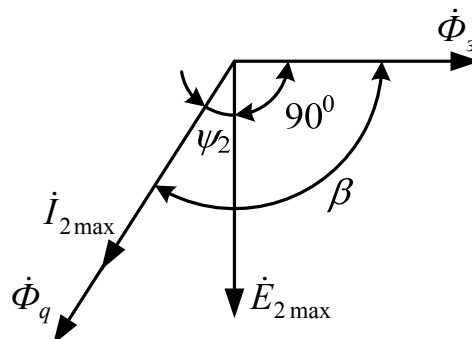


Рисунок 4.2 – Векторна діаграма для ротора сельсина-приймача

Миттєве значення синхронізувального моменту [3]:

$$\begin{aligned} m_{сн} &= C_1 \Phi_{зм} \sin \omega t F_q \sin(\omega t - \beta) = \\ &= C_2 \Phi_{зм} F_{2\max} \sin \Theta [\cos \beta - \cos(2\omega t - \beta)], \end{aligned} \quad (4.6)$$

де C_1 і C_2 – постійні.

Із (4.6) випливає, що при заданому куті неузгодженості Θ синхронізувальний момент змінюється відповідно до зміни кута ωt .

Середнє значення синхронізувального моменту:

$$M_{сн} = C_1 \Phi_{зм} F_q \cos \beta = C_2 \Phi_{зм} F_{2\max} \sin \Theta \sin \psi_2. \quad (4.7)$$

Прийнявши $\sin \psi_2 = \text{const}$ і позначивши $M_{\max} = C_2 \Phi_{зм} F_{2\max} \sin \psi_2$, одержимо

$$M_{сн} = M_{\max} \sin \Theta. \quad (4.8)$$

Таким чином, синхронізувальний момент пропорційний синусу кута неузгодженості. Для того, щоб сельсини забезпечували самосинхронізацію в межах одного оберту, їх в основному виконують двополюсними, причому геометричний кут повороту ротора Θ відповідає „електричному” куту. З виразу (4.8) та рис. 4.3, а) випливає, що синхронізувальний момент рівний нулю при кутах неузгодженості $\Theta = 0$ і $\Theta = 180^0$, тобто в розглянутій системі передачі кута неузгодженості Θ на 360^0 є дві точки узгодженого положення ротора сенсора і приймача. Однак в дійсності узгоджене положення відповідає куту $\Theta = 0$, тому що при $\Theta = 180^0$ має місце нестійка рівновага: при маленькому відхиленні ротора в ту чи іншу сторону від цієї точки виникає синхронізувальний момент, який намагається ліквідувати кут неузгодженості Θ і зробити його рівним нулю.

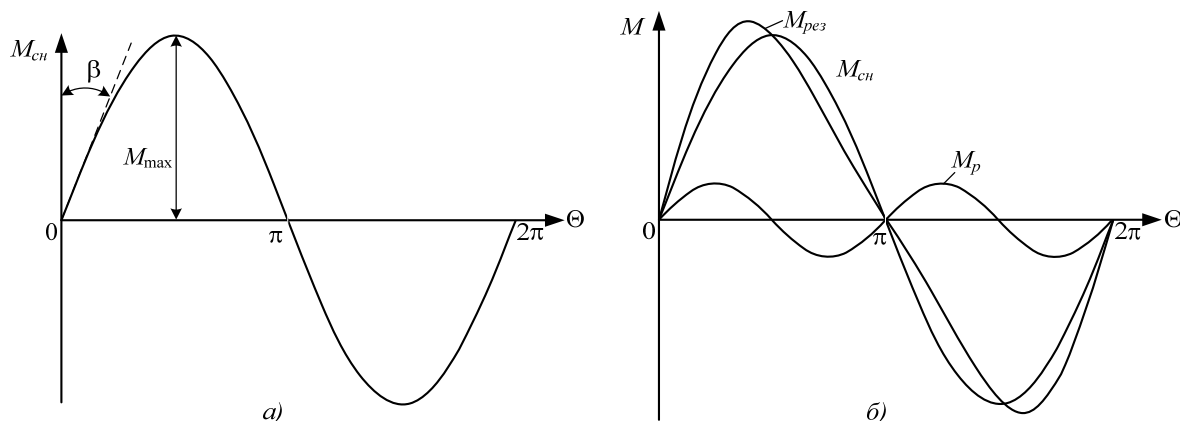


Рисунок 4.3 – Залежність величини синхронізувального моменту від кута неузгодженості в сельсинах з неявно вираженими (а) і явно вираженими (б) полюсами

Для одержання найбільшої величини синхронізувального моменту необхідно мати однакові активний та індуктивний опори ротора сельсина [3].

В сельсинах розрізняють *питомий синхронізувальний момент* – момент, який припадає на один градус кута неузгодженості:

$$M_{\text{сн.пит}} = M_{\text{max}} \sin 1^\circ = 0,0175 M_{\text{max}}. \quad (4.9)$$

Часто цим терміном позначають також крутість S наростання синхронізувального моменту в початковій частині характеристики $M_{\text{сн}} = f(\Theta)$, тобто:

$$S = M'_{\text{сн.пит}} = \left. \frac{dM_{\text{сн}}}{d\Theta} \right|_{\Theta=0}. \quad (4.10)$$

Момент $M'_{\text{сн.пит}}$ є тангенсом кута нахилу $90^\circ - \beta$ характеристики $M_{\text{сн}} = f(\Theta)$ в її початковій частині (рис. 4.3, а). Чим більші величини $M_{\text{сн.пит}}$ і $M'_{\text{сн.пит}}$, тим при меншому куті неузгодженості Θ буде зведений до мінімуму момент від сили тертя, який діє на ротор, і, відповідно, тим меншою буде статична похибка сельсина.

Для збільшення питомого синхронізувального моменту при малих кутах неузгодженості Θ сельсини, призначені для роботи в індикаторному режимі, виконують, як правило, із зосередженою обмоткою збудження і явно вираженими полюсами на статорі. Завдяки цьому з'являється додатковий реактивний момент M_p (рис. 4.3, б), який збільшує сумарний питомий синхронізувальний момент приблизно на 10–20%. Появу реактивного моменту можна пояснити притяганням ротора, який є електромагнітом, до виступних полюсів статора.

4.1.4 Основні похибки сельсинів і способи їх усунення

4.1.4.1 Основні вимоги до сельсинів

Основними технічними показниками, що характеризують роботу сельсинів, є:

- статична і динамічна точність передачі кута;
- питомий синхронізувальний момент;
- максимальний синхронізувальний момент при найбільшому куті неузгодження між осями роторів сенсора і приймача;
- максимальна частота обертання сельсинів;
- час заспокоєння ротора приймача при різких поворотах ротора сенсора.

Залежно від класу точності статична похибка сельсинів складає $\pm(0,25 \div 2,5)^\circ$.

Для сельсинів різної потужності $M_{сн.ном} = (0,1 \div 5) \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/град}$.

4.1.4.2 Причини похибок

Похибки при роботі сельсинів можуть бути спричинені електричною, магнітною і механічною асиметріями сенсора і приймача, що обумовлені технологічними причинами, впливом вищих гармонік в кривій магніторушійних сил ротора, впливом опору лінії зв'язку, зміною напруги живлення. При роботі сельсинів в трансформаторному режимі на точність відпрацювання кута значно впливає струм навантаження у вихідній

обмотці, а при роботі в індикаторному режимі – гальмівний момент на валові приймача.

Технологічні причини похибок можна усунути при виготовленні сельсинів, забезпечивши високу точність штампування листів ротора і статора, а також складання їхніх пакетів; строгою концентричність циліндрових поверхонь ротора і статора, ретельне балансування ротора й ін.

Вищі гармоніки в кривій магніторушійних сил ротора можна зменшити застосуванням синусних (точних) обмоток, виконуючи скіс пазів і вибираючи сприятливі співвідношення між полюсною дугою і зубцевим розподілом.

4.1.4.3 Вплив опору лінії зв'язку

При розгляді роботи сельсинів опір лінії зв'язку не брався до уваги. В тих випадках, коли сенсор знаходиться на значній відстані від приймача, опір лінії зв'язку стає співмірним із власним опором обмоток синхронізації. Це приводить до зменшення струму в обмотках синхронізації сенсора і приймача, внаслідок чого зменшуються вихідна напруга приймача при роботі сельсинів в трансформаторному режимі й величина синхронізувального моменту при роботі в індикаторному режимі. Аналогічно впливає і падіння напруги в ковзних контактах.

В індикаторному режимі роботи сельсинів за умови значної відстані між сенсором і приймачем напруги, що підводяться до їхніх обмоток збудження, можуть дещо відрізнятись за величиною і фазою, що призводить до появи певної похибки. Для її усунення в коло збудження однієї з машин включають додатковий регульований активно-індуктивний опір.

4.1.4.4 Вплив моменту навантаження

При роботі сельсинів в індикаторному режимі гальмівний момент на валі приймача створює певну похибку. Але основний вплив на точність передачі кута завдає тертя в підшипниках приймача і тертя щіток по

контактних кільцях. Похибка, викликана моментом тертя M_T приймача, характеризує його зону нечутливості $\Delta\Theta_T$, величина якої визначається як

$$\Delta\Theta_T = M_T / M_{сн.нум}. \quad (4.11)$$

При роботі сельсинів в трансформаторному режимі момент тертя не впливає на точність передачі кута, оскільки цей момент сприймається виконавчим двигуном.

4.1.4.5 Точність сельсинів-приймачів

В індикаторному режимі її характеризують похибкою $\Delta\Theta$, яка визначається як півсума максимальних позитивного $\Theta_{\max1}$ і негативного $\Theta_{\max2}$ відхилень ротора приймача від узгодженого з ротором сенсора положення за один оберт:

$$\Delta\Theta = (\Theta_{\max1} + \Theta_{\max2}) / 2. \quad (4.12)$$

Точність сенсорів та приймачів сельсинів в трансформаторному режимі визначають похибкою асиметрії. Похибки знаходять для кожної з трьох фаз. Вона визначається як півсума максимальних позитивних і негативних відхилень.

4.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, конструкцією сельсинів.
2. Дослідити роботу сельсинів в індикаторному режимі.
3. Визначити похибки і побудувати криві похибок $\Delta\Theta = f(\Theta_C)$.
4. Визначити питомий синхронізувальний момент сельсина-приймача і побудувати в одних координатних осях графіки залежностей $(\Theta_P, I_z, M_{сн}, M_{с.нум}) = f(G)$, де G – вага вантажу.
5. Визначити залежності синхронізувального моменту, струму, потужності сельсина-сенсора, струмів у лінії зв'язку від кута

неузгодженості. За даними досліду побудувати залежності $(M_{сн}, I_3, P_3, I_{л1}, I_{л2}, I_{л3}) = f(\Theta)$ в одних координатних осях.

4.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

4.3.1 Будова лабораторного стенда

Зовнішній вигляд лабораторного стенда для дослідження безконтактних сельсинів показаний на рис. 4.4, а на рис. 4.5 – у збільшеному вигляді його передня панель.

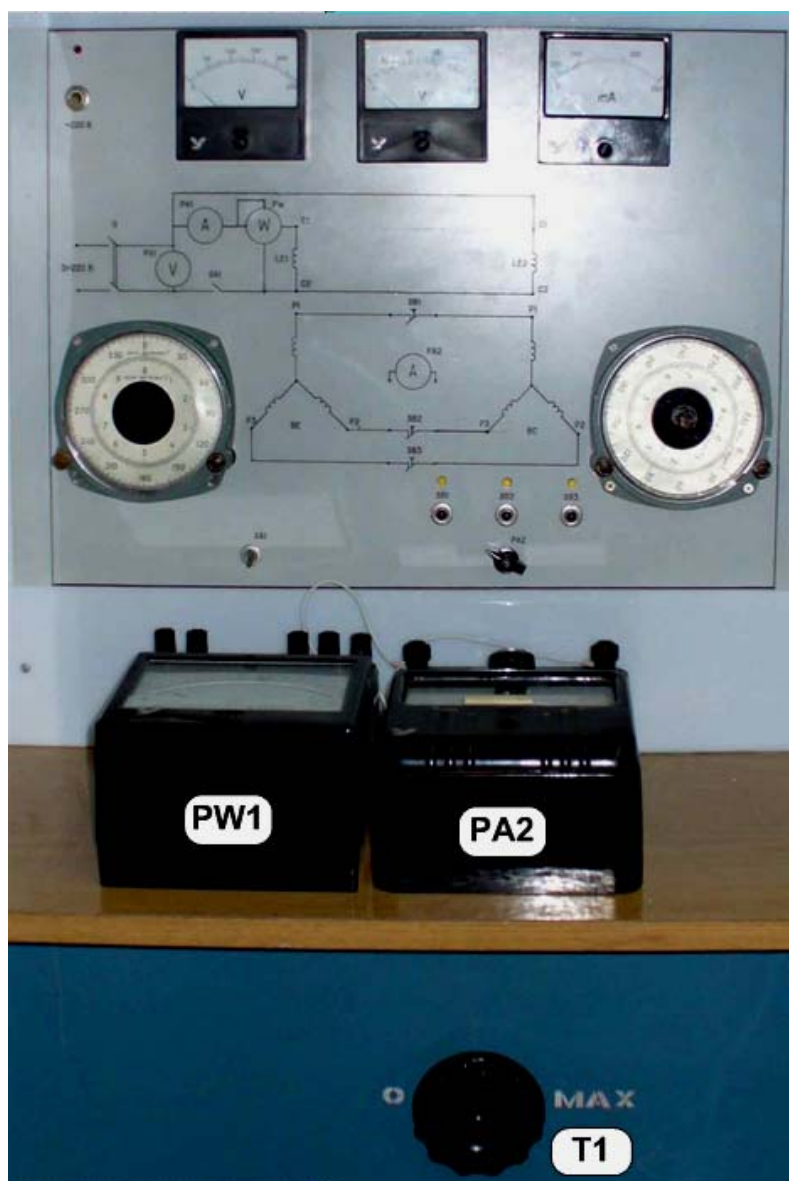


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд лабораторного стенда для дослідження безконтактних сельсинів

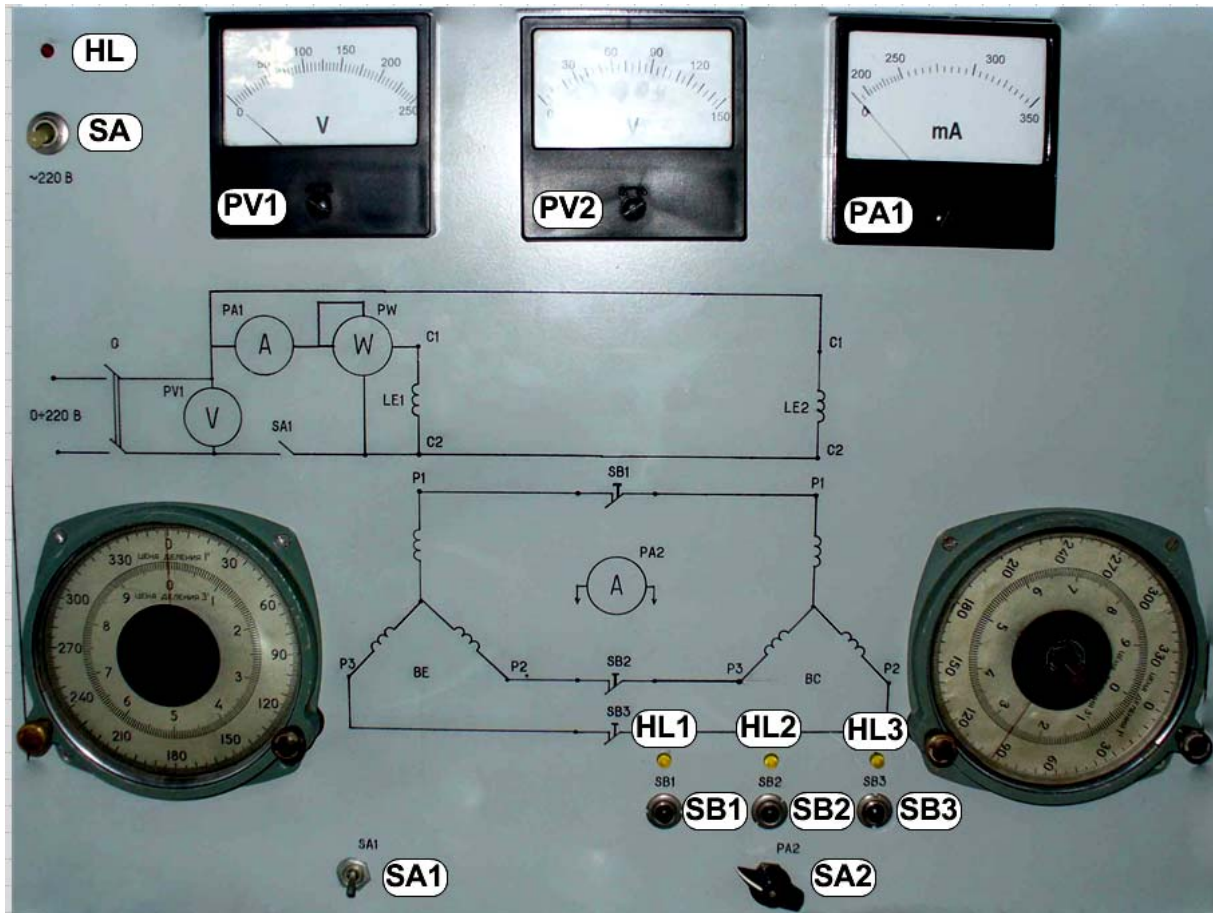


Рисунок 4.5 – Передня панель станда для дослідження безконтактних сельсінів

Схема електрична принципова станда для дослідження сельсінів наведена на рис. 4.6.

