Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електропривода

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА» (ЧАСТИНА 1)

для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Дніпро
НТУ «ДП»
2021

Колб А. А. Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електропривода» (Частина 1) для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А.А.Колб. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2021. – 53 с.

Укладач: А.А.Колб, канд. техн. наук, проф.

Погоджено рішенням методичної комісії спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 20\21-05 від 10.03.2021).

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Наведено загальні вказівки до виконання лабораторних робіт, порядок виконання робіт, контрольні запитання, вимоги до звіту.

Зміст

Вступ
Лабораторна робота № 1. Експериментальне визначення моменту інерції електропривода методом вільного вибігу
Лабораторна робота № 2. Характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження
Лабораторна робота №3. Дослідження електромеханічних властивостей двигуна постійного струму послідовного збудження
Лабораторна робота №4. Характеристики трифазного асинхронного двигуна с фазним ротором
Лабораторна робота №5. Дослідження електропривода за системою генератор – двигун (Г-Д)
Лабораторна робота №6. Дослідження системи Г-Д с ЕМП при наявності зворотних зв'язків
Лабораторна робота №7. Дослідження характеристик вентильного електропривода постійного струму
Література

Вступ

До збірки увійшли методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електропривода» (частина 1). Більшість робіт присвячена вивченню електромеханічних властивостей та способів регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму. Лабораторні роботи охоплюють основні розділи курсу і спрямовані на закріплення лекційного матеріалу та придбана навичок експериментального дослідження та експлуатації електроприводів.

Кожна лабораторна робота (окрім першої) розрахована на 4 години. У більшості робіт передбачена розробка кожним студентом детальної послідовності виконання досліджень у відповідності з програмою роботи та варіантом індивідуального завдання.

Методичні вказівки до кожної роботи містять програму роботи та варіанти індивідуальних завдань, основні теоретичні положення, схему та короткий опис лабораторної установки, зразки необхідних таблиць для фіксації результатів вимірювань, послідовність обробки експериментальних даних.

Під час домашньої підготовки до чергової роботи студент повинен:

1. Вивчити відповідні теоретичні розділи підручників.
2. Ознайомитись з метою, програмою роботи та варіантом індивідуального завдання.
3. Досконально вивчивши схему установки, підготувати детальну послідовність виконання роботи, в якій повинні бути відображені: початковий стан усіх апаратів та послідовність їх комутації для запуску і виведення установки до вихідного положення для досліджень, дії щодо виконання експериментів згідно програми, послідовність вимкнення установки.

4. Підготувати попередній звіт з лабораторної роботи, який має містити найменування, мету та програму роботи, розроблену послідовність виконання досліджень, схему лабораторної установки, розрахункові механічні характеристики, та таблиці для фіксації результатів експериментів

До проведення лабораторної роботи допускаються лише студенти із підготовленим попереднім звітом при умові безпомилково складеної послідовності досліджень та успішної відповіді на контрольні запитання.

Підсумковий звіт з виконаної лабораторної роботи має містити, крім згаданих раніше вимог, результати вимірювань та розрахунків, графіки отриманих залежностей та їх аналіз.

Захист лабораторної робота передбачає демонстрацію викладачеві підсумкового звіту та відповіді на запитання стосовно теми досліджень.

1. Загальні положення

1.1. Підготовка лабораторної установки до запуску

Перед вмиканням будь-якої лабораторної установки необхідно впевнитись, що усі її апарати та пристрої знаходяться у вихідному стані, а саме:

- вимкнені усі автомати, за допомогою яких установка підключається до мереж живлення;
- вимкнені автомати у головних колах електроприводів за системами тиристорний перетворювач – двигун (ТП-Д) та генератор – двигун (Г-Д);
- знаходяться в нульовому положенні резистори в ланцюгах завдання перетворювачів;
- до кіл якорів двигунів постійного струму та кіл роторів асинхронних двигунів з фазним ротором, котрі запускаються безпосередньо від мереж живлення, введені максимальні опори;
- потенціометри, що забезпечують живлення обмоток збудження генераторів в системах Г-Д та навантажувальних машин постійного струму, які працюють в режимах динамічного гальмування, знаходяться у такому положенні, що струм збудження при вмиканні напруги буде рівним нулю;
- реостати в колах обмоток збудження досліджуваних машин (ДМ) постійного струму та навантажувальних машин (НМ), які працюють, в режимі гальмування противмиканням, повністю виведені, тобто при вмиканні установки величина струму збудження цих кіл має бути максимальною.

1.2 Запуск лабораторної установки

Запуск лабораторної установки в більшості випадків здійснюється у такій послідовності: спочатку безпосередньо від мережі або від перетворювача запускається досліджувана машина, далі навантажувальна машина, а потім установка виводиться на необхідний режим роботи.

Для запуску від мережі двигуни постійного струму незалежного (паралельною) збудження необхідно подати спочатку максимальним струм до обмотки збудження, а потім при максимальній величині опору в обмотці якоря підключити її до мережі. Одночасно із зростанням швидкості двигуна є можливість послідовно

шунтувати секції додаткового резистора у колі якоря та вивести машину на потрібну характеристику, а в разі повного шунтування додаткового резистора – на природну.

Оскільки двигун постійного струму послідовного збудження не може працювати вхолосту, то в установці з двигуном цього типу спочатку необхідно забезпечити його навантаження шляхом вмикання навантажувальної машини, що працює у гальмівному режимі, а потім здійснювати запуск досліджуваного двигуна з максимальним опором у колі якоря

Забороняється вмикати не збуджені двигуни постійного струму (досліджувані та навантажувальні) та здійснювати їх запуск від мережі за відсутності додаткових резисторів у колах якорів.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором запускається безпосередньо від мережі змінного струму без допоміжних пускових пристроїв, а такий же двигун з фазним ротором – при максимальному додатковому опорі в колі ротора.

Електропривод за системою Г-Д запускають у такій послідовності: спочатку подають струм до обмотки збудження двигуна, після цього за відсутності струму в обмотці збудження генератора запускають його приводний двигун та замикають автоматом головне електричне коло системи. Регулювання напруги генератора та виведення системи до потрібного режиму здійснюється шляхом зміни струму в обмотці збудження генератора.

Для запуску електроприводів з тиристорними перетворювачами після збудження двигуна необхідно подати напругу спочатку до системи імпульсно-фазового керування, а потім – на тиристори перетворювача. Регулювання напруги перетворювача та виведення електропривода до потрібного режиму роботи здійснюється шляхом зміни напруги в колі завдання перетворювача або системи керування електроприводом.

Таким же чином здійснюють запуск електроприводів змінного струму з перетворювачами частоти.

В електроприводах, регулювання швидкості яких відбувається шляхом зміни величини опору в колі якоря або ротору, перехід до іншої характеристики дозволяється роботи тільки після розвантаження досліджуваного двигуна.

У замкнених системах електропривода будь-які комутації (зміна типу зворотного зв'язку, зміна типу регулятора та ін.) слід робити за відсутності напруги на затискачах досліджуваної машини.

2. Навантаження досліджуваних електроприводів

Роботі електричного двигуна виробничого механізму в статичному режимі згідно з основним рівнянням руху електропривода відповідає

$$M - M_c = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (1)$$

рівновага моментів опору механізму та двигуна. Для регулювання статичних моментів на валах досліджувальних машин в лабораторіях кафедри електропривода використовуються навантажувальні двигуни постійного струму незалежного збудження. При цьому використовуються три варіанти схем їх вмикання. Розглянемо два з них, а третій докладно викладено у методичних вказівках до роботи №4, де ця схема навантаження застосовується.

2.1. Навантажувальна машина працює в режимі динамічного гальмування

Схема установки для цього випадку наведена на рис. 1. Оскільки момент двигуна незалежного збудження

$$M = \kappa \Phi I_c \qquad (2)$$

то зміна моменту навантаження можлива: регулюванням струму $I_я$ у колі якоря навантажувальної машини (резистор R1, автомати B1, B2) регулюванням потоку Ф її збудження (реостат R2) або комбінацією цих двох способів.

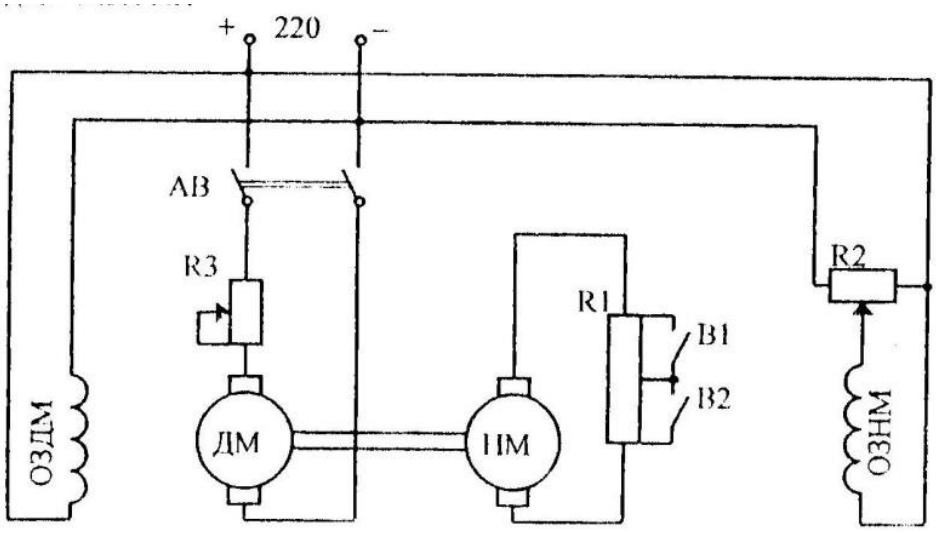

Рис. 1. Схема установки

Недолік даної схеми – можливість навантаження досліджувальної машини лише в режимі двигуна.

Механічні характеристики навантажувальної машини можуть бути побудовані в одній системі координат з досліджуваною машиною (рис. 2). Якщо досліджувальна машина працює в т. 1 механічної характеристики з моментом M1 та швидкістю $\omega 1$, то навантажувальна машина має ту саме швидкість $\omega 1$ та такий же за величиною, але протилежний за напрямком момент –M1, тобто працює в т.1́. Оскільки характеристики динамічного гальмування двигуна незалежного збудження – прямі лінії, що проходять через початок координат, то навантажувальна машина має характеристику II.

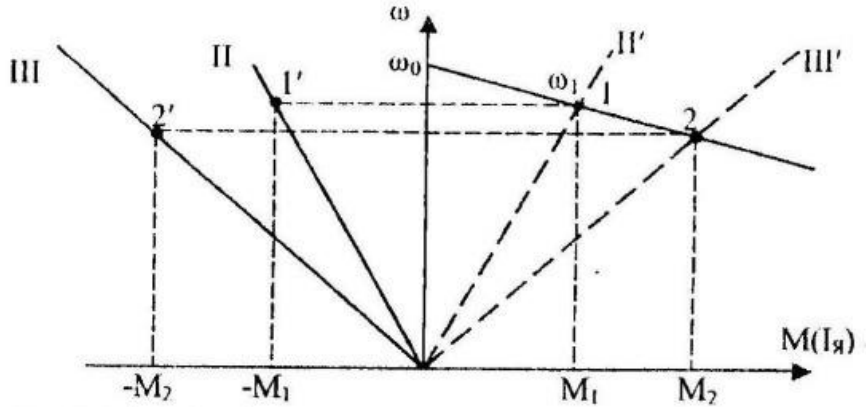

Рис. 2. Механічні характиристики

Щоб перевести досліджувальну машину в т.2, необхідно збільшити момент навантажувальної машини шляхом збільшення струму в її колі якоря (наприклад, шунтуванням автоматом В1 частини опору R1) або в обмотці збудження (потенціометром R2). Це призведе до переходу навантажувальної машини до т.2' на характеристиці III.

У деяких лабораторних установках навантажувальна машина вмикається згідно схеми, наведеної на рис. 3. За допомогою перемикача її навантажувальна машина може бути ввімкнена узгоджено або зустрічно відносно напрямку обертання досліджуваної машини.

У першому випадку обидві машини, ввімкнені до мережі незалежно одна від іншої, обертаються в одному напрямку. У зв'язку з тим, що обидві машини жорстко з'єднані, то при зустрічному вмиканні вони обертаються в напрямку тієї машини, момент короткого замикання якої більший. Величина моменту при цьому регулюється зміною додаткового опору в колі якоря навантажувальної машини.

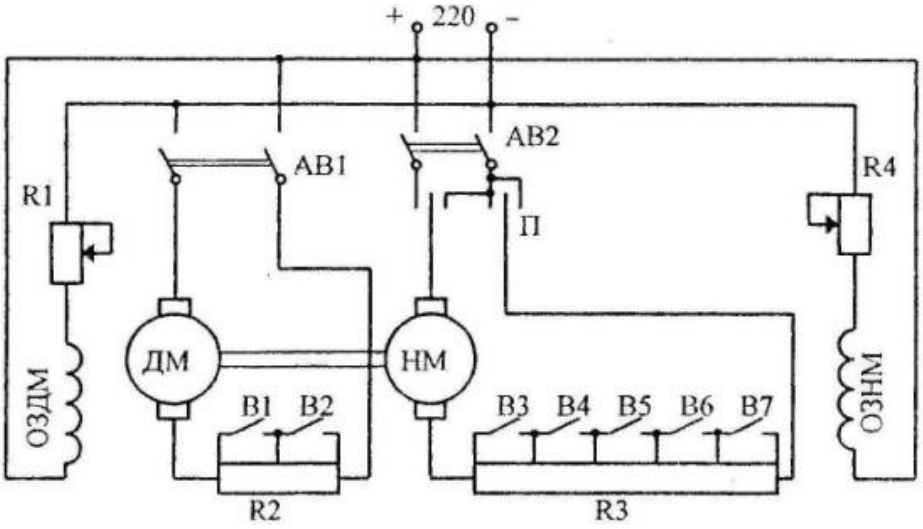

Рис. 3. Схема вмикання установки

При знятті характеристик досліджуваної машини в режимі двигуна чи гальмуванні противмиканням навантажувальна машина вмикається назустріч. Сталий режим в установці досягається у випадку, коли моменти на валах ДМ та НМ рівні за величиною і протилежні за знаком. У відповідності з цим т. 1-6 (рис. 4) визначаються перетином механічних характеристик ДМ із дзеркальним відображенням механічних характеристик НМ (штрихові лінії), отриманих при різних додаткових опорах в її колі якоря. При цьому т. 1, 2 відповідають режиму двигуна ДМ і одержують при роботі НМ в режимі гальмування противмиканням. Точка 3 відповідає режиму короткого замикання обох машин. Точки 4-6, що відповідають режиму противмикання ДМ, знімають при роботі НМ в режимі двигуна.

З метою виключення небезпечних величин струму вмикання навантажувальної машини необхідно завжди здійснювати при максимальному опорі в колі якоря.

Для зняття характеристик ДМ в режимі рекуперативного гальмування НМ вмикається узгоджено. Збільшуючи її швидкість, компенсують втрати холостого ходу досліджувальної машини і переводять її до режиму ідеального холостого ходу

(M=0, $\omega = \omega_0$), а при подальшому збільшенні швидкості – до режиму рекуперативного гальмування. Ідеальний холостий хід та т. 1-3 характеристики II рекуперативного гальмування (рис. 5) отримані шляхом збільшення швидкості НМ завдяки зменшенню додаткового опору в колі якоря, а т. 4 – зменшенням її магнітного потоку.

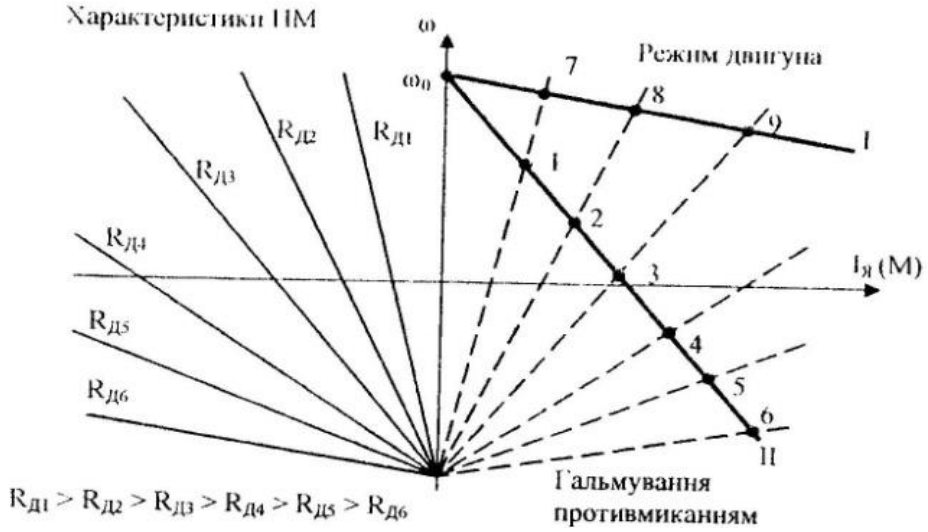

Рис. 4. Механічні характеристики

Якщо номінальні швидкості обох машин рівні, то всі точки характеристики рекуперативного гальмування можуть бути отримані лише шляхом зменшення магнітного потоку. Але і в цьому випадку слід ослабляти магнітний потік лише тоді коли повністю виведений додатковий опір у колі якоря.

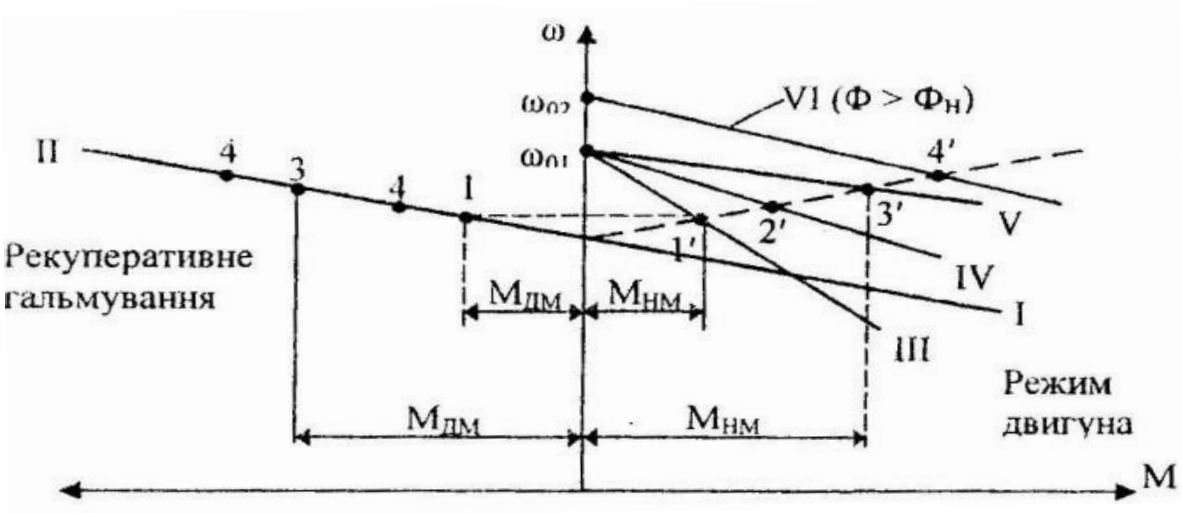

Рис. 5. Механічна характеристика

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

1. Найменування роботи

Експериментальне визначення моменту інерції електропривода методом вільного вибігу.

2. Мета роботи

Визначення моменту інерції установки, то складається з асинхронного двигуна (АД) та машини постійного струму.

3. Програма роботи

3.1. Ознайомитись з лабораторного установкою.

3.2. Підготувати послідовність проведення дослідів.

3.3. Провести дослід холостого ходу АД та визначити складові втрат.

3.4. Провести дослід ідеального холостого ходу АД та визначити складові втрат.

3.5. Провести дослід вільного вибігу установки та зняти залежність

n = $f(t)$.

3.6. Отримати дані втрат холостого ходу установки в залежності від частоти обертання.

3.7. Розрахувати величину моменту інерції установки двома методами.

3.8. Зробити висновки відносно точності застосованих методів розрахунку моменту інерції.

4. Теоретична частина

Значення величини моменту інерції необхідне дня дослідження динаміки електропривода. З експериментальних способів визначення моменту інерції найбільш розповсюджений метод вільною вибігу.

Для визначення моменту інерції цим способом проводять, досліди холостого ходу та ідеального холостого ходу, що дає змогу виділити складову механічних втрат в установці із загальних втрат. Після цього вимикається живлення двигуна і знімається крива вільного вибігу установки, тобто через рівні проміжки часу Δt виконують заміри частоти обертання. Приблизний вигляд кривої вибігу наведено на рис. 1.1.

До вимкнення двигуна мала місце рівновага моментів статичного M_c та двигуна $M_{дв}$, тобто

$$Mc = M_{дв} = \frac{P_{мех}}{\omega_{хх}},$$

де $P_{МЕХ}$ – потужність на валу двигуна, Вт;

$\omega_{хх}$ – кутова швидкість двигуна, 1/с.

Після вимкнення двигуна протягом кожної миті статичний момент урівноважується динамічним моментом

$$-M_c = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (1.2)$$

де I – момент інерції установки.

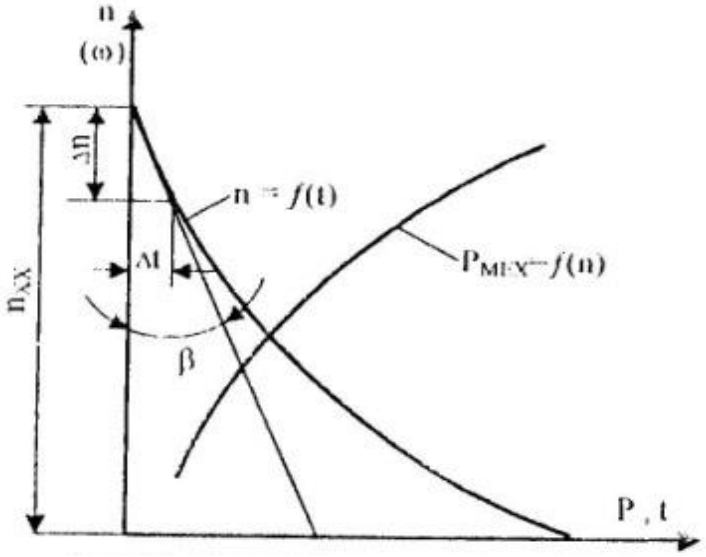

Рис. 1.1. Дослідні залежності n=f(t), $P_{мех}$=f(n)

Замінивши нескінченно малі $d\omega$ та dt на кінечні прирости $\Delta\omega$ та Δt, з формул (1.1) та (1.2) отримуємо

$$J = -\frac{P_{мех}}{\omega_{хх}} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cong 91 \frac{P_{мех}}{n_{хх}} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta n} \qquad (1.3)$$

Таким чином, для визначення моменту інерції згідно (1.3), достатньо провести в початковій точці кривої вибігу дотичну (рис. 1.1) та знайти значення $\Delta n/\Delta t$.

Точність визначення моменту інерції забезпечує інший метод, що спирається на графічне інтегрування. При використанні цього способу, крім кривої вибігу n=$f(t)$ необхідно мати залежність втрат у функції частоти обертання $P_{МЕХ} = f(n)$ (рис. 1.1). Така залежність може бути знята за допомогою двигуна постійного струму, швидкість якого регулюється зміною величини додаткового опору в його колі якоря. За кривими $P_{МЕХ} = f(n)$ та n=$f(t)$ при фіксованих значеннях n будується залежність $P_{МЕХ} = f(t)$ (рис. 1.2), при зміні ω від ω_{xx} до $\omega_к$

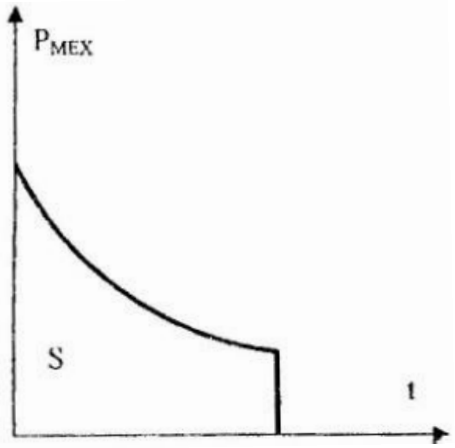

Рис. 1.2. Графік до визначення моменту інерції

Під час вільного вибігу від ω_{xx} до $\omega_к$ весь запас кінетичної енергії, рівний $J(\omega_{xx}^2 - \omega_к^2)/2$, витрачається на роботу для подолання сил тертя. Ця робота пропорційна площі S (рис. 1.2), обмежена кривою $P_{МЕХ} = f(t)$ та осями координат

$$S = \frac{J(\omega_{xx}^2 - \omega_к^2)}{2m_t - m_p}$$

де m_t та m_p – масштаби часу (с/см) та потужності (Вт/см).

Таким чином

$$J = \frac{2Sm_t m_p}{\omega_{xx}^2 - \omega_к^2} = 182.4\frac{Sm_t m_p}{n_{xx}^2 - n_к^2}$$

Якщо крива вибігу знімається до повної зупинки двигуна, то у цьому разі $\omega_к = 0$. Площа S визначається планіметром або шляхом розділення її на елементарні прямокутники з наступним їх складанням.

5. Опис лабораторної установки

Лабораторна установки (рис. 1.3) складається з асинхронної о двигуна АД та машини постійного струму Д. З метою обмеження пускового струму АД до його кола ротора ввімкнені резистори R1-R3, котрі в процесі розгону АД шунтуються автоматом АВ7, чим забезпечується виведення двигуна на природну характеристику.

Двигун постійного струму Д забезпечує компенсацію сил тертя в установці в режимі ідеального холостого ходу АД, а також призначений для регулювання швидкості установки при зняті залежності втрат від частоти обертання шляхом зміни величний додаткового опору в колі його якоря. Регулювання величини додаткового опору може здійснюватися ступінчасто (автомати АВ8 та АВ9) або плавно (реостат R7) в межах кожної ступені.

Оскільки навіть при введені до кола ротора додаткових резисторів спостерігається досить значний стрибок пусковою струму, слід на період пуску замкнути перемикачем УП1 вимірювальні кола (положення "Пуск"). Амперметр постійного струму А1, ввімкнений до однієї з фаз ротора АД, призначений для індикації режиму ідеального холостого ходу.

При визначенні втрат у функції швидкості слід виконувати вимірювання струму та напруги двигуна Д у всьому діапазоні з інтервалом 100-150 об/хв. При цьому треба мати на увазі, що при максимальному опорі у колі якоря двигуна Д стала швидкість установки близько 400 об/хв. Оскільки динамічний момент установки при цих умовах незначний, вимірювання для менших швидкостей допускається робити в процесі пуску двигуна.

6. Порядок виконання роботи

6.1. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки зображеної на рис. 1.3. Записати паспортні дані.

6.2. Підготувати стенд до виконання лабораторної роботи. Перевести перемикач УП1 до положення "Пуск", перемикач УП2 – до положення "=струм", тумблер поряд з вольтметром V3 – до положення "300В", автоматичні вимикачі АВ1 – АВ10 до положення "Відкл". Установити максимальне значення резистора R7. Ввімкнути обмотку збудження двигуна Д.

6.3. Зробити дослід холостого ходу установки з приводом від асинхронного двигуна АД. Для цього при максимальному опорі в колі ротора ввімкнути АД. По

мірі розгону двигуна треба зашунтувати резистори R1, R2, R3 в колі ротора АД. Перевести універсальний перемикач УП1 до положення "Вим" та занести до табл. 1.1 показання приладів n, V1, A2, W.

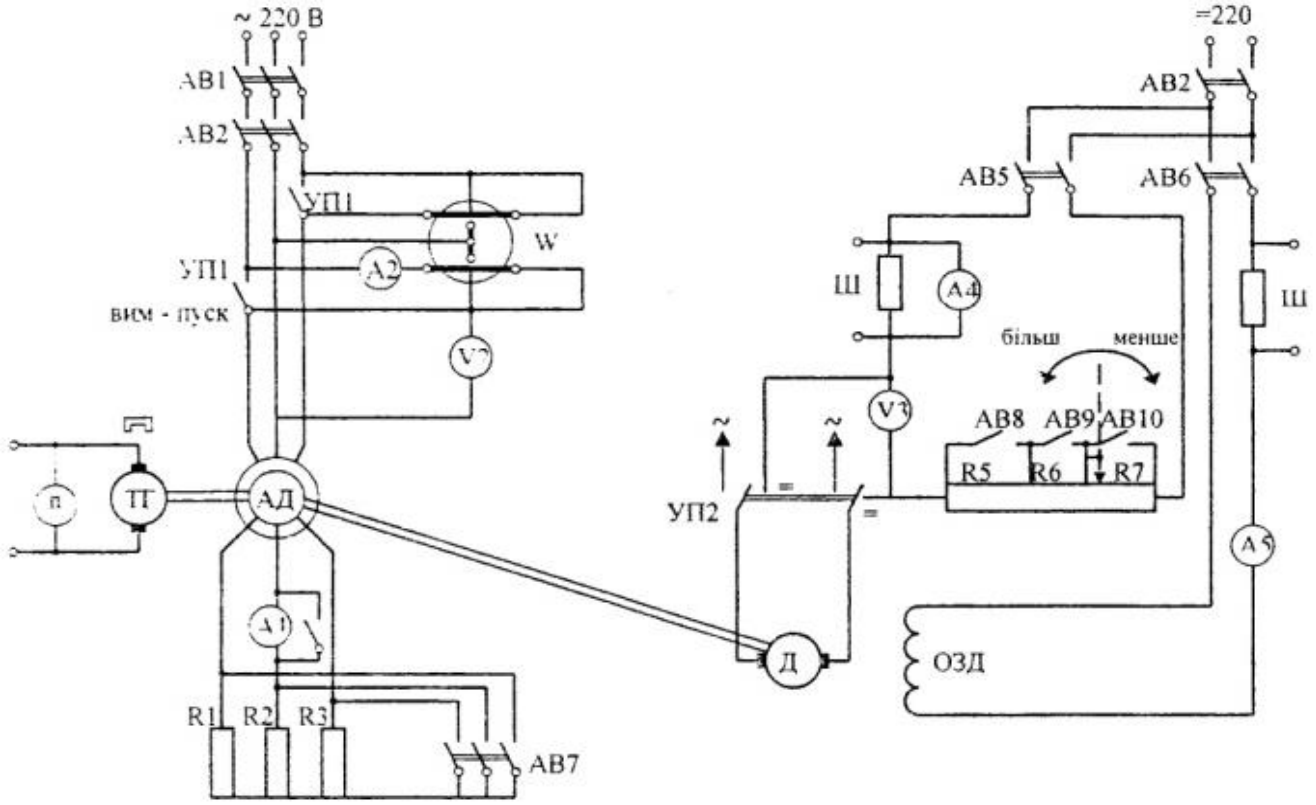

Рис. 1.3. Принципова схема лабораторної установки

Таблиця 1.1

Дані досліду холостого хода

Uхх, В	nхх, об/хв	Рхх, Вт	Іхх, А	Рмідь, Вт	Рст, Вт	Рмех, Вт

6.4. Зробити дослід ідеальною холостою ходу асинхронною двигуна, скомпенсувавши втрати холостого ходу за допомогою двигуна постійного струму. Ввімкнути двигун постійного струму та, зменшуючи опір в колі якоря добитись припинення коливань стрілки амперметра А1 в колі ротора АД. При ньому частота обертання двигуна буде синхронною. Занести до табл.1.2 показання приладів n, V1, A2, W. Вимкнути якір двигуна постійного струму та установити максимальний опір в колі якоря.

Таблиця 1.2

Дані досліду ідеального холостого хода

U_0, В	n_0, об/хв	P_0, Вт	I_0, А	Рмідь, Вт	Рст, Вт	r_0, Ом

6.5. Зробити дослід вільного вибігу асинхронного двигуна. Вимкнути АД та за допомогою реєструючого приладу або секундоміра та тахометра зняти залежність n= $f(t)$

6.6. Визначити втрати холостого ходу установки при різних частотах обертання. Ввімкнути двигун постійного струму (АВ8-АВ10 вимкнути) та після закінчення перехідного процесу зняти показання приладів n, V3, A4.

Результати вимірювань занести до табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Параметри холостого хода

n_0, об/хв	
$I_я$, А	
$U_я$, В	
Рмех, Вт	

Зменшуючи опір R7 від максимуму до нуля при ввімкнених опорах R5 та R6, зняти ще декілька точок. Якщо резистор R7 буде в крайньому положенні, то необхідно перевести його в початковий стан. Зашунтувавши опір R5, півтори вимірювання зменшуючи опір R7. На наступних етапах зашунтувати R6, потім R6 та R7. Дослід зупинити при частоті обертання n=1500об/хв.

7. Обробка експериментальних даних

При визначенні моменту інерції першим способом необхідно знайти механічні втрати $P_{мех}$, скориставшись методом розділення втрат. З досліду ідеального холостого ходу втрати в сталі

$$P_{ст} = P_0 - P_м = P_0 - 3\left(\frac{I_0}{\sqrt{3}}\right)^2 r_c\ ,$$

де P_O – потужність, що споживається з мережі; $P_{ст}$, $P_м$ – втрати в сталі та міді відповідно; I_0 – струм статора при ідеальному холостому ході; r_c – опір фази обмотки статора.

З досліду холостого ходу потужність на валу двигуна

$$P_{мех} = P_{хх} - P_м - P_{ст} = P_{хх} - 3\left(\frac{I_0}{\sqrt{3}}\right)^2 r_c - P_{ст}\left(\frac{U_{хх}}{U_0}\right),$$

де $P_{хх}$ – потужність, що споживається з мережі; $I_{хх}$ – струм статори при холостому ході; $U_{хх}$,U_0 – напруга під час дослідів холостого та ідеального холостого ходу відповідно.

При визначенні моменту інерції через площу спочатку слід побудувати залежність $P_{мех} = f(t)$ розраховуючи втрати

$$P_{мех} = U_я\ I_я,$$

де $U_я$ та $I_я$ – відповідно напруга та струм двигуна Д.

Після цього за двома кривими $n = f(t)$ та $P_{мех} = f(n)$ будується крива $P_{мех} = f(t)$ площа під якою знаходиться шляхом графічного інтегрування.

8. Зміст звіту

8.1. Найменування, мета та програма роботи.

8.2. Принципова схема установки.

8.3. Таблиці експериментів ти розрахунки.

8.4. Послідовні виконання робот згідно програми.

8.5. Залежності $P_{мех} = f(n)$, $n = f(t)$, $P_{мех} = f(t)$.

8.6. Розрахунки значень моментів інерції двома методами.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

1. Найменування роботи

Характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

2. Мета роботи

Вивчення природних та штучних електромеханічних n= ƒ($I_я$) та механічних n=ƒ(M) характеристик двигуна постійного струму незалежною збудження, а також дослідження впливу параметрів машини на вигляд цих характеристик.

3. Програма роботи

3.1. Ознайомитись з лабораторною установкою.

3.2. Розрахувати та побудувати природну електромеханічну характеристику (е.м.х.) двигуна n= ƒ($I_я$).

3.3. Розрахувати та побудувати штучну е.м.х. двигуна для заданих значень додаткового опору $R_д$.

3.4. Розрахувати та побудувати для заданого значення Rд е.м.х. двигуна в режимі гальмування противмиканням.

3.5. Розрахувати та побудувати природну та штучну е.м.х. двигуна в режимі рекуперативного гальмування.

3.6. Розрахувати та побудувати для заданих Rд е.м.х. в режимі динамічного гальмування.

3.7. Розрахувати та побудувати е.м.х. двигуна при ослабленому магнітному потоці (Ф - 0,8$Ф_Н$).

3.8. Отримати дані та побудувати регулювальну характеристику двигуна n=ƒ($I_з$)

3.9. Зняти е.м.х. двигуна згідно умов, викладених в п.п. 3.2-3.7. Для цього кожний студент повинен самостійно розробити план проведення кожного з дослідів, в якому слід вказати послідовність вмикання машин, додаткових резисторів та інших елементів. Результати експериментів заносять у відповідні таблиці.

3.10. Побудувати електромеханічні та механічні характеристики двигуна, зняті згідно п. 3.9, порівняти їх з розрахунковими та пояснити розбіжності розрахунку та експерименту.

4. Теоретична частина

Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження наведена на рис. 2.1, а. Якір двигуна М та його обмотка збудження ОЗ звичайно живляться від різних мереж з напругами U та $U_З$ відповідно. Лише при наявності мережі постійного струму або при нерегульованому перетворювачі в якірному колі обмотка збудження живиться від тієї ж мережі, що і якір двигуна. Але і в цьому випадку струм збудження Із практично не залежить від струму Ія якоря.

Напрямок струму Ія та ЕРС машини ЕДВ, зображені на рис. 2.1, а, відповідають режимові двигуна.

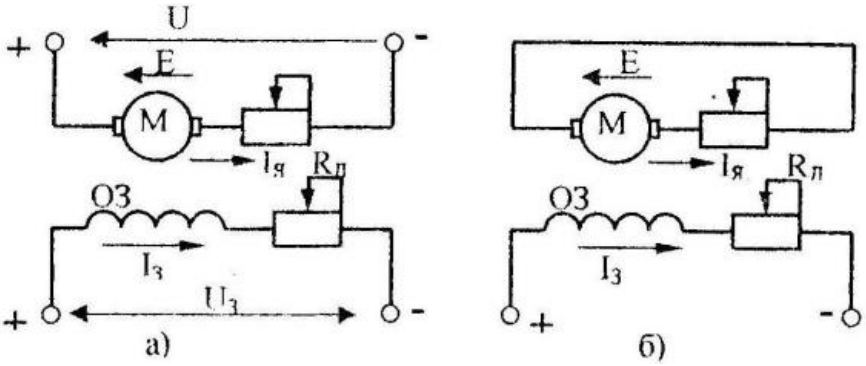

Рис. 2.1. Схеми вмикання двигуна

Аналітичний вираз для механічної характеристики двигуна (залежності його кутової швидкості ω від обертаючого моменту М) може бути отриманий з рівняння рівноваги напруг, складеного для якірного кола. В усталеному режимі прикладена напруга U урівноважуватись падінням напруги в якірному колі $I_я R_я$ та наведеної в якорі ЕРС обертання Едв, тобто

$$U = I_я R_я + E_{дв} \quad (2.1)$$

де $R_я = r_я + R_д$ – сумарний опір якірною кола, що складається з зовнішнього додаткового опору $R_д$ та внутрішнього опору якоря двигуна $r_я$.

ЕРС двигуна визначаться як:

$$E_{дв} = к\Phi\omega \quad (2.2)$$

де к – коефіцієнт, що залежить під конструктивних даних двигуна, Ф магнітний потік (Вб)

Якщо в (2.1) замість Е підставити її значення згідно (2.2), отримаємо рівняння електромеханічної характеристики $\omega = f(I_я)$

$$\omega = \frac{U - I_я R_я}{к\Phi} \quad (2.3)$$

Момент, що розвиває двигун

$$M = к\Phi I_я \quad (2.4)$$

У зв'язку з цим підстановка в (2.3) значення струму $I_я$ з рівняння (2.4) дає вираз для механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{к\Phi} - \frac{MR}{(к\Phi)^2}. \quad (2.5)$$

Електромеханічна та механічна характеристики (рис. 2.2) можуть бути зображені також у вигляді $n = f(I_я)$ та $n = f(M)$, де n – частота обертання (об/хв).

Крім режиму двигуна можливі три способи електричного гальмування:

1) гальмування з віддачею енергії до мережі (рекуперативне);

2) гальмування противмиканням;

3) динамічне гальмування.

У кожному з гальмівних режимів двигун працює як генератор, перетворюючи механічну енергію, що поступає з валу виробничого механізму, в електричну. При цьому енергія або віддається до мережі (рекуперативне гальмування), або розсіюється у вигляді тепла в якірному колі двигуна (два останні види гальмування).

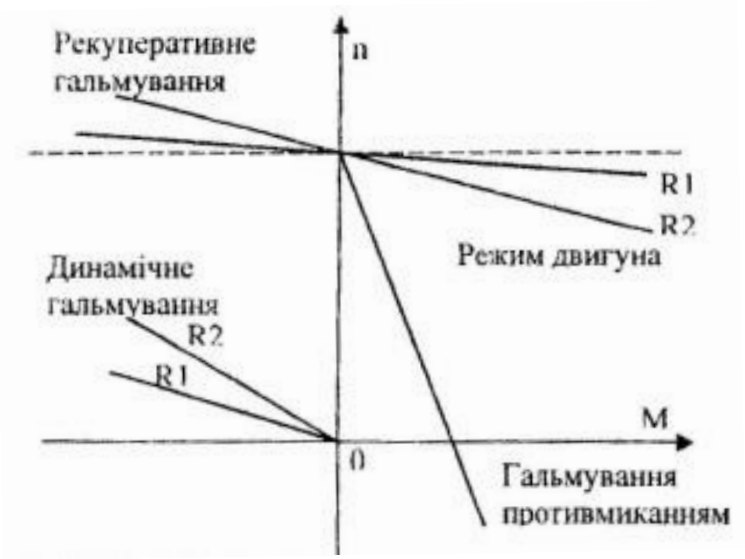

Рис. 2.2. Механічні характеристики двигуна при різних режимах роботи

Рекуперативне гальмування при U=const можливе лише у випадку, коли швидкість двигуна стає вищою швидкості ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$, в зв'язку з чим ЕРС двигуна стає більшою за напругу мережі.

В результаті цього струм в колі якоря

$$\mathrm{I_я} = \frac{U - E_{\text{дв}}}{R_{\text{я}}} = -\frac{E_{\text{дв}} - U}{R_{\text{я}}} \tag{2.6}$$

змінює напрямок і момент двигуна стає гальмівним.

У зв'язку з тим, що струм змінює напрямок, рівняння е.м.х. має вигляд

$$\omega = \frac{U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\text{кФ}} \tag{2.7}$$

У лабораторних умовах швидкість досліджуваного двигуна збільшується за допомогою навантажувальної машини, котра вмикається узгоджено.

У режимі гальмування противмиканням якір двигуна під дією переважаючого зовнішнього моменту обертається в напрямку, протилежному його електромагнітному моменту. Оскільки якір обертається в протилежному напрямку, НРС двигуна змінює напрямок і діє узгоджено з прикладеною напругою. При цьому струм у колі якоря визначається як.

$$I_{\text{я}} = \frac{U + E_{\text{дв}}}{R_{\text{я}}} \tag{2.8}$$

У зв'язку з цим для обмеження струму необхідно до кола якоря ввімкнути значний за величиною додатковий опір. Рівняння е.м.х. для цього режиму таке ж, як і для режиму двигуна.

Для здійснення режиму динамічного гальмування якір двигуна вимикається І мережі і закорочуються на зовнішній додатковий опір (рис. 2.1, б). Обмотка збудження при цьому продовжує живитись від мережі. В обмотці якоря, що обертається під дією зовнішнього моменту, наводиться ЕРС, яка викликає протікання струму в колі якоря

$$I_{\text{я}} = -\frac{E_{\text{дв}}}{R_{\text{я}}} = -\frac{\text{кФ}\omega}{R_{\text{я}}} \tag{2.9}$$

в протилежному напрямку і момент двигуна стає гальмівним

$$\text{М} = \text{кФ}I_{\text{я}} = -\frac{(\text{кФ})^2\omega}{R_{\text{я}}} \tag{2.10}$$

Па основі виразів (2.9) та (2.10), рівняння електромеханічної та механічної характеристик відповідно мають вигляд

$$\omega = -\frac{\text{I}_{\text{я}}R_{\text{я}}}{\text{кФ}} \tag{2.11}$$

$$\omega = -\frac{\text{M}R_{\text{я}}}{(\text{кФ})^2} \tag{2.12}$$

У зв'язку з тим, що е.м.х. двигуна с прямі лінії (рис. 2.2), для їх побудови необхідно знати лише дні точки. Для всіх режимів, крім динамічного гальмування, цими точками зручно вибирати точку ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0, \text{I}_{\text{я}=0}$ та точку, що відповідає номінальному струму $\text{I}_\text{я} = \text{I}_\text{н}$ $\omega = \omega_\text{н}$. Значення швидкості при $\text{I}_\text{я} = \text{I}_\text{н}$ визначається для кожного з режимів за рівнянням відповідної е.м.х.

Швидкість ідеального холостого ходу визначається як

$$\omega = \frac{U}{\text{кФ}} \tag{2.13}$$

де

$$\text{кФ} = \frac{U - \text{I}_\text{н}r_{\text{я}}}{\omega_\text{н}} \tag{2.14}$$

$$\omega_y = \frac{\pi n_\text{н}}{30} \tag{2.15}$$

$n_\text{н}$ – номінальна частота обертання двигуна.

Таким же чином будується е.м.х. при ослабленому магнітному потокові.

В режимі динамічного гальмування е.м.х. проходять через початок координат. Тому для їх побудови необхідно згідно (2.11) знайти значення швидкості для заданого додаткового опору $\text{R}_\text{д}$ при $\text{I}_\text{я} = \text{I}_\text{н}$.

5. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка, принципова схема якої наведена на рис. 2.3, складається з досліджуваної ДМ та навантажувальної НМ машин і тахогенератора ТГ для вимірювання швидкості. Перемикач П1 забезпечує вибір режиму роботи ДМ: режим двигуна ДВ або динамічного гальмування ДГ. Перемикач П2 забезпечує реверсування НМ. З метою обмеження пускових струмів до кіл якорів ДМ та НМ відповідно ввімкнені додаткові опори R2 та R4, секції котрих шунтуються автоматичними вимикачами В1...В9. Струми збудження машин регулюються реостатами R1 та R3. Паспортні дані машин наведені в табл. 2.1

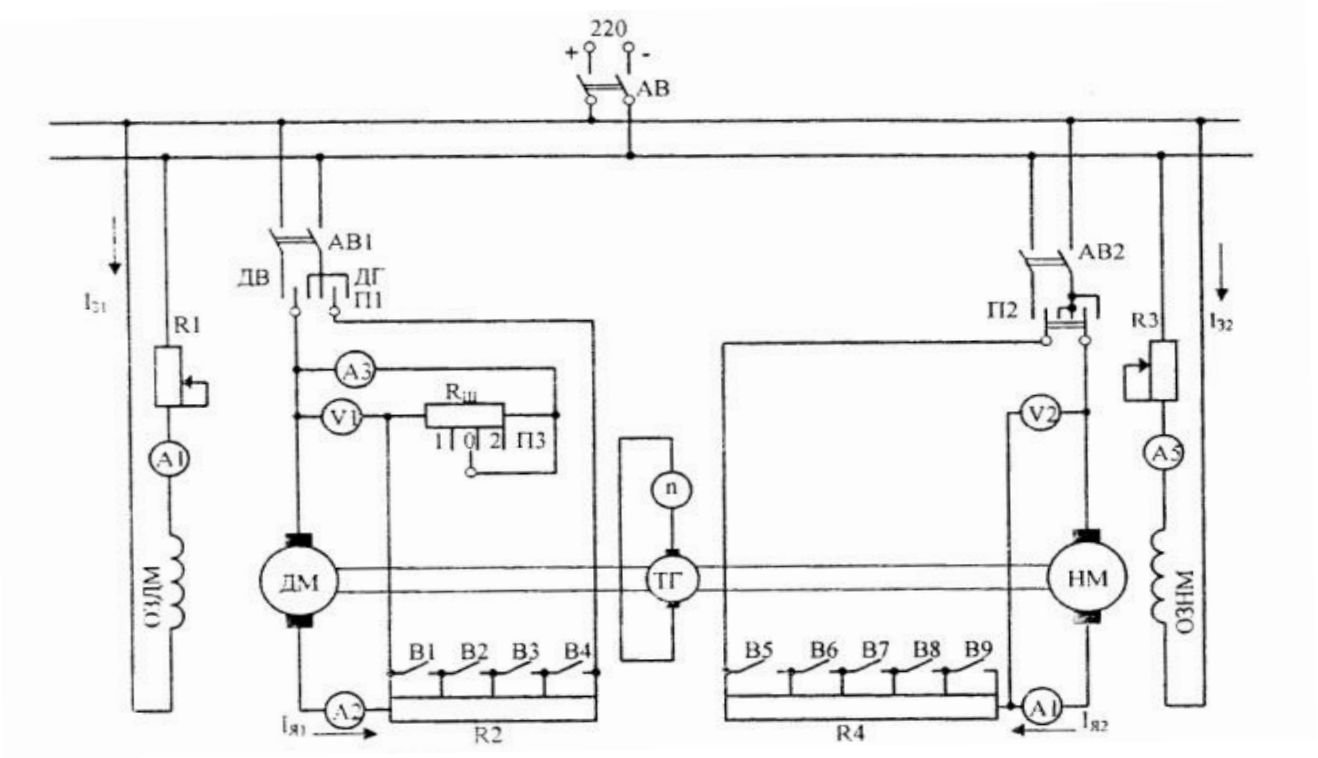

Рис. 2.3. Принципова схема установки

Таблиця 2.1

Номінальні параметри електричних машин

№ з/п	Параметр	Досліджувана машина	Навантажувальна машина
1	Тип	П-32	П-32
2	$P_н$, кВт	2,2	2,2
3	$U_н$, В	220	220
4	$I_н$, А	12,2	12,2
5	$n_н$, об/хв	1500	1500
6	$R_я$, Ом	0,8	0,8

6. Порядок виконання роботи

6.1. Зняття регулювальної характеристики n= f($I_з$)

здійснюється при вимкненій навантажувальній машині НМ. Досліджувана машина ДМ вмикається до мережі при максимальному додатковому опорі в колі якоря, а потім виводиться на природну характеристику. Це здійснюється послідовним шунтуванням секцій реостата R2. Плавно зменшуючи струм збудження ДМ реостатом R1, отримують 5-6 точок регулювальної характеристики. Дані вимірювань заносяться до табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Дані досліду при знятті регулювальної характеристики

$I_З$, А	
n, об/хв	

6.2. Зняття характеристик режиму двигуна

При знятті характеристик режиму двигуна навантажувальна машина виконує роль гальма. При цьому перемикач П2 ставиться в положення "зустрічне". При максимальних струмах збудження обох машин та повністю введених опорах R2 і R4 вмикається досліджувальна машина ДМ. Природна характеристика знімається при повністю виведеному опорі R2, штучні – при почерговому вимиканні вимикачей В1, В2, В3, В4 досліджуваної машини.

Зменшуючи опір R4 в колі якоря ввімкненій НМ, знімають показники струму якоря досліджувальної машини $I_{я1}$ та швидкості n. Граничні значення струмів $I_{Я1}$ та $I_{Я2}$ – 12А. Дані вимірювань заносяться до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Дані дослідів та розрахунків при знятті е.м.х. та механічних характеристик

Режим роботи	Характеристика	Виміряно			Розраховано
		№ вим.	n, об/хв	$I_Я$,А	М,Нм
		1 45			

6.3. Зняття характеристик режиму гальмування противмиканням

Для виконання цього режиму вмикаються ДМ та НМ при повністю введених реостатах R2 та R4 та перемикачі П2 у положенні "зустрічне". Зменшуючи опір R4, домагаються зупинки агрегату. Подальшим зменшенням опору R4 домагаються обертання агрегату в протилежному напрямку, що відповідає режиму гальмування противмиканням. Дані вимірювань заносяться до табл. 2.3.

6.4. Зняття характеристик режиму рекуперативного гальмування

здійснюється при згідному вмиканні навантажувальної машини. При максимальних струмах збудження $I_{З1}$, та максимальних опорах R2 та R4 вмикається ДМ, а потім НМ. Після чого обидві машини виводяться на природні характеристики. Потім плавним зменшенням струму збудження навантажувальної машини $I_{з2}$ здійснюється режим ідеального ходу ($I_{Я1}$ =0; $n = n_0$). При подальшому ослаблені струму збудження НМ швидкість агрегату зростає, а струм якоря $I_{я1}$стає негативним, що відповідає режиму рекуперативного гальмування. Аналогічно способом знімається штучна характеристика при наявності додаткового опору у колі якоря ДМ. Результати вимірювань заносяться до табл. 2.3.

6.5. Зняття характеристик режиму динамічного гальмування.

У цьому режимі якір досліджуваної машини вимкнений від мережі замикається на опір R2. Для цього перемикач П1 ставиться до положення "ДГ" і при введеному опорі R4 вмикається НМ. При знятті характеристик швидкість агрегату регулюється реостатом R4. (величини додаткових опорів при знятті штучних характеристик наведені в табл. 2.4.

7. Обробки експериментальних даних

Для побудови механічних характеристик $n=f(M)$ за результатами вимірювань згідно формули (2.4) слід розрахувати величини електромагнітного моменту М при постійному значенні потоку збудження в ньому. У разі для номінального потоку збудження

$$M = кФI_я$$

8. Зміст звіту

8.1. Найменування, мета та програма роботи.

8.2. Розрахунки та графіки е.м.х. згідно п.п. 3.2-3.7 програми роботи.

8.3. План проведення досліджень згідно п.п. 3.8 та 3.9. програми роботи, в якому миють бути відображені дії щодо вмикання установки, виведення її до необхідного режиму та проведення кожного з дослідів.

8.4. Таблиці експериментів та розрахунків.

8.5. Регулювальну характеристику двигуна $n=f(I_з)$

8.6. Експериментальні е.м.х. двигуна $n=f(I_я)$ в одній системі координат з розрахунковими.

8.7. Механічні характеристики двигуна $n=f(M)$ згідно результатів експериментів.

8.8. Аналіз причин розбіжностей розрахункових та експериментальних е.м.х.

У табл. 2.4. вказано автомати, котрі мають бути вимкнені при знятті першої ($R_{Д1}$) та другої ($R_{Д2}$) штучних характеристик в режимах двигуна, рекуперативного та динамічного гальмувань, а також наведено перелік ($R_{дп}$) вимкнених автоматів при проведенні дослідів у режимі гальмування прогин миканням.

Таблиця 2.4

До вибору значень додаткових опорів при знятті
та розрахунках штучних характеристик

Параметр	Номер варіанта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{д1}$	В1	В2	В3	В4	В1	В2	В3	В4
$R_{Д2}$	В1,В2	В1,В3	В1,В4	В2,В3	В2,В4	В3,В4	В1.В2	В1,В3
$R_{дл}$	В1,В2 В3	В1,В2 В4	В1,В3 В4	В2,В3 В4	В1,В2 В3,В4	ВІ,В2 В3	В1,В2 В4	В1,В3 В4

Примітка. Штучні характеристики слід розраховувати в залежності від варіанта для значень додаткових опорів ($R_{д1}$ $R_{д2}$, $R_{дп}$), що визначаються станом вимкнених автоматів згідно табл. 2.4.

Таблиця 2.5

Значення додаткових опорів (Ом) в колах якорів ДМ та НМ, та номерів автоматичних вимикачів, котрі їх шунтують.

	$R_{д1}$	$R_{д2}$	$R_{д3}$	$R_{д4}$	$R_{д5}$
ДМ	В1-6	В2-12	В3-12	В4-12	–
НМ	В5 - 35	В6-27	В7-21	В8-16	В9-16

Варіанти індивідуальних програм

Варіант 1
1. Зняти регулювальну характеристику ДМ n= $f(I)$
2. Зняти природну е.м.х. ДМ в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
3. Зняти дві штучні е.м.х. з $R_{д1}$ та $R_{д2}$ в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
4. Зняти е.м.х. при $R_д = 0$ та $Ф = 0,8Ф_н$ в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
5. При $Ф = Ф_н$ та $R_д = R_{дп}$ зняти характеристику гальмування противмиканням.
6. Зняти дві характеристики динамічного гальмування з $R_{Д1}$ та $R_{Д2}$ в колі якоря ДМ.

Варіант2
1. Зняти регулювальну характеристику ДМ n= $f(I_з)$
2. У режимі двигуна при $Ф = Ф_ц$ зняти природну та дві штучні е.м.х
3. Зняти характеристику гальмування противмиканням.
4. Зняти природну та дні штучні е.м.х. в режимі рекуперативного гальмування. 5 У режимах рекуперативного гальмування та двигуна зняти е.м.х при $R_д = 0$ та $Ф = 0,8Ф_М$. 6. Зняти е.м.х. в режимі динамічного гальмування.

Варіант 3
I. Зняти дві штучні характеристики в режимі динамічного гальмування.
2. Зняти природну та дні штучні е.м.х н режимі рекуперативного гальмування
3. Зняти природну та штучні е.м.х. її режимі двигуни.
4. Зняти характеристику гальмування противмиканням.
5. Зняти е.м.х. при $R_д = 0$ та $Ф = 0,8Ф_И$ в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
6. Зняти регулювальну характеристику n= $f(I_з)$

Варіант 4
1. Зняти природну е.м.х. в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
2 Зняти е.м.х. при Rд= 0 та Ф= 0,8Фц в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
3. Зняти характеристику гальмування та двигуна.
4. Зняти штучну характеристику з $R_д$ - $R_{д2}$ в режимах двигуна та рекуперативного гальмування.
5. Зняти штучну характеристику з $R_д = R_{д1}$ в режимах двигуна та рекуперативного гальмування.
6. Зняти регулювальну характеристику ДМ.
7. Зняти е.м.х. в режимі динамічного гальмування.

Варіант 5
1. У режимі двигуна зняти природну та дві штучні е.м.х. при $Ф = Ф_н$, а також характеристику з $R_д = 0$ та $Ф = 0, 8Ф_н$,

2. Зняти природну та дві штучні е.м.х при Ф = $Ф_н$, а також характеристику з $R_д$ = 0 та Ф = 0,8$Ф_н$ в режимі рекуперативного гальмування.
3. І Ірн Ф = $Ф_н$ зняти характеристику гальмування противмиканням.
4. Зняти характеристику динамічного гальмування.
5. Зняти регулювальну характеристику n= $f(I_з)$

Варіант 6
1. Зняти регулювальну характеристику n= $f(I_з)$
2. Зняти е.м.х. при $R_д$ = 0 та Ф = 0,8$Ф_Н$ в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
3. Зняти природну е.м.х. в режимах рекуперативного гальмування та двигуна.
4. Зняти штучні е.м.х. в режимах двигуна, рекуперативного та динамічного гальмування.
5. Зняти характеристику гальмування противмиканням.

Варіант 7
1. Зняти регулювальну характеристику ДМ.
2. Зняти характеристику гальмування противмиканням Ф = Фц.
3. В режимі двигуна зняти природну та дві штучні е.м.х., а також характеристику при $R_д$ = 0 та Ф = 0,8$Ф_Н$.
4. У режимах рекуперативного гальмування зняти характеристику при $R_д$ = 0 та Ф = 0,8$Ф_Н$, а також природну та дві штучні е.м.х при Ф = $Ф_Н$.
5. Зняти характеристику динамічного гальмування.

Варіант 8
1. Зняти е.м.х. в режимі гальмування противмиканням.
2. Зняти природну та дві штучні е.м.х, та характеристику при $R_д$ = О та Ф = 0,8$Ф_Н$ в режимі двигуна.
3. У режимі рекуперативного гальмування зняти характеристику при Ф = 0,8Фн, а також природну та дві штучні е.м.х.
4. Зняти регулювальну характеристику ДМ.
5. Зняти е.м.х. в режимі динамічного гальмування.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

1. Найменування роботи

Дослідження електромеханічних властивостей двигуна постійного струму послідовного збудження

2. Мета роботи

Вивчення природної та штучних механічних та електромеханічних (швидкісних) характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження в режимі двигуна та гальмівних режимах, а також вплив додаткових опорів на вигляд цих характеристик.

3. Програма роботи

3.1. Користуючись універсальними кривими, розрахувати та побудувати природну електромеханічну (е.м.х.) та механічну (м.х.) характеристики двигуна.

3.2. Розраховуючи та побудувати штучні е.м.х та м.х. її режимі двигуна при різних додаткових опорах її коні якоря ($R_{д1}$=3, $R_{д2}$= 6, $R_{д3}$ = 11)

3.3. Рахувати та побудувати штучні е. м.х та м.х. в режимі гальмування противмиканням при додатковому опорі $R_д$=11

3.4. Розрахувати та побудувати е.м.х. та м.х. в режимі динамічного гальмування з самозбудженням при додаткових опорах $R_{д1}$=11, $R_{д2}$=6.

3.5. Розрахувати та побудувати е. м.х. та м.х. и режимі динамічного гальмування ч незалежним збудженням при $I_в$ = 20А та додаткових опорах $R_{д1}$= 11, $R_{д2}$ =6.

3.6. Розрахувати та побудувати штучні е.м.х. та м.х. при шунтуванні якоря $R_щ$=10, $R_{д1}$=11, $R_{д2}$ =6.

3.7. Зняти е.м.х. згідно умов п.п. 3.1-3.6.

3.8. Побудувати е.м.х. згідно експериментальних даних п. 3.7 та порівняти їх з розрахунковими та пояснити причини розбіжностей результатів розрахунків та дослідів.

4. Теоретична частина

Для електродвигуна послідовного збудження, схема вмикання якого наведена на рис. 3.1.а, рівняння е.м.х. та м.х. характеристик мають такий же вигляд, як і для двигуна незалежного збудження:

$$\omega = \frac{U_c - IR_я}{кФ}$$

$$\omega = \frac{U_c}{кФ} - \frac{MR_я}{(кФ)^2}$$

де $R_я$ – сумарний опір якірного кола двигуна, що складається із опору обмотки якоря, обмотки збудження та додаткового опору.

Особливістю двигунів послідовного збудження є вмикання обмотки збудження послідовно з якорем (рис. 3.1, а). Як наслідок, магнітний потік машини є функцією струму якоря і змінюється при зміні навантаження на валу. У випадку малих навантажень потік машини різко зменшується, а швидкість значно зростає і може досягнути великих значень, що є недопустимим. У зв'язку з цим робота двигуна послідовного збудження вхолосту забороняється.

Крива намагнічування Ф = $f(I_я)$ через насичення магнітного кола не може бути точно описана аналітично. Тому важко отримати і точний аналітичний вираз для механічної характеристики двигуна послідовного збудження. У практичних розрахунках звичайно користуються універсальними характеристиками $\omega = f(I_я)$ та M = $f(I_я)$, які наводяться в каталогах для кожної з серій машин (рис. 3.2).

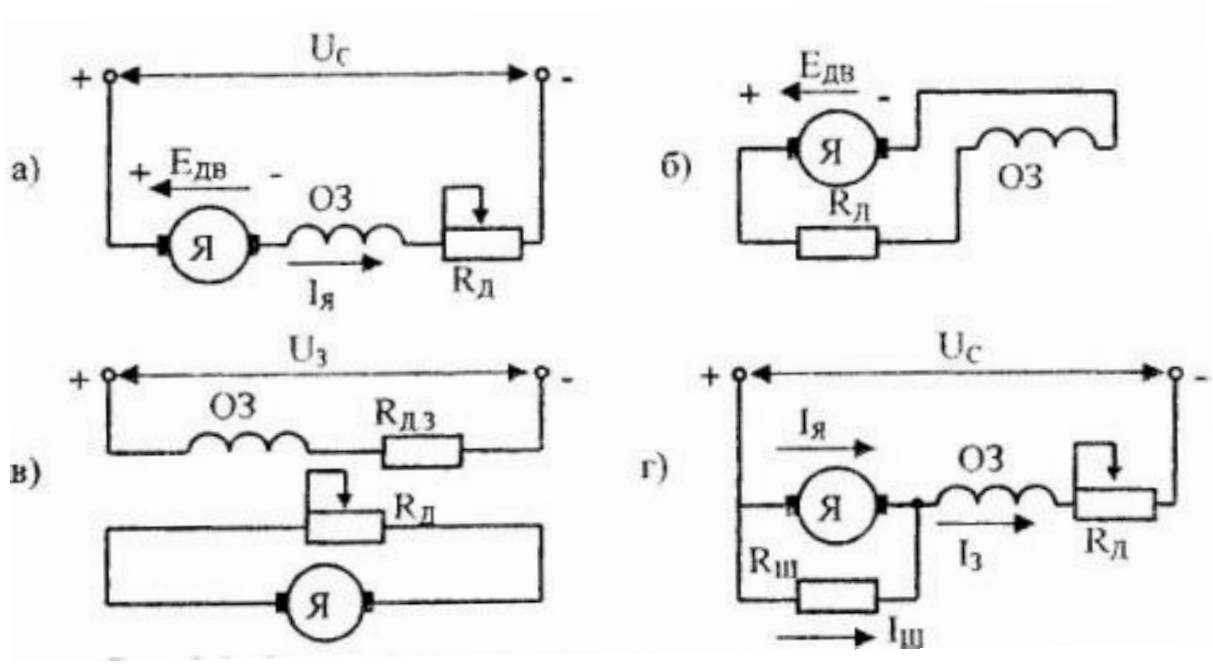

Рис. 3.1. Схеми вімкнення двигуна послідовного збудження

а) режим двигуна;
б) динамічне гальмування з самозбудженням;
в) динамічне гальмування з незалежним збудженням;
г) шунтування якоря.

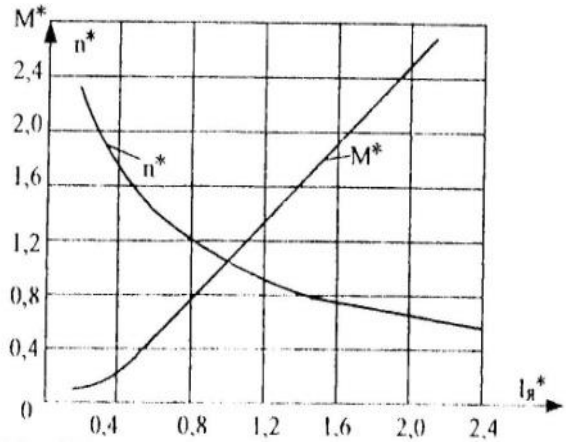

Рис. 3.2. Універсальні характеристики двигуна послідовного струму

Якщо для спрощення аналізу допустити лінійну залежність між потоком та струмом якоря, тобто Ф =$\alpha$$I_я$ то момент двигуна

$$M = кФI_я = \alpha кI_я^2, \quad (3.3)$$

З урахуванням (3.3) рівняння електромеханічної та механічної характеристик двигуна послідовного збудження приймають вигляд

$$\omega = \frac{U_С}{кФ} - \frac{R_я}{к\alpha}, \quad (3.4)$$

$$\omega = \frac{U_С}{\sqrt{МК\alpha}} - \frac{R_я}{к\alpha}. \quad (3.5)$$

Звідси випливає, що при ненасиченому магнітному колі механічна характеристика двигуна мас гіперболічний характер (рис. 3.3), особливістю якої є різке збільшення частоти обертання у випадку малих навантажень. При великих навантаженнях магнітна система насичується і механічна характеристика стає майже прямолінійною.

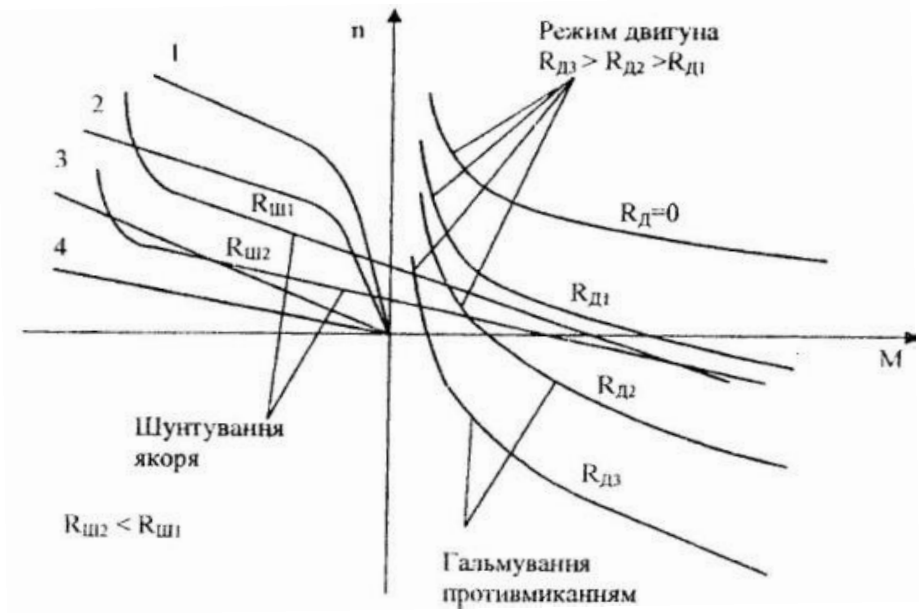

Рис. 3.3. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

1-2 – динамічне гальмування із самозбудженням;
3-4 – динамічне гальмування з незалежним збудженням.

Для двигуна послідовного збудження можливі лише два гальмівних режими: гальмування противмиканням (П) та динамічне гальмування із самозбудженням (рис. 3.1, б) або з незалежним збудженням (рис. 3.1, в).

При динамічному гальмуванні із самозбудженням якір двигуна вимкнено із мережі живлення та замкнено на зовнішній додатковий опір. Щоб уникнути розмагнічування машини, необхідно її обмотку збудження ввімкнути в такий спосіб, щоб напрямок струму в ній залишився попереднім, як і в режимі двигуна, що був перед цим. У режимі самозбудження при низьких швидкостях гальмівний момент дуже малий (рис. 3.3). Тому переважно застосовують режим динамічного гальмування з незалежним збудженням. При цьому обмотка збудження двигуна через додатковий опір, що обмежує в ній струм, живиться від мережі, а обмотка якоря замикається на додатковий опір. Механічні характеристики при цьому є прямими лініями, що проходять через початок координат (рис. 3.3), та ідентичні характеристикам двигуна незалежного збудження.

Для отримання на малих швидкостях характеристик з більшою жорсткістю, ніж реостатні, застосовується схема з шунтуванням якоря (рис. 3.1, г). У цьому випадку коли $I_я = 0$ через шунтуючий опір та обмотку збудження тече струм, котрий створює магнітний потік, що визначає швидкість ідеального холостого ходу.

При розрахунках штучних характеристик двигуна (для заданих додаткових опорів Rд) користуються рівнянням

$$\omega_{\text{ш}} = \omega_{\text{п}} \frac{U_c - I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{U_c - I_{\text{я}} r_{\text{я}}} \qquad (3.6)$$

де $\omega_{\text{ш}}, \omega_{\text{п}}$ – швидкості на штучній та природній характеристиках, що відповідають прийнятому струму $I_{\text{д}}$; $r_{\text{я}}$ – опір якоря, що складається з опору обмоток якоря $r_{\text{об.я}}$ та збудження $r_{\text{об.з}}$.

Задаючись довільними значеннями струму якоря $I_{\text{я}}$, знаходять за природною характеристикою $\omega_{\text{п}}$. Після цього за (3.6) знаходять для заданого додаткового опору Rд величину швидкості на штучній характеристиці при тому ж струмові якоря.

Для побудови механічної характеристики в режимі динамічного гальмування з самозбудженням використовують, співвідношення

$$I_{\text{я}}^2(r_{\text{я}} + R_{\text{д}}) = M\omega$$

яке спирається на закон збереження енергії, тобто потужність електричних втрат дорівнює механічній потужності, що надходить з валу навантажувальної машини. З (3.7) маємо

$$\omega = \frac{I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{M}.$$

При розрахунках, задаючись довільними значеннями $I_{\text{я}}$, знаходять за універсальними кривими (рис. 3.2) момент двигуна, а потім за формулою (3.8) швидкість двигуна для заданого $R_{\text{д}}$. Маючи залежність $\omega = f(M)$ є можливість з використанням універсальних кривих побудувати е.м.х. двигуна.

Для побудови е.м.х. в режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням користуються співвідношенням

$$\omega = \frac{I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}.$$

Величину кФ для заданого струму збудження $I_{\text{з}}$ знаходять з рівняння

$$k\Phi = \frac{U_c - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{\omega},$$

де ω – швидкість двигуна на природній характеристиці при $I_{\text{я}} = I_{\text{ян}}$.

5. Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки наведена на рис. 3.4. Досліджувана машина послідовного збудження ДМ механічно з'єднана із навантажувальною машиною НМ та тахогенератором ТГ. Для обмеження пускових струмів до кіл якорів машин увімкнені реостати R1, R2.

Динамічне гальмування з самозбудженням здійснюється при обертанні агрегату навантажувальною машиною при вмиканні контакторів В або Н. Особливо слід підкреслити необхідність збереження напрямку струму в обмотці збудження ДМ котрий був при попередніх дослідах.

Для гальмування ДМ незалежним збудженням вмикають контактор Т.

За допомогою перемикача ПЗ забезпечується шунтування якоря ДМ додатковим опором Rш.

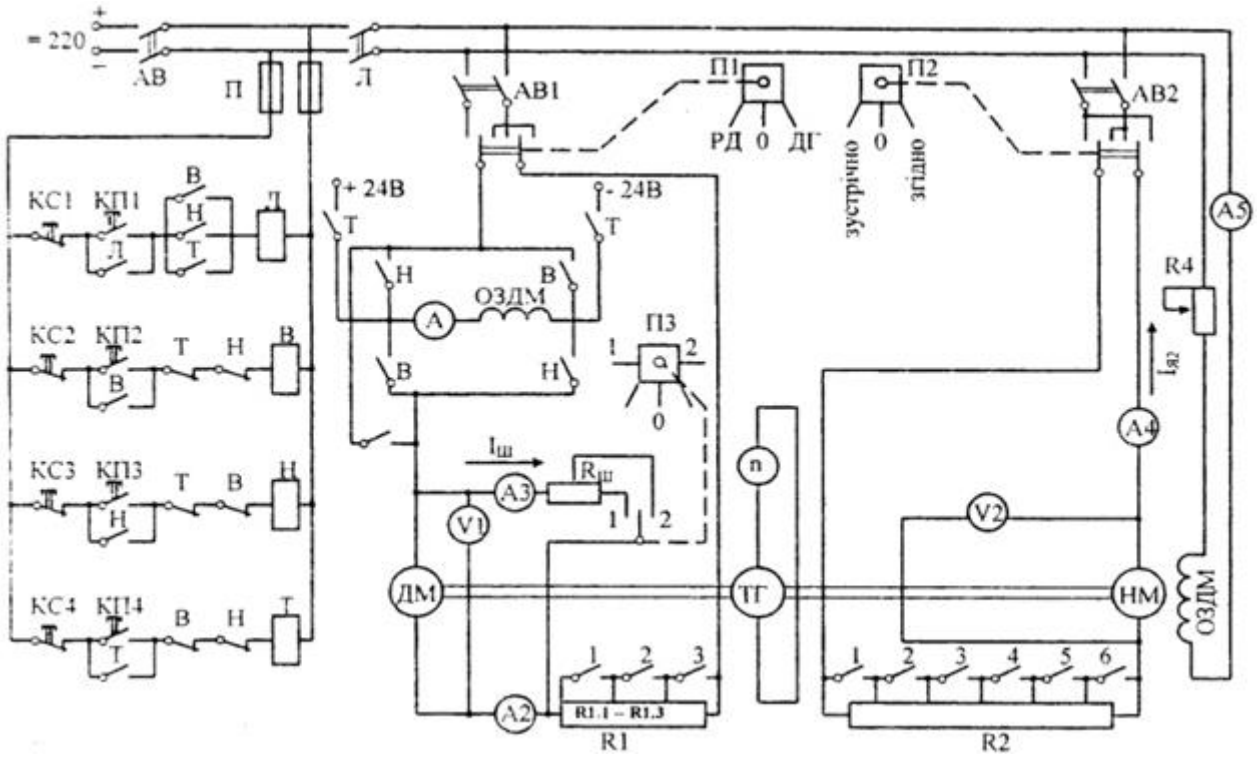

Рис. 3.4. Принципова схема установки

Номінальні дані електричних машин наведені в табл. 3.1, а величини додаткових опорів – в табл. 3.2.

Таблиця 3.1

Номінальні дані електричних машин

№ з/п	Номінальні параметри	Досліджувана машина	Навантажувальна машина
1	Тип	ДП-12	П-42
2	Рн, кВт	3	4,5
3	nн, В	220	220
4	Ін, А	10	25,5
5	$n_н$, об/хв	960	2500
6	$r_{об.я}+r_{об.з}$	2,5	Rоб.я = 1,2

Таблиця 3.2

Параметри додаткових опорів (Ом)

Ступінь	R1.1	R1.2	R1.3	R1.4
ДМ	3	3	5	2,5

6. Порядок виконання роботи

6.1. Зняття електромеханічних характеристик n= $f(I_я)$, у режимі двигуна та гальмування противмиканням

Перед пуском установки необхідно попередньо ввімкнути автоматичні вимикачі АВ, АВ1, АВ2. Перемикач П1 установити до положення "РД", а П2 – "зустрі-

чно". При такому положенні перемикачів навантажувальна машина вмикається зустрічно досліджуваної та виконує роль гальма. Пуск установки проводять при максимальному опорі R1 та R2 кнопками КП2 та КП1.

Природна характеристика знімається при відсутності додаткового опору R1 в колі якоря ДМ. Тому в процесі розгону двигуна необхідно шпунтувати опір R1. Для збільшення навантаження на валу ДМ необхідно зменшувати додатковий опір в колі якоря НМ почерговим вмиканням автоматичних вимикачів 1-6. При цьому струм у колі якоря НМ не повинен перевищувати 30А. Отримані дані заносяться до табл. 3.3. Після зняття характеристики зменшити навантаження на валу ДМ (вимкнути вимикачі 1-6).

Штучні характеристики знімаються аналогічним чином, лише з тією різницею що до кола якоря ДМ вводиться додатковий опір величиною 3, 6 та 11 Ом (перші дві секції опору R1 по 3 Ом, третя – 5 Ом, а четверта – 2,5 Ом залишається постійно ввімкненою до кола).

При знятті штучної характеристики (R1 = 11 Ом) досягти зупинки ДМ, а потім обертання її у протилежному напрямку, що відповідає режиму противмиканням ДМ.

6.2. Зняття характеристик у режимі динамічного гальмування

Для переводу двигуна до режиму динамічного гальмування з самозбудженням необхідно установити перемикач П1 до положення "ДГ" і ввімкнути контактори В або Н з таким розрахунком, щоб залишити незмінним, як у попередньому режимі, напрямок струму в обмотці збудження.

Обертання ДМ здійснюється навантажувальною машиною, швидкість якої регулюється змінним опором R2. Характеристики знімаються для двох значень додаткового опору R1 (6 та 11 Ом). Отримані дані заносяться до табл. 3.3.

Зняття характеристик динамічного гальмування з незалежним збудженням здійснюється аналогічно режиму з самозбудженням. Однак обмотка збудження ДМ в цьому випадку живиться від низьковольтного джерела постійної напруги 24В. Ввімкнення обмотки збудження здійснюється контактором Т. Характеристики знімаються при R1, яке дорівнює 6 та 11 Ом. Отримані дані заносяться до табл. 3.3.

6.3. Зняття характеристик при шунтуванні обмотки якоря. У цьому режимі якір ДМ шунтується опором $R_ш$ (рис. 3.1, г). Для цього перемикач П3 встановлюють в положення 1. При знятті характеристик у режимі двигуна та гальмування противмиканням навантажувальна машина вмикається зустрічно. Зменшуючи опір в колі якоря НМ, збільшують навантаження на валу ДМ та знімають низку точок характеристики режиму двигуна. Після зупинки та обертання двигуна в протилежному напрямку знімають ще декілька точок характеристики гальмування противмиканням. Після закінченні досліду встановити максимальне значення опору R2. Дані вимірювань заносяться до табл. 3.3. Характеристики знімаються при R1, яке дорівнює 6 та 11 Ом.

Для зняття характеристики у режимі рекуперативного гальмування навантажувальна машина вмикається згідно. Зменшуючи опір R2 в колі якоря НМ, збільшують швидкість обертання установки. При ньому ДМ переходить до режиму рекуперативного гальмування. Дані вимірювань заносяться до табл. 3.3. Характеристики знімаються при R1, яке дорівнює 6 та 11 Ом.

Таблиця 3.3

Дані вимірювання та розрахунків

Режим роботи	Додатковий опір	n, об/хв	I, A	M, Нм

Примітка: Під таблицею залишити місце для записи 50 вимірювань.

7. Обробка експериментальних даних

7.1. За даними табл. 3.3 будується е.м.х. n= f(I) для усіх режимів роботи.

7.2. Використовуючи залежність M = f(I) (рис. 3.2), визначають значення моменту M і заносять до табл. 3.3. Дія усіх режимів роботи будуються механічні характеристики n = f(I).

8. Зміст звіту

8.1. Назва та номер роботи.

8.2. Мета та програма роботи.

8.3. Принципова схема установки (рис. 3.4)

8.4. Таблиця експериментальних даних та розрахунків.

8.5. Експериментальні електромеханічні n = f(I) та механічні n=f(M) характеристики двигуна.

8.6. Розрахункові е.м.х. відповідно п.п. 3.1 - 3.5.

8.7. Аналіз причин розбіжностей розрахункових та експериментальних м.х. та е.м.х.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

1. Найменування роботи

Характеристики трифазного асинхронного двигуни с фазним ротором

2. Мета роботи

Вивчення природних та штучних механічних n = f_1(M) і електромеханічних n = f_2(I) характеристик трифазного асинхронного двигуна у режимі двигуна та гальмівних режимах

3.Програма роботи

3.1. Ознайомитись з лабораторною установкою.

3.2. З’ясувати притіни дії навантажувального агрегату.

3.3. Розрахувати та побудувати природну та штучну механічні характеристики при заданому додатковому опорі в режимі двигуна, в режимі рекуперативного гальмування і гальмування противмиканням.

3.4. Розрахувати та побудувати при заданому додатковому опорі механічні характеристики в режимі динамічного гальмування.

3.5. Отримати дані для побудови природних механічної та електромеханічної характеристик в режимі двигуна та в рекуперативному режимі.

3.6. Отримати дані для побудови штучних (реостатних) механічних та електромеханічних характеристик в режимі двигуна і рекуперативному режимі при додаткових опорах Rд в фазі ротора 3, 6, 9 Ом в режимі противмикання при $R_д$ = 9 Ом.

3.7. Отримати дані для побудови природної та штучних (при Rд 3, 6, 9 Ом) механічних характеристик у режимі динамічного гальмування.

3.8. За даними досліду та розрахунків побудувати механічні n = f_1(M) та електромеханічні n = f_2(I_1) характеристики в режимі двигуна та гальмівному режимі.

3.9. Проаналізувати розрахункові і дослідні результати.

4. Теоретична частина

Рівняння статичної механічної характеристики асинхронного двигуна, тобто залежність від ковзання або швидкості моменту двигуна має вигляд:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 S\left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right]}$$

де M – електромагнітний момент, який розвішає двигун, Нм; U_1 – фазна напруга статора, В; R_2' – приведений активний опір фази ротора, Ом; R_1 – активний опір фази статора, Ом; X_1 – реактивний опір фази статора, Ом; X_2' – приведений реактивний опір фази ротора, Ом; ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна, рад/с; S – ковзання асинхронного двигуна.

Із рівняння (4.1) видно, що електромагнітний момент асинхронного двигуна є складною функцією ковзання.

Аналіз функції (4.1) показує, що вона має два максимуму: перший – в генераторному режимі, другий – в режимі двигуна (при значних опорах роторного кола максимум моменту може виявитись в режимі гальмування противмиканням).

Критичне ковзання, котре відповідає екстремуму, може бути визначене шляхом диференціювання (4.1) за S та наступним прирівнюванням нулю цієї похідної:

$$S_k = \pm\frac{R_2^1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2^1)^2}}$$

Підставляючи значення S_k в (4.1), знаходимо вираз для критичного (максимального) моменту

$$\text{M} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0\left(R_1 \pm \sqrt{\left(X_1 + X_2^1\right)^2 + R_1^2}\right)} \qquad (4.3)$$

Знак "+" в рівняннях (4.2) та (4.3) відноситься до режиму двигуна (або гальмування противмиканням), знак "-" – до генераторного (рекуперативного).

Як наслідок з (4.3), максимальний момент не залежить від опору в колі ротора. Із збільшенням цього опору збільшується ковзання при даному моменті. Змінюючи активний опір у колі ротора, можна отримати різні механічні характеристики асинхронного двигуна.

З урахуванням (4.2) та (4.3) рівняння (4.1) після перетворювань може бути зображено у вигляді уточненої формули Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1+\alpha S_k)}{\frac{S}{S_k}+\frac{S_k}{S}+2\alpha S_k} \quad (4.4)$$

де $\alpha = R_1/R'_2$

Якщо у рівнянні (4.4) знехтувати активним опором статора, отримуємо спрощену формулу Клосса, більш зручну для розрахунків

$$M = \frac{2M_K}{S/S_K + S_K/S} \quad (4.5)$$

Для асинхронного двигуна можливі три режими електричного гальмування: рекуперативне, противмиканням, динамічне.

Рівняння механічних характеристик у режимах рекуперативному та при противмиканні мають той же вигляд, що і для режиму двигуна.

Рівняння механічної характеристики в режимі динамічного гальмування за своєю структурою аналогічне рівнянню механічної характеристики асинхронного двигуна в режимі двигуна

$$M = \frac{2M_{k\text{т}}}{\frac{S}{S_{k\text{т}}}+\frac{S_{k\text{т}}}{S}} \quad (4.6)$$

де $M_{k\text{т}}$ – максимальний момент в режимі динамічного гальмування; $S_{k\text{т}}=R'_2/(X'_2+X\mu)$ критичне ковзання, $X\mu$ – індуктивний опір контуру намагнічування, $S=\omega/\omega_0$ – ковзання в режимі динамічного гальмування.

Для асинхронною двигуна є два типи електромеханічних (швидкісних) характеристик $I_1 = f_1(S)$ та $I'_2 = f_2(S)$, тобто залежності від ковзання або від швидкості можна представити у вигляді:

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2(1 + 2\alpha\sqrt{2\alpha^2}S_k^2)}\ , \quad (4.7)$$

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1+\frac{R'_2}{S}\right)^2+(X_1+X'_2)^2}} \quad (4.8)$$

де $I\mu$ – фазний струм намагнічування, $\alpha = I\mu/I'_{\text{гр}}$ – граничне значення струму ротора при $S = \omega$.

При дослідженні механічних, та електромеханічних характеристик двигунів в окремих випадках, наприклад, при проведені лабораторних робіт зручно користуватися несистемною одиницею швидкості п, об/хв.

Залежність між швидкістю n та ковзанням S визначається в режимі двигуна та гальмівних режимах, окрім динамічного, рівнянням

$$n = n_0(1 - S), \quad (4.9)$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.

Приблизний вигляд механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі двигуна та гальмівних режимах наведено на рис. 4.1 та 4.2.

5. Опис лабораторної установки

Принципова схема лабораторної установки для дослідження механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором зображена на рис. 4.3. Керування установкою здійснюється за допомогою апаратів та приладів, назва та призначення яких наведені у табл. 4.1.

У лабораторній установці є два двомашиних агрегати, кожний з котрих складається з механічноз'єднаних машин змінного та постійного струму АД1 та ДП1, АД2 та ДП2.

Номінальні дані двигуна: $P_н$ = 2,2 кВт; $U_н$ = 380/220 В; $I_{ІН}$ = 7,2/12,4 А; $n_н$= 885 об/хв; r_2 = 3,7 Ом; $M_{КР}/M_н$= 2,3; x_1 = 2,47 Ом; $E_{РН}$ = 135 В; $I_н$ = 12,8 А; r_2 = 0,61 Ом; x_2 = 0,5 Ом; K_E = 2,6; x_μ =41 Ом.

Струм в якірному колі двигунів ДП1 та ДП2 пропорційний алгебраїчній сумі ЕРС $I_я = (E_1 + E_2)/R$, де E_1 та E_2 - ЕРС відповідно машин ДНІ та ДП2; R - активний опір якірного кола.

Змінюючи за величиною та знаком одну або обидві ЕРС, можна змінювати величину та знак струму в якірному колі. Таким чином, можливе переведення досліджуваного двигуна АД1 у будь-який режим роботи.

Найбільш просто це здійснюється регулюванням збудження двигунів ДП1 та ДП2 за допомогою потенціометрів R2 та R3. Для зміни напрямку струму збудження служить перемикач П4.

Розглянемо роботу схеми в усіх режимах.

При дослідженні характеристик асинхронного двигуна АД1 у режимі двигуна перемикач П4 знаходиться у положенні "0". ЕРС машин постійного струму ДП1 та ДП2 при цьому спрямовані зустрічно, а струм якірного кола $I_я=(E_1-E_2)/R$.

При повному збуджені обох машин ЕРС рівні та $I_Я$ = 0 (амперметр А6). Досліджуваний двигун працює у режимі, близькому до ідеального холостого ходу. Ослаблюючи струм збудження ДП2, збільшують навантаження на валу АД2 та отримують дані для побудови природних та реостатних механічних, та електромеханічних характеристик.

АД1 та ДП2 працюють у режимі двигуна, ДП1 та АД2 – в генераторному режимі.

Для дослідження характеристик у рекуперативному режимі швидкість ротора повинна бути вище синхронної. При послаблені поля ДП1 E_1 стане менше E_2 (перемикач П4 – у положенні "0") та струм $I_я$ змінює знак.

АД1 та ДП2 працюють в генераторному режимі, ДП1 та АД2 – у режимі двигуна.

Ідеальний холостий хід (граничний режим) має місце, коли амперметр А8 показує нуль.

При досліджуванні характеристик у режимі противмикання перемикач П4 знаходиться у положенні "1". ЕРС ДП1 та ДП2 при цьому спрямовані згідно, а струм якірного кола

$$I_Я = \frac{E_1 + E_2}{R}.$$

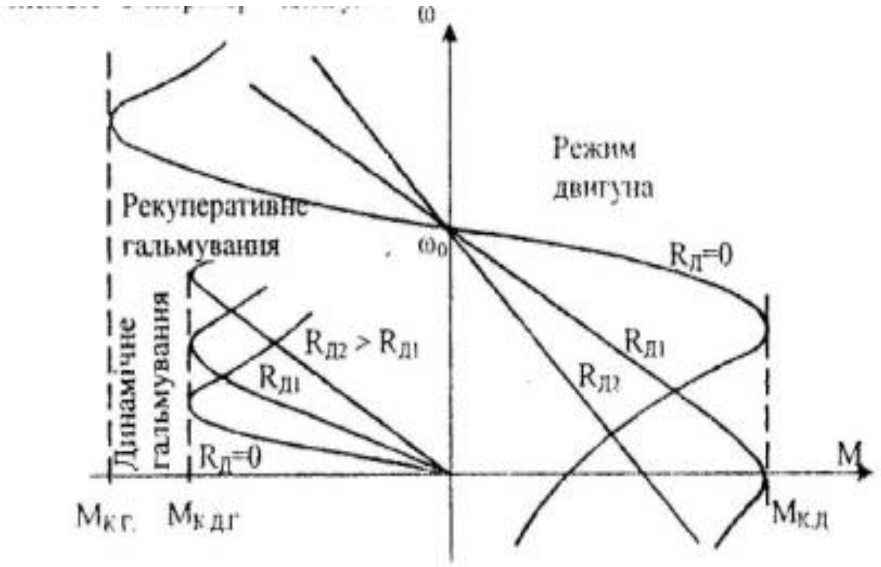

Рис.4.1. Механічні характеристики асинхронного двигуна

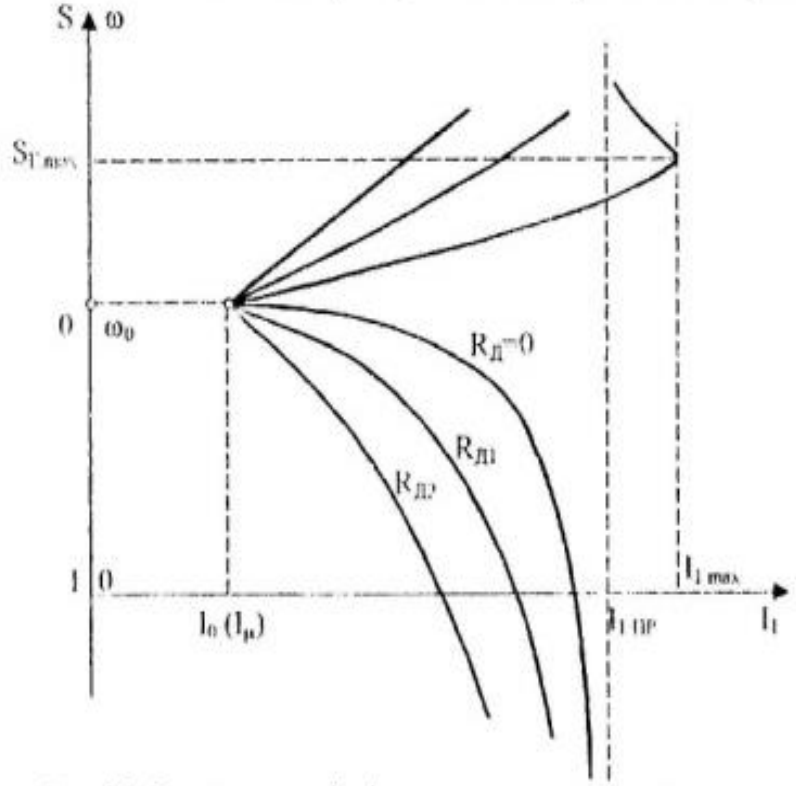

Рис 4.2. Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна

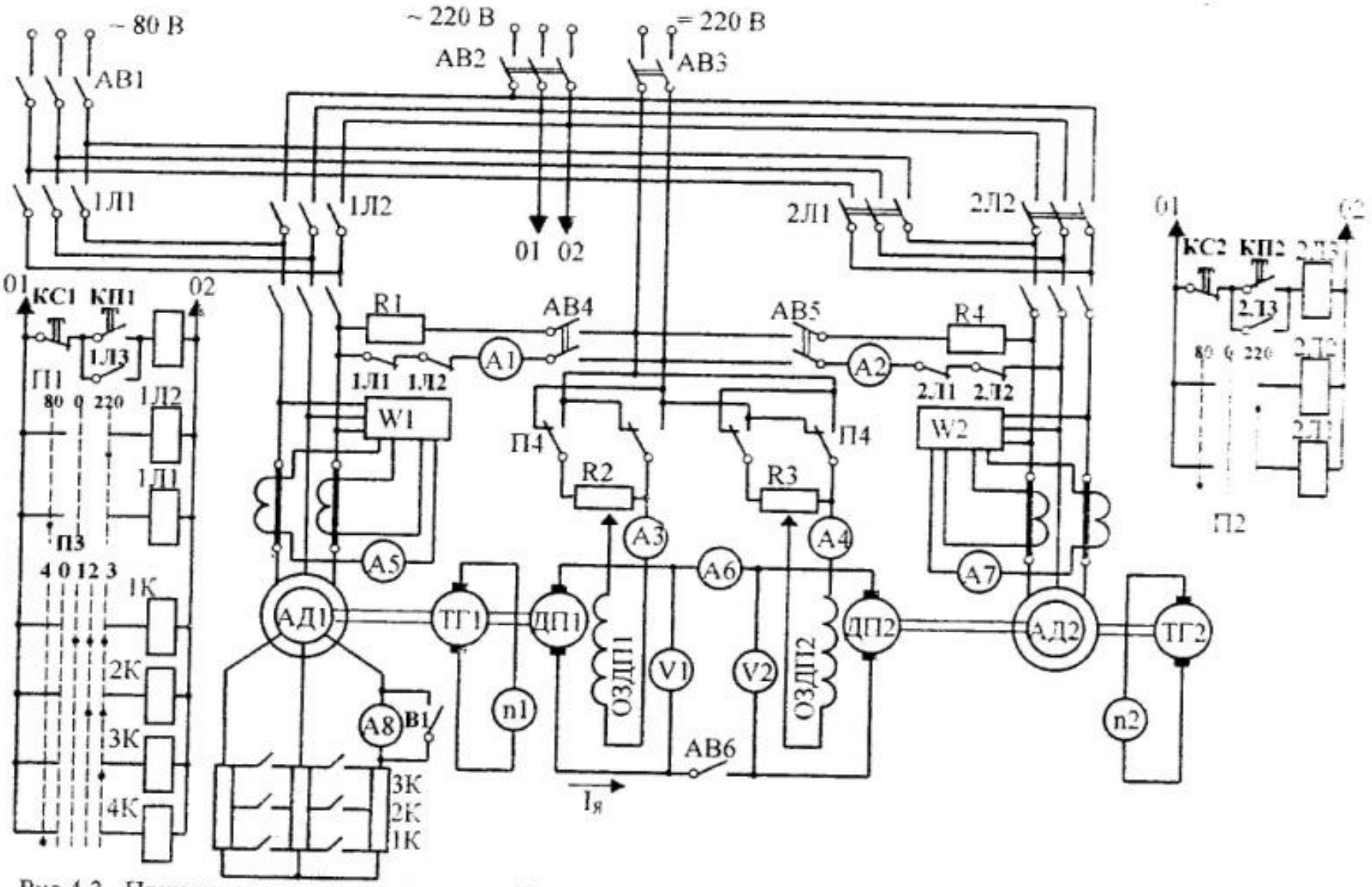

Рис.4.3. Принципова електрична схема лабороторної установки

Таблиця 4.1.

Апарати та прилади лабораторної установки

Позначення	Назва	Призначення
1	2	3
AB1	Триполюсний автоматичний вимикач	Підключення установки до мережі змінного струму напругою 80 В
AB2	Теж	Підключення установки до мережі змінного струму напругою 220 В
AB3	Два однополюсних автоматичних вимикача	Підключення установки до мережі змінного струму напругою 220 В
AB4	Теж	Підключення статора АД1 до мережі постійного струму у режимі динамічного гальмування
AB5	Теж	Підключення статора АД2 до мережі постійного струму у режимі динамічного гальмування
AB6	Однополюсний автоматичний вимикач	Замкнення якірного кола двигунів постійного струму ДП1 та ДП2
B1	Вимикач	Шунтування амперметра A8 при пуску АД1
П1	Триполюсний універсальний перемикач	Керування контакторами 1Л1, 1Л2 вибору напруги живлення АД1
П2	Теж	Керування контакторами 2Л1, 2Л2 вибору напруги живлення АД2
П3	П'ятипозиційний перемикач	Вибір полярності струму збудження машин постійного струму ДП1 та ДП2
A1, A2	Амперметри постійного струму	Вимірювання струму збудження статора двигунів АД1 та АД2 в режимі динамічного гальмування
A3, A4	Амперметри постійного струму	Вимірювання струму збудження двигунів ДП1 та ДП2
A5	Амперметри змінного струму	Вимірювання струму статора двигуна АД1
A6	Амперметр постійного струму	Вимірювання струму якірного кола двигунів ДП1, ДП2
A7	Амперметри змінного струму	Вимірювання струму статора двигуна АД2

1	2	3
A8	Амперметри змінного струму	Індикація режиму ідеального холостого ходу двигуна АД1
W1, W2	Ватметри трифазної активної потужності	Вимірювання потужності електричної енергії, споживаної (відданої двигунами АД1, АД2)
n1, n2	Вольтметри постійного струму	Вимірювання швидкості двомашинних агрегатів
V1, V2	Теж	Вимірювання напруги на якорях ДП1, ДП2
R1, R4	Опори	Додаткові сталі опори
R2, R3	Теж	Потенціометри для регулювання струму збудження ДП1, ДП2
КП1, КС1	Кнопки	Вмикання та вимикання статора АД1 від мережі змінного струму
КП2, КС2	Теж	Вмикання та вимикання статора АД2 від мережі змінного струму

Збільшуючи струм збудження ДП2 від нуля до номінального, отримують дані для побудови штучних механічних та електромеханічних характеристик (Rд = 9 Ом).

АД2 та ДП1 працюють у режимі двигуна, ДП2 – в генераторному режимі.

Для дослідження механічних характеристик у режимі динамічного гальмування статор АД1 відключають від мережі змінного струму та збуджують постійним струмом, а ротор обертають машиною ДП1 .

АД1 та ДП2 працюють в генераторному режимі. ДП1 та АД2 - у режимі двигуна.

При виконанні роботи необхідно дотримуватись таких вимог:

- пуск досліджуваного двигуна робити тільки при нульовому положенні перемикача П3,

- переведення перемикача П4 з одного положення в інше здійснювати тільки при відсутності збудження ДП2;

- перед вмиканням вимикача АВ6 напруги машин ДП1 та ДП2 повинні бути одного знаку (перемикач П4 в положенні "0") та відрізнятися за абсолютною величиною не більше ніж на 10 В;

- припустиме навантаження асинхронних двигунів АД1 та АД2 у межах шкали кіловатметрів W1 та W2;

- припустима швидкість не більш за 1500 об/хв;

- під час пуску двигуна АД1 амперметр А8 має бути зашунтованим вимикачем В1;

- зупинка агрегатів повинна здійснюватися у такій послідовності: зменшити до нуля струми збудження ДПІ та ДП2; розімкнути якірне коло вимикачем АВ6; зупинивши двигуни АД1 та АД2, вимкнути усі автомати, перевести перемикачі до нульового положення.

6. Порядок виконання роботи

6.1. Підготовка схеми.

6.1.1. Переконалися, що всі автоматичні вимикачі (АВ1 - АВ6) вимкнені, амперметр А8 зашунтований, а перемикачі П1 - П4 знаходяться у нульовому положенні.

6.1.2. Ввімкнути вимикачі АВ2, АВ3.

6.1.3. Перемикачі П1 та П2 перевести до положення "220".

6.1.4. Запустити асинхронні двигуни АД1 та АД2 за допомогою кнопок КП1 та КП2.

6.1.5. Вивести з роторною кола досліджуваного двигуна додаткові опори (перевести перемикач П3 до положення 3).

6.1.6. Перевести перемикач П4 до положення "О" та за допомогою потенціометрів К2 та К3 встановити напругу на якорях обох машин Uя = 200В.

6.1.7. Замкнути якірне коло вимикачем АВ6.

6.2. Зняття механічних та електромеханічних характеристик у режимі двигуна.

Знімаються природні ($R_д$ = 0 - перемикач П3 до положення "3") та штучні (Rд дорівнює 3, 6 та 9 Ом - перемикач у положеннях "2", "1", "0") характеристики.

Зміна навантаження на валу досліджуваного двигуна АД1 здійснюється послабленням поля ДП2. Отримати 5-6 точок для кожної характеристики. Повернути R3 до вихідного положення.

Дані вимірювань занести до табл. 4.2.

6.3. Зняття механічних та електромеханічних характеристик у рекуперативному режимі.

Знімаються природні (Rд = 0) та штучні (при Rд 3, 6 та 9 Ом) характеристики.

Перемикач П4 - в положенні "0".

Зміна навантаження здійснюється послабленням поля ДП1. Початок ідеального холостого ходу фіксувати за амперметром А8. Після досліду перевести R2 до вихідного положення.

Дані вимірювань занести до табл. 4.2.

6.4. Зняття механічної та електромеханічної характеристик в режимі противмикання.

Знімається штучна характеристики при Rд = 9 Ом.

Зміна навантаження здійснюється спочатку послабленням струму збудження ДП2 до нуля, а потім перемикач П4 встановлюється до положення "1" та збільшенням струму ДП2 до номінального.

Дані вимірювань занести до табл. 4.2. Повернути установку до вихідного стану та вимкнути АВ6.

6.5. Зняття механічних характеристик у режимі динамічного гальмування.

Знімаються природні (Rд = 0) та штучні (при Rд 3, 6 та 9 Ом) характеристики.

6.5.1. Вимкнути АД від мережі та подати до статорного кола АД1 постійний струм.

6.5.2. Встановити номінальне збудження для ДП1 та нульове для ДП2.

6.5.3. Встановити перемикач П3 до положення "3".

6.5.4. Замкнути якірне коло вимикачем АВ6.

6.5.5. Збільшуючи збудження ДП2, отримати 5 - 6 точок механічної характеристики. Дані вимірювані, занести до табл. 4.3.

6.5.6. Знизити струм збудження ДП2 до нуля.

6.5.7. Перевести перемикач П3 до положення "2", "1", "О", повторити для кожного з них заміри.

6.5.8. Зупинити агрегати після вимірювань:

зменшити до нуля струми збудження ДП2 та ДП1; розімкнути якірне коло вимикачем АВ6; зупинити АД2; вимкнути автоматичні вимикачі АВ2, АН3, АВ4; перевести перемикачі до нульових положень.

7. Обробка експериментальних даних

Електромагнітний момент знаходиться за формулою

$$M = \frac{P_E}{\omega_0} = \frac{P_1 - \Delta P_1}{\omega_0} \qquad (4.10)$$

де P_E – електромагнітна потужність, двигуна, Вт; P_1 потужність, що споживається з мережі, Вт, $\Delta P_1 = \Delta P_{м1} + \Delta P_{с1}$ – втрати у статорі, Вт,

$\Delta P_{м1} = 3I_{1ф}^2 r_1 = \sqrt{3} I_1^2 r_1$ – витрати в міді статора, Вт, r_1 = 3,7 Ом – опір фази обмотки статора $\Delta P_{с1}$ – витрати в сталі статора, Вт; $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$ – швидкість поля статора, рад/с.

Витрати в сталі статора визначаються за даними експерименту холостого ходу

$$\Delta P_{с1} = P_{1,0} - \sqrt{3} I_{1,0}^2 r_1 \text{ Вт},$$

де $P_{1,0}$ споживана потужність при ідеальному холостому ході, Вт; $I_{1,0}$ – стум ідеального холостого ходу,А.

Електромагнітний момент у режимі динамічного гальмування приблизно може бути визначено побічним способом за параметрами допоміжної машини постійного струму ДП1

$$M = к_м I_я$$

де $к_м$ = 1,8 Нм/А – коефіцієнт пропорційності поміж струмом якоря ДП1 та моментом па ваду АД1.

Результати розрахунків занести до табл. 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.2

Дані експериментів та розрахунків при дослідженні механічних та електромеханічних характеристик у режимі двигуна, рекуперативному та противмиканням

Режим	Rд	Виміряно					Розраховано			
		n	P		I_1		$\Delta P_{мI}$	ΔP_1	P_E	M
	Ом	об/хв	діл.	Вт	діл.	А	Вт	Вт	Вт	Нм

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 50 вимірювань.

Таблиця 4.3

Дані досліджень та розрахунків при дослідженні механічних характеристик у режимі динамічного гальмування

$R_д$	Виміряно		Розраховано
	n_1	$I_я$	M
Ом	об/хв	А	Нм

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 20 вимірювань.

8. Зміст звіту

8.1. Найменування, мета та програма роботи.

8.2. Схема лабораторної установки (рис. 4.3).

8.3. Таблиці експериментальних та розрахункових даних (табл. 4.2, 4.3).

8.4. Механічні характеристики за даними табл. 4.2 - 4.3 у системі координат n-M.

8.5. Електромеханічні .характеристики за даними табл. 4.2 у системі координат n-M.

8.6. Розрахунки та графіки механічних характеристик згідно п.п. 3.3-3.4.

8.7. Аналіз причин розходження розрахункових та експериментальних механічних характеристик.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

1. Найменування роботи

Дослідження електропривода за системою генератор - двигун (Г - Д)

2. Мста роботи

Вивчити роботу електропривода, спосіб регулювання швидкості, регулювальні та механічні характеристики електропривода в системі Г- Д.

3. Програма роботи

3.1. Застити основні теоретичні положення досліджуваної системи.

3.2. Ознайомитись з описом, електричними машинами та апаратами лабораторної установки.

3.3. Підготувати установку до роботи.

3.4. Отримати дані для побудови характеристики холостого ходу генератора $E_г = f(I_{з.г})$

3.5. Отримати дані дчя побудови регулювальної характеристики системи $n_{дв}=f(I_{з.г})$

3.6. Отримати дані для побудови механічних характеристик двигуна $n=f(M)$ у режимі двигуна та генераторному режимі з рекуперацією енергії до мережі.

3.7. Побудувати за результатами дослідів указані характеристики та дати зрівнювальний аналіз отриманих результатні.

4. Теоретичні положення

Для отримання плавного регулювання частоти обертання двигуна постійного струму в широкому діапазоні застосовується система Г-Д, принципова схема якої наведена на рис. 5.1.

У цій системі в якості регулюємого джерела постійного струму використовується генератор незалежного збудження Г, який приводиться до руху приводним асинхронним двигуном ПД1. Якір двигуна, швидкість якого необхідно регулювати, вмикається безпосередньо до затискачів генератора без пускових та регулювальних опорів.

Регулюючи, за допомогою потенціометра R2, струм в обмотці збудження генератора ОЗГ, можна плавно змінювати ЕРС генератора та, як наслідок, швидкість двигуна.

Рівняння електричної рівноваги у якірному колі системи

$$E_г = I R_я + E_{дв} = I R_я + кФ\omega \qquad (5.1)$$

де $E_г$ – ЕРС генератора; I – струм якірного кола; $R_я$ – сумарний опір якірного кола; к – конструктивний коефіцієнт двигуна; Ф – магнітний потік двигуна; ω – кутова швидкість двигуна.

З (5.1) можна отримати рівняння електромеханічної (швидкісної) характеристики двигуна у системі Г - Д.

$$\omega = \frac{E_г}{кФ} - \frac{IR_я}{кФ}. \qquad (5.2)$$

Враховуючи, що момент двигуна М = кФІ, отримуємо з (5.2) рівняння механічної характеристики двигуна

$$\omega = \frac{E_г}{кФ} - \frac{MR_я}{(кФ)^2}. \qquad (5.3)$$

Рівняння (5.3) можна зобразити як

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \qquad (5.4)$$

де $\omega_0 = E_г/кФ$ – швидкість ідеального холостого ходу; $\Delta\omega$ – падіння швидкості, обумовлене навантаженням двигуна.

Кожному значенню $E_г$ відповідач своя швидкість ідеального холостого ходу. Тому при зміні $E_г$ механічні характеристики двигуна являють собою прямі лінії, паралельні одна одній, нахил яких визначається другим членом рівняння (5.3).

Система Г-Д дозволяє просто здійснювати електричне гальмування з віддачею енергії до мережі. Якщо при заданій швидкості обертання зменшити струм збудження генератора настільки, що $E_г$ стане менш ніж Ед, то струм в колі якоря

$$I = \frac{E_г - E_{дв}}{R_я}$$

змінить напрямок та двигун перейде у генераторний режим з віддачею енергії до мережі змінного струму. Механічні характеристики в режимі генераторного гальмування є продовженням відповідних характеристик режиму двигуна в другий квадрат.

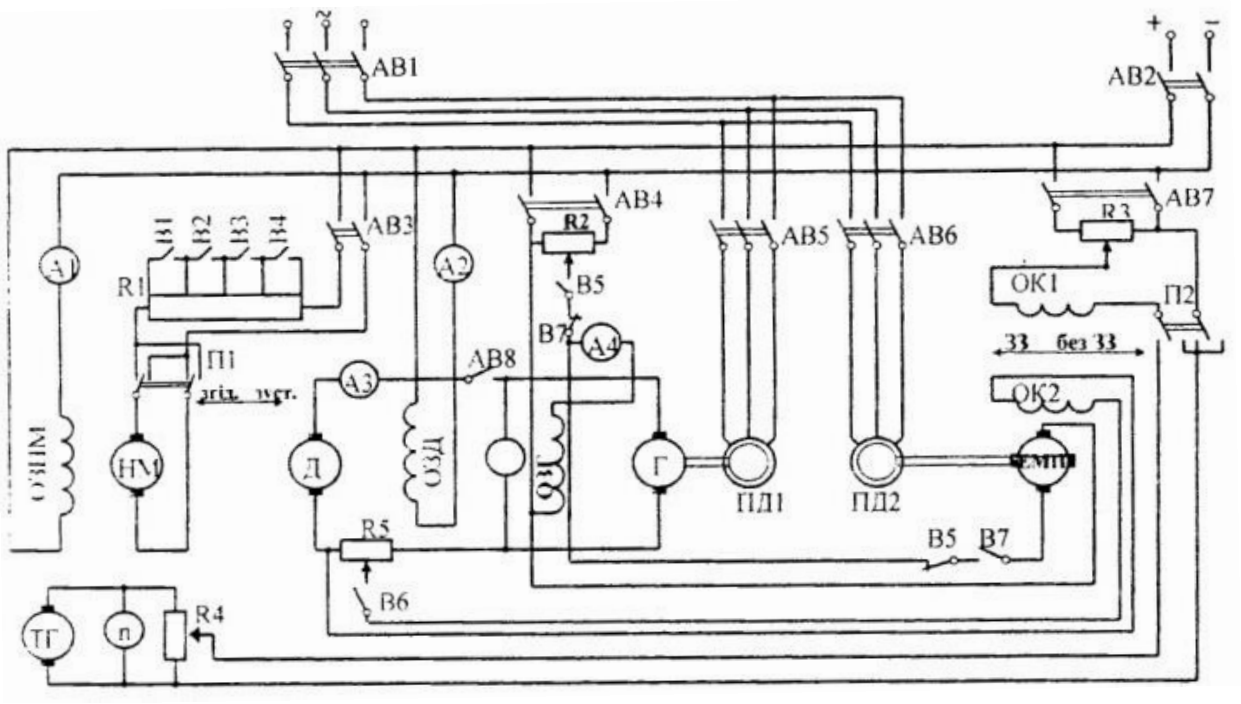

Рис. 5.1. Схема лабораторної установки

5. Порядок виконання роботи

5.1. Підготувати установку до роботи та провести пробний пуск установки за системою Г - Д.

Для чого необхідно подати живлення до лабораторного стенду та на регулювальний потенціометр R2. При мінімальному струмі в обмотці збудження генератора ввімкнути приводний двигун генератора. Ввімкнути В5 та вимкнути В7. Замкнути якірне коло двигуна та плавно збільшуючи струм в обмотці збудження генератора переконатися, що швидкість двигуна зростає.

5.2. Отримати дані для побудови залежності $E_г = f(I_{з.г})$

Виміряти залишкову ЕРС генератора при $I_{з.г} = 0$. Повільно збільшуючи струм збудження генератора від 0 до 320 мА з інтервалом 40 мА, виміряти вольтметром ЕРС генератора $E_г$, потім зменшуючи струм збудження генератора до нуля виміряти $E_г$. Результати занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Характеристика холостого ходу

$E_г$, В									
$I_{з.г}$, мА									

5.3. Отримання даних для побудови залежності $n = f(I_{з.г})$

При $I_{з.г} = 0$ замкнути вимикачем АВ8 якірне коло двигуна і, збільшуючи струм збудження генератора від 0 до 320 мА з інтервалом 40 мА, виміряти частоту обертання двигуна. Результати вимірювань занести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Регулювальна характеристика

n, об/хв									
Ізг, мА									

5.4. Отримання даних для побудови механічних характеристик двигуна при $U_г$ = 60, 80 та 100 В.

5.4.1. За допомогою R2 встановити за вольтметром V напругу генератора $U_г$=60 В.

5.4.2. Занести до табл. 5.3 значення струму якоря I (амперметр А3) та частоти обертання n.

5.4.3. Для отримання наступних точок залежності n = *f* (I) необхідно навантажити двигун, ввімкнувши при максимальному опорі RI навантажувальну машину зустрічне, (встановити перемикач ПІ до положення "зустрічно" та ввімкнути АВ3).

5.4.4. Занести до табл. 5.3 значення струму якоря I та частоти обертання n

5.4.5. Послідовно вмикаючи В1 - В4, зняти ще декілька точок залежності n= *f*(I). Струм якоря не повинен перепитувати 16 А.

5.4.6. Розвантажити досліджуваний двигун, вимкнувши АВ3, а потім В1 - В4.

Примітка. Такої черги вимикання навантажувальної машини обов'язково додержуватися в усіх послідуючих дослідах

Таблиця 5.3

Експериментальні та розрахункові дані для побудови механічних характеристик

Напруга генератора	Режим двигуна				Ідеальний холостий хід, $I_я$ = 0 U_0, n_0	Режим генератора			
	№№ ш	I	n	M		№№ ш	I	n	M
60 80 100	1 . . 15					1 . . 15			

5.4.7. Не змінюючи напруги генератора, перевести двигун до генераторного режиму, ввімкнувши навантажувальну машину згідно. Для цього необхідно при вимкнених вимикачах АВ та В1-В4 встановити перемикач П1 в положення "згідно" та ввімкнути АВ3.

5.4.8. Послідовно шунтуючи R1 за допомогою В1-В4 перевести двигун до режиму генератора і зняти декілька точок залежності n = *f*(I). Ознакою режиму генератора є зміна напрямку струму якоря.

5.4.9. При переході двигуна до генераторного режиму зафіксувати швидкість ідеального холостого ходу n_0 та напругу генератора n_0, відповідну цій швидкості. Отримані залежності занести до табл. 5.3.

5.4.10. Після зняття даних вимкнути АВ3, а потім В1-В4.

5.4.11. Встановити за допомогою R2 напругу генератора 80 В, а потім 100 В та повторити досліди за п.п. 5.4.2 - 5.4. 10.

6. Обробка експериментальних даних

6.1. За даними табл. 5.1 та 5.2 побудувати залежності $E_{зг} = f(I_{зг})$.та $n = f(I_{зг})$.

6.2. Побудувати механічні характеристики двигуна $n = f(M)$ для трьох значень напруги генератора. Для цього необхідно розрахувати електромагнітний момент, що розвиває двигун

$$M = КФI , \tag{6.4}$$

Де

$$кФ = \frac{U_0}{\omega_0} = \frac{30U_0}{\pi n_0} \approx \frac{U_0}{n_0} \tag{6.5}$$

6.3. Визначити діапазон регулювання швидкості в даній лабораторній установці з розімкненою системою керування

$$Д = \frac{n = ƒ(Iзг).}{n_{мин}} = \frac{n_{макс}}{\Delta n_н} = \frac{n_{макс} кФ}{9.55 I_н R_я} \tag{6.6}$$

$n = f(I_{зг})$ - частота обертання двигуна при $I = I_н$ на характеристиці двигуна при $U_г = 100$ В; $Rд = Rя.г + Rя.д = 2{,}0$ Ом - опір якірного кола; $\Delta n_н$ - падіння швидкості при I = Iн.

7. Зміст звіту

7.1. Назва та номер роботи.

7.2. Мета та програма роботи.

7.3. Схема установки (рис. 5.1).

7.4. Таблиці з записами результатів вимірювань та розрахунків.

7.5. Залежності $E_{зг}=f(I_{зг})$, $n=f(M)$ та електромеханічні характеристики двигуна.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

1. Найменування роботи

Дослідження системи Г -Д с ЕМП при наявності зворотних зв’язків

2. Мета роботи

Вивчення принципу дії та призначення різноманітних зворотних зв’язків, отримання даних для побудови та аналізу електромеханічних характеристик $n= f(\omega)$ системи Г-Д з різноманітними зворотними зв'язками, сумованими за допомогою ЕМП.

3. Програма роботи

3.1. Засвоїти основні теоретичні положення досліджуваної системи.

3.2. Ознайомитись з описом, електричними машинами та апаратами лабораторної установки.

3.3. Підготувати установку до роботи та зробити пробний пуск системи.

3.4. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при відсутності зворотних зв'язків.

3.5. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при наявності від'ємного зворотного зв'язку за струмом якоря.

3.6. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при наявності додатного зворотного зв'язку за струмом якоря.

3.7. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при наявності від'ємних зв'язків за струмом якоря та швидкості.

3.8. Побудувати за результатами дослідів електромеханічні характеристики двигуна та дати зрівнювальний аналіз.

4. Теоретична частина

Для розширення діапазону регулювання швидкості та підвищення точності регулювання застосовують замкнені системи автоматичного регулювання з різноманітними зворотними зв'язками. Характерною особливістю замкнених систем є те, що за допомогою різноманітних датчиків вимірюють дійсне значення регулюємої величини та роблять порівняним з заданим значенням. Різниця поміж ними сигналами поступає на вхід підсилювача (в лабораторній установці у якості підсилювача використовується електромашиний підсилювач ЕМП). Вихід підсилювача впливає на обмотку збудження генератора та підтримує регулюєму величину на заданому рінні (див. рис. 5.1).

Розглянемо принцип дії від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю двигуна. Припустимо, що навантаження на валу двигуна збільшується. При цьому швидкість двигуна зменшується Напруга тахогенератора ТГ, який знаходиться на одному малу з двигуном, також зменшується. Як наслідок підсумкова напруга на обмотці керування ОК2 електромашиного підсилювача, яка знаходиться як річниця напруг, завдання та тахогенератора, збільшується. Це призводить до збільшення струму збудження та напруги генератора, а як наслідок, і швидкості двигуна. Таким чином зворотній зв'язок за швидкістю автоматично компенсує падіння швидкості двигуна, яке було викликане збільшенням навантаження.

Для здійснення додаткового зворотного зв'язку за струмом якоря на вхід ЕМП (обмотка керування ОК1) подасться задаюча напруга та напруга, пропорційна струму якоря (обмотка керування ОК2). Полярність напруг підбирається таким чином, що ці сигнали підсумовуються на вході підсилювача.

При збільшенні струму якоря результуючий сигнал на вході ЕМП зростає. Це призводить до збільшення напруги генератора та швидкості двигуна. Відповідним підбором параметрів зворотного зв'язку можна отримати абсолютно жорстку механічну характеристику двигуна, коли л зростом навантаження швидкість двигуна залишається незмінною.

Робота системи Г-Д зі зворотним зв'язком описується таким рівнянням:

Підсумкова напруга на вході ЕМП:

$$U_{хв} = U_{завд} - U_{зз} = U_{завд} - k_{тг}\omega, \qquad (6.1)$$

де $U_{завд}, U_{зз}$- завдаюча напруга та напруга зворотного зв'язку;

$к_{тг}$ - коефіцієнт передачі (підсилення) тахогенератора.

Напруга па обмотці збудження генератора (на виході ЕМП):

$$U_{зг} = k_п U_{вх} = k_п\left(U_{завд} - k_{тг}\omega\right), \quad (6.2)$$

Напруга генератора:

$$E_г = к_г U_{зг} = к_г k_п\left(U_{завд} - k_{тг}\omega\right). \quad (6.3)$$

Рівняння електричної рівноваги в колі якоря:

$$E_г = E_д + IR_Я = кФ\,\omega + IR_Я\,. \quad (6.4)$$

З сумісного рішення (6.3) та (6.4) отримуємо

$$\omega = \frac{U_{завд} к_г k_п - IR_Я}{кФ(1+к_с)} \quad (6.5)$$

де Кс = КтгКпКг / кФ- загальний коефіцієнт підсилення системи.

З виразу (6.5) випливає, що в замкненій системі з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю падіння швидкості під навантаженням

$$\Delta\omega_{зам} = \frac{IR}{k\Phi(1+к_с)} = \frac{\Delta\omega_{роз}}{1+к_с}, \quad (6.6)$$

В 1+Кс раз менш, чим у розімкненій системі. Коли $Кс \to \infty$, то $\Delta\omega \to 0$.

5. Порядок виконання роботи

5.1. Підготовка устаткування до роботи та пробний пуск системи Г-Д.

5.1.1. Ввімкнути змінну напругу автоматичним вимикачем АВ1.

5.1.2. Ввімкнути постійну напругу автоматичним вимикачем АВ2.

5.1.3. Ввімкнути обмотку збудження генератора до якоря ЕМП зо допомогою вмикання В7 та вимикання В5.

5.1.4. Ввімкнути напругу керування вимикачем АВ7.

5.1.5. Встановити перемикач П2 до положення "без ЗЗ".

5.1.6. Ввімкнути привідний двигун генератора вимикачем АВ5.

5.1.7. Ввімкнути привідний двигун ЕМП вимикачем АВ6.

5.1.8. Замкнути якірне коло системи Г- Д вимикачем АВ8.

5.1.9. Повільно збільшуючи за допомогою R3 струм в обмотці керування (ОК1) ЕМП, встановити напругу генератора 100 В. Переконатися, що при цьому швидкість двигуна зростає та установка працює нормально.

5.2. Отримання даних для побудови електромеханічної характеристики без зворотних зв'язків.

5.2.1. При напрузі генератора, яка дорівнює 100 В. занести до табл. 6.1. значення струму якоря та швидкості двигуна.

5.2.2. Для зняття наступних[точок залежності n= f (I).необхідно навантажити двигун, ввімкнувши навантажувальну машину зустрічно. Для цього мри вимкненому АВ3 перемикач П1 встановити до положення "зустрічно".

5.2.3. При вимкнених ВІ-В4 ввімкнути АВ3 та провести другий вимір.

5.2.4. Шунтуючий додатковий опір R1 за допомогою В1-В4, зняти ще декілька точок залежності n = f(I). Якщо струм якоря досягає 14-16А,подальше шунтування R1 припинити

5.2.5. Вимкнувши навантажувальну матиму, для чого спочатку вимкнути АВ3, а потім В1-В4.

Примітка: Такого порядку підключення навантажувальної машини додержуватися у всіх наступних дослідах.

5.3. Отримання даних для побудови електромеханічної характеристики при наявності зворотного зв'язку за швидкістю двигуна

5.3.1. За допомогою R3 зменшити напругу генератора до нуля.

5.3.2. Встановити перемикач П2 до положення "ЗЗ". При цьому напруга тахогенератора вмикається зустрічне задаючій напрузі на обмотці керування ОК1.

5.3.3. Встановити движок R4 на максимум інтенсивності зворотного зв'язку за швидкістю.

5.3.4. Збільшити за допомогою R3 задаючу напругу та встановити напругу генератора 100 В.

5.3.5. Змінюючи навантаження двигуна згідно п.п. 4.2.1 - 4.2.4, провести необхідні вимірювання та дані занести до табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Результати вимірювань

№ з/п	ЗЗ відсутній		ЗЗ за швидкістю		Позитивний ЗЗ за струмом		ЗЗ за швидкістю та позитивна за струмом	
	I	n	I	n	I	n	I	n
1 ⋮ 6								

5.3.6. При закінчені досліду відключити спочатку АВ3, а потім В1-В4.

5.4. Отримання даних для побудови електромеханічної характеристики при наявності позитивного зворотного зв'язку за струмом якоря

5.4.1. Потенціометром r3 повільно зменшити напругу генератора до мінімуму.

5.4.2. Встановити перемикач П2 до положення “без ЗЗ”.

5.4.3. Ввімкнути тумблером В6 зворотній зв’язок за струмом якоря.

5.4.4. Встановити движок R5 до середнього положення.

5.4.5. Потенціометром R3 встановити напругу генератора 100 В.

5.4.6. Згідно п.п. 4.2.1 - 4.2.4 провести необхідні вимірювання та дані занести до табл. 6.1.

5.4.7. Після закінчення досліду вимкнувши АВ3, а потім В1-В4.

5.5. Отримання даних при одночасної дії двох зворотних зв'язків.

5.5.1. Потенціометром R3 повільно зменшити напругу генератора до мінімуму.

5.5.2. Встановити перемикач П2 до положення "ЗЗ".

5.5.3. За допомогою R3 встановити напругу генератора 100 В.

5.5.4. Згідно п.п. 4.2.1 - 4.2.4 провести необхідні вимірювання та дані занести до табл. 6.1.

5.5.5. Відключити АВ3, а потім В1-В4.

5.5.6. За допомогою R3 зменшити напругу генератора до мінімуму.

5.5.7. Вимкнувши вимикачем АВ8 якірне коло двигуна, а потім лабораторну установку.

6. Обробка експериментальних даних

6.1. За даними табл. 6.1. побудувати електромеханічні характеристики двигуна $n = f(I)$.

6.2. За методикою, яка приведена в лабораторній роботі №5, визначити можливий діапазон регулювання швидкості розімкненої системи та замкненій при наявності зворотних зв'язків за швидкістю та струму якоря.

7. Зміст звіту

7.1. Найменування, мета та програма роботи.

7.2. Схема лабораторної установки (рис. 5.1)

7.3. Таблиця 6.1. з результатами вимірювань.

7.4 Електромеханічні характеристики двигуна при наявності зворотних зв'язків, а також без них.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

1.Найменування роботи

Дослідженим характеристик вентильного електропривода
постійного струму

2.Мета роботи

Вивчення регулювальних властивостей тиристорного перетворювача та електромеханічних характерне гик вентильного електропривода постійного струму.

3.Програма роботи

3.1. Ознайомитись з лабораторною установкою, конструкцією тиристорного перетворювача з основними блоками системи керування.

3.2. Отримати дані для побудови залежності вихідної напруги (U_d) тиристорного перетворювача від напруги керування $U_{КЕР}$.

3.3. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при відсутності зворотного зв'язку за швидкістю для різних початкових значень вихідної напруги перетворювача.

3.4. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики двигуна при наявності зворотного зв'язку за швидкістю для різних початкових значень вихідної напруги перетворювача, які були прийняті в п.3.3.

3.5. Побудувати залежності $U_d = f/(U_{КЕР})$, $U_d = U_{d0}$ та $n = f(I)$.

3.6. Визначити діапазон регулювання швидкості при відсутності та наявності зворотного зв'язку за швидкістю.

4. Теоретична частина

Для повільного регулювання швидкості двигуна постійного струму широке застосування отримали керовані тиристорні перетворювачі, за допомогою яких

здійснюється не тільки випрямлення змінної напруги, але і регулювання вихідної напруги.

Принцип дії тиристорного перетворювача (ТП) полягає в тому, що тиристори виконують роль ключів, які пропускають струм у провідну частину періоду та розмикають коло в непровідну. Регулювання вихідної напруги тиристорного перетворювача здійснюється шляхом затримки моменту відкриття тиристорів до провідної частини періоду. Затримка моменту відкриття тиристорів характеризується кутом а і відраховується від точки природної комутації тиристорів.

Середнє значення випрямленої напруги тиристорного перетворювача визначається як

$$U_d = U_{d0} \cos\alpha \qquad (7.1)$$

де U_{d0} - максимальна величина випрямленої напруги при відсутності запізнення відкриття вентилів ($\alpha = 0$).

У режимі безперервних струмів умова електричної рівноваги у колі якоря:

$$U_{d0} \cos\alpha = E_д + 1R_Я + \Delta U_2 \qquad (7.2)$$

де $E_д = к\Phi\omega$ - ЕРС двигуна; ΔU_2 - падіння напруги в вентилі; I - струм якоря; Rя - сумарний опір якірного кола.

З (7.2) знаходимо вираз електромеханічної характеристики двигуна

$$\omega = \frac{U_{d0} cos\alpha - IR_Я - \Delta U_в}{к\Phi} \qquad (7.3)$$

Регулювання швидкості у розгляненій системі здійснюється шляхом зміни кута запізнення відкриття вентилів α. При зміни a від 0 до $\pi/2$ середнє: значення випрямленої напруги тиристорного перетворювача змінюється від максимального значення, яке дорівнює U_{d0}, до нуля. При цьому механічні характеристики зображають собою сім'ю характеристик паралельних одна одній прямих, нахил яких залежить від сумарного опору якірного кола.

Механічні характеристики двигуна незалежного збудження, що живиться від тиристорного перетворювача, схожі з характеристиками двигуна у системі Г-Д, але вони мають деяку різницю. Характеристики двигуна в системі Г-Д мають більший нахил (меншу жорсткість) в наслідок підвищеного падіння напруги у випрямлячі, яке обумовлене головним чином процесом комутації тиристорів. Окрім того, при переході від малих навантажень до режиму ідеального холостого ходу, має місце різке збільшення швидкості, оскільки при зниженні струму навантаження наступає режим переривчастих струмів Унаслідок чого збільшується вихідна напруга перетворювача та швидкість двигуна.

У наш час тиристорні перетворювачі випускаються у широкому діапазоні потужностей від одиниць до десятків тисяч кВт. Перетворювачі малої та середньої потужності звичайно ВИКОНУЮТЬСЯ за трифазною нульовою або мостовою схемами .Нульова схема простіша, має всього три вентилі забезпечує однонапівперіодний режим випрямлення. Вона застосовуються звичайно у малопотужних електроприводах металорізальних верстатів і деяких інших механізмів. Вмикається до мережі через трансформатор, оскільки потрібна нульова точка. Малопотужні тиристорні перетворювачі звичайно не мають. вимикачів навантаження. Для більш по-

тужних перетворювачів, як правило, застосовується трифазна мостова двонапівперіодна схема випрямляча, яка вмикається до промислової мережі 0,4 кВ автоматичним вимикачем через струмообмежувальні реактори. Вимикач навантаження також викопується у вигляді швидкісного автомата. Індуктивність струмообмежувального реактора вибирається таким чином, щоб під час спрацювання вимикача при короткому замкненні в колі випрямленої напруги струм, що протікає через тиристори, не встиг зрости до струму їх теплового пробою. Потужні тиристорні агрегат вмикаються до мережі 6 - 10 кВ через знижувальний трансформатор за допомогою оливного вимикача. Випрямляч при цьому має не один, а декілька мостів, з'єднаних паралельно та послідовно. Мости можуть вмикатися до трансформаторів, які мають різні групи з'єднання обмоток. Цим досягається збільшення еквівалентної фазності випрямляча та покращення гармонійного складу фазних струмів мережі. Двигун постійного струму вмикається за допомогою швидкодіючого вимикача. Зменшення пульсацій струму в якірному колі досягається послідовним вмиканням реактора з великою індуктивністю.

Передбачаються також і деякі інші види захисту. Плавкі запобіжники, що підключені послідовно з кожним тиристором, у разі пробою силового тиристора через перенапруження або перевантаження вимикають пошкоджений тиристор, чим вилучається режим міжфазного замкнення.

Сітковий захист, що діє на зрив імпульсів керування тиристорів, спрацьовує практично миттєво в разі, якщо фазні струмі перебільшують струм уставки захисту. При цьому всі тиристори зачиняються, напруга на виході випрямляча дорівнює нулю.

У тиристорних перетворювачах можливі такі перенапруження: перенапруження, що йдуть з живильної мережі; перенапруження, обумовлені вимиканням первинної обмотки силового трансформатора; перенапруження, обумовлені комутацією вентилів; перенапруження, обумовлене вимиканням навантаження.

Захист тиристорного перетворювача від перенапруження, що йде з живильної мережі, здійснюється RC - колами, підключеними до кожної фази на вході перетворювача. RC - кола ввімкнені паралельно вентилям (див. рис. 7.1), здійснюють захист від перенапружень, що з’являються при комутації тиристорів. Коло: діод – резистор - ємність, ввімкнена паралельно навантаженій, яка призначена для обмежування перенапруги при вимиканні двигуна під навантаженням.

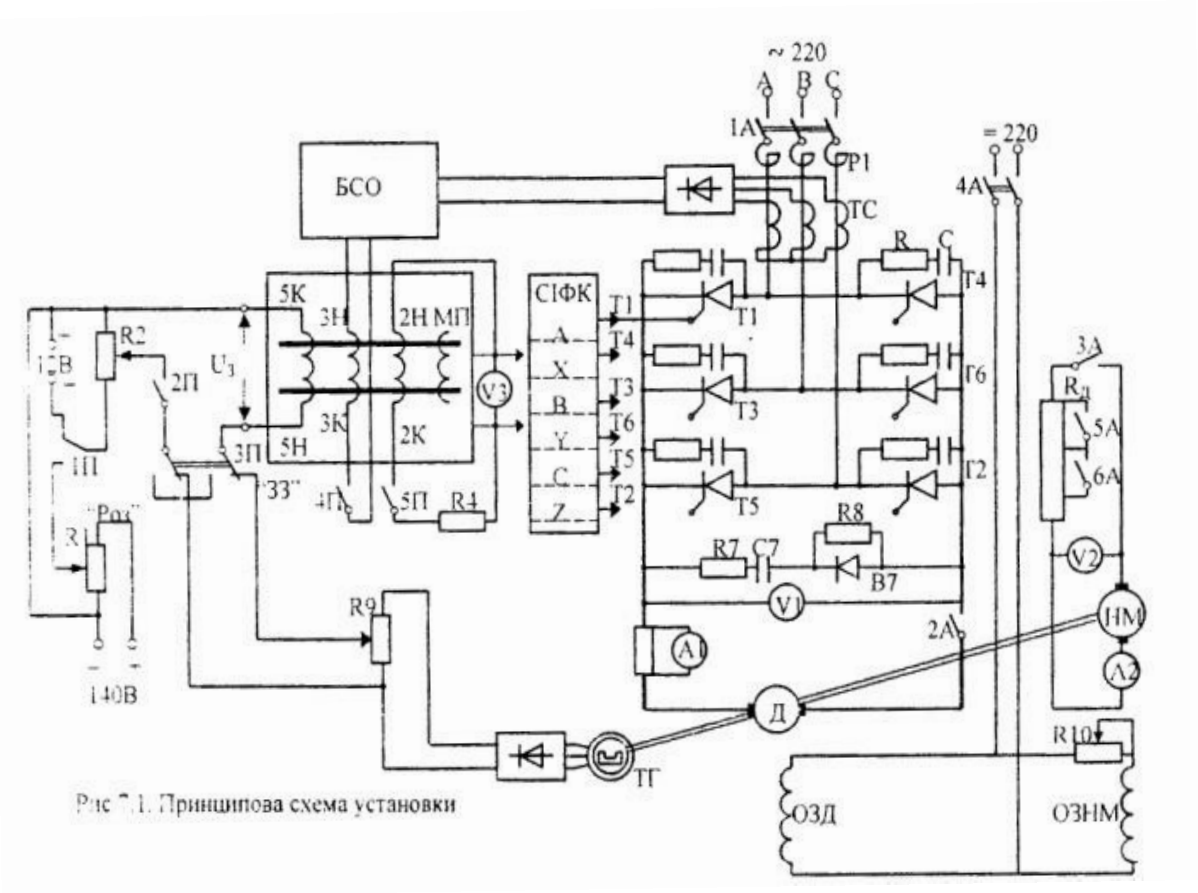

Рис 7.1. Принципова схема установки

5. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка, схема якої приведена на рис. 7.1, виконана на базі серійного промисловістю тиристорного перетворювача типу ПТТ-230-100. На стенді наведена розгорнута принципова схема системи приводу, що розглядається, яка вміщує слідуючи основні блоки: силову частини тиристорного перетворювача, систему імпульсно-фазового керування СІФК та систему автоматичного регулювання швидкості електроприводи. Дана лабораторна роботи ставить метою вивченім лише силової частини та електромеханічних властивостей системи ТП - Д. Для вивчення системи керування передбачається окрема лабораторна робота. Лабораторна установка забезпечує роботу системи ТП - Д без зворотного зв'язку та зі зворотним зв'язком за швидкістю.

Основу силової частини перетворювача складає вентильний блок, який виконаний за трифазною мостовою схемою випрямлення. До силової частини перетворювача входять також струмообмежувальні реактори Р1, автоматичний вимикач 1А, який виконує функцію захисту від коротких замикань, вимикач 2А для вмикання двигуна. Для формування вимикаючих імпульсів та зміни кута регулювання служить система керування, яка складається з магнітного підсилювача (МП), блока струмообмежування (БСО) та системи імпульсно - фазового керування (СІФК).

Із задаючого потенціометра R2 сигнал завдання надходить на вхід магнітного підсилювача (обмотка 5Н - 5К). На обмотку 3Н - 3К магнітного підсилювача надходить сигнал зворотного зв'язку за струмом з виходу блока струмообмеження. Для обмеження коефіцієнта підсилення та забезпечення стійкості роботи магнітний підсилювач охоплений зворотним зв'язком за напругою, котра подасться на обмотку

2Н - 2К. З виходу блока магнітного підсилювача сигнал керування надходить на вхід СІФК, де керуюча напруга перетворюється у систему імпульсів, необхідних для керування тиристорами силового блока.

6. Порядок виконання роботи

6.1. Після ознайомлення *з* лабораторною установкою необхідно отримати дані для побудови залежності $U_d = f(U_к)$, Для цього необхідно:

6.1.1. Ввімкнути лабораторну установку за розімкненою схемою, установивши перемикач 3П до положення "Роз"

6.1.2. Ввімкнути тумблер П1 до положення "12В".

6.1.3. Встановити движок потенціометра К2 до нульового положення та ввімкнути тумблер 2П

6.1.4. Ввімкнути СІФК автоматичним вимикачем, який розташований на лицьовій панелі шафи тиристорного перетворювача.

6.1.5. Ввімкнути автомат 1А та 4А. виляснути 2А.

6.1.6. Плавно збільшуючи напругу завдання за допомогою К2, зняти декілька точок залежності $U_d = f(U_{кер})$, - Напруга завдання керування $U_{кер}$, вимірюється за допомогою вольтметра V3, а випрямлена напруга U_d реєструється вольтметром V1.

6.1.7. Після зняття вказаної залежності встановити движок потенціометра R2 до нульового положення.

6.2. Отримання даних для побудови електромеханічної характеристики двигуна $n = f(I)$ при відсутності зворотного зв'язку та початковому значені напруги перетворювача U_d = 220 В. Для цього необхідно:

6.2.1. При положенні движка R2 у нульовому положенні ввімкнути 2А.

6.2.2. Встановити за допомогоюR2 напругу перетворювача U_d = 220 В.

6.2.3. Встановити за допомогою потенціометра R10 мінімальне значення струму в обмотці збудження навантажувальної машини (ОЗНМ).

6.2.4. Вимкнути автомати 5А та 6А і замкнути якірне коло НМ за допомогою 3А.

6.2.5. Плавно збільшуючи потенціометром R10 струм в ОЗЧМ, зняти декілька точок залежності $n = f(I)$ (амперметр А1).

6.2.6. Зменшити за допомогою R10 струм в ОЗНМ до нуля.

Примітка. У всіх дослідах струм якоря ДМ не повинен перепитувати 12-14 А.

6.3. Отримання даних для побудови залежності $n = f(I)$ при початковій напрузі U_d =150В.

6.3.1. Встановити за допомогою *R2* напругу перетворювача U_d =150 В.

6.3.2. Ввімкнути автоматичний вимикач 5А.

6.3.3. Повторити пп. 6.2.5 - 6.2.6 та зняти декілька точок залежності $n = f(I)$

6.4. Отримання даних для побудови залежностей при початковій напрузі U_d=100 В

6.4.1. Встановити за допомогою R2 напругу перетворювача U_d = 100 В.

6.4.2. Вимкнути автоматичні вимикачі 5А та 6А

6.4. Зповторити 6.2.5 - 6.2.6 та зняти декілька тичок залежності $n = f(I)$

6.5. Отримання даних для побудови залежності $n = f(I)$ при наявності зворотного зв'язку й швидкістю при U_d = 220 В.

6.5.1 Встановити движок потенціометра R2 до нульового положення

6.5.2. Встановити перемикач 3П до положення "33".

6.5.3. Встановити перемикач 1П до положення "140 В".

6.5.4. Встановити движки потенціометрів R1 та R9 до положення "1".

6.5.5. повторити п.п. 6.2.2 - 6.2.6 та зняти декілька точок залежності $n = f(I)$.

6.6. Отримання даних для побудови залежності $n = f(I)$ при U_d = I50В та U_d=100В.

6.6.1. Встановити за допомогою R2 потрібну напругу.

6.6.2. Ввімкнути автоматичний вимикач 5А.

6.6.3. Плавне збільшуючи потенціометром R10 струм в ОЗНМ, зняти декілька точок залежності $n = f(I)$.

6.7. Відключити установку.

6.7.1. Зменшити за допомогою потенціометра R10 струм ОЗНМ до нуля.

6.7.2. Вимкнути 3А, 1А, СІФК, 2А та 4А.

7. Обробка експериментальних даних

Побудова залежності $U_d = f(U_{КЕР})$ виконується за даними табл.7.1. Залежність $U_d / U_{d0} = f(\alpha)$ будуються на основі виразу

$$\alpha = \arccos U_d / U_{do},$$

де $U_{d0} = 2{,}34\ U_ф = 1{,}35\ U_л = 1{,}35 \cdot 220 = 300$ В; $U_Л$ лінійна напруга мережі.

За даними табл.7.2. побудувати швидкісні характеристики двигуна без зворотного зв'язку та зі зворотним зв'язком за швидкістю. В обох випадках визначити діапазон регулювання швидкості за виразом

$$Д = n_{макс}/\Delta n.$$

де $n_{макс}$ - частота обертання двигуна при I = 12 А та U = 220 В; Δn - падіння швидкості при I = 12 А.

Таблиця 7.1

Експериментальні дані регулювальної характеристики ТП

$U_{КЕР}$, В							
U_d, В							
U_d/U_{d0}							
α							

Таблиця 7.2

Результати вимірювань залежності $n = f(I)$

Вимоги	В	№ вимірювань	1	2	3	4	5	6	7	8
Без зворотного зв'язку за швидкістю	220	I, А								
		n, об/хв								
	150	I, А								
		n, об/хв								

	100	I, A								
		n, об/хв								
Зі зворотним зв'язком за швидкістю	220	I, A								
		n, об/хв								
	150	I.A								
		n, об/хв								
	100	I, A								
		n, об/хв								

8. Зміст звіту

8.1. Назва та мета лабораторної роботи.

8.2. Програма роботи.

8.3. Принципова схема лабораторної установки (рис. 7.1)

8.4. Табл. 7.1 та 7.2 за результатами вимірювань та розрахунків.

8.5. Залежності $U_d = f(U_{КЕР})$, та $U_d / U_{d0} = f(\alpha)$

8.6. Електромеханічні характеристики двигуна $n = f(I)$ без зворотною зв'язку за швидкістю при різних навчальних значень випрямленої напруги.

8.7. Розрахунок діапазону регулювання п розімкненні замкненій системі

Література

1. Вешеневський С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

2. Ключев В.Т. Теорія електропривода. – М.: Энергоатоматиздат, 1985. – 560 с.

3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс електропривода. – М.: Энергоатоматиздат, 1981. – 416 с.

4. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Щинянского. – М.: Энергоатоматиздат, 1983. – 661 с.

5. Мартынов М.В., Переслегин Н.Г. Автоматизированный электропивод в горной промышленности. – М.: Недра, 1977. – 375 с.

6. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

Навчально-методичне видання

А.А.Колб

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електропривода» (Частина 1)
для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготовлено до виходу в світ у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19