

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

С.О. КВІТКА, М.В. ПОСТНІКОВА, О.М. РЕЧИНА

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ЧАСТИНА 1

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Мелітополь, 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

С.О. КВІТКА, М.В. ПОСТНІКОВА, О.М. РЕЧИНА

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ЧАСТИНА 1

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Вченою радою факультету енергетики
і комп'ютерних технологій Таврійського державного
агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного
для підготовки фахівців зі спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
у вищих навчальних закладах II-IV рівнів акредитації*

УДК 631.3-83 (075.8)

К 32

*Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою
факультету енергетики і комп'ютерних технологій
Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного
(протокол №8 від «11» березня 2020 р.)*

Укладачі: **Квітка С.О.**, доцент Таврійського ДАТУ,
Постнікова М.В., доцент Таврійського ДАТУ,
Речина О.М., асистент Таврійського ДАТУ

Рецензенти:

Островець М.Я., д.т.н., професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Діордієв В.Г., д.т.н., професор, завідувач кафедри електроенергетики і автоматизації Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Квітка С.О.

К 32 Основи електропривода: лабораторний практикум, Ч.1 / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. – 165 с.

У лабораторному практикумі систематизований і викладений теоретичний та методичний матеріал, який охоплює практичні питання дослідження механічних та електромеханічних характеристик електродвигунів постійного і змінного струму та способів регулювання їх швидкості при різному характері навантаження. Структура кожної лабораторної роботи, їх зміст, ілюстрації теоретичного матеріалу роблять лабораторний практикум зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами як денної, так і заочної (дистанційної) форми навчання.

Лабораторний практикум з дисципліни «Основи електропривода» призначений для студентів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» вищих навчальних закладів II-IV рівнів акредитації.

© С.О. Квітка,
© М.В. Постнікова,
© О.М. Речина,
© Таврійський державний
агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, 2020

ЗМІСТ

Передмова	5
ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В ЛАБОРАТОРІЇ ОСНОВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	6
ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ З МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
Вимірювання опорів обмоток та пускорегулювальних пристроїв	9
Створення навантаження при дослідженні електропривода	11
Вибір вимірювальних приладів та резисторів	14
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО (ПАРАЛЕЛЬНОГО) ЗБУДЖЕННЯ	16
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	38
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ	64
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО (ПАРАЛЕЛЬНОГО) ЗБУДЖЕННЯ ЗМІНОЮ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА	87
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ СТРУМУ	104
<i>Лабораторна робота</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСІВ	120
Додатки	135
Список літератури	164

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Основи електропривода» є профільною при підготовці фахівців ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Під час вивчення курсу студенти оволодівають знаннями з теорії електропривода, навчаються проводити дослідження, випробування і давати оцінку електроприводів постійного та змінного струму.

Лабораторний практикум містить лабораторні роботи з дисципліни «Основи електропривода, ч. 1». Роботи присвячені вивченню електромеханічних властивостей та способів регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму. Загалом лабораторні роботи охоплюють основні розділи курсу і спрямовані на закріплення лекційного матеріалу та придбання навичок експериментального дослідження та експлуатації електроприводів.

Методичні вказівки до кожної роботи містять основні теоретичні положення, завдання для самостійної роботи, програму роботи, технічну характеристику лабораторного устаткування, вказівки щодо виконання лабораторної роботи, схему лабораторної установки, зразки таблиць для фіксації результатів вимірювань, список літератури.

Структура кожної лабораторної роботи, зміст та теоретичний матеріал роблять лабораторний практикум зручним для самостійного опрацювання матеріалу студентами, як денної, так і заочної (дистанційної) форми навчання. Уважне та ретельне проведення дослідів, свідоме виконання необхідних розрахунків і графічних побудов, осмислення і узагальнення отриманих результатів, оформлення звітів з дотриманням вимог стандартів і ЕСКД забезпечують високу ефективність пізнавального процесу.

Міцним фундаментом підготовки лабораторного практикуму стали найкращі освітянські традиції та багаторічний досвід викладання дисципліни «Основи електропривода» на кафедрі електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе студентам краще засвоїти курс дисципліни «Основи електропривода», набути практичних навичок раціонального вибору, експлуатації та дослідження електроприводів постійного та змінного струму.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В ЛАБОРАТОРІЇ ОСНОВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

На лабораторних заняттях студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з дослідження і випробування електроприводів постійного та змінного струму.

Лабораторні роботи з основ електропривода відрізняються складністю схем, великою кількістю різного електрообладнання (електричні машини, вимірювальні прилади, апарати керування) і відмінностями в режимах їх роботи.

При виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Основи електропривода» студент вивчає роботу комплексу електротехнічного обладнання, призначеного для виконання певної виробничої функції. Тому при виконанні лабораторних робіт з основ електропривода студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, вміти складати схеми електроприводів, регулювати і налагоджувати як машини і апарати зокрема, так і весь електропривод в цілому.

Лабораторні роботи з основ електропривода виконують бригадами (2...4 студенти). Кожна бригада повинна виконати всі лабораторні роботи, які передбачені календарно-тематичним планом з дисципліни. Одержавши графік виконання лабораторних робіт, студент завчасно готується до кожної з них, вивчає відповідні розділи теоретичного матеріалу, складає повні робочі схеми дослідження, таблиці, виконує необхідні розрахунки.

До виконання робіт допускаються студенти, які знають зміст та методику виконання поточної лабораторної роботи.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен ознайомитися з обладнанням робочого місця, паспортними даними усіх машин і апаратів, що застосовуються в роботі, одержати інші характеристики цього обладнання. Лише після ознайомлення з обладнанням робочого місця і перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття, він може виконувати лабораторну роботу.

Для роботи студент самостійно вибирає вимірювальні прилади, реостати, апарати керування і складає схему. При цьому необхідно керуватися правилом, що силові кола і кола керування збирають окремо; з'єднують спочатку послідовні, а потім паралельні кола. Також необхідно дотримуватися правила: не закріплювати під одним затискачем більше двох кінців проводів. Їх потрібно розподілити рівномірно між іншими затискачами. Приєднання електровимірювальних приладів до електричних машин здійснюється через клемну колодку, яка закріплена в нижній частині збірної сторони лабораторних стендів.

Перед подачею напруги на схему необхідно переконатись, що движки реостатів знаходяться у вихідному положенні: опір пускових реостатів повинен бути повністю введений в коло якоря або ротора (для АД з фазним ротором), а шунтового реостату в колі збудження двигунів постійного струму – повністю виведено.

Напругу на затискачі електродвигуна потрібно подавати послідовним вми-

канням апаратури керування зі сторони живлення, а знімати – у зворотному порядку.

Після перевірки схеми викладачем або лаборантом її вмикають, звертають увагу на напрямок обертання машин і правильність вмикання приладів. Після перевірки схеми при різних режимах роботи починають виконувати досліди.

Під час проведення дослідів стежать за показами приладів і режимами роботи всього обладнання. Показання приладів знімають в одному заздалегідь установленому порядку, записуючи в першу чергу ті параметри, які при роботі змінюються найшвидше. При проведенні дослідів всі дані випробувань, технічні дані обладнання записують в таблиці фіксації експериментальних даних, що рекомендовані до кожної лабораторної роботи. Після проведення дослідів і виконання необхідних розрахунків складають звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів.

При виконанні лабораторних робіт необхідно суворо дотримуватись правил з техніки безпеки. В лабораторії основ електропривода доводиться мати справу з відкритими схемами і при невиконанні елементарних правил електробезпеки можна потрапити під електричну напругу.

Перед початком роботи в лабораторії основ електропривода студент повинен ознайомитись із схемою живлення лабораторії і робочих місць, з'ясувати, де розташовані апарати для вмикання і вимикання живлення всієї лабораторії з усіх систем живлення (змінний і постійний струм різних напруг). Крім того, потрібно ознайомитися з правилами техніки безпеки та надання першої допомоги потерпілому від електричного струму; прийняти їх до обов'язкового виконання та розписатися про це в журналі з техніки безпеки. Студенти, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

При складанні схеми необхідно слідкувати за тим, щоб контактні з'єднання були щільними, провідники не перетинали проходів і не потрапляли на рухомі частини машин і апаратів. Після складання схеми потрібно прибрати всі зайві провідники, апарати, прилади тощо.