Призначення приладів:

- вольтметр PV1 – для вимірювання напруги мережі;
- вольтметр PV2 – для вимірювання напруги на виході РНО;
- міліамперметр PA1 – для вимірювання струму в лініях зв'язку;
- амперметр PA2 – для вимірювання струму в обмотках збудження;
- ватметр PW1 – для вимірювання потужності в обмотках збудження.

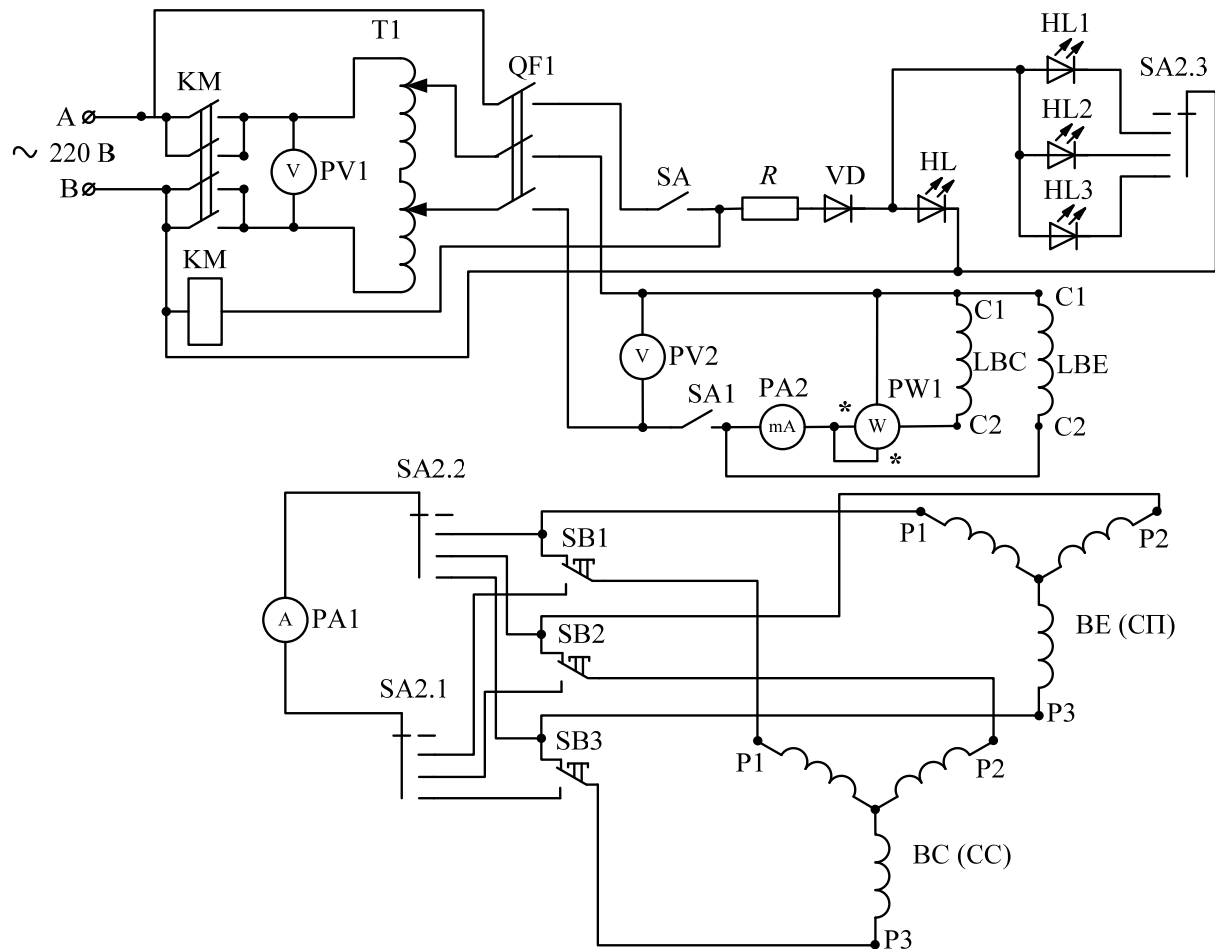


Рисунок 4.6 – Схема електрична принципова лабораторної установки для дослідження безконтактних сельсинів

Призначення сигнально-комутаційної апаратури:

- тумблер SA – для подачі живлення на схему;
- тумблер SA1 – для подачі напруги на обмотки збудження сельсинів;
- пакетний перемикач SA2 – для під'єднання міліамперметра в одну з ліній зв'язку;
- кнопки SB1, SB2, SB3 – для вмикання в одну з ліній зв'язку міліамперметра;
- світлодіод HL – для сигналізуванню подачі живлення на схему;
- світлодіоди HL1, HL2, HL3 – для сигналізуванню під'єднання міліамперметра в одну з ліній зв'язку.

4.3.2 Визначення похибок

Увімкнути вимикач триполюсний QF1 та тумблер SA. За допомогою лабораторного регулятора напруги Т1 виставити напругу на обмотці збудження сельсинів $U_3 = 110$ В та підтримувати її незмінною під час всіх дослідів. Увімкнути тумблер SA1.

Стрілку сельсина-сенсора виставити на нульову відмітку і перевірити, чи збігається нульова відмітка шкали приймача з його стрілкою. Якщо ця умова не виконується, то її можна досягти шляхом повороту шкали сельсина-приймача.

Плавним поворотом ротора сельсина-сенсора задавати кут сельсина-приймача Θ_C від 0^0 до 360^0 через кожні 30^0 і записувати при цьому кути повороту роторів сенсора Θ_C та приймача Θ_P . Різниця показів сельсина-сенсора і сельсина-приймача, виражена в градусах, дасть похибку системи $\Delta\Theta = \Theta_C - \Theta_P$.

Дослід провести двічі: при обертанні ротора сельсина-сенсора за годинниковою стрілкою і проти неї. Дані дослідів занести до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Експериментальні та розрахункові дані для визначення похибки сельсинів

№ точ.	Напрямок руху ротора сельсина-сенсора						Точність сельсинів, клас точності
	за годинниковою стрілкою			проти годинникової стрілки			
	Θ_C , град	Θ_P , град	$\Delta\Theta$	Θ_C , град	Θ_P , град	$\Delta\Theta$	
1							
2							
...							

За даними дослідів побудувати криві похибок $\Delta\Theta = f(\Theta_C)$. Точність сельсина визначається як півсума абсолютних значень додатної та від'ємної похибок

$$\Delta\Theta_{cp} = \frac{\Delta\Theta_{\max} - \Delta\Theta_{\min}}{2}.$$

За величиною $\Delta\Theta_{cp}$ індикаторні сельсини поділяються на три класи:

- 1 клас – $0 \leq \Delta\Theta_{cp} \leq 0,75$ град.;
- 2 клас – $0,75 \leq \Delta\Theta_{cp} \leq 1,5$ град.;
- 3 клас – $1,5 \leq \Delta\Theta_{cp} \leq 2,5$ град.

4.3.3 Визначення питомого синхронізувального моменту сельсина-приймача

На лабораторному стенді питомий синхронізувальний момент $M_{сн.пит}$ визначається за допомогою шківів та нитки з вантажем. Для цього необхідно встановити на вісь ротора сельсина-приймача шків, закріпивши його на осі за допомогою гвинта. Стрілку ротора сельсина-сенсора встановити на нульову відмітку. Вантаж, закріплений на нитці, виводить ротор сельсина-приймача з узгодженого стану. При цьому стрілка сельсина-приймача покаже кут неузгодженості $\Theta = \Theta_{II}$ (стрілку сельсина-сенсора загальмовувати вручну на 0^0).

Величина синхронізувального моменту визначається із співвідношення, [г·см]:

$$M_{сн} = GR_{шк}, \quad (413)$$

де $R_{шк} = 1,9$ см – радіус шківів,

G – вага вантажу в грамах (маса вибита на вантажі).

Питомий синхронізувальний момент можна визначити як [г·см/град]

$$M_{сн.пит} = \frac{M_{сн}}{\Theta}.$$

Для точного визначення $M_{сн.пит}$ потрібно зробити по два виміри з різними вантажами, розбалансовуючи сельсин-приймач в обидва боки від нульового положення. Результати досліду занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Дані для визначення питомого синхронізувального моменту

Вимірювання	Параметри						Примітки
	G , г	Θ , град	$I_{з.С}$, мА	$M_{сн}$, г·см	$M_{сн.пит}$, г·см/град	$M_{сн.пит.ср}$, г·см/град	
за годинниковою стрілкою	0						
	4						
	6						
	14						
	25						
	83						
	95						
проти годинникової стрілки	0						
	4						
	6						
	14						
	25						
	83						
	95						

Середнє значення питомого синхронізувального моменту $M_{сн.пит.ср}$ визначається як

$$M_{сн.пит.ср} = \frac{1}{n} \sum^n M_{сн.пит}, \quad (7.14)$$

де n – число вимірювань.

Отриману величину $M_{сн.пит.ср}$ порівняти з номінальним значенням $M_{сн.пит.ном}$.

Після досліду зняти шків із осі сельсина-приймача.

4.3.4 Визначення залежності синхронізувального моменту, струму, потужності сельсина-сенсора, струмів у лінії зв'язку від кута неузгодженості

Попередньо сельсини повинні бути узгоджені, тобто $\Theta_C = \Theta_{II} = 0^0$.

На вісь сельсина-приймача встановити і закріпити гвинтом вантажний пристрій (штангу з вантажем і стрілкою), сумістивши його стрілку з нулем шкали сельсина-приймача. Змінюючи положення ротора сельсина-сенсора в діапазоні 0^0-180^0 через кожні 20^0 , записати покази приладів.

Навантаження на валові сельсина-приймача створюється вантажем, закріпленим на штанзі (10 г або 14 г). Вантаж створює момент M_g , що врівноважує синхронізувальний момент сельсинів:

$$M_g = Gl \sin \Theta = M_{\max} \sin \Theta = M_{сн}, \quad (4.15)$$

де l – відстань від точки прикладання (центра ваги вантажу) до осі вала, см;

Θ – кут відхилення штанги з вантажем (кут відхилення стрілки сельсина-приймача) від нульового положення.

В даному пристрої максимальний момент M_{\max} виникає при $\Theta = 90^0$. Вирівнювання струмів у лініях зв'язку $I_{л1}$, $I_{л2}$, $I_{л3}$ виконується одним міліамперметром при включенні його в одну з ліній зв'язку за допомогою пакетного перемикача SA2 (загориться один із світлодіодів HL1, HL2, HL3) і натисканням відповідної кнопки SB.

При кутах сенсора від 60^0 до 80^0 вимірювання потрібно виконувати якомога швидше, щоб запобігти перегріванню сельсинів. Результати дослідів занести до табл. 4.3.

За даними досліду побудувати залежності $(M_{сн}, I_з., P_з., I_{л1}, I_{л2}, I_{л3}) = f(\Theta)$ в одних координатних осях.

Таблиця 4.3 – Експериментальні та розрахункові дані для побудови залежностей $(M_{сн}, I_з, P_з, I_{л1}, I_{л2}, I_{л3}) = f(\Theta)$

№ точ.	Дослідні дані							Розрахункові дані			Примітка
	Θ_C , град	Θ_P , град	$I_з$, А	$P_з$, Вт	$I_{л1}$, мА	$I_{л2}$, мА	$I_{л3}$, мА	$\sin\Theta$	$M_{сн}$, г·см	Θ , град	
1.											$U_з = 110 \text{ В}$ $M_{\max} = 425 \text{ г·см}$ $M_{сн} = M_{\max} \sin \Theta$ $\Theta = \Theta_C - \Theta_P$
2.											
...											

4.4 Паспортні дані електричних машин

Номинальні величини сельсинів:

тип: сенсор – БД-404 А; приймач – БС-404 А;

$U_{з.ном} = 110 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $I_{з.ном} = 0,45 \text{ А}$; $P_{1ном} = 12,5 \text{ Вт}$;

$U_2 = U_{обм.синхр.} = U_{вих} = 49 \text{ В}$; $J = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ кг·м}^2 = 132 \text{ г·см}$;

$M_{сн.нит} = 0,0005 \text{ Н·м/град} = 5 \text{ г·см}$; $M_{\max} = 0,024 \text{ Н·м/град} = 240 \text{ г·см}$.

4.5 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Програма лабораторної роботи.
5. Паспортні дані електричних машин, перелік використаних приладів.
6. Схема дослідної установки.
7. Таблиці з дослідними та розрахунковими даними.
8. Графічні залежності відповідно до програми роботи.
9. За результатами роботи зробити висновки.

4.6 Питання для самоконтролю



1. Пояснити будову контактних сельсинів.
2. Пояснити будову безконтактних сельсинів.
3. Суть індикаторного та трансформаторного режимів роботи сельсинів.
4. Методика визначення кутових похибок в індикаторному режимі.
5. Визначення питомого синхронізувального моменту сельсинів.
6. Пояснити залежності від кута Θ синхронізувального моменту, потужності і струмів, отриманих у досліді.

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ІНДУКЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА

📁 **Мета роботи** | Вивчити будову і принцип роботи індукційного регулятора, методику зняття вихідних характеристик регулятора.

5.1 Основні теоретичні відомості

5.1.1 Будова індукційного регулятора

Індукційний регулятор – це поворотний автотрансформатор. Його використовують для регулювання напруги трифазної мережі змінного струму. Як індукційний регулятор використовують трифазний асинхронний двигун із фазним ротором, причому його ротор загальмований, але при необхідності може змінювати своє положення за допомогою приводного механізму.

Схема з'єднання обмоток трифазного індукційного регулятора подана на рис. 5.1.

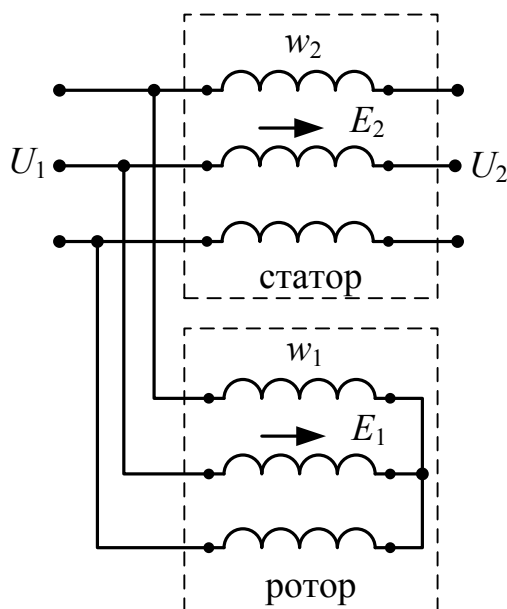


Рисунок 5.1 – Схема з'єднань обмоток трифазного індукційного регулятора

Як первинну обмотку використовують обмотку ротора з кількістю витків w_1 . Її включають паралельно в мережу з напругою U_1 . Вторинна обмотка (обмотка статора) з кількістю витків w_2 включається в цю ж саму мережу, але послідовно. При цьому первинна обмотка може бути з'єднана як зіркою, так і трикутником.

5.1.2 Принцип роботи

Розглянемо роботу індукційного регулятора при з'єднанні первинної обмотки зіркою.

Первинна обмотка споживає з мережі намагнічувальний струм, який створює обертове магнітне поле з потоком Φ . Припустимо, що напрямком цього поля збігається з напрямком руху годинникової стрілки (рис. 5.2).

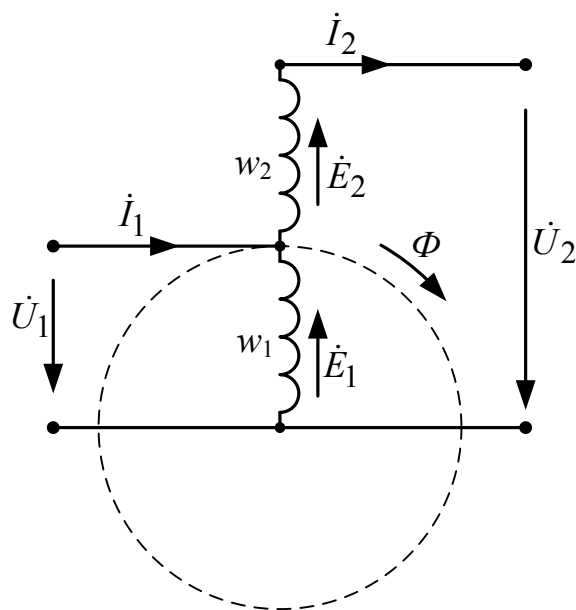


Рисунок 5.2 – До принципу роботи індукційного регулятора

Якщо осі фаз ротора просторово збігаються з осями відповідних фаз статора, то потік Φ при обертанні одночасно проходить через фази ротора і статора та індукує в них ЕРС E_1 і E_2 , які збігаються за фазами. Якщо знехтувати падіннями напруги, то потік індукує в обмотках ЕРС $E_1 = U_1$ і E_2 [4]:

$$E_2 = \frac{w_2 K_{об2}}{w_1 K_{об1}} E_1 = \frac{w_2 K_{об2}}{w_1 K_{об1}} U_1. \quad (5.1)$$

Всі три фази знаходяться в однакових умовах, тому на рис. 5.2 показана лише одна фаза; процеси в інших фазах аналогічні.

ЕРС \dot{E}_2 додається до напруги \dot{U}_1 під кутом β (рис. 5.3), що дорівнює електричному куту повороту фази вторинної обмотки відносно первинної. З рис. 5.3 видно, що при $\beta = 0^\circ$ вектор ЕРС $\dot{E}_2^{(0)}$ збігається за напрямком із вектором \dot{U}_1 .

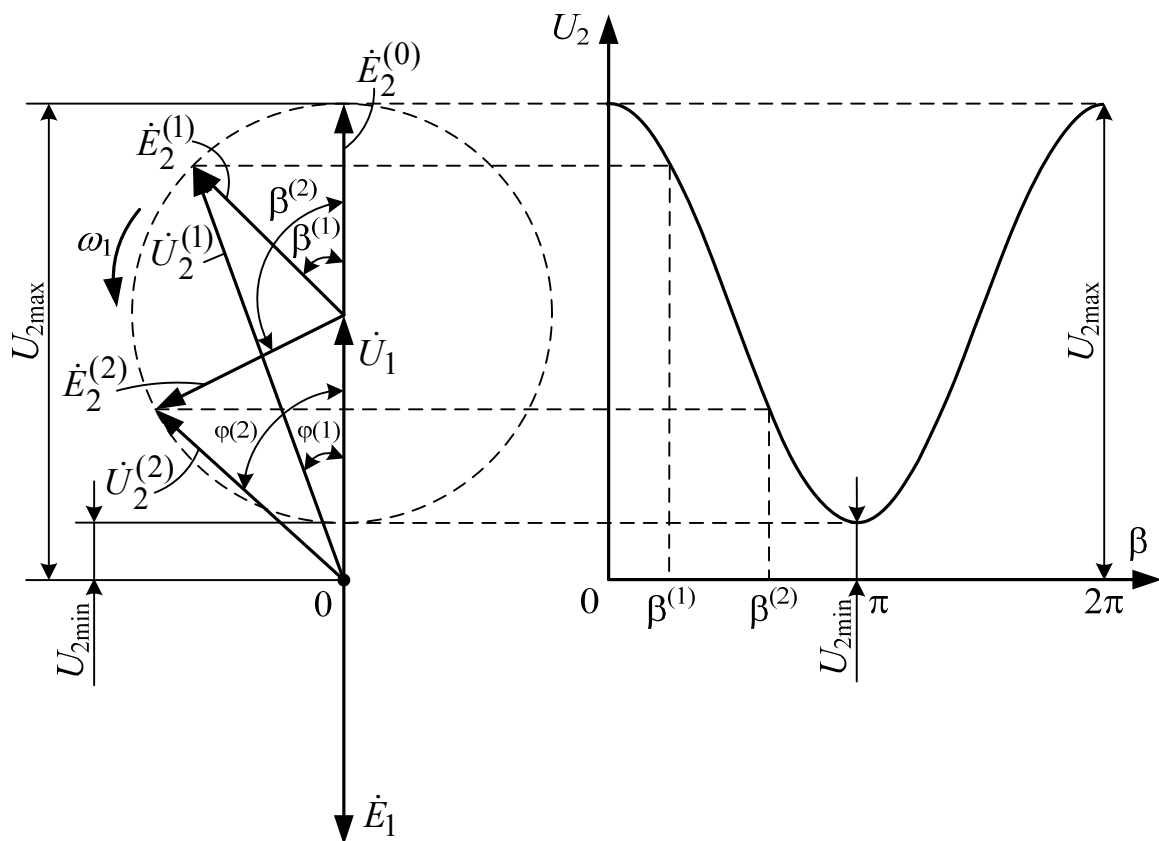


Рисунок 5.3 – Векторна діаграма фазних напруг і ЕРС для однієї фази

В цьому положенні вихідна напруга \dot{U}_2 буде максимальною і рівною арифметичній сумі $U_{2\max} = U_1 + E_2$. Прийmemo це положення ротора за вихідне. При повороті ротора на електричний кут $\beta^{(1)}$ вектори вторинної напруги та вторинної ЕРС займуть відповідно положення $\dot{U}_2^{(1)}$ та $\dot{E}_2^{(1)}$, а

при $\beta^{(2)} - \dot{U}_2^{(2)}$ та $\dot{E}_2^{(2)}$, тобто при зміні кута β кінці векторів \dot{E}_2 та \dot{U}_2 при $\dot{U}_1 = \text{const}$ ковзатимуть по колу. При повороті ротора на кут $\beta = \pm 180^\circ$ вектор ЕРС \dot{E}_2 повернеться на такий самий кут і буде протилежним напрямку вектора \dot{U}_1 . Вихідна напруга в цьому положенні буде максимальною і рівною арифметичній різниці $U_{2\text{min}} = U_1 - E_2$.

При повороті ротора на деякий кут за напрямом обертання потоку Φ (рис. 5.2) первинна напруга U_1 і її частота f_1 незмінні, тому значення потоку Φ також не змінюється. При цьому потік Φ при своєму обертанні буде набігати спочатку на обмотку статора w_2 , а потім на обмотку ротора w_1 . Тому вектор \dot{E}_2 , не змінюючись за величиною, повернеться відносно вектора \dot{U}_1 (рис. 5.3) у напрямку обертання ротора на цей самий кут, як і було показано вище. Геометричним місцем кінців векторів \dot{E}_2 і напруги \dot{U}_2 при зміні кута β від 0° до 360 електричних градусів є коло радіусом E_2 . При цьому *характеристика вихідної напруги* $U_2 = f(\beta)$ індукційного регулятора залежно від положення ротора β буде змінюватися відповідно до графіка, наведеного на рис. 5.3, на якому подана векторна діаграма лише для однієї фази.

При однаковій кількості витків на обмотках статора і ротора

$$E_2 = E_1 = U_1;$$

$$U_{2\text{max}} \approx 2U; \quad U_{2\text{min}} \approx 0.$$

З векторної діаграми (рис. 5.3) видно, що при повороті ротора від 0° до ± 180 електричних градусів змінюється не тільки напруга U_2 , але й її фаза φ відносно первинної напруги ($\varphi = \left(\dot{U}_1, \hat{\dot{U}}_2 \right)$), що залежить від положення вектора \dot{E}_2 .

В деяких випадках потрібно мати незмінність фази φ , для чого досить часто використовують здвоєний індукційний регулятор (рис. 5.4), у якого

первинні обмотки приєднано до первинної мережі паралельно, а вторинні – послідовно одна з другою [4].

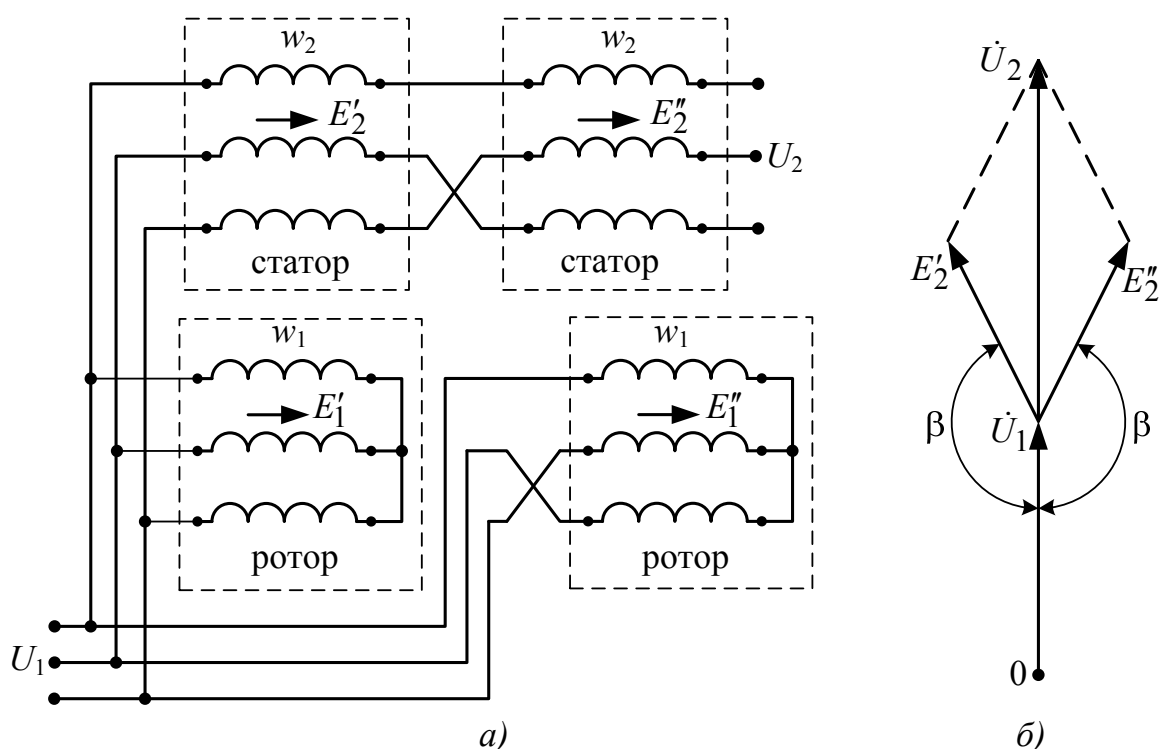


Рисунок 5.4 – Схема з'єднання обмоток (а) та вектора діаграм напруг (б) зведеного трифазного індукційного регулятора

Обидва регулятори закріплені на спільному валі, причому у другого регулятора під'єднання фаз до початків первинної і вторинної сторін здійснюється так, що магнітні поля двох регуляторів обертаються в протилежні сторони, і при повороті ротора одного регулятора в напрямку обертання поля ротор другого повертається проти напрямку обертання поля. При цьому вектори вторинних ЕРС регуляторів E'_2 та E''_2 (рис. 5.4, б) повертаються в протилежних напрямках, і при не враховуванні падіння напруги фаза вторинної напруги

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}'_2 + \dot{E}''_2$$

залишається незмінною. Обертний момент на валові зведеного регулятора відсутній. Недоліком такого регулятора є наявність двох машин, що впливає на вартість пристрою.

Незмінну за фазою вторинну напругу можна отримати також в індукційному регуляторі при з'єднанні фаз обмоток статора (c) і ротора (p) в спільний трикутник (рис. 5.5), якщо кількість витків статора і ротора однакові [4]. Незмінна первинна напруга $U_1 = \text{const}$ в такому регуляторі підводиться до вершин трикутника ABC , а вторинна $U_2 = \text{var}$ знімається із середніх точок a, b, c сторін цього трикутника (рис. 5.5).

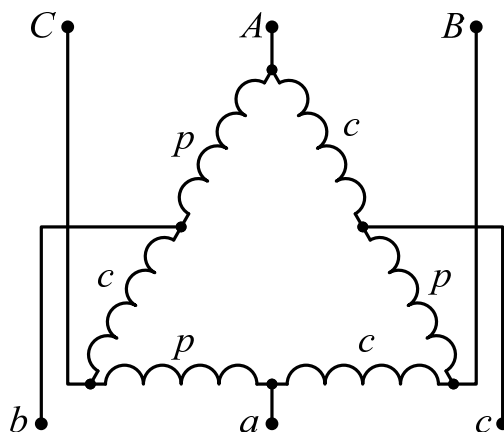


Рисунок 5.5 – Схема трифазного індукційного регулятора при з'єднанні обмоток статора і ротора в спільний трикутник

Векторні діаграми напруг такого регулятора (рис. 5.2) можна побудувати, враховуючи, що ЕРС фаз статора E_1 та ротора E_2 одного і того ж плеча трикутника при $w_1 k_{o\phi 1} = w_2 k_{o\phi 2}$ рівні за величиною, зсунуті по фазі на кут β повороту ротора відносно статора і в сумі рівні прикладеній фазній напрузі [4]:

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_2)$$

На рис. 5.6 показані векторні діаграми регулятора, що розглядається, відповідно для 3-х випадків: $\beta = 0$, $\beta > 0$, $\beta < 0$. При цьому трикутники ABC є системою незмінних первинних напруг, вектори Cb , Ac , Ba – ЕРС фаз статора E_1 та вектори bA , cB , aC – ЕРС фаз ротора E_2 . При повороті ротора зсув фаз β між ЕРС E_1 та E_2 змінюється. Одночасно змінюються також значення обертового потоку Φ та ЕРС E_1 , E_2 таким чином, що сума ЕРС фаз одного і того самого плеча трикутника залишається незмінною:

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 = -\dot{U}_1 = \text{const.}$$

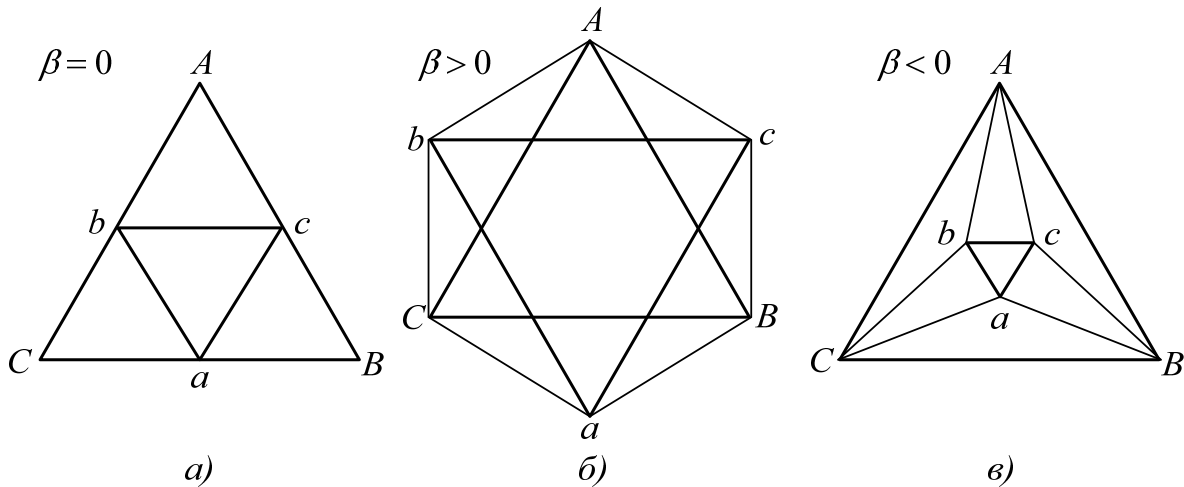


Рисунок 5.6 – Векторні діаграми ЕРС і напруг індукційного регулятора при з'єднанні обмоток статора і ротора в спільний трикутник при різних положеннях ротора

А трикутник вторинних напруг abc (рис. 5.6) змінюється за величиною, але при $w_1 k_{o\phi 1} = w_2 k_{o\phi 2}$ ($E_1 = E_2$) положення цього трикутника, а тому і фаза вторинної напруги не змінюються [4].

При відсутності навантаження на вторинній стороні регулятор, зображений на рис. 5.5, за своїми властивостями є регульованою трифазною реактивною котушкою.

В індукційних регуляторах, як і в автотрансформаторах, розрізняють прохідну і розрахункову (типову) потужності. Співвідношення між цими потужностями в індукційних регуляторах та автотрансформаторах при однакових схемах з'єднання обмоток і однакових співвідношеннях кількості витків рівні.

Охолодження індукційних регуляторів здійснюється внутрішнім або зовнішнім обдувом за допомогою вентилятора. Деколи обмотки індукційного регулятора занурюють в масляний бак, що має радіатори, аналогічно трансформаторному баку.

Індукційні регулятори виготовляються на потужності до 500 кВА.

5.1.3 Маркування фаз статора і ротора

На практиці досить часто доводиться мати справу з електричними машинами, у яких відсутні позначення виводів обмоток. Тому пропонуємо ознайомитися з методикою маркування обмоток асинхронних машин з фазним ротором, на основі яких і побудовані індукційні регулятори.

Два виводи, які належать одній фазі, можна визначити:

1) за допомогою контрольної лампи, яка включається на дві фази трифазної мережі послідовно з фазою індукційного регулятора, яка визначається;

2) за допомогою омметра;

3) за допомогою тестера.

Пропонується виводи однієї фази шукати з використанням першого способу. При цьому загорання контрольної лампи свідчить про те, що дані затискачі належать одній фазі. Одночасно за яскравістю горіння лампи і показами вольтметра, який підключається до затискачів фази індукційного регулятора, визначається належність фази статора чи ротору. Фази статора, виконані на вищу напругу, мають більшу кількість витків і більший опір, тому лампа, увімкнена послідовно з цими фазами, горить менш яскраво, а покази вольтметра більші. Початки і кінці фаз статора маркуються за схемою рис. 5.7, на якому зображена найпростіша обмотка статора, кожна фаза якої складається з однієї котушки.

Початок і кінець однієї з фаз позначають довільно, наприклад С1–С4. Послідовно з цією фазою вмикають одну з невідомих фаз, наприклад С3–С6, і подають на них напругу. По фазах протікатиме струм I , який створюватиме магнітний потік Φ (рис. 8.7). Якщо кінець С4 з'єднаємо з кінцем другої фази С6, то ЕРС в третій фазі не наводиться (показ вольтметра рівний нулю). Це пояснюється тим, що силові лінії магнітного поля, що створюється струмом, який має однаковий напрямок в провідниках, які належать початку однієї і кінцю іншої фази, не перетинають третю фазу. Якщо кінець С4 буде з'єднаний з початком С3 другої фази, то в третій фазі індукватиметься деяка ЕРС, що і покаже вольтметр. Це пояснюється тим, що в цьому випадку струм буде мати

однаковий напрямок в провідниках, які належать початкам і, відповідно, кінцям фаз. Тоді силові лінії магнітного поля Φ , яке охоплює початки C1, C3 фаз і їх кінці C4, C6, будуть пронизувати третю фазу.

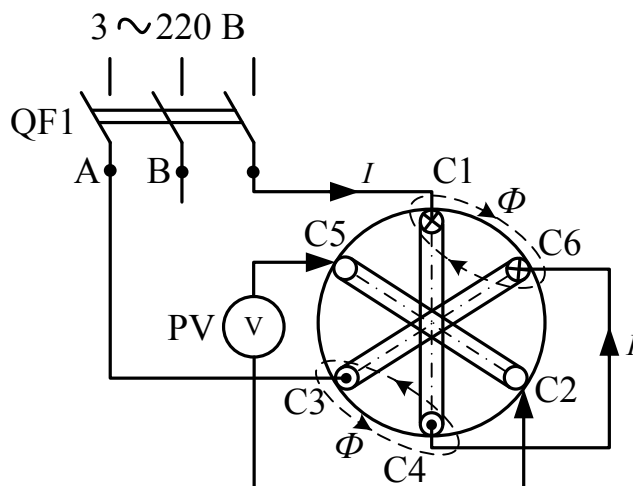


Рисунок 5.7 – Маркування початків і кінців фаз статора

Аналогічно маркується початок і кінець третьої фази.

Фази ротора, які відповідають фазам статора, визначаються за схемою рис. 5.8 у такій послідовності. На одну із фаз статора, наприклад C1–C4, подається напруга.

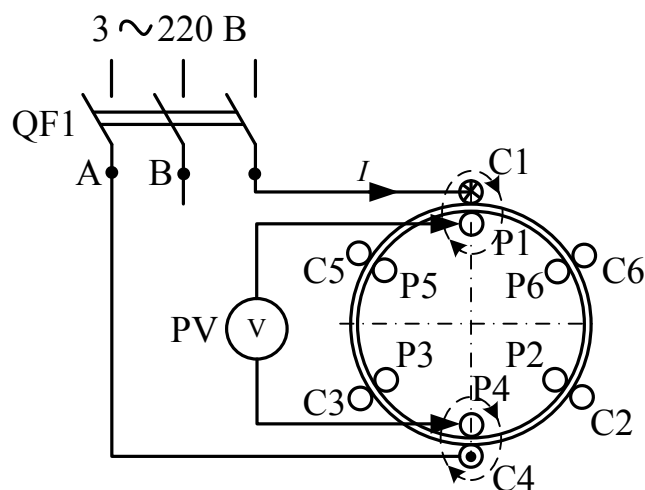


Рисунок 5.8 – Визначення фаз ротора

До затискачів будь-якої іншої фази ротора приєднується вольтметр. Ротор повертається доти, доки вольтметр не покаже максимальну напругу.

При цьому магнітні осі відповідних фаз статора і ротора будуть збігатися. Тому якщо напруга подана на фазу С1–С4, то вольтметр ввімкнений на фазу Р1–Р4. Подаючи напругу по черзі на решту фаз статора і не повертаючи ротор, знаходять відповідні їм фази ротора.

Початки і кінці фаз ротора маркуються за схемою рис. 5.9 при положенні ротора, яке відповідає попередньому дослідженню.

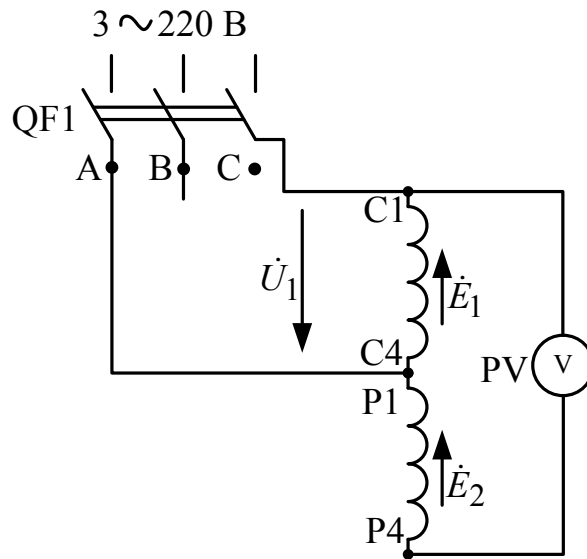


Рисунок 5.9 – Маркування початків і кінців фаз ротора

На одну із фаз статора, наприклад С1–С4, подається напруга U_1 . Кінець її С4 при цьому з'єднаний з одним із виводів відповідної фази ротора, що відповідає схемі автотрансформатора. Під дією напруги U_1 в фазі статора протікатиме струм, що створюватиме магнітний потік, який в свою чергу індукуватиме в фазах статора і ротора ЕРС \dot{E}_1 і \dot{E}_2 . Якщо вихідна напруга автотрансформатора $U_{вих} = E_1 + E_2 \approx E_1 + E_2$ стане більшою, ніж U_1 , то обмотки статора і ротора включені узгоджено, тобто з'єднані між собою С4 і Р1, а якщо $U_{вих} < U_1$, то обмотки включені зустрічно.

5.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитися з будовою лабораторної установки, записати паспортні дані досліджуваного індукційного регулятора, підібрати відповідні їм вимірювальні прилади.
2. Зняти вихідні характеристики $U = f(\alpha)$ індукційного регулятора при:
 - а) правильному чергуванні фаз;
 - б) неправильному увімкненні фаз ($A \leftrightarrow B$);
 - в) неправильному увімкненні фаз ($A \leftrightarrow C$);
 - г) неправильному увімкненні фаз ($B \leftrightarrow C$);
3. Визначити коефіцієнт трансформації індукційного регулятора.
4. Для кожного із дослідів підпункту 2 побудувати залежності $U = f(\alpha)$ та векторні діаграми.

5.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

5.3.1 Будова лабораторного стенда

Передня панель стенда для дослідження індукційного регулятора (рис. 3.4) показана на рис. 5.10.

Схема електрична принципова стенда для дослідження індукційного регулятора наведена на рис. 5.11.

Послідовність подачі напруги на стенд: при вмиканні автомата QF та тумблера SA спрацьовує контактор KM.

Призначення перемикачів:

- тумблер SA – для подачі живлення на схему;
- перемикач SA1 – для зміни чергування фаз;
- перемикач SA2 – для ввімкнення вимірювального приладу PV1 в різні кола контролю вимірювальної величини.

Призначення контрольно-вимірювального приладу:

- вольтметр PV1 – для вимірювання напруги на затискачах обмоток статора.

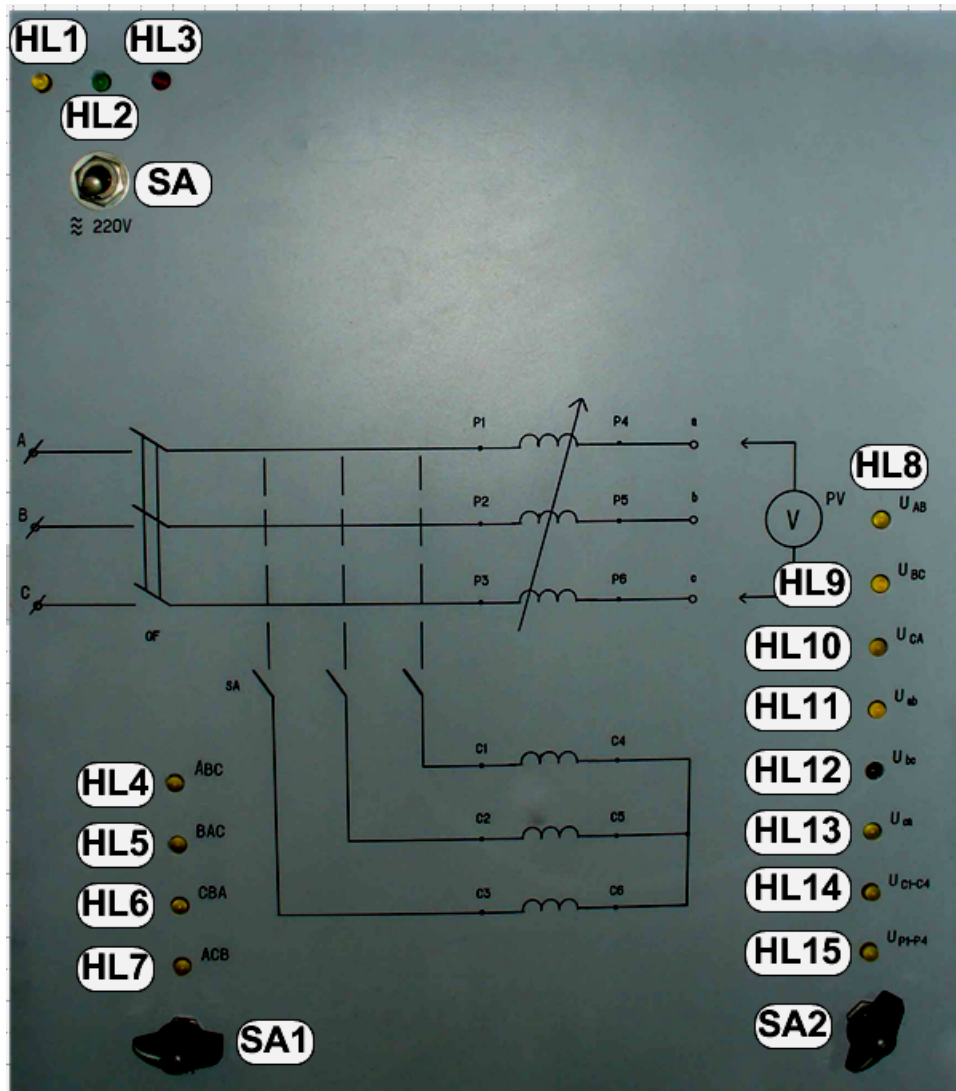


Рисунок 5.10 – Передня панель стенда для дослідження індукційного регулятора

5.3.2 Зняття вихідних характеристик

Зняття вихідної характеристики індукційного регулятора здійснюється:

- а) при правильному ввімкненні фаз – ввімкнути тумблер SA, перемикач SA1 перевести у перше положення. За допомогою перемикача SA2 та вольтметра здійснити вимірювання напруги (для ввімкнення приладу тумблер над T1 перевести в праве положення);
- б) при неправильному ввімкненні фаз ($A \leftrightarrow B$) – перемикач SA1 перевести у друге положення і повторити дослід;

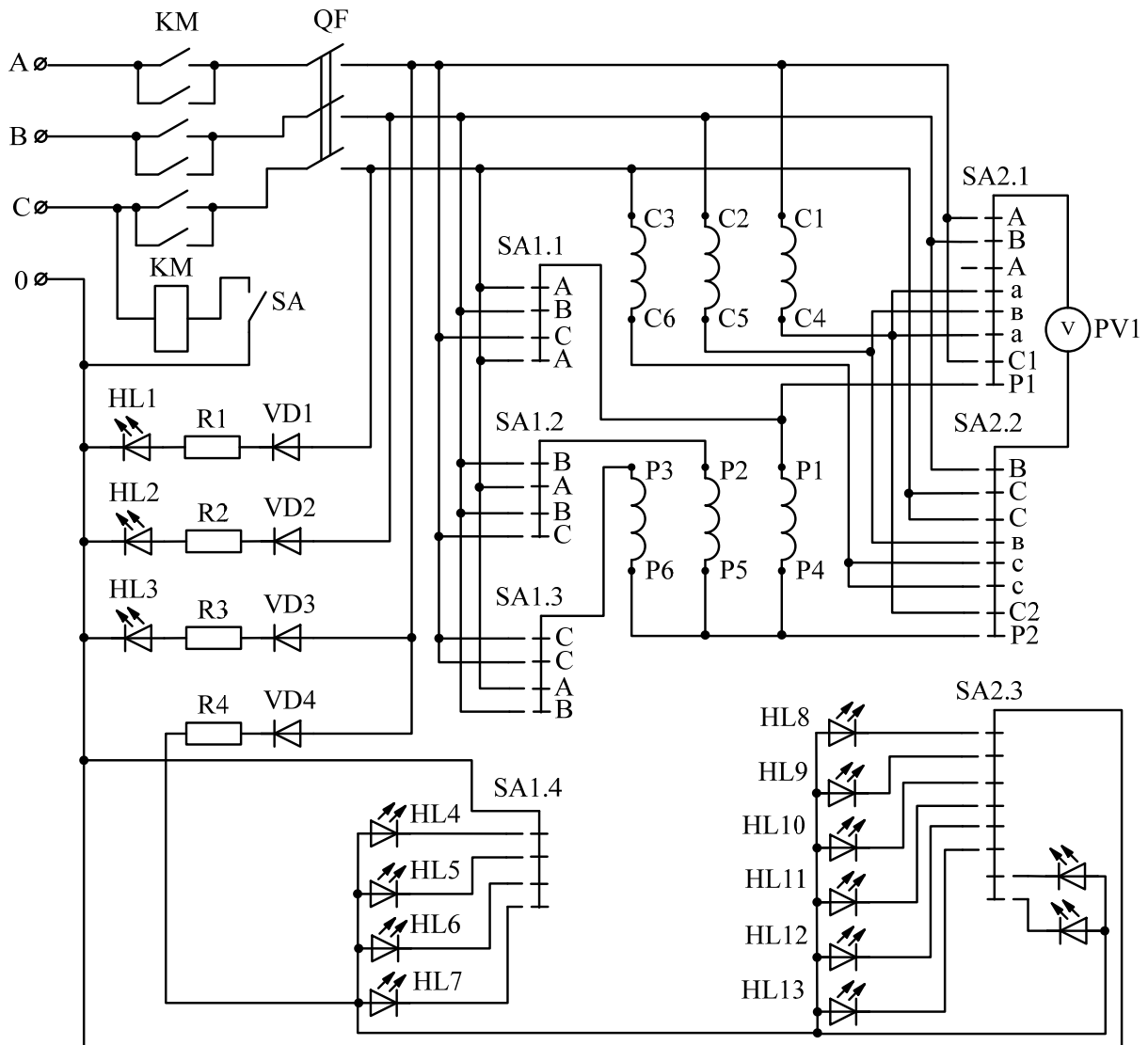


Рисунок 5.11 – Схема електрична принципова стенда для дослідження індукційного регулятора

в) при неправильному ввімкненні фаз ($A \leftrightarrow C$) – перемикач SA1 перевести у третє положення і повторити дослід;

г) при неправильному ввімкненні фаз ($B \leftrightarrow C$) – перемикач SA1 перевести у четверте положення і провести дослід.

Для визначення коефіцієнта трансформації перемикач SA1 має бути у першому положенні, а перемикач SA2 – спочатку в передостанньому та кінцевому положенні, відповідно.

Дані з дослідів заносимо до табл. 5.1 (вимірювання здійснюють через кожні 20 електричних градусів).

Таблиця 5.1 – Експериментальні дані для побудови вихідної характеристики індукційного регулятора

Ел. град.	Значення напруг										
	$U_{1л},$ В	$U_{2л},$ В	A↔B			A↔C			B↔C		
			$U_{ав},$ В	$U_{вс},$ В	$U_{са},$ В	$U_{ав},$ В	$U_{вс},$ В	$U_{са},$ В	$U_{ав},$ В	$U_{вс},$ В	$U_{са},$ В
0											
20											
40											
.....											
340											
360											

Кожна бригада виконує досліди відповідно до табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Варіанти завдань для бригад

№ бригади	Правильне вмикання обмоток	Неправильне вмикання обмоток
1	$0^0; 90^0; 120^0; 240^0; 360^0$	ВАС: $0^0; 90^0; 120^0; 240^0; 360^0$
2	$0^0; 180^0; 240^0; 320^0; 360^0$	СВА: $0^0; 180^0; 240^0; 320^0; 360^0$
3	$0^0; 40^0; 180^0; 240^0; 360^0$	АСВ: $0^0; 40^0; 180^0; 240^0; 360^0$

Коефіцієнт трансформації не залежить від схеми з'єднання обмоток індукційного регулятора і визначається відношенням ЕРС первинної до ЕРС вторинної обмоток. Тому його можна визначити з формули:

$$k = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} \approx \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}.$$

5.4 Паспортні дані електричних машин

Індукційний регулятор напруги:

тип – Фр–41А;

$S_n = 0,5 \text{кВ}\cdot\text{А}$; $m = 3$; $f = 50 \text{ Гц}$; $\Delta/Y = 220/380 \text{ В}$; $I_1 = 1,31 \text{ А}/2,24 \text{ А}$;

$U_{2лн} = 38\div 405 \text{ В}$.

5.5 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Програма лабораторної роботи.
5. Паспортні дані електричних машин, перелік використаних приладів.
6. Схема дослідної установки.
7. Таблиці з дослідними даними.
8. На основі даних п. 5.2 (підпункти 2, а) –г) побудувати векторні діаграми індукційного регулятора при $\alpha = 0^\circ$ для правильного і неправильного способів вмикання обмоток та вихідні характеристики $U = f(\alpha)$ в межах зміни кута α від 0° до 360 електричних градусів. Графіки будувати для правильного вмикання обмоток в одних координатних осях, а для неправильного – в інших. На отримані графіки для порівняння нанести дослідні криві $U_{2л} = f(\alpha)$.
9. За результатами роботи зробити висновки.

5.6 Питання для самоконтролю



1. Будова асинхронної машини. Режими її роботи.
2. Робота асинхронної машини при нерухомому роторі в режимах холостого ходу, короткого замикання і навантаження. Приведення параметрів ротора до статора.
3. Призначення, будова і принцип роботи індукційного регулятора.

4. Схеми з'єднання обмоток трифазного індукційного регулятора, методика маркування початків і кінців його фаз.
5. Векторні діаграми трифазного індукційного регулятора в режимі холостого ходу при правильній і неправильній схемах ввімкнення та їх обґрунтування.
6. Теоретично пояснити співвідношення між геометричними і електричними градусами в електричній машині.
7. Зобразити вигляд залежностей $U_{2r} = f(\alpha)$ при $p = 1$, $p = 2$, $p = 3$ за один повний оберт ротора.
8. Призначення, будова, схема з'єднання обмоток і принцип роботи фазорегулятора.

Лабораторна робота №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

📁 **Мета роботи** Ознайомитись з конструкцією і принципом роботи обертових трансформаторів, дослідити синусно-косинусний трансформатор, лінійний обертовий трансформатор із вторинним симетруванням, обертовий трансформатор-побудовник.

6.1 Основні теоретичні відомості

6.1.1 Призначення обертових трансформаторів

Обертovими трансформаторами називають електричні мікромашини змінного струму, що перетворюють кут повороту ротора Θ в напругу, пропорційну деяким функціям цього кута чи самому куту [2, 3]. Залежно від закону зміни напруги на виході машини розрізняють такі типи обертових трансформаторів:

- синусно-косинусний трансформатор, що дозволяє отримувати на виході дві напруги, одна з яких пропорційна $\sin\Theta$, а друга – $\cos\Theta$;
- лінійний обертовий трансформатор, вихідна напруга якого пропорційна куту Θ ;
- трансформатор-побудовник, вихідна напруга якого пов'язана з первинними напругами U_1 та U_2 формулою $U_{\max} = C\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$, де C – постійна.

Для отримання обертових трансформаторів різних типів може бути використана одна і та сама машина з двома обмотками на статорі і двома на роторі при різних способах ввімкнення обмоток.

Обертovі трансформатори широко використовуються в автоматичних і обчислювальних пристроях, призначених для виконання операцій трьох основних видів:

- 1) алгебраїчних – додавання, множення, ділення, піднесення до степеня, визначення кореня;
- 2) тригонометричних – отримання синусних, арксинусних, тангенсних, арктангенсних і т.д. залежностей амплітуди напруги від кута повороту;
- 3) перетворення координат.

В системах автоматичного управління вони використовуються також як вимірювачі неузгодженості, що фіксують відхилення системи від деякого заданого положення.

6.1.2 Будова обертових трансформаторів

Конструктивно обертовий трансформатор виконується так само, як і асинхронний двигун з фазним ротором. На статорі і роторі розміщуються по дві однакові однофазні розподілені обмотки, зсунуті між собою в просторі на 90° . Магнітопровід виготовляють із листів електротехнічної сталі чи пермалою, ізольованих один від одного [3].

Обертовий трансформатор може працювати в режимах:

- повороту ротора;
- обертання.

В першому випадку положення ротора відносно статора задається обертовим механізмом (виконавчим двигуном з редуктором). При роботі в цьому режимі одна з обмоток статора – обмотка збудження OZ рис. 6.1 – під'єднується до мережі змінного струму, а інша – компенсаційна (або квадратурна) обмотка KO – підключається до деякого опору і замикається накоротко. В деяких випадках обидві статорні обмотки отримують незалежне живлення від мережі змінного струму. Обмотки статора OZ і KO можуть виконуватися розділеними або вмикаються за мостовою схемою. Обмотки статора S (синусна) та C (косинусна) приєднуються до контактних кілець (в обертових трансформаторах, що випускаються промисловістю, виводи обмоток статора маркуються C_1, C_2, C_3, C_4 , а ротора – P_1, P_2, P_3 , та P_4). Для зменшення числа контактних кілець кінці двох обмоток ротора приєднуються до одного спільного кільця і через

мідну щітку підводяться до спільного затискача. Кінці цих обмоток виводять через відповідні кільця і щітки до двох інших затискачів. Застосовується також струмознімач на базі спіральних пружин, але в цьому випадку кут повороту ротора в межах 1,8–2 оберти [3].

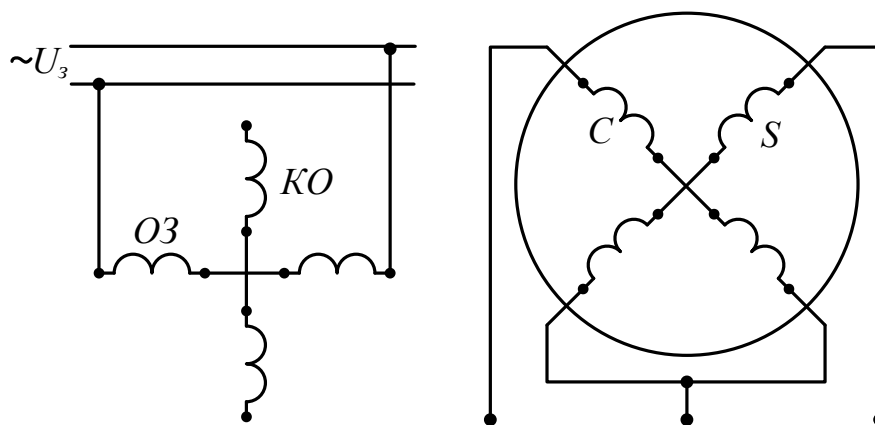


Рисунок 6.1 – Схема електрична принципова чотириобмоткового обертового трансформатора

При роботі обертового трансформатора в режимі безперервного обертання обмотку збудження і компенсаційну обмотку з метою зменшення числа ковзних контактів здебільшого розміщують на роторі, а синусну і косинусну – на статорі. При цьому компенсаційну обмотку замикають накоротко, а виводи обмотки збудження підключають до двох контактних кілець.

Для подальшого розгляду обертових трансформаторів вважатимемо, що обмотки OZ та KO розміщені на статорі, а обмотки S і C – на роторі.

6.1.3 Принцип дії обертового трансформатора

При підключенні обмотки збудження OZ до мережі змінного струму в машині виникає поздовжній магнітний потік Φ_d , що пульсує в часі з частотою мережі. На холостому ході в обмотках ротора S та C цей потік індукватиме ЕРС E_{S_0} і E_{C_0} , частота яких буде рівна частоті мережі f_1 , а дійсне значення буде залежати від положення ротора відносно статора [3].

В обмотці статора OZ потік Φ_d індукує ЕРС

$$E_3 = 4,44 f_1 w_1 k_{o\delta 1} \Phi_{dm}, \quad (6.1)$$

де Φ_{dm} – максимальне значення потоку;

w_1 та $k_{o\delta 1}$ – число витків і коефіцієнт обмотки статора, відповідно.

Максимальне значення потоку, зчепленого з обмоткою C , при зсуві осі обмотки C ротора відносно осі обмотки OZ на деякий кут Θ :

$$\Phi_{Cm} = \Phi_{dm} \cos \Theta, \quad (6.2)$$

а ЕРС, індукована в цій обмотці,

$$E_{C0} = 4,44 f_1 w_2 k_{o\delta 2} \Phi_{dm} \cos \Theta, \quad (6.3)$$

де w_2 та $k_{o\delta 2}$ – кількість витків і коефіцієнт обмотки ротора, відповідно.

Поділивши (6.3) на (6.1), отримаємо:

$$\frac{E_{C0}}{E_3} = \frac{w_2 k_{o\delta 2}}{w_1 k_{o\delta 1}} \cos \Theta = k \cos \Theta. \quad (6.4)$$

Тоді вихідна напруга косинусної обмотки на холостому ході

$$E_{C0} = k E_3 \cos \Theta. \quad (6.5)$$

Обмотка ротора S зсунута відносно обмотки C на кут $\pi/2$, звідси вихідна напруга в цій обмотці

$$E_{S0} = k E_3 \sin \Theta. \quad (6.6)$$

Обмотка статора KO з потоком Φ_d не пов'язана, а тому він не індукує в ній ЕРС. Вона використовується для компенсації поперечних потоків, що створюються обмотками ротора при навантаженні обертового трансформатора. Якщо замість обмотки OZ приєднати до мережі змінного струму обмотку KO , то вона створить поперечний потік, відносно якого обмотка S буде косинусною, а обмотка C – синусною. Таким чином, в обмотках ротора на холостому ході індукуються ЕРС, пропорційні синусу чи косинусу кута повороту ротора відносно відповідного потоку.

Застосовуючи різноманітні схеми вмикання обмоток статора і ротора, можна отримати й інші функціональні залежності, а також зменшити похибки, викликані струмом навантаження [3].

6.1.4 Синусно-косинусний обертовий трансформатор

6.1.4.1 Вихідна напруга

Такий трансформатор має чотири обмотки: на статорі – OZ і KO , на роторі S і C (рис. 6.1). Напруга на холостому ході на косинусній обмотці C рівна ЕРС (6.5), а на синусній S – ЕРС (6.6).

Розглянемо роботу обертового трансформатора при підключенні до синусної обмотки S деякого навантаження Z_{HS} . В цьому випадку по обмотці S буде протікати струм

$$I_S = \frac{\dot{E}_S}{Z_S + Z_{HS}}, \quad (6.7)$$

де Z_S – опір обмотки S , який будемо вважати постійним.

Струм I_{HS} створює магніторушійну силу ротора F_S , яку можна подати як суму двох складових: поздовжньої $F_{Sd} = F_S \sin \Theta$ і поперечної $F_{Sq} = F_S \cos \Theta$ (рис. 6.2).

Поздовжня складова F_{Sq} створює в обмотці збудження OZ компенсувальний струм, магніторушійна сила якого F_3 компенсує дію F_{Sq} . Результувальний поздовжній потік Φ_d індукує в обмотці S ЕРС

$$E_{Sd} = kE_3 \sin \Theta. \quad (6.8)$$

Поперечна складова F_{Sq} створює в обертовому трансформаторі поперечний потік Φ_q , відносно якого обмотка S є косинусною, а тому в ній індукується ЕРС [3]

$$E_{Sq} = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{qm} \cos \Theta = CF_S \cos^2 \Theta, \quad (6.9)$$

де C – постійна.

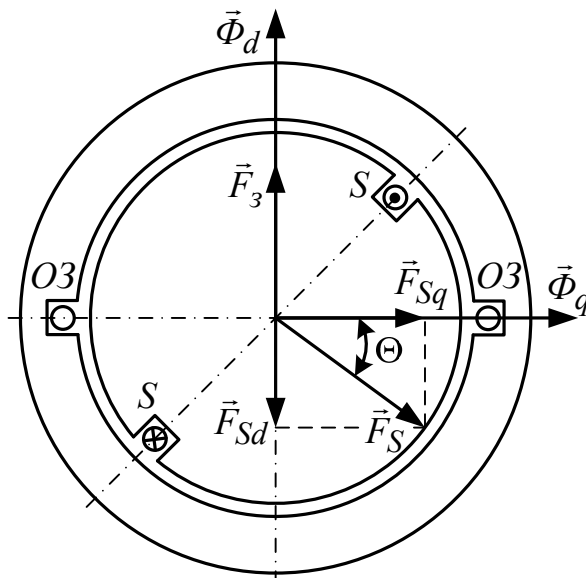


Рисунок 6.2 – Векторна діаграма магніторушійних сил при підключенні навантаження до синусної обмотки

Таким чином, при навантаженні в синусній обмотці S індуються дві ЕРС, які визначаються виразами (6.8) та (6.9). Остання ЕРС є небажаною, оскільки вносить похибку. Аналогічно в косинусній обмотці при навантаженні поперечним потоком Φ_q індується також небажана ЕРС E_{Cq} , пропорційна струму навантаження і $\cos^2\Theta$, що також викликає похибку.

Для усунення похибки обертового трансформатора, обумовленої поперечним потоком Φ_q , застосовують так звані *симетрувальні трансформатори*, тобто *компенсацію поперечного потоку ротора*. Є два способи симетрування: вторинне (зі сторони ротора) і первинне (зі сторони статора).

6.1.4.2 Вторинне симетрування

Зменшити похибку вихідної напруги, що знімається з синусної обмотки, можна, підключивши до косинусної обмотки опір Z_{nC} (рис. 6.3, а). В цьому випадку струм, що проходить по обмотці C , створює магніторушійну силу F_C , яку можна подати у вигляді векторної суми двох складових: поздовжньої $F_{Cd} = F_C \cos\Theta$ і поперечної $F_{Cq} = F_C \sin\Theta$

(рис. 6.3, б). Поздовжня складова F_{Cd} збігається за напрямком із F_{Sd} , а поперечна складова F_{Cq} направлена проти F_{Sq} . При рівності $F_{Cq} = F_{Sq}$ поперечний потік $\Phi_q = 0$. Тому похибки, обумовлені цим потоком не буде [3].

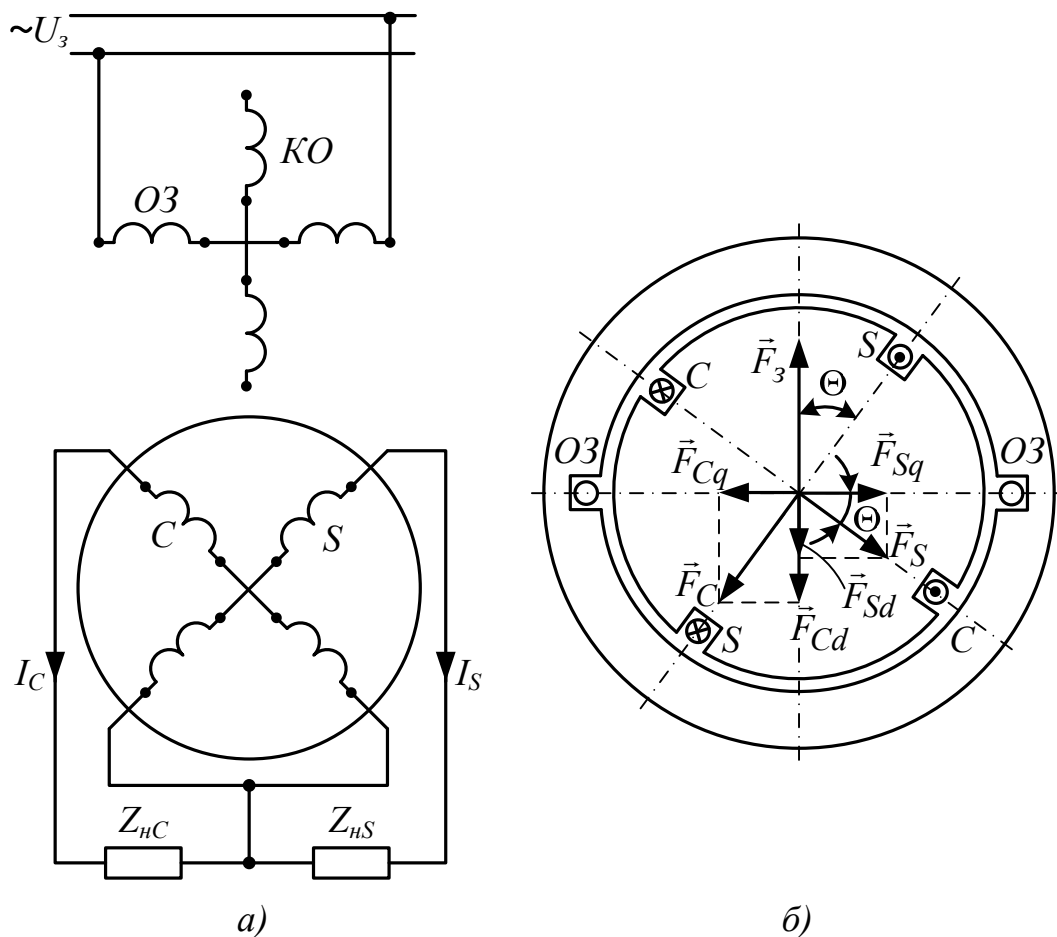


Рисунок 6.3 – Схема синусно-косинусного трансформатора із вторинною компенсацією (а) та діаграма магніторушійних сил, що створюються обмотками ротора (б)

Величину опору Z_{nC} , при якому буде забезпечено повне симетрування, можна визначити з умови

$$F_S \cos \Theta = F_C \sin \Theta \quad (6.10)$$

або з урахуванням F_S і F_C

$$Z_S + Z_{nS} = Z_C + Z_{nC}. \quad (6.11)$$

З виразу (6.11) видно, що повне симетрування буде спостерігатися при рівності опорів в колі обмоток S і C ротора.

Недоліком розглянутого методу симетрування є те, що він практично застосовується тільки при постійному опорі навантаження.

6.1.4.3 Первинне симетрування

Припустимо, що навантаження підключене тільки до одної з обмоток ротора, наприклад, до обмотки S (рис. 6.4, a), внаслідок чого намагнічувальна сила ротора по поперечній осі не дорівнює нулю. Для зменшення поперечного потоку компенсаційну обмотку KO статора замикають на будь-який малий опір Z_K чи накоротко. В цьому випадку вздовж поперечної осі обертового трансформатора буде діяти результувальна магніторушійна сила [3]

$$F_q = F_{Sq} + F_K, \quad (6.12)$$

де F_K – магніторушійна сила, що створюється компенсаційною обмоткою.

Оскільки обмотка KO відносно поперечного потоку Φ_q є замкнутою накоротко вторинною обмоткою трансформатора, то її магніторушійна сила \dot{F}_K направлена проти магніторушійної сили \dot{F}_{Sq} „первинної” обмотки, а результувальна магніторушійна сила \dot{F}_q набагато менша магніторушійної сили \dot{F}_{Sq} . Тому поперечний потік Φ_q і викликана ним похибка різко зменшуються. При зміні навантаження, підключеного до обмотки ротора, магніторушійна сила \dot{F}_K змінюється майже пропорційно \dot{F}_{Sq} , внаслідок чого ступінь компенсації поперечного потоку залишається практично незмінною. Це є перевагою даного методу симетрування. Однак при зміні кута повороту ротора Θ змінюється струм I_3 в обмотці збудження, що є небажаним, оскільки при заданій напрузі \dot{U}_3 в цьому випадку буде змінюватися ЕРС \dot{E}_3 . В результаті з’являється додаткова похибка в величині вихідних напруг \dot{U}_S та \dot{U}_C на затискачах синусної та

косинусної обмоток. Тому в обертових трансформаторах здебільшого застосовують одночасно первинне і вторинне симетрування (рис. 6.4, б).

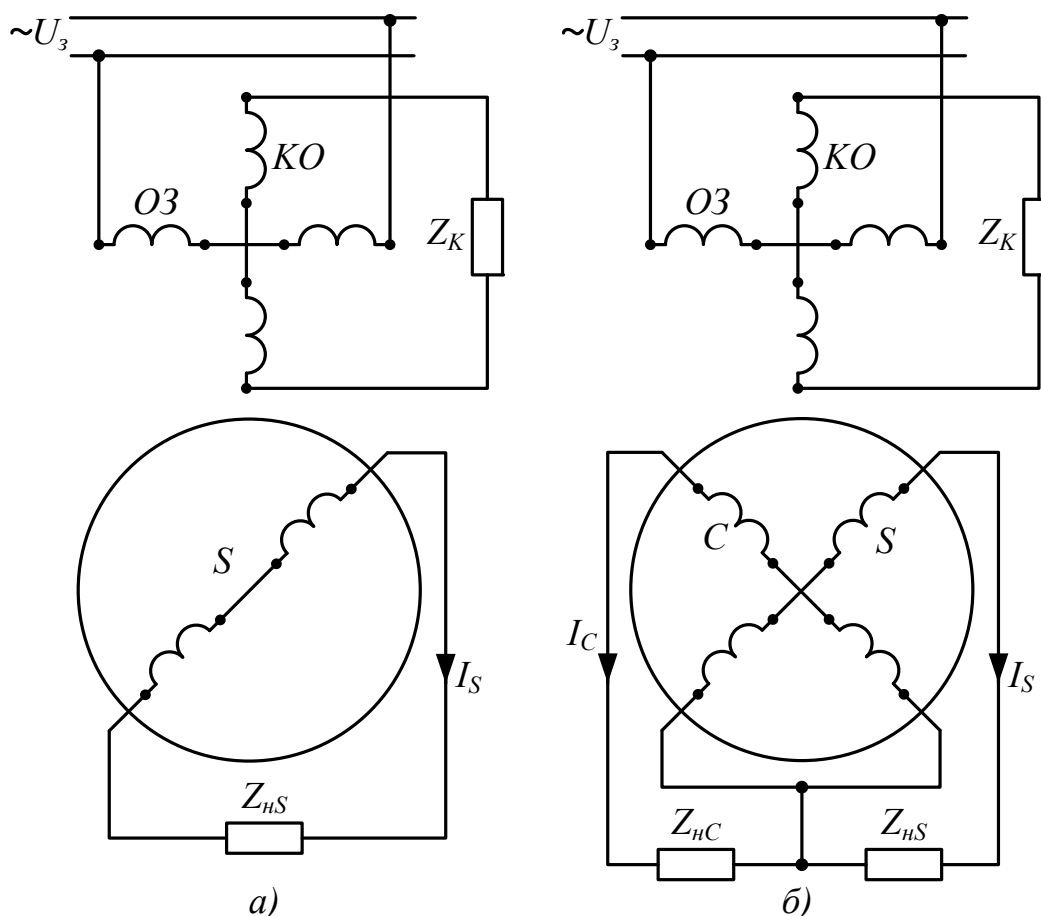


Рисунок 6.4 – Схеми синусно-косинусних обертових трансформаторів

Розглянуті методи компенсації поперечного потоку Φ_q дозволяють використовувати як робочу обмотку і синусну, і косинусну обмотки. Тому обертовий трансформатор, ввімкнений за схемою, зображеною на рис. 6.4, б) називають *СИНУСНО-КОСИНУСНИМ* [3].

6.1.5 Лінійний обертовий трансформатор

6.1.5.1 Вихідна напруга

При будь-якому вмиканні обмоток обертового трансформатора рівняння, що пов'язує його вихідну напругу з кутом повороту Θ ротора, містить функції $\sin\Theta$ та $\cos\Theta$. Якщо вибрати певним чином схеми

ввімкнення обмоток, можна отримати вихідну характеристику в деякому обмеженому діапазоні зміни кута Θ , близьку до лінійної. Наприклад, при невеликій зміні кута Θ можна вважати, що $\Theta \approx \sin\Theta$ і отримати потрібну лінійну залежність $U_{вих} = f(\Theta)$ від синусної обмотки. Однак в цьому випадку точність лінійної апроксимації порядку 0,1% може бути отримана лише при зміні кута Θ в межах $\pm 4,5^\circ$. Тому використовувати для лінійного обертового трансформатора одну синусну обмотку нераціонально [3].

Ширший діапазон зміни кута Θ , в межах якого вихідна характеристика може з достатньою точністю вважатися лінійною, можна отримати, якщо вихідну напругу подати у вигляді функції [3]

$$U_{вих} = C \frac{\sin \Theta}{1 + k \cos \Theta}. \quad (6.13)$$

Для отримання вказаної залежності можуть бути використані дві схеми з'єднання обмоток обертового трансформатора: з первинним симетруванням (на статорі) і з вторинним симетруванням (на роторі).

6.1.5.2 Схема з первинним симетруванням

В цій схемі (рис. 6.5, а) компенсаційна обмотка KO замикається накоротко, а обмотка збудження OZ з'єднується послідовно з косинусною обмоткою C ротора; кінці їх підключаються до мережі. До синусної обмотки S приєднують опір навантаження $Z_{нс}$. Через те, що обмотка KO замкнута накоротко, поперечний потік $\Phi_q = 0$. Для кола обмоток OZ та C можна записати рівняння

$$\dot{U}_3 + \dot{E}_3 + \dot{E}_C = \dot{I}_3 Z_3 + \dot{I}_3 Z_C. \quad (6.14)$$

Нехтуючи падіннями напруги в обмотках OZ , C та S і беручи $E_3 + E_C \approx U_3$, отримаємо

$$U_{вих} \approx E_S = kU_3 \frac{\sin \Theta}{1 + k \cos \Theta}. \quad (6.15)$$

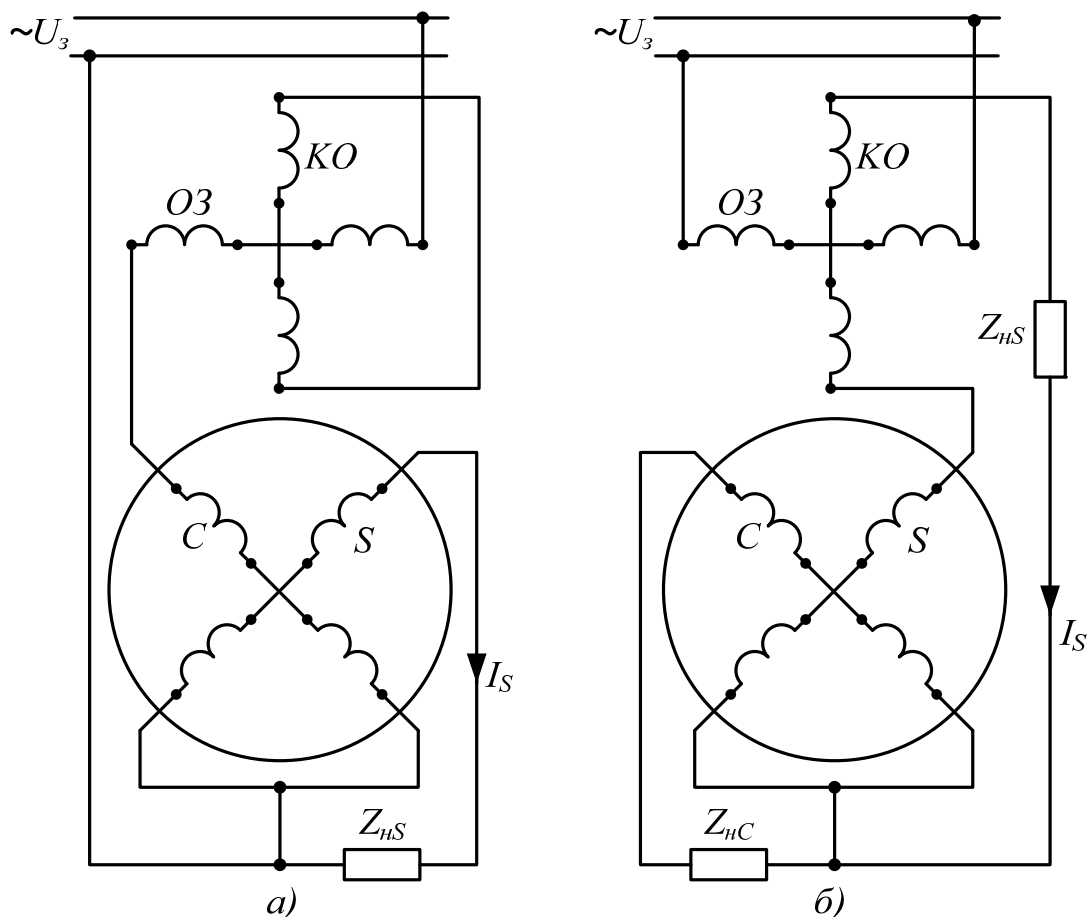


Рисунок 6.5 – Схеми лінійного обертового трансформатора

6.1.5.3 Схема з вторинним симетруванням

В цій схемі (рис. 6.5, б) навантаження $Z_{нS}$ включене в коло послідовно з'єднаних обмоток S та KO ; обмотка $O3$ під'єднана до мережі, а до обмотки C підключається симетрувальний опір $Z_{нC}$. Величина цього опору підбирається таким чином, щоб поперечні магніторушійні сили обмоток S та C компенсували одна одну.

За цих умов в машині будуть діяти постійний за амплітудою поздовжній потік Φ_q , що створюється обмоткою $O3$, і поперечний потік Φ_q , що створюється обмоткою KO й пропорційний струму навантаження I_S .

Вихідна напруга для такої схеми вмикання обертового трансформатора [3]:

$$\dot{U}_{вих} \approx \dot{E}_S = \frac{k\dot{E}_3 \sin \Theta}{1 + \dot{B} \cos \Theta}, \quad (6.16)$$

де \dot{B} – деякий комплексний коефіцієнт:

$$\dot{B} = k \frac{jX_{1q}}{Z_{hS} + Z_S + Z_K}, \quad (6.17)$$

де X_{1q} – індуктивний опір обмотки статора, обумовлений потоком Φ_q .

Значення опору Z_{hC} , що забезпечує взаємну компенсацію поперечних намагнічувальних сил обмоток S та C , визначається з умови:

$$Z_C + Z_{hC} = 2(Z_S + Z_K + Z_{hS}), \quad (6.18)$$

з якої випливає, що для вторинного симетрування необхідно, щоб повний опір кола косинусної обмотки був рівним подвоєному опору синусної обмотки.

6.1.5.4 Переваги та недоліки різних схем

В лінійних обертових трансформаторах з первинним симетруванням зміна навантаження Z_{hS} практично не впливає на лінійність вихідної характеристики. Однак при зміні кута повороту ротора будуть виникати певні похибки у вихідній напрузі через зміну струму і спад напруги в первинному контурі.

В лінійних трансформаторах із вторинним симетруванням при зміні навантаження порушується умова симетрування і виникають значні відхилення від лінійної залежності. Тому їх використовують досить рідко [3].

6.1.6 Обертвий трансформатор-побудовник

Такий трансформатор може бути використаний для визначення гіпотенузи прямокутного трикутника за двома заданими катетами, для перетворення координат із декартової системи в полярну або із однієї декартової системи в іншу, повернуту на деякий кут γ [3].

При цьому обмотки статора OZ та K під'єднуються до однієї і тієї ж однофазної мережі через потенціометри, за допомогою яких на них подаються напруги різної величини U_z та U_K (рис. 6.6). Одна з роторних

обмоток, наприклад S , є вихідною і під'єднується до вимірювального приладу PS, а друга – C – до обмотки управління $OУ$ виконавчого двигуна ВД. Обмотка S є вихідною.

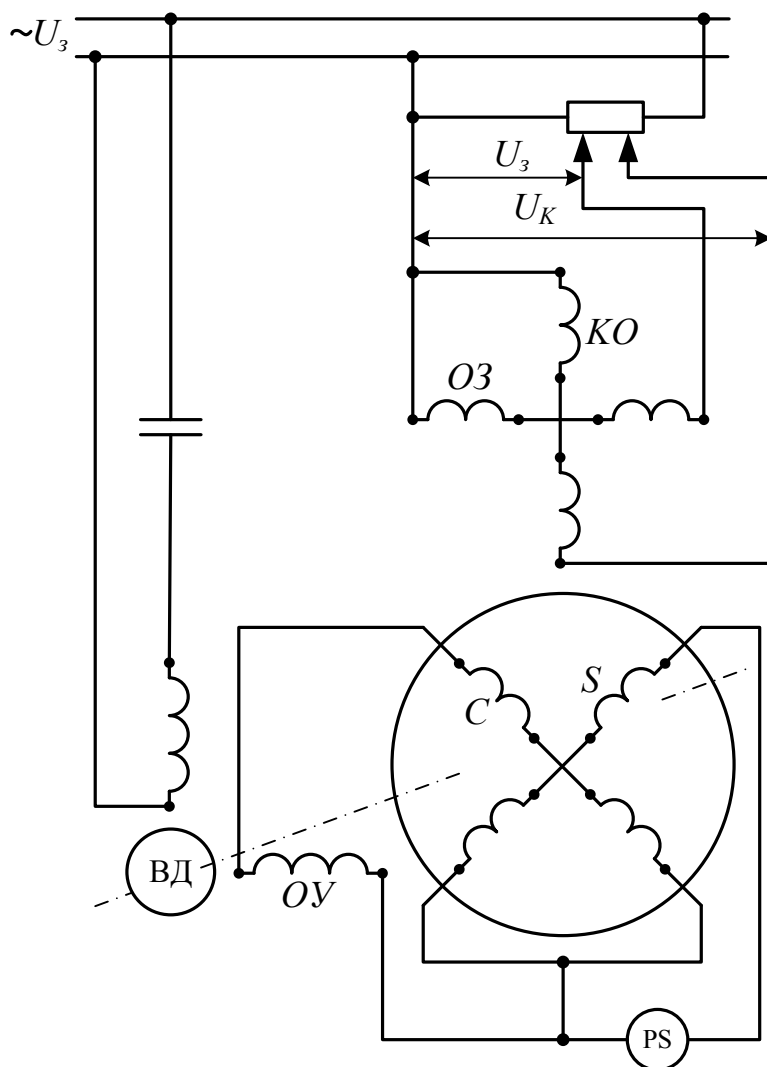


Рисунок 6.6 – Схема обертового трансформатора-побудовника

Обмотки статора $O3$ та KO створюють у трансформаторі результувальний магнітний потік, поздовжня складова якого Φ_{dm} , а поперечна – Φ_{qm} . Якщо машина ненасичена, то величина результувального потоку

$$\Phi_{резт} = \sqrt{\Phi_{dm}^2 + \Phi_{qm}^2}. \quad (6.19)$$

Цей потік індукує в обмотці ротора C ЕРС E_C , а у вихідній обмотці S – ЕРС E_S :

$$E_C = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{рез m} \cos \gamma, \quad (6.20)$$

$$E_S = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{рез m} \sin \gamma. \quad (6.21)$$

ЕРС E_C подається на обмотку управління OU виконавчого двигуна ВД, який обертає ротор обертового трансформатора до тих пір, поки ЕРС E_C не стане рівною нулю. Ротор зупиниться, коли кут γ буде рівним 90° . Тож

$$U_{вих} \approx E_{S \max} = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{рез m} = k \sqrt{U_3^2 + U_K^2}. \quad (6.22)$$

Таким чином, вимірювальний пристрій, під'єднаний до обмотки S , при нерухомому роторі показує напругу, пропорційну гіпотенузі прямокутного трикутника, катети якого пропорційні U_3 та U_K .

При переході з декартової системи координат в полярну напругу $U_{вих}$ розглядають як модуль вектора, заданого в декартовій системі координат проєкціями U_3 та U_K .

6.1.7 Причини похибок та точність обертових трансформаторів

Причини, що викликають похибки обертових трансформаторів:

- 1) недосконалість схем;
- 2) недосконалість конструкції та технології виготовлення трансформаторів;
- 3) коливання напруги, нагрівання обмоток та інші експлуатаційні причини.

До причин виникнення похибок, пов'язаних із недосконалістю схем, відносяться:

- неповна компенсація поперечного потоку Φ_q ;
- падіння напруги в обмотці збудження $I_3 Z_3$;
- падіння напруги у вихідній обмотці $I_{вих} Z_{вих}$.

Точність обертових трансформаторів оцінюється:

а) величиною максимальної похибки відображення необхідної залежності, вираженою у відсотках від максимальної величини вихідної напруги;

б) максимальною асиметрією нульових точок (для синусно-косинусного поворотного трансформатора);

в) максимальною величиною залишкової ЕРС, вираженою у відсотках від максимальної ЕРС відповідної обмотки;

г) максимальною величиною ЕРС квадратурної обмотки при живленні обмотки збудження, вираженою у відсотках від величини напруги живлення;

д) максимальною різницею коефіцієнтів трансформації, яка не повинна перевищувати від 0,005 до 0,2%.

Залежно від величин перерахованих показників обертові трансформатори поділяють на шість класів точності.

6.2 Програма лабораторної роботи

1. Ознайомитися із конструкцією обертового трансформатора, записати його номінальні величини і підібрати відповідні їм вимірювальні пристрої.

2. При дослідженні синусно-косинусного трансформатора:

а) зняти залежності ЕРС обмоток ротора від кута його повороту $E_{p1}, E_{p2} = f(\Theta)$ на холостому ході при постійній напрузі на головній статорній обмотці ($U_1 = \text{const}$) без первинного симетрування. За результатами досліду визначити коефіцієнт трансформації обертового трансформатора;

б) зняти залежність ЕРС синусної роторної обмотки від кута повороту ротора $E_{p1} = f(\Theta)$ при $R_{n1} = \text{const}$, $U_1 = \text{const}$ без симетрування;

в) зняти залежність ЕРС синусної роторної обмотки від кута повороту ротора $E_{p1} = f(\Theta)$ при $R_{n1} = \text{const}$, $U_1 = \text{const}$ при первинному симетруванні;

г) зняти залежності $E_{p1}, E_{p2} = f(\Theta)$ при $U_1 = \text{const}$, $R_{n1} = R_{n2} = \text{const}$ при вторинному симетруванні;

д) зняти залежності E_{p1} , $E_{p2} = f(\Theta)$ при $U_1 = \text{const}$, $R_{n1} = R_{n2} = \text{const}$ при обох видах симетрування.

3. За даними пунктів 2 а), б), в), г), д) в одних координатних осях побудувати залежності E_{p1} , $E_{p2} = f(\Theta)$ при різних способах симетрування.

4. Зібрати схему лінійного обертового трансформатора із вторинним симетруванням та зняти залежність $E_{вих} = f(\Theta)$ при $U_1 = \text{const}$. Побудувати цю залежність в окремих координатних осях.

5. Зібрати схему обертового трансформатора-побудовника і за заданими катетами визначити гіпотенузу прямокутного трикутника.

6.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

В роботі досліджується обертовий трансформатор з контактними кільцями типу 10-ВТМ-Б-5П. Окремі вузли аналогічного обертового трансформатора в розібраному вигляді показані на стенді, розміщеному біля лабораторного столу.

Досліджуваний обертовий трансформатор розміщений за панеллю лабораторного столу, а на передню панель виведені його вал із закріпленою на ньому стрілкою, за допомогою якого ротор може повертатися на будь-який кут. На втулці, через яку проходить вал обертового трансформатора, закріплена рухома шкала із значеннями кута Θ від 0^0 до 360^0 .

6.3.1 Будова лабораторного стенда

Передня панель стенда для дослідження обертового трансформатора (рис. 1.5) показана на рис. 6.7.

Для вивчення будови трансформатора в боковій панелі стенда закріплена панель, на якій він поданий у розібраному стані (рис. 6.8).

Схема електрична принципова стенда для дослідження обертового трансформатора наведена на рис. 6.9.

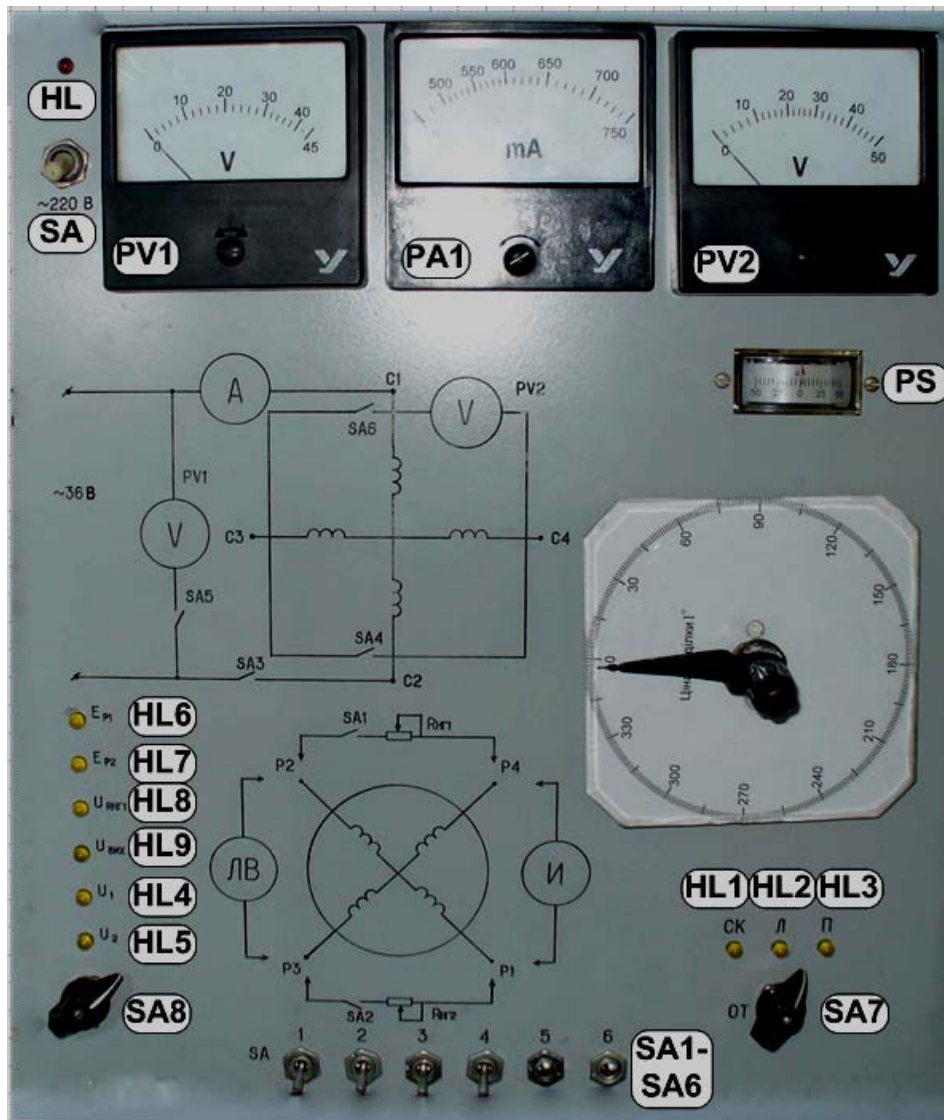


Рисунок 6.7 – Передня панель стенда для дослідження обертового трансформатора



Рисунок 6.8 – Будова обертового трансформатора

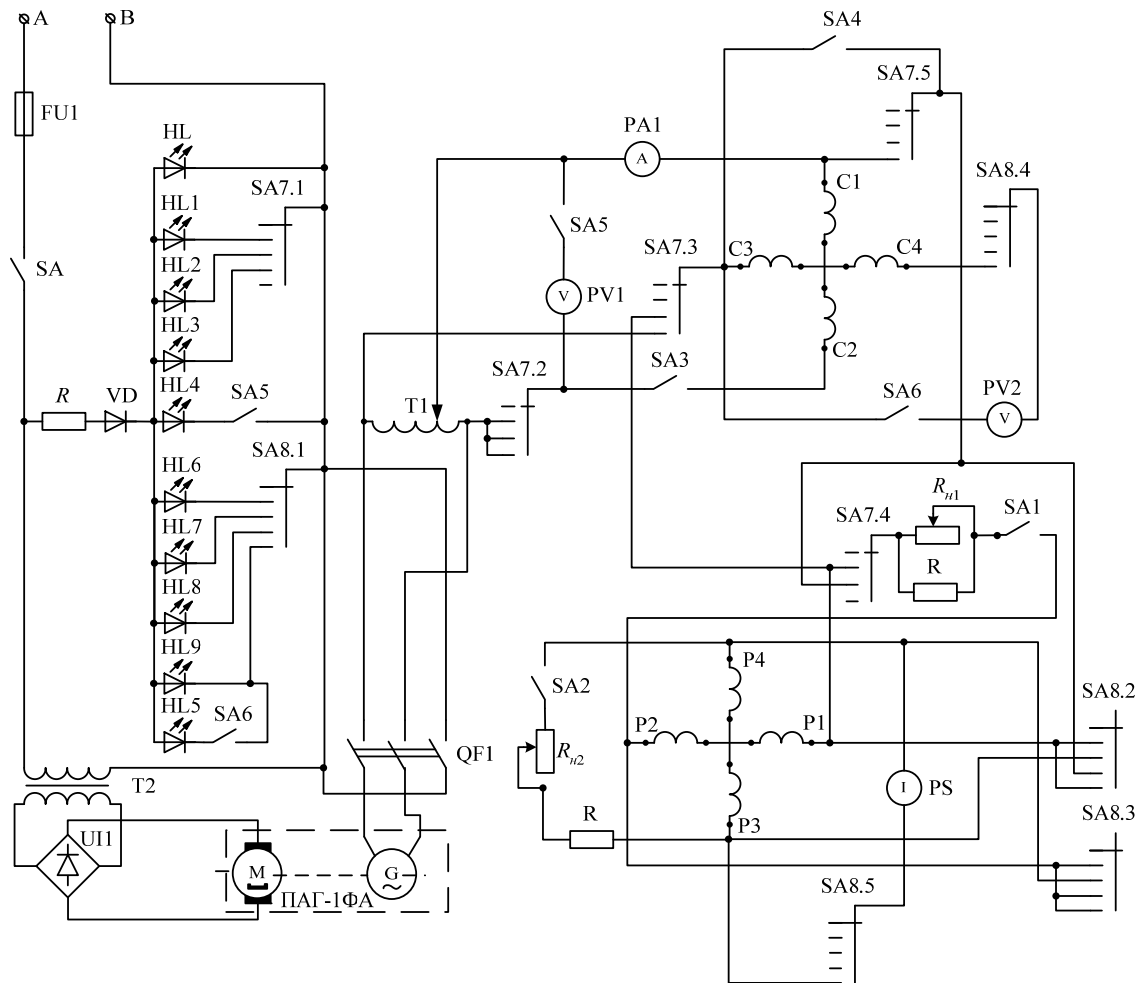


Рисунок 6.9 – Схема електрична принципова стенда для дослідження обертового трансформатора

Призначення приладів:

- амперметр PA1 – для індикації струму в головній статорній обмотці;
- вольтметр PV1 – для вимірювання напруги на головній статорній обмотці;
- вольтметр PV2 – для вимірювання напруги на додатковій статорній обмотці в досліді обертового трансформатора-будувника;
- ламповий високоомний вольтметр PV3 – для вимірювання вихідних величин;
- індикатор PS – для контролю напруги на косинусній обмотці ротора в досліді обертового трансформатора-будувача;

Призначення сигнально-комутаційної апаратури:

- тумблери SA – для подачі напруги живлення на схему;
- тумблери SA1, SA2 – для вмикання в схему навантажувальних опорів R_{n1} та R_{n2} , відповідно;
- тумблер SA3 – для подачі живлення на головну обмотку статора;
- тумблер SA4 – для первинного симетрування обертового трансформатора в синусно-косинусному режимі;
- тумблери SA5, SA6 – для проведення вимірювань вольтметрами PV1 та PV2, відповідно;
- пакетний перемикач SA7 – для перемикання дослідних режимів (синусно-косинусного – положення СК; лінійного – положення ОТ ; будувача – положення П);
- пакетний перемикач SA8 – для перемикання величин, які вимірюються ламповим вольтметром PV3: E_{p1} та E_{p2} – при дослідженні синусно-косинусного обертового трансформатора (перше і друге положення перемикача), U_{Rn1} – при дослідженні лінійного обертового трансформатора (третє положення перемикача), $U_{вих}$ – при дослідженні трансформатора-побудовника (четверте положення перемикача);
- світлодіод HL – для сигналізування подачі живлення на силову частину схеми;
- світлодіоди HL1, HL2, HL3 – для сигналізування роботи синусно-косинусного, лінійного обертового трансформатора та будувача, відповідно;
- світлодіоди HL4, HL5 – для сигналізування проведення вимірювань вольтметрами PV1 і PV2;
- світлодіоди HL6, HL7, HL8, HL9 – для сигналізування величин (E_{p1} , E_{p2} , U_{Rn1} , $U_{вих}$, відповідно), що вимірюються ламповим вольтметром PV3.

6.3.2 Дослідження синусно-косинусного обертового трансформатора

Виконати таку послідовність дій для підготовки схеми до проведення дослідів:

- замкнути тумблер SA;
- встановити пакетний перемикач SA7 трансформатора в положення СК, при якому загориться світлодіод HL1;
- ввімкнути ламповий вольтметр PV3;
- замкнути тумблер SA5;
- ручкою регулятора напруги T1 встановити та підтримувати незмінною номінальну напругу на вольтметрі PV1 ($U_{ном} = 36 \text{ В}$);
- замкнути тумблер SA3.

6.3.2.1 Дослід холостого ходу

Дослід холостого ходу та обробку результатів провести у такій послідовності:

- пакетний перемикач SA8 – в перше положення, при якому загориться світлодіод HL6;
- виставити ротор в таке положення, при якому $E_{p1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валові ротора;
- повертаючи стрілку на валові ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром PV3 значення величин E_{p1} та E_{p2} , перемикаючи пакетний перемикач SA8 відповідно в перше і друге положення, при яких будуть горіти світлодіоди HL6 та HL7;
- результати вимірювання занести до табл. 6.1;
- побудувати залежність ЕРС роторних обмоток від кута повороту ротора $E_{p1}, E_{p2} = f(\Theta)$ (при $\Theta = 90^{\circ} \div 180^{\circ}$ значення E_{p2} взяти від'ємними);
- визначити коефіцієнт трансформації обертового трансформатора за співвідношенням:

$$k = \frac{E_{p1 \max}}{U_{1 \text{ном}}} = \frac{E_{p2 \max}}{U_{1 \text{ном}}} = \dots, \quad (6.23)$$

де $E_{p1 \max} = E_{p2 \max}$ – максимальні значення ЕРС синусної та косинусної обмоток.

Таблиця 6.1 – Дані для дослідження синусно-косинусного обертового трансформатора

№ досл.	ЕРС, В	Θ, град.												
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
2, а	E_{p1}													
	E_{p2}													
2, б	E_{p1}													
2, в	E_{p1}													
2, г	E_{p1}													
	E_{p2}													
2, д	E_{p1}													
	E_{p2}													

6.3.2.2 Синусний обертовий трансформатор без симетрування

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- виставити пакетний перемикач SA8 в перше положення, при якому загориться світлодіод HL6;
- виставити ротор в таке положення, при якому $E_{p1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валі ротора;
- замкнути тумблер SA1;
- повзунок реостата $R_{н21}$ встановити у положення, що відповідає його максимальному опору;

- повертаючи стрілку на валі ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром значення величини E_{p1} ;
- результати вимірювання занести до табл. 6.1;
- побудувати залежність ЕРС синусної роторної обмотки від кута повороту ротора $E_{p1} = f(\Theta)$.

6.3.2.3 Синусний обертовий трансформатор із первинним симетруванням

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- виставити ротор в таке положення, при якому $E_{p1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валі ротора;
- замкнути тумблер SA4 (тумблер SA1 залишити замкненим);
- повзунок реостата R_{n21} встановити у положення, що відповідає його максимальному опору;
- повертаючи стрілку на валі ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром значення величини E_{p1} ;
- результати вимірювання занести до табл. 6.1;
- побудувати залежність ЕРС синусної роторної обмотки від кута повороту ротора $E_{p1} = f(\Theta)$.

6.3.2.4 Синусно-косинусний обертовий трансформатор із вторинним симетруванням

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- виставити пакетний перемикач SA8 в перше положення, при якому загориться світлодіод HL6;
- виставити ротор в таке положення, при якому $E_{p1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валові ротора;
- розімкнути тумблер SA4;

- замкнути тумблер SA2 (тумблер SA1 залишити замкненим);
- повзунок реостата $R_{н21}$ встановити у положення, що відповідає його максимальному опору;
- повзунок реостата $R_{н22}$ переміщувати до тих пір, поки при повороті ротора величина струму, що вимірюється амперметром PA1, не стане незалежною від кута повороту ротора;
- повертаючи стрілку на валові ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром PV3 значення величин E_{p1} та E_{p2} , перемикаючи пакетний перемикач SA8 відповідно в перше і друге положення, при яких будуть горіти світлодіоди HL6 та HL7;
- результати вимірювання занести до табл. 6.1;
- побудувати залежність ЕРС роторних обмоток від кута повороту ротора $E_{p1}, E_{p2} = f(\Theta)$ (при $\Theta = 90^{\circ} \div 180^{\circ}$ значення E_{p2} взяти від'ємними).

6.3.2.5 Синусно-косинусний обертовий трансформатор із первинним і вторинним симетруванням

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- виставити пакетний перемикач SA8 в перше положення, при якому загориться світлодіод HL6;
- виставити ротор в таке положення, при якому $E_{p1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валі ротора;
- замкнути тумблер SA4 (тумблери SA1 і SA2 залишити замкненими);
- повертаючи стрілку на валі ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром PV3 значення величин E_{p1} та E_{p2} , перемикаючи пакетний перемикач SA8 відповідно в перше і друге положення, при яких будуть горіти світлодіоди HL6 та HL7;
- результати вимірювання занести до табл. 6.1;

- розімкнути тумблер SA3;
- ручкою ЛАТРа Т2 виставити напругу на вольтметрі PV1 $U_1 = 0$;
- розімкнути тумблер SA;
- надати дані дослідів викладачеві на перевірку;
- побудувати залежність ЕРС роторних обмоток від кута повороту ротора $E_{p1}, E_{p2} = f(\Theta)$ (при $\Theta = 90^0 \div 180^0$ значення E_{p2} прийняти від'ємними).

6.3.3 Дослідження лінійного обертового трансформатора

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- замкнути тумблер SA;
- встановити пакетний перемикач SA7 обертового трансформатора в положення Л, при якому загориться світлодіод HL2;
- ввімкнути ламповий вольтметр PV3;
- замкнути тумблер SA5;
- ручкою Т1 встановити і підтримувати незмінною номінальну напругу на вольтметрі PV1 ($U_{1ном} = 36$ В);
- замкнути тумблер SA3;
- замкнути тумблери SA1 і SA2;
- повзунок реостата $R_{н21}$ встановити у положення, що відповідає його мінімальному опору;
- повзунок реостата $R_{н22}$ переміщувати до тих пір, поки при повороті ротора величина струму, що вимірюється амперметром PA1, не стане незалежною від кута повороту ротора;
- виставити пакетний перемикач SA8 в третє положення, при якому загориться світлодіод HL8;
- виставити ротор в таке положення, при якому $U_{RH1} = 0$;
- нуль шкали сумістити зі стрілкою на валі ротора;

- повертаючи стрілку на валі ротора в діапазоні $\Theta = 0^{\circ} \div 180^{\circ}$ через кожні 15° вимірювати ламповим вольтметром PV3 значення величини U_{RH1} ;
- результати вимірювання занести до табл. 6.2;
- розімкнути тумблер SA3;
- ручкою T1 виставити напругу на вольтметрі PV1 $U_1 = 0$;
- розімкнути тумблер SA;
- надати дані дослідів викладачеві на перевірку;
- побудувати залежність ЕРС роторних обмоток від кута повороту ротора $U_{RH1} = f(\Theta)$, беручи величину U_{RH1} від'ємною при $\Theta = -180^{\circ} \div 0^{\circ}$.

Таблиця 6.2 – Експериментальні дані дослідження лінійного обертового трансформатора

Параметр	Числові значення												
$\Theta, ^{\circ}$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$U_{вих}, В$													
$\Theta, ^{\circ}$	0	-15	-30	-45	-60	-75	-90	-105	-120	-135	-150	-165	-180
$U_{вих}, В$													

6.3.4 Дослідження обертового трансформатора-побудовника

Дослідження обертового трансформатора в даному режимі провести у такій послідовності:

- замкнути тумблер SA;
- встановити пакетний перемикач SA7 обертового трансформатора в положення П, при якому загориться світлодіод HL3;
- ввімкнути ламповий вольтметр PV3;
- замкнути тумблери SA5 і SA6;
- ручкою T1 встановити і підтримувати незмінною номінальну напругу на вольтметрі PV1 ($U_{ном} = 36 В$);

- замкнути тумблер SA3;
- встановити ротор в положення, при якому індикатор встановиться на нуль;
- виставити пакетний перемикач SA8 в четверте положення, при якому загориться світлодіод HL9;
- ручкою T1 встановити вказані в табл. 6.3 значення напруги U_1 на вольтметрі PV1;
- зняти значення напруги U_2 з вольтметра PV2 і $U_{вих}$ із лампового вольтметра PV3;
- результати занести до табл. 6.3;
- розімкнути тумблер SA3;
- ручкою T1 виставити напругу на вольтметрі PV1 $U_1 = 0$;
- розімкнути тумблер SA;
- надати дані дослідів викладачеві на перевірку;
- занести до табл. 6.3 для порівняння значення гіпотенузи трикутника, визначені дослідним і розрахунковим шляхом (коефіцієнт трансформації k був визначений раніше).

Таблиця 6.3 – Експериментальні та розрахункові дані дослідження трансформатора-побудовника

№ досл.	Виміри			Розрахунок	
	Катети		$U_{вих}, \text{В}$	Гіпотенуза	
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$		$U_{вих}/k, \text{В}$	$\sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \text{В}$
1	36				
2	34				
3	32				

6.4 Паспортні дані електричних машин

Обертовий трансформатор:

Тип 10 ВТМ-5-5П. Призначення: СКПТ, ЛПТ;

$U_{ном} = 36$ В; $f_{ном} = 400$ Гц;

діапазон вимірювань: $U = 0...36$ В; $f = 390...510$ Гц;

коефіцієнт трансформації $k \approx 1,7$;

момент статичного тертя $M_{тр} = 0,06$ Н·м;

вхідний опір при холостому ході $Z = 1000$ Ом.

Перетворювач:

Тип ПАГ-ІФА;

робота на постійному струмі: $U_{ном} = 27$ В; $I_{ном} = 3,5$ А;

робота на змінному струмі: $U_{ном} = 36$ В; $I_{ном} = 0.51$ А; $m = 3$; $f_{ном} = 400$ Гц;

$\cos\varphi_n = 0,63$.

6.5 Зміст звіту

1. Титульний лист.
2. Мета та програма роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Паспортні дані електричних машин, перелік використаних приладів.
5. Схеми дослідної установки.
6. Таблиці з дослідними та розрахунковими даними.
7. За даними п. 6.2, п. 6.3, п. 6.4 надати всі необхідні характеристики та побудови.
8. За результатами роботи зробити висновки.

6.6 Питання для самоконтролю



1. Будова та принцип роботи обертового трансформатора.
2. Синусно-косинусний обертовий трансформатор в режимі холостого ходу.
3. Причина появи похибки синусно-косинусного трансформатора в режимі навантаження.
4. Суть первинного і вторинного симетрування.
5. Лінійний обертовий трансформатор. Рівняння вихідної характеристики. Умови, при яких вона лінійна.
6. Призначення та принцип роботи обертового трансформатора-побудовника.

Питання до захисту лабораторних занять (модуль II)

1. Призначення, будова і принцип роботи індукційного регулятора.
2. Векторна діаграма ЕРС сенсора і приймача сельсинів при $\Theta_C > \Theta_P$.
3. Масштабний обертовий трансформатор.
4. Еквівалентна і принципова схеми асинхронного тахогенератора.
5. Схеми з'єднання обмоток трифазного індукційного регулятора; методика маркування початків і кінців його фаз.
6. Залежність синхронізувального моменту сельсинів від кута неузгодження при обертанні в обох напрямках.
7. Призначення і принцип роботи обертового трансформатора-побудовника.
8. Вихідні характеристики асинхронного тахогенератора.
9. Векторні діаграми трифазного індукційного регулятора в режимі холостого ходу при правильній схемі ввімкнення обмоток та їх обґрунтування.
10. Залежність величин зони нечутливості сельсина-приймача (формули, фізичний зміст).
11. Застосування обертових трансформаторів.
12. Принцип дії асинхронного тахогенератора
13. Векторні діаграми трифазного індукційного регулятора в режимі холостого ходу при неправильній схемі ввімкнення обмоток, їх обґрунтування.
14. Основні технологічні фактори, які впливають на похибку сельсинів-приймачів і сенсорів.
15. Залежність амплітудної похибки від швидкості обертання при різному характері навантаження асинхронного тахогенератора.
16. Схема здвоєного трифазного індукційного регулятора і векторна діаграма напруг.
17. Область використання сельсинів.
18. Принципова і еквівалентна схеми синусно-косинусного обертового трансформатора.

19. Залежність фазової похибки асинхронного тахогенератора від швидкості обертання при різному характері навантаження.
20. Зовнішня і внутрішня потужності автотрансформатора.
21. Векторна діаграма ЕРС сенсора і приймача сельсинів при $\Theta_C > \Theta_P$.
22. Принципова і еквівалентна схеми синусного обертового трансформатора з первинною симетрією.
23. Залежність вихідної напруги асинхронного тахогенератора від величини і характеру зовнішнього навантаження.
24. Схема і векторна діаграма напруг фазорегулятора.
25. Конструкція безконтактного сельсина.
26. Принцип роботи синусного обертового трансформатора.
27. Швидкісна амплітудна похибка асинхронного тахогенератора.
28. Асинхронна машина з нерухомим ротором (фазорегулятор) (призначення і будова).
29. Залежність синхронізувального моменту сельсина (формула).
30. Принципова і еквівалентна схеми синусного обертового трансформатора.
31. Фазова похибка асинхронного тахогенератора.
32. Схема трифазного індукційного регулятора при з'єднанні обмоток статора і ротора в спільний трикутник.
33. Залежність синхронізувального моменту сельсина від кута неузгодження (графік).
34. Будова і принцип роботи обертового трансформатора.
35. За рахунок чого можна зменшити похибку асинхронного тахогенератора?
36. Схема синхронного зв'язку в трансформаторному режимі роботи сельсинів (принцип роботи).
37. Спеціальні вимоги до конструкції обертових трансформаторів і технології їх виготовлення.
38. Що таке нульовий сигнал в асинхронному тахогенераторі.
39. Динамічний синхронізувальний момент сельсина-приймача.
40. Які бувають обертові трансформатори залежно від режиму роботи?

41. Способи усунення нульового сигналу в асинхронному тахогенераторі.
42. Схема підключення трьох сельсинів-приймачів до одного сенсора.
43. Класи точності обертових трансформаторів і від чого вони залежать.
44. Основні рівняння вихідної характеристики асинхронного тахогенератора.
45. Пояснити співвідношення між геометричними і електричними градусами в електричній машині.
46. Схеми однофазних сельсинів в індикаторному режимі (принцип роботи).
47. Симетрування обертових трансформаторів зі сторони статора (схема, принцип роботи).
48. Переваги і недоліки асинхронного тахогенератора.
49. Режим короткого замикання асинхронної машини (Т-подібна схема заміщення; чому дорівнює опір короткого замикання при ковзанні $s = 1$).
50. Симетрування обертових трансформаторів зі сторони ротора (схема, принцип роботи). Від яких величин залежить дійсне значення трансформаторної ЕРС в генераторній обмотці асинхронного тахогенератора.
51. Коефіцієнт приведення ЕРС і напруг; коефіцієнт трансформації (приведення) струмів для асинхронної машини при нерухомому роторі.
52. Будова контактних сельсинів.
53. Лінійна вихідна характеристика лінійного обертового трансформатора.
54. Еквівалентна схема асиметричного ротора і залишкова ЕРС асинхронного тахогенератора.

Література

1. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.
2. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины. – М.: Высшая школа, 1968. – 213 с.
3. 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.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины – М.: Энергия, 1978. – 832 с.

Навчальне видання

Володимир Віталійович Грабко

Михайло Петрович Розводюк

Микола Омелянович Казак

Експериментальні дослідження електричних машин

Частина II. Спеціальні електричні машини

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено М.П. Розводюком

Редактор Т.О. Старічек

Науково-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 Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк. арк.

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