Перед подачею напруги на схему необхідно попередити товаришів по роботі і перевірити, чи не доторкається хтось до струмопровідних частин та до частин, що обертаються. Під час проведення дослідів потрібно бути уважним та обережним, не відволікатися сторонніми справами і розмовами. Ніяких перемикань під напругою робити не можна. На цей період треба вимкнути схему.

При появі будь-яких ознак ненормальної роботи обладнання (сторонні шуми в машинах, дим, запах горілого тощо) та обриві проводів потрібно негайно вимкнути схему і доповісти про те, що сталося, викладачу або лаборанту. Без їх дозволу знову схему не вмикати. Результати дослідів потрібно показати викладачу і тільки з його дозволу розбирати схему. Після закінчення роботи привести в порядок робоче місце. Студент повинен дбати про збереження обладнання лабораторії.

Основні правила охорони праці при виконанні лабораторних робіт

Для безпечної роботи в лабораторії основ електропривода кожен студент повинен знати і суворо дотримуватися наступних основних правил безпеки:

1. Збирати схему і тим більш підключати її до мережі дозволяється тільки після ознайомлення з усім обладнанням, апаратурою та вимірювальними приладами, їх принципом дії, призначенням в схемі і номінальними даними.

2. Електричну схему можна збирати тільки при виключеному вимикачі з боку живлення.

3. Зібрану електричну схему перед вмиканням обов'язково повинен перевірити викладач або лаборант.

4. Перед включенням електричної схеми під напругу треба обов'язково перевірити, чи знаходяться рукоятки перемикачів та повзунки реостатів у вихідному положенні.

5. При кожному включенні схеми необхідно попередити про це своїх товаришів.

6. Підключати електричну схему апаратами керування до мережі необхідно послідовно, починаючи з боку живлення: автоматом, перемикачем або кнопкою "Пуск". Відключати схему необхідно в зворотній послідовності: натиснути кнопку "Стоп", а потім вимкнути автоматичний вимикач.

7. Вносити зміни в схему (робити перемикання) дозволяється тільки при вимкненому автоматичному вимикачі.

8. Під час виконання роботи не доторкатися до оголених кінців проводів, металевих затискачів, затискачів вимірювальних приладів, апаратів, електродвигунів або іншого обладнання, яке знаходиться під напругою.

9. Не знімати захисних огорож з апаратів, приладів, обладнання.

10. Слідкувати за щільністю розбірних контактних з'єднань.

11. Замір опору ізоляції електродвигуна мегомметром необхідно виконувати при повному його вимкненні від електричної мережі.

12. Суворо дотримуватись вказівок викладача щодо особливостей виконання кожної роботи.

13. При виявленні несправностей в схемі, необхідно терміново зупинити роботу і повідомити про це викладача.

14. Категорично забороняється доторкатися рукою, ногою до частин обладнання, що обертаються.

15. При нещасному випадку необхідно миттєво вимкнути установку від мережі, негайно надати першу допомогу потерпілому. Аптечка швидкої допомоги знаходиться в аудиторії 1.123. За необхідності визвати карету швидкої допомоги за телефоном 103.

16. У випадку пожежі негайно вимкнути автоматичні вимикачі постійного та змінного струмів на розподільчих щитках кожного робочого місця та натиснути кнопки "Стоп" на головному розподільчому щиті лабораторії електропривода, вжити заходів щодо ліквідації пожежі. Вуглекислотний вогнегасник знаходиться в лабораторії. При необхідності визвати пожежну команду за телефоном 101.

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ З МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання опорів обмоток та пускорегулювальних пристроїв

При розрахунку та дослідженні механічних характеристик електродвигунів, складанні та налагодженні схем автоматичного керування електродвигунами необхідно знати опори їх обмоток, а також опори, які вводяться в кола обмоток: пускові, гальмівні та інших резисторів.

Вимірювання опорів можна проводити будь-яким з відомих способів, що забезпечать достатню точність вимірювання. Похибку не більше 2 % можливо забезпечити при вимірюванні опорів обмоток мостами, методом амперметра і вольтметра. Вимірювати опір обмоток електричних машин, особливо великої потужності, омметрами не рекомендується, оскільки вони дають значну похибку у 4...10 %. При вимірюванні опорів обмоток головних кіл двигунів потрібно користуватися подвійними мостами, які дають найбільшу точність у випадку малих опорів. Для вимірювання опорів незалежних і паралельних обмоток застосовують одинарні вимірювальні мости.

Пускові, гальмівні та інші металеві опори в колах електродвигунів вимірюють мостами або методом вольтметра і амперметра.

При вимірюванні опорів обмоток статорів машин змінного струму та обмоток збудження машин постійного струму методом амперметра і вольтметра в обмотці встановлюють невеликий струм (близько 10...20 % від номінального), щоб запобігти значному нагріванню обмотки під час вимірювань. Схему вимірювань зображено на рисунку 1.

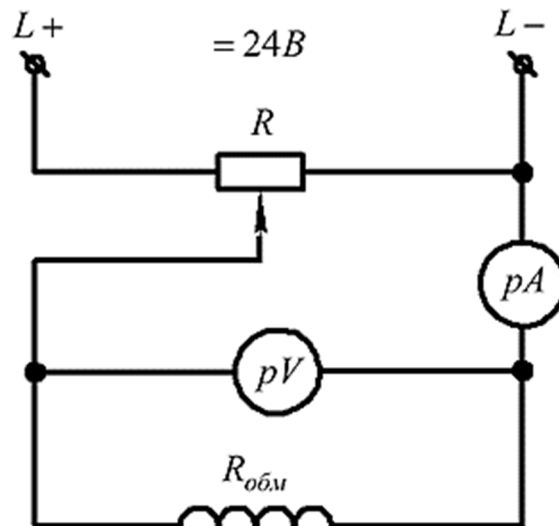


Рисунок 1 – Схема вимірювання опору обмотки

Струм у коло подається з мережі постійного струму напругою 24 В. Особливу увагу слід приділити вибору реостата R . Він повинен мати такий опір, щоб не перегрівався робочим струмом під час дослідів. Вимірювання опору кола

якоря машини постійного струму та фазного ротора асинхронного двигуна необхідно виконувати при струмі, близькому до номінального, а саме $(0,5...1)I_H$, щоб опір щіток був близьким до робочого.

Для отримання високої точності і достовірності дослідних даних при визначенні опору необхідно провести щонайменше три виміри (методом амперметра-вольтметра при різних значеннях струму) і взяти середнє арифметичне значення опору

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (1)$$

де n – кількість дослідів.

Необхідно мати на увазі, що опори обмоток залежать від температури, тому потрібно фіксувати, при якій температурі виконані вимірювання або до якої температури приведено опір. Найточніші результати одержують при вимірюванні опорів обмоток машини в холодному стані. При цьому машина повинна знаходитися в приміщенні з постійною температурою протягом не менше 10...12 годин. За температуру машини приймають температуру повітря в даному приміщенні.

У випадку приведення опору обмоток до іншої температури для обмоток із міді користуються формулою

$$R_{t_2} = R \frac{235 + t_2}{235 + t_1}, \quad (2)$$

де R – середнє арифметичне значення опору обмотки при вимірюванні, Ом;

t_1 – температура при вимірюванні, °С;

t_2 – температура, до якої приведено опір, °С;

R_{t_2} – опір при температурі t_2 , Ом.

Для обмоток із алюмінію замість числа 235 у формулу підставляють 245.

За розрахункову робочу температуру електричних машин за ДСТУ ІЕС 60034-2:2015 «Машини електричні обертові. Частина 2. Методи визначення втрат і ККД обертових електричних машин за допомогою випробувань» приймають 95 °С для обмоток класу нагрівостійкості В, 115 °С – для класу F, 135 °С – для класу Н. Для машин класів нагрівостійкості А і Е за розрахункову робочу температуру приймають 60 °С і 75 °С відповідно до ГОСТ25941-83. Якщо установлена робоча температура обмоток значно відрізняється від розрахункової, то потрібно брати опір при фактичній температурі обмоток.

Створення навантаження при дослідженні електропривода

Електромеханічні та механічні характеристики будь-якого електродвигуна можуть бути отримані експериментально за допомогою навантажувальних пристроїв. Найбільш досконалим навантажувальним пристроєм є установка для випробування електродвигунів в різних режимах за методом зворотної роботи, схема якої представлена на рисунку 2. В ролі гальмівного пристрою використовується машина постійного струму незалежного збудження $M2$ (навантажувальна машина), електрично з'єднана з агрегатом, який складається з машини постійного струму незалежного збудження $M3$ (допоміжна машина) та асинхронного двигуна $M4$ (допоміжний двигун).

Така система називається “генератор-двигун” (Г-Д).

Прилади, які вимірюють струм, напругу та швидкість двигуна $M1$, що досліджується, повинні мати шкали з двостороннім відліком або обладнанні відповідними перемикачами.

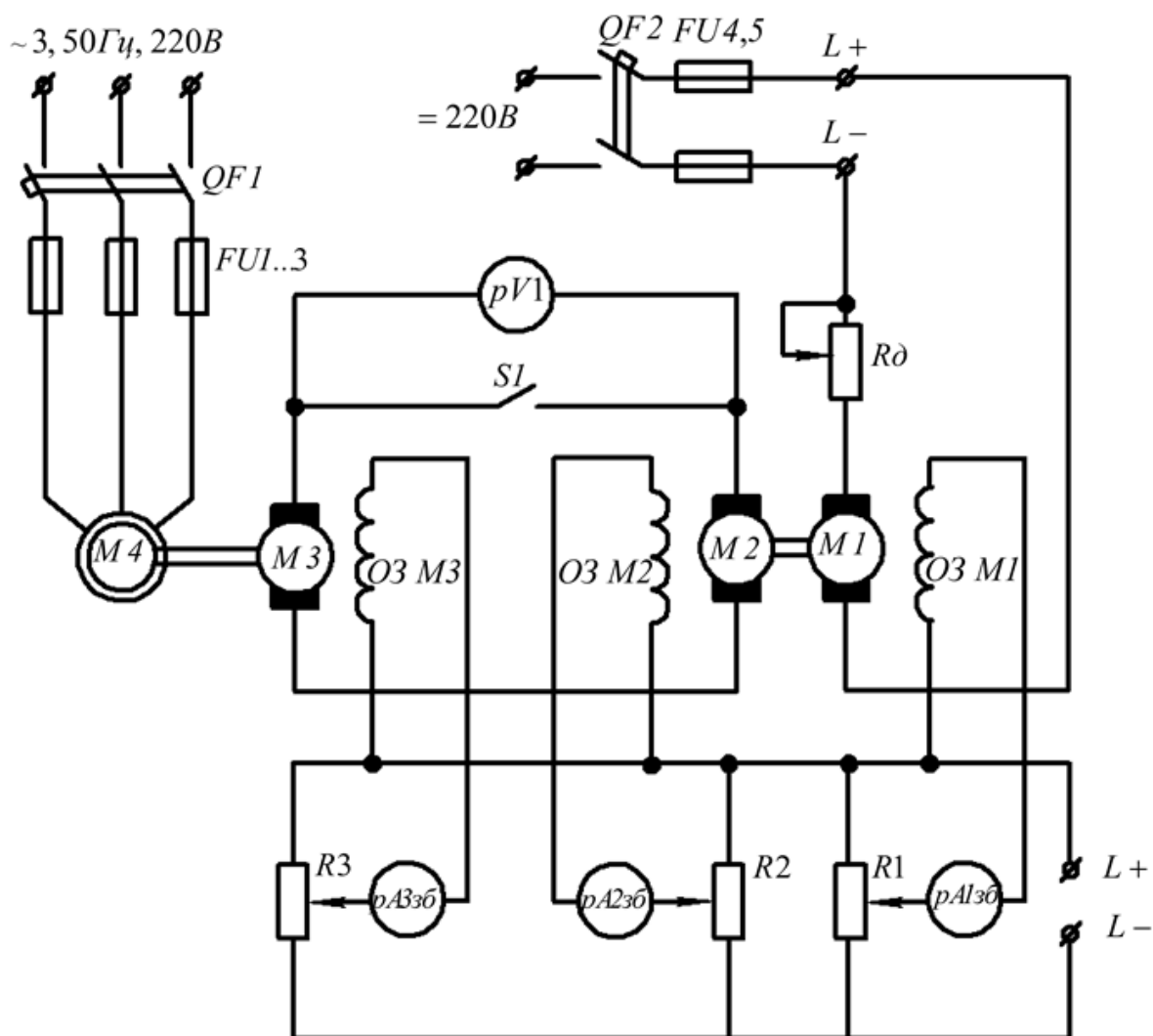


Рисунок 2 – Схема навантажувального агрегату для випробування електродвигунів в різних режимах за методом зворотної роботи

Напрямок і величина моменту опору, що створює навантажувальна машина визначається напрямком і величиною струму у якірному колі машин M_2, M_3

$$M_o = M_{EM} = k\Phi I, \quad (3)$$

де k – конструктивна стала машини M_2 ;

Φ – магнітний потік машини M_2 , Вб;

I – струм якоря електродвигуна M_2 , А.

Схема заміщення якірному кола навантажувальної машини M_2 та допоміжної машини M_3 приведена на рисунку 3.

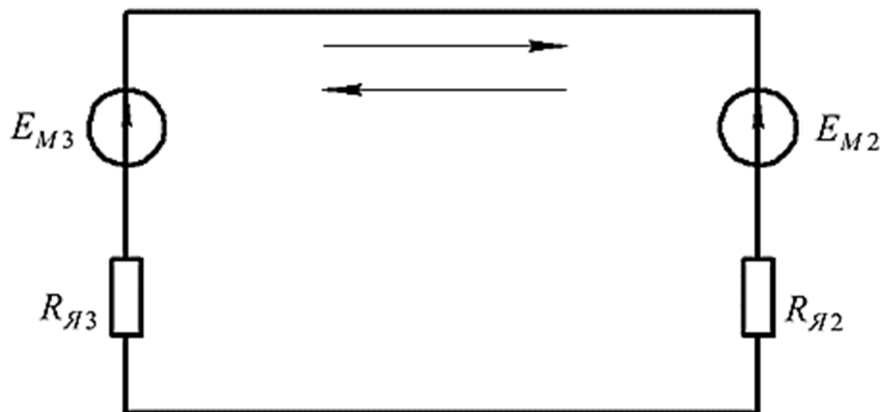


Рисунок 3 – Схема заміщення якірному кола навантажувальної машини M_2 та допоміжної машини M_3

Струм в колі

$$I = \frac{(+E_{M2}) + (-E_{M3})}{R_{Я2} + R_{Я3}}, \quad (4)$$

де E_{M2}, E_{M3} – електрорушійні сили (ЕРС) відповідних машин, В;

$R_{Я2}, R_{Я3}$ – опори якірних кіл відповідних машин, Ом.

В залежності від величини та напрямку дії ЕРС змінюється напрям струму в якірному колі машин M_2, M_3 . При дослідженні машини M_1 у режимі двигуна, рекуперативного (генераторного) гальмування, динамічного гальмування якорі машин M_2 і M_3 повинні бути з'єднані між собою так, щоб полярність їх збігалася (плюс однієї машини з'єднаний з плюсом другої – ЕРС машин направлені зустрічно), у режимі гальмування протидією – напрямки дії ЕРС даних машин мають збігатися для створення достатнього моменту опору навантажувальної машини M_2 .

Величину ЕРС регулюють зміною магнітного потоку машин. При цьому необхідно врахувати, що під час проведення дослідів магнітний потік навантажувальної машини має залишатися постійним, величину струму збудження машини $M2$ контролюють за амперметром $pA2_{36}$. Допоміжна машина $M3$, яка обертається з постійною частотою, повинна мати регулювання збудження в широких межах. Для дослідження машини $M1$ в режимі двигуна необхідно зменшувати збудження машини $M3$. При цьому $E_{M2} > E_{M3}$ і допоміжна машина $M3$ буде споживати енергію від машини $M2$. Режими роботи машин при цьому будуть наступні: машина $M1$ працюватиме в режимі двигуна, машина $M2$ – в генераторному режимі, машина $M3$ – в режимі двигуна, машина $M4$ – в режимі рекуперації, оскільки швидкість обертання агрегату $M3 - M4$ буде вищою за синхронну. Таким чином, енергія, споживана двигуном $M1$, через машину $M4$ буде повертатися назад в мережу (за вирахуванням втрат в машинах). Такий метод випробування електричних машин придатний для всіх машин, навіть великих потужностей. При випробуванні за цим методом втрати енергії мінімальні.

Момент на валу досліджуваної машини визначається

$$M_B = M_{EM} \pm \Delta M, \quad (5)$$

де M_{EM} – електромагнітний момент навантажувальної машини, отриманий за експериментальними даними, Н·м;

ΔM – момент втрат холостого ходу навантажувальної машини, знайдений дослідним шляхом, Н·м.

Знак (-) відноситься до режиму двигуна та генераторного режиму (в генераторному режимі момент M має від'ємне значення); знак (+) відноситься до режиму гальмування противмиканням. Зручно, коли залежність $\Delta M = f(\omega)$ отримана завчасно. Якщо її немає, то необхідно в кожній лабораторній роботі виконувати дослід холостого ходу для навантажувальної машини.

Підготовка установки для проведення дослідів:

1. Зібрати та перевірити електричну схему (рисунок 2).
2. Встановити всі апарати у виключений стан.
3. Подати напругу на обмотки збудження машин постійного струму.
4. Встановити номінальний струм збудження машини $M1$ і близько 50...60 % від номінального струму збудження машин $M2$ та $M3$.
5. Запустити двигун $M1$. Для цього при повністю введеному пусковому реостаті R_D автоматичним вимикачем $QF2$ подати напругу на якорне коло машини. Після запуску двигуна повністю вивести пусковий реостат.
6. Автоматичним вимикачем $QF1$ подати живлення на двигун $M4$.
7. Регулюючи струм в обмотці збудження машини $M3$, домогтися такого положення, коли вольтметр $pV1$ показуватиме напругу рівну нулю. Якщо при збільшенні струму збудження машини $M3$ показання вольтметра $pV1$

збільшуються (дія ЕРС якорів машин $M2$ та $M3$ збігається за напрямком), необхідно виконати один із наступних заходів:

– змінити полярність напруги, що подається на обмотки збудження машини $M1$, або $M2$, або $M3$;

– змінити напрям обертання двигуна $M4$, для чого необхідно поміняти місцями будь-які дві фази напруги, що подається.

8. Після вирівнювання ЕРС замкнути рубильник $S1$ і дослідити двигун у необхідному режимі.

Під час дослідження механічних характеристик потрібно зняти не менше 3...4 точок при прямолінійних характеристиках і не менше 6...8 точок при криволінійних.

Вибір вимірювальних приладів та резисторів

Вибір вимірювальних приладів та резисторів здійснюють за родом струму та межами вимірювання. Оскільки при дослідженні механічних характеристик необхідно знімати точки і при перевантаженні машини, то межі вимірювання амперметрів у головних колах повинні в 1,5...2 рази перевищувати номінальні струми досліджуваних двигунів. Вольтметри вибирають з межами вимірювань, що в 1,5...2 рази перевищують номінальні напруги машин.

В лабораторії використовуються пускові, навантажувальні і регулювальні реостати. Пускові реостати використовуються для зменшення пускового струму якоря двигуна постійного струму або ротора асинхронного двигуна з фазним ротором. Як правило, їх включають тільки на час пуску, а при роботі повністю виводять. При необхідності вибору повзункового реостату для обмеження пускового струму двигуна постійного струму розраховують величину опору

$$R = \frac{U_n}{I_{я доп}} - R_{ов}, \quad (6)$$

де U_n – номінальна напруга електродвигуна, В;

$I_{я доп}$ – допустимий струм якорного кола електродвигуна, А. Приймають

$$I_{я доп} = (2...2,5)I_{ян};$$

$R_{ов}$ – внутрішній опір електродвигуна, Ом.

Щоб забезпечити пуск двигуна з фазним ротором при максимальному пусковому моменті необхідно в коло ротора увімкнути опір

$$R = R_2 \left(\frac{1}{S_k} - 1 \right), \quad (7)$$

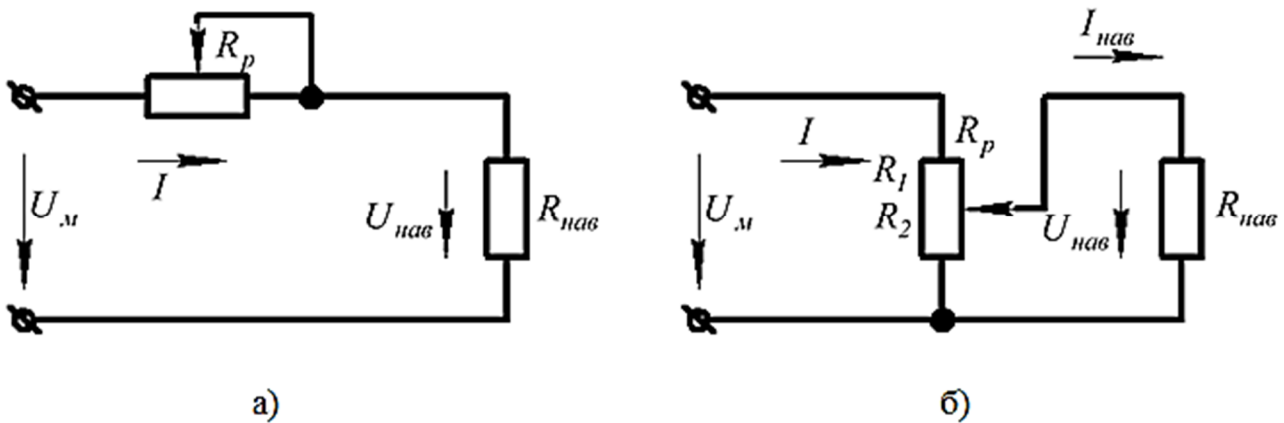
де R_2 – внутрішній опір ротора електродвигуна, Ом;

S_k – критичне ковзання електродвигуна, в.о.

При цьому допустимий струм реостата має бути не менше номінального струму двигуна. Точний розрахунок пускових опорів вивчається на практичних заняттях.

Регулювальні реостати застосовуються для регулювання струму і напруги в електричних машинах або в вимірювальних схемах. Реостати, що включаються в головні кола електричних машин, мають бути розраховані на тривале протікання робочих (номінальних) струмів. За конструктивним виконанням вони можуть бути різними. У лабораторії застосовуються дротяні движкові реостати із ковзними контактами (їх називають повзунковими). На реостаті вказується номінальний опір і найбільший тривалий допустимий струм. Реостати вибирають за цими параметрами. Резистори в колах якоря та ротора розраховують на тривале проходження струмів, які в 1,5...2 рази перевищують номінальний струм якоря чи ротора. Реостати збудження вибирають так, щоб максимальний струм збудження не перевищував допустимий струм для даного реостата.

Для регулювання струму реостат включається в коло послідовно (рисунок 4, а). Для плавного регулювання напруги реостата його включають за схемою дільника напруги (рисунок 4, б). Регулювальні реостати перед дослідом встановлюють в положення, вказане в методичних вказівках до лабораторних робіт. Зазвичай опір в колі якоря встановлюють максимальним, а в колі збудження двигуна рівним нулю.



а – для регулювання струму; б – для регулювання напруги

Рисунок 4 – Схеми вмикання повзункового реостату

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО (ПАРАЛЕЛЬНОГО) ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: вивчити електромеханічні і механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження (ДПС НЗ); засвоїти методику розрахунку і експериментального одержання електро-механічних та механічних характеристик ДПС НЗ.

1 Основні теоретичні відомості

Двигуни постійного струму мають регульовальні властивості і механічні характеристики, що задовольняють вимогам більшості робочих механізмів. Тому двигуни постійного струму широко використовуються на транспорті (магістральні електровози, тепловози, приміські електропоїзди, метрополітен, трамваї, тролейбуси), в верстатах, прокатних станах, кранах, суднових установках. У переважній більшості автомобілів, тракторів, літаків і інших літальних апаратів двигуни постійного струму приводять в обертання все допоміжне обладнання.

На рисунку 1 наведено принципову схему вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ). Напрямок струму якоря $I_{я}$ і ЕРС E відповідають двигунному режиму роботи. В коло якоря вмикається пусковий реостат R_n , в коло обмотки збудження – регульовальний реостат R_p . Якщо обмотку збудження ввімкнути паралельно обмотці якоря, то одержимо ДПС паралельного збудження. Оскільки ЕД мають однакові властивості, то розглядати будемо тільки ДПС НЗ.

Опір пускового реостату вибирають так, щоб він обмежував струм або момент двигуна до заданого значення. Значення початкового пускового струму, якщо нема обмеження пускового моменту, обмежується умовами комутації на якорі. Із цих міркувань початковий пусковий струм не повинен перебільшувати $(2...4)I_{ян}$. Якщо ж при запуску обмежувати пусковий момент, то кратність пускового струму чисельно буде дорівнювати кратності пускового моменту

$$k_i = k_M = \frac{M_n}{M_n}, \quad (1)$$

де M_n – необхідний пусковий момент електродвигуна, Н·м;

M_n – номінальний момент електродвигуна, Н·м.

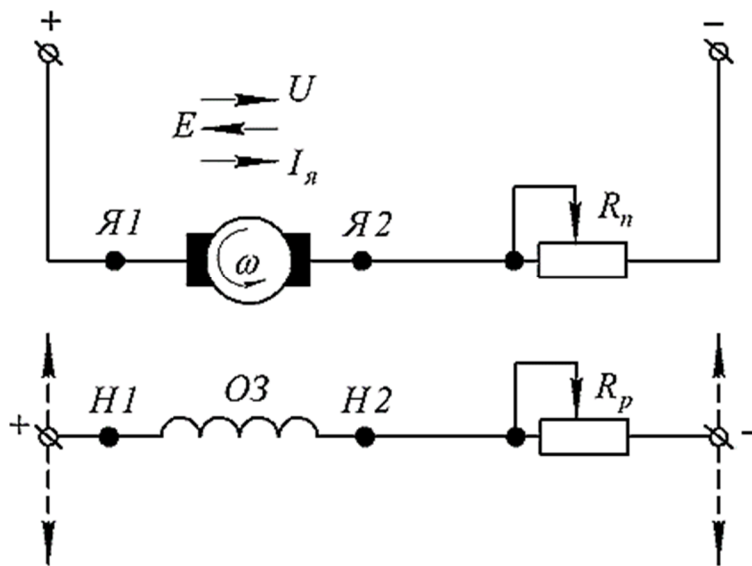
$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (2)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

ω_n – номінальна кутова швидкість ДПС, рад/с.

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (3)$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.



$I_я$ і $I_{зб}$ – відповідно струми обмоток якоря і збудження двигуна;
 E і ω – відповідно електрорушійна сила (ЕРС) і кутова швидкість якоря;
 R_n і R_p – відповідно додаткові опори в якірному колі і колі збудження

Рисунок 1 – Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження

Загалом значення пускового опору можна обчислити за формулою

$$R_n = \frac{U_я}{\kappa_i I_{ян}} - R_я, \quad (4)$$

де $U_я$ – напруга прикладена до якірному кола електродвигуна, В;

$R_я$ – опір якірної обмотки електродвигуна, Ом.

Якщо внутрішній опір електродвигуна $R_я$ невідомий і заводські дані відсутні, то опір визначають безпосереднім вимірюванням або за формулою приблизного розрахунку

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_{яn}}, \quad (5)$$

де η_n – номінальний ККД, в.о.;

$U_{я}$ – номінальна напруга електродвигуна, В.

Основні рівняння ДПС НЗ, що описують статичні режими роботи

$$U_{я} = E + I_{я}R, \quad (6)$$

$$E = k\Phi\omega, \quad (7)$$

$$M = k\Phi I_{я}, \quad (8)$$

де $R = R_{я} + R_{\partial}$ – сумарний опір якірного кола, який складається з внутрішнього опору двигуна та додаткового опору у колі якоря, Ом;

k – конструктивна стала електродвигуна;

Φ – магнітний потік машини, Вб;

ω – кутова швидкість обертання якоря ДПС, рад/с;

$M = M_{нав} + M_{хх}$ – електромагнітний момент електродвигуна, рівний сумі моменту навантаження на валу машини і моменту холостого ходу електродвигуна, Н·м.

З точки зору адекватного вибору електропривода робочих машин важливим є аналіз механічних характеристик електродвигуна і виробничого механізму.

Механічною характеристикою електродвигуна постійного струму називають залежність кутової швидкості обертання його валу від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M)$.

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними.

Природною механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту при номінальних параметрах мережі живлення, номінальному магнітному потоці і при відсутності додаткових опорів у колі якоря. При інших значеннях вказаних величин характеристики штучні. Кожний двигун має одну природну характеристику та безліч штучних характеристик.

Крім механічної характеристики, в теорії електропривода є поняття електромеханічної характеристики, яка представляє собою залежність кутової швидкості обертання двигуна від струму якоря $\omega = f(I_{я})$.

Після сумісного розв'язання рівнянь (6) і (7) відносно кутової швидкості отримуємо аналітичний вираз електромеханічної характеристики ДПС НЗ

$$\omega = \frac{U_{я} - I_{я}R}{k\Phi} = \frac{U_{я} - I_{я}(R_{я} + R_{\delta})}{k\Phi}. \quad (9)$$

Підставивши у рівняння (9) значення струму з формули (8) отримаємо рівняння механічної характеристики ДПС при будь-якому збудженні

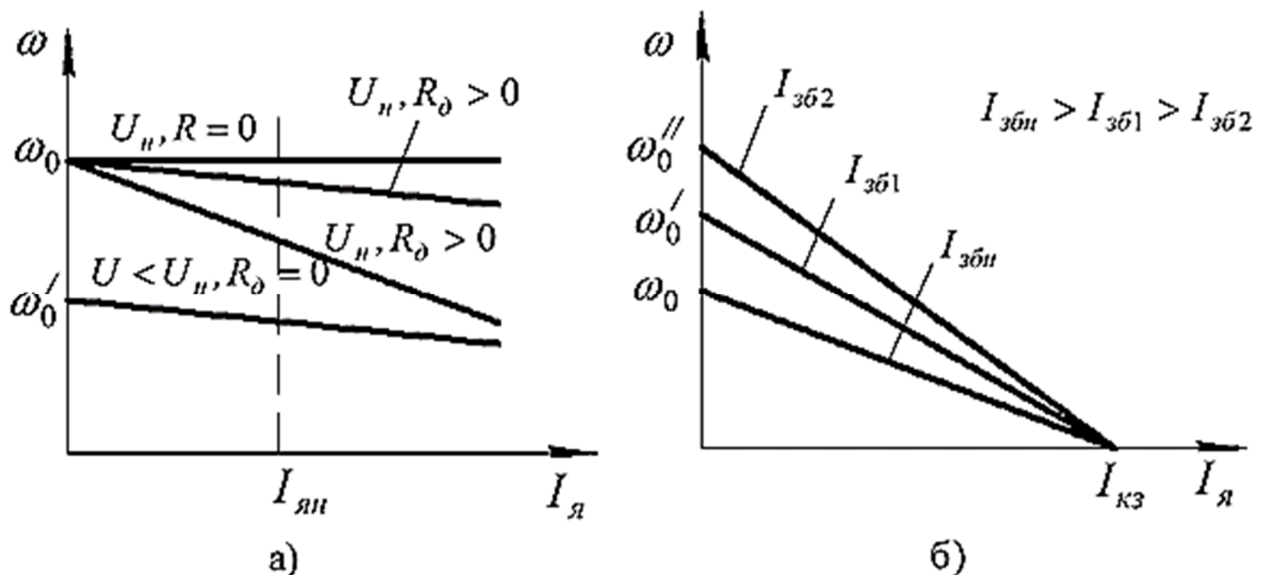
$$\omega = \frac{U_{я}}{k\Phi} - \frac{M(R_{я} + R_{\delta})}{(k\Phi)^2}. \quad (10)$$

ДПС НЗ, як правило, працюють при незмінному номінальному магнітному потоці, тому добуток $k\Phi_n$ є постійною величиною, яку легко обчислити за виразом

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_{ян}R_{я}}{\omega_n}. \quad (11)$$

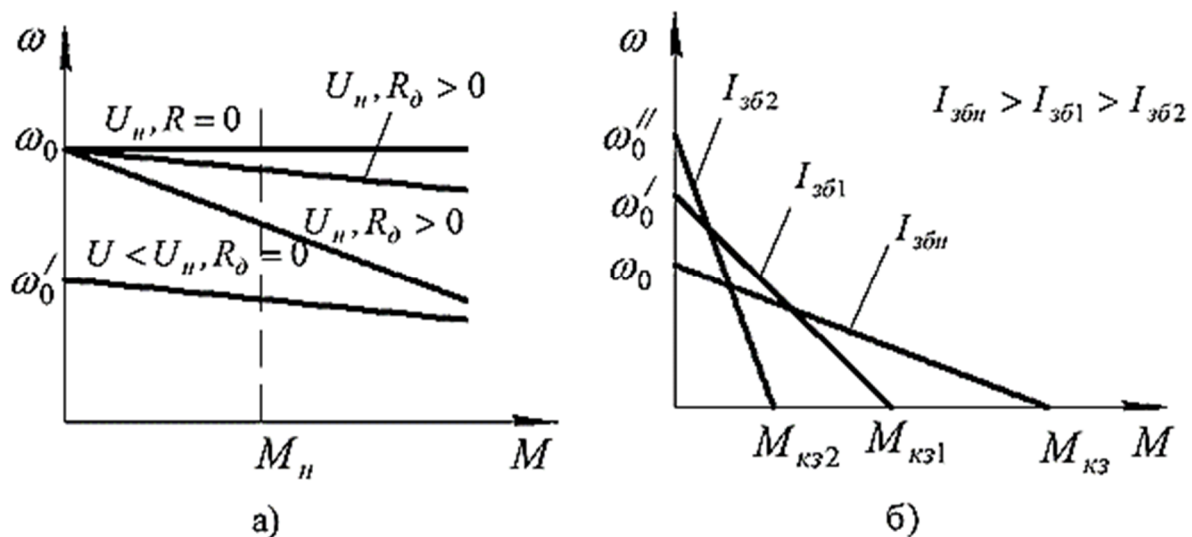
Із аналізу рівнянь (9-11) випливає, що електромеханічні і механічні характеристики ДПС НЗ описуються рівняннями прямої лінії. Тому у прямокутній системі координат характеристики можна побудувати за двома із трьох точок, координати яких найлегше визначити. Координати точок відповідають: режиму ідеального холостого ходу; режиму номінального навантаження; режиму короткого замикання.

Зовнішній вигляд електромеханічних характеристик ДПС НЗ представлений на рисунку 2, а механічних – на рисунку 3.



а – при номінальному магнітному потоці; б – при ослабленому магнітному потоці

Рисунок 2 – Електромеханічні характеристики ДПС НЗ



а – при номінальному магнітному потоці; б – при ослабленому магнітному потоці

Рисунок 3 – Механічні характеристики ДПС НЗ

Енергетичний режим роботи ЕД залежить від механічних (M, ω) і електричних (E, I_γ) координат ЕД, які визначають його механічну $M\omega$ і електромагнітну EI_γ потужності.

За умови співпадання напрямку дії механічних координат і протилежному напрямку струму і ЕРС має місце двигунний режим роботи, а при протилежному напрямі кутової швидкості і моменту та однаковому напрямі ЕРС і струму – генераторний. Між двигунним і генераторним режимами роботи є режими ідеального холостого ходу і короткого замикання, в яких одна з електричних і механічних змінних дорівнює нулю. При ідеальному холостому ході струм і момент дорівнюють нулю, а при короткому замиканні нульові значення мають ЕРС і швидкість.

Розглянемо режими роботи ДПС НЗ на різних ділянках його характеристик при позитивній полярності напруги.

Режим ідеального холостого ходу (точки $\omega_0, -\omega_0$ рисунок 3). Двигун споживає з мережі живлення струм збудження, якір двигуна обертає робоча машина. При цьому $I_\gamma = 0; U = E; M = 0; \omega = \omega_0$.

В двигунному режимі роботи ДПС НЗ споживає енергію з мережі. При цьому протиелектрорушійна сила менша за напругу $E < U$, межі зміни кутової швидкості при прямому напрямку обертання $0 < \omega < \omega_0$, при зворотному $0 < -\omega < -\omega_0$. Напрямки дії струму і напруги співпадають, а ЕРС направлена у протилежний бік. У двигунному режимі електроенергія надходить з електричної мережі, а механічна енергія віддається з вала ДПС НЗ робочій машині. Механічні характеристики розташовуються у I і III квадрантах (рисунок 4).

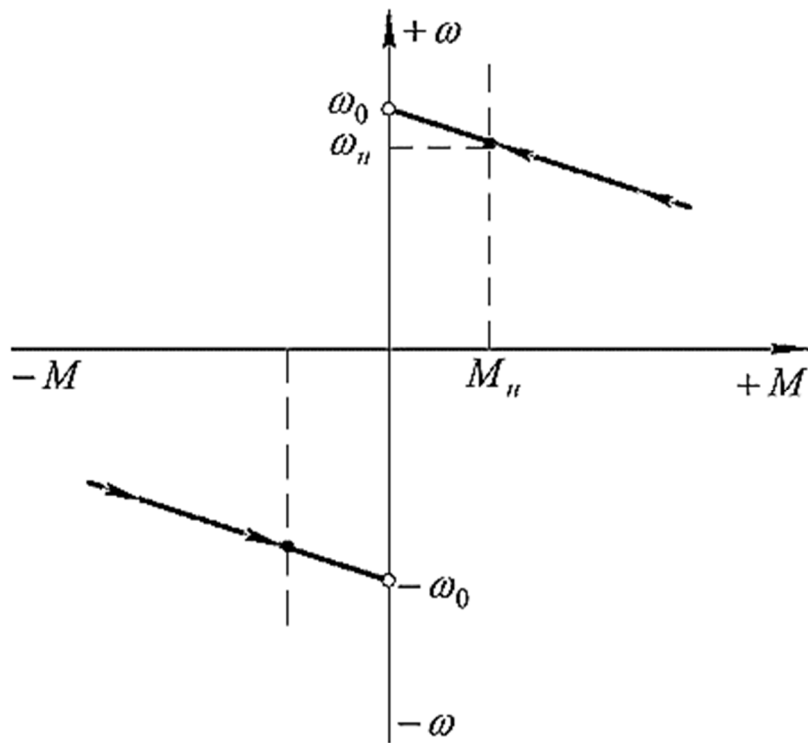


Рисунок 4 – Механічні характеристики ДПС НЗ

Режим короткого замикання спостерігається при нерухомому якорі, коли $\omega = 0; E = 0$. При цьому $I_{я} = I_{кз} = \frac{U}{R}$, а споживана з мережі електрична енергія витрачається на нагрівання опорів кола якоря.

Гальмівні режими роботи мають місце у другому і четвертому квадрантах – це генераторні режими, оскільки механічна енергія, що поступає з вала машини, перетворюється в електричну і передається на виводи машини. В залежності від способу використання електричної енергії розрізняють три гальмівні режими.

Рекуперативне гальмування (генераторний режим роботи ДПС НЗ паралельно з електричною мережею) здійснюється тоді, коли при незмінній схемі вмикання електродвигуна його якорі під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається зі швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$. При цьому ЕРС якоря вища за прикладену напругу, тому струм якоря і обертовий момент змінюють свій напрямок. Рівняння механічної характеристики в режимі рекуперативного гальмування приймає вигляд

$$\omega = \omega_0 + \frac{M(R_{\partial\partial} + R_{з.р.})}{(k\Phi_n)^2}, \quad (12)$$

де $R_{з.р.}$ – опір рекуперативного гальмування, Ом.

Графічно ці характеристики представляють прямими лініями $1'$, $2'$ (рисунок 5), які є продовженням механічної характеристики двигунного режиму у II квадранті. Гальмівний момент регулюють зміною опору $R_{з.р.}$.

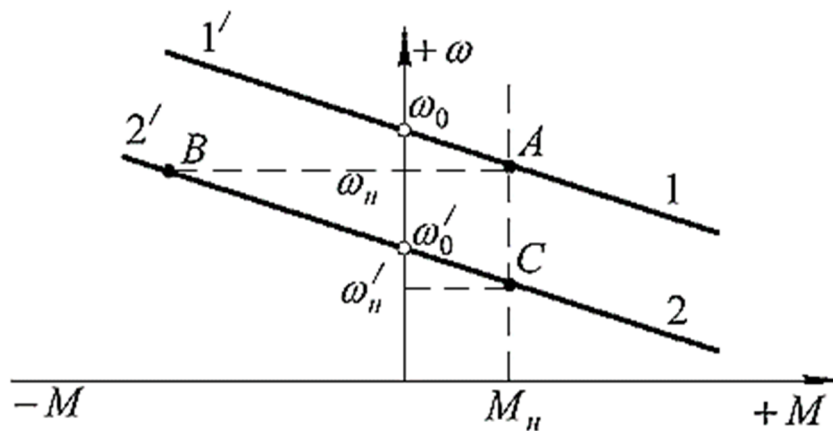


Рисунок 5 – Механічні характеристики ДПС НЗ при рекупераційному гальмуванні

Рекупераційне гальмування економічне, перехід з двигунного режиму в гальмівний відбувається плавно без перемикачів у колі якоря і колі збудження електродвигуна. Його застосовують, наприклад, у приводах підйомних і транспортних механізмів.

Застосування рекупераційного гальмування обмежується максимальною швидкістю обертання приводного електродвигуна. Рекупераційне гальмування також можливе і при низьких швидкостях, коли останню регулюють зміною напруги, оскільки $\omega_0 \equiv U$. Так, якщо ДПС в двигунному режимі працював в точці A , то при зниженні напруги робоча точка переходить на нову MX , відрізок якої $B\omega'_0$ відповідає рекупераційному гальмуванню.

Режим гальмування протидієюм (режим генератора послідовно з електричною мережею) має місце, коли напрямок дій обертального моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря. Може бути три випадки цього виду гальмування в залежності від характеру моменту опору виконавчого органу робочої машини: активний чи реактивний.

Реактивними називають сили і моменти статичних опорів, які виникають внаслідок руху як протидія механічної ланки на рух. До них належать сили і моменти, зумовлені тертям, опором матеріалу при обробці різанням, опором потоку повітря у вентиляторах або рідини у насосах і т. ін. Реактивні сили і моменти завжди спрямовані проти руху і при зміні напрямку руху змінюють свій знак. Елементи механічної системи, які створюють реактивні сили і моменти, можуть бути тільки споживачами енергії.

Активні сили і моменти статичних опорів створюються сторонніми джерелами механічної енергії і виникають у механічній системі незалежно від її руху.

До них належать сили і моменти, зумовлені тяжінням, стисканням, розтягуванням і скручуванням пружних тіл, силою вітру чи потоку падаючої води. Напрямок дії активних сил і моментів не залежить від напрямку руху і при зміні останнього вони зберігають свій знак. Джерело активної сили або моменту може споживати або віддавати механічну енергію. Так, вантаж, переміщуваний підйомником, при підніманні споживає механічну енергію від електродвигуна, а при опусканні віддає її електродвигуну, внаслідок чого останній працює в гальмівному режимі.

Перший випадок гальмування противмиканням реалізується в електроприводі машин з активним моментом статичних опорів, наприклад, в вантажо-підйомних механізмах при спуску вантажу. Двигун з активним моментом на валу M_o (рисунок 6) працює в точці A природної механічної характеристики 1 в режимі двигуна. Для переходу з режиму двигуна в режим гальмування противмиканням досить увімкнути в коло якоря достатню величину зовнішнього додаткового опору $R_{z.n.}$. Робоча точка електродвигуна переходить на штучну механічну характеристику 2 в точку B . Виникає від'ємний динамічний момент, внаслідок чого знижується швидкість і на відрізку CD здійснюється режим гальмування противмиканням.

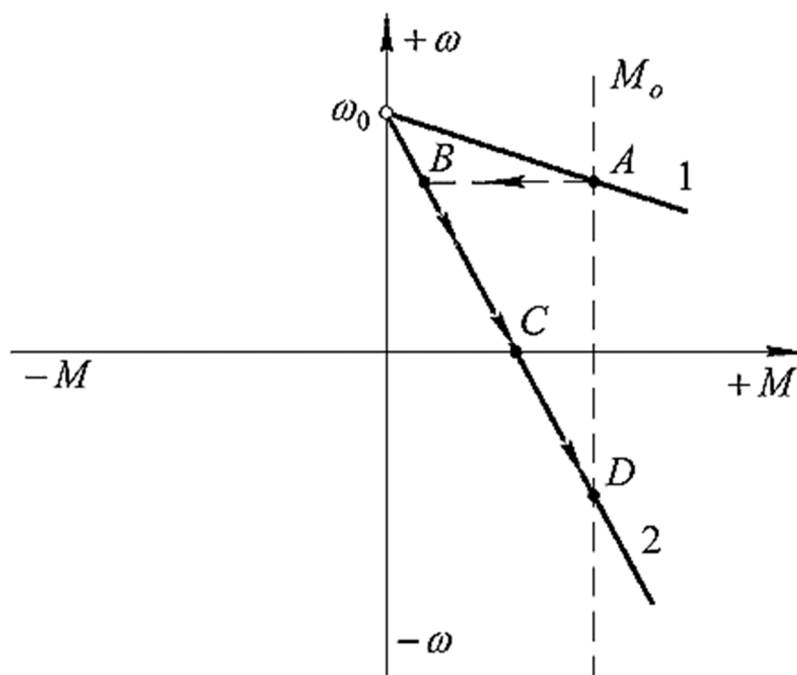


Рисунок 6 – Механічні характеристики ДПС НЗ при гальмуванні противмиканням при введенні додаткового активного опору у коло якоря

Під дією активного моменту змінюється напрямок обертання ЕД $\omega < 0$ і напрямок ЕРС якоря, яка буде діяти узгоджено з напругою мережі. При цьому якір двигуна споживає енергію як з мережі, так і від вала машини. Ця енергія у вигляді тепла виділяється в опорах кола якоря. Оскільки напруга, прикладена до якірного кола, і ЕРС якоря мають однаковий напрямок, то струм у колі якоря

різко зростає. Момент двигуна, напрямок дії якого не змінюється, буде гальмівним. Усталеному режиму спуску вантажу відповідає точка D , коли зрівнюються статичний і гальмівний моменти. Характеристики ДПС НЗ за даного способу гальмування розташовуються у IV квадранті.

Механічна характеристика двигуна, що працює в режимі гальмування противмиканням у випадку зміни напрямку обертання описується рівнянням

$$-\omega = \omega_0 - \frac{M(R_{\text{об}} + R_{\text{з.н.}})}{(k\Phi_n)^2}, \quad (13)$$

де $R_{\text{з.н.}}$ – опір гальмування противмиканням, Ом.

Другий випадок гальмування противмиканням реалізується при збільшенні величини активного статичного моменту опору від M_{o1} до M_{o2} (рисунок 7). Електродвигун працює на штучній механічній характеристиці в точці A . Збільшення навантаження спричинить виникнення від'ємного динамічного моменту, внаслідок чого почнеться зниження швидкості до зупинки у точці B , а потім – реверс якоря до швидкості в точці C .

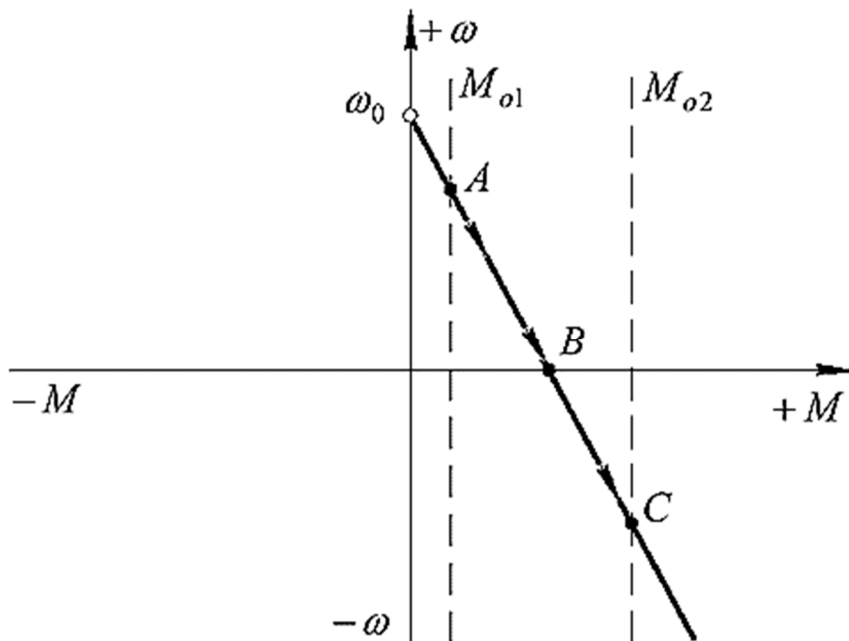


Рисунок 7 – Механічні характеристики ДПС НЗ при гальмуванні противмиканням при збільшенні статичного моменту опору

Графік механічної характеристики за цього режиму представляє собою пряму, яка є продовженням лінії $M\chi$ двигунного режиму в зоні IV квадранта.

Третій випадок гальмування противмиканням використовується в приводах машин з реактивним моментом статичних опорів і здійснюється шляхом зміни полярності напруги, підведеної до якоря двигуна, що працює в двигунному режимі. Це призведе до зміни напрямків струму в колі якоря і електромагнітного

моменту. Робоча точка A переміщується в другий квадрант в точку B (рисунок 8).

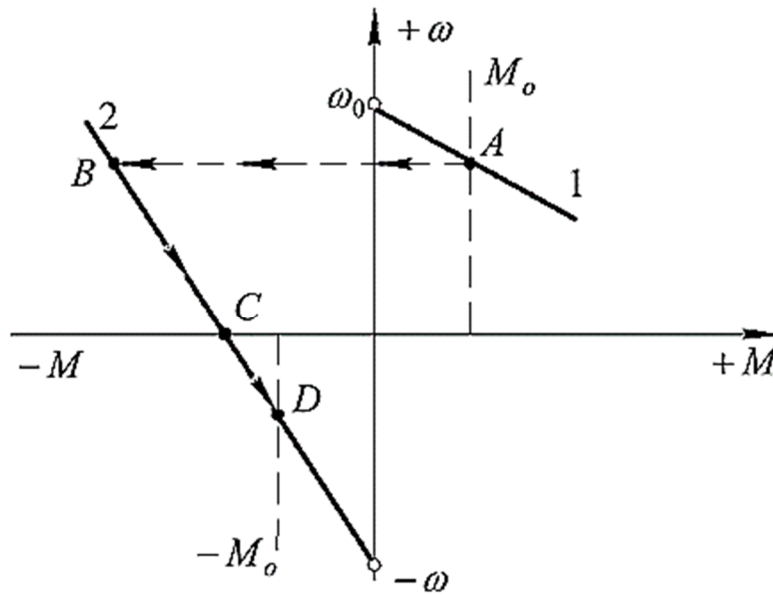


Рисунок 8 – Механічні характеристики ДПС НЗ при гальмуванні противмиканням при зміні полярності напруги, підведеної до якоря двигуна

Поки напрямок обертання не змінився (якір під дією кінетичної енергії системи «ЕД-РМ» продовжує обертатися в попередньому напрямку), електромагнітний момент ДПС НЗ діє в протилежному напрямку, тобто гальмує привод. В цьому випадку напруга мережі і ЕРС якоря діють узгоджено і рівняння механічної характеристики прийме вигляд

$$\omega = -\omega_0 + \frac{M(R_{\text{де}} + R_{\text{з.п.}})}{(k\Phi_n)^2}. \quad (14)$$

Графічно механічна характеристика за цього способу гальмування зображується прямою лінією BC . В момент зупинки (точка C) двигун необхідно вимкнути з мережі, інакше він знову перейде у двигунний режим і буде обертати РМ в протилежному напрямку.

Режим динамічного гальмування або режим генератора, працюючого незалежно від мережі, створюється шляхом вимикання якоря з мережі і замикання його на зовнішній опір або накоротко. Закорочування якоря двигуна не означає для нього режиму короткого замикання. Можливі два способи динамічного гальмування: із самозбудженням та з незалежним збудженням.

У цьому режимі двигун працює як генератор, перетворюючи механічну енергію, що поступає з вала робочої машини в електричну, яка розсіюється на обмотці якоря машини та гальмівному резисторі. Оскільки якір ЕД вимикається

з мережі, то $U = 0$, $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n} = 0$ і струм якоря $I_{я} = I_{з.д} = \frac{0 - E}{R} = -\frac{E}{R}$,

де R – сумарний опір кола якоря ДПС НЗ. Тоді рівняння механічної характеристики двигуна, що працює в режимі динамічного гальмування матиме вигляд

$$\omega = -\frac{M(R_{я} + R_{з.д.})}{(k\Phi_n)^2}. \quad (15)$$

де $R_{з.д.}$ – опір динамічного гальмування, Ом.

Із рівняння (8) видно, що механічні характеристики є прямими лініями, які незалежно від величини опору проходять через початок координат. Жорсткість характеристик при сталому потоці збудження залежить лише від величини гальмівного опору $R_{з.д.}$.

Зовнішній вигляд механічних характеристик ДПС НЗ при динамічному гальмуванні представлено на рисунку 9. При динамічному гальмуванні ЕД із незалежним збудженням, на валу якого діє реактивний момент, двигун переходить з точки A в точку B і гальмується до повної зупинки в точці C .

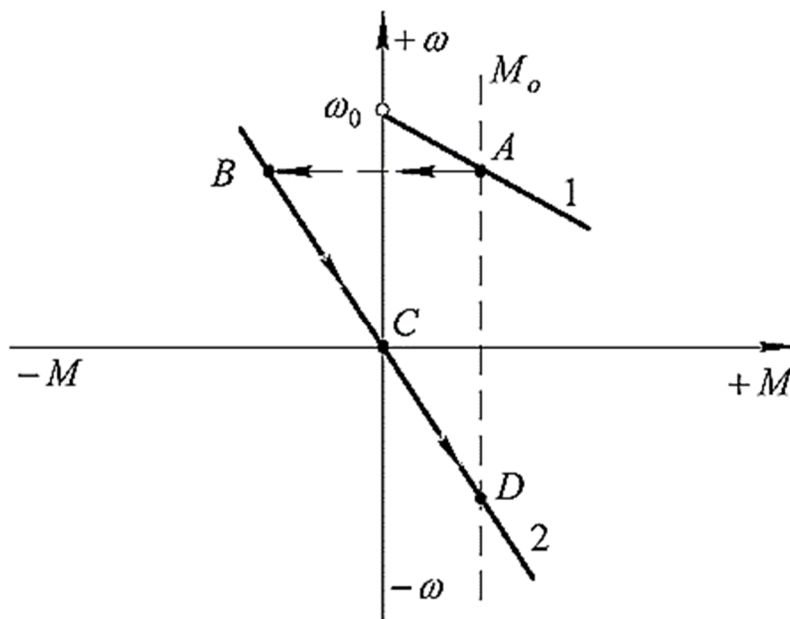


Рисунок 9 – Механічні характеристики ДПС НЗ при динамічному гальмуванні із незалежним збудженням

При активному моменті на валу двигун може працювати в точці D , яка відповідає усталеній гальмівній швидкості, наприклад, при опусканні вантажу.

При динамічному гальмуванні із самозбудженням ЕД працює в режимі генератора з самозбудженням на зовнішній опір $R_{з.д.}$. Характерною рисою цього режиму є те, що в процесі гальмування при деякій критичній швидкості, залежній від опору кола обмотки збудження, гальмівний момент практично зникає. Це

пояснюється тим, що при швидкостях, менших від критичної, не відбувається самозбудження.

До переваг динамічного гальмування ДПС НЗ можна віднести простоту і економічність способу (у гальмівному режимі енергія з мережі витрачається тільки на живлення обмотки збудження), надійність і плавність гальмування. Гальмування при відсутності напруги в мережі є основними перевагами цього гальмівного режиму, тому він застосовується як аварійний. Недоліком є зникнення гальмівного моменту при швидкостях двигуна, менших за критичну при динамічному гальмуванні із самозбудженням.

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 2, лекція «Природні та штучні характеристики двигунів постійного струму, рівняння характеристик та їх аналіз»; 2, с. 45-57; 3, с. 11-22; 4, с. 244-252].

2. Відповісти на контрольні питання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну і штучну (при введенні в коло якоря додаткового опору $R_{\partial} = 16$ Ом) електромеханічні характеристики $\omega = f(I_{я})$ ДПС НЗ.

3. За каталожними даними розрахувати і побудувати природну та штучну ($R_{\partial} = 16$ Ом) механічні характеристики $\omega = f(M)$ ДПС НЗ.

4. Експериментально визначити опір обмоток двигуна та привести їх до розрахункової робочої температури.

5. Провести дослід по встановленню залежності моменту втрат в системі машин $M1 - M2$ від швидкості $\omega = f(M_{втрат})$.

6. Зібрати схему експериментальної установки для дослідження механічних та електромеханічних характеристик ДПС НЗ.

7. Дослідити електромеханічну $\omega = f(I_{я})$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики ДПС НЗ в генераторному та двигунному режимах за різних значень опору у колі якоря ($R_{\partial} = 0$, $R_{\partial} = 16$ Ом).

8. Дослідити механічну характеристику $\omega = f(M)$ ДПС НЗ в режимі динамічного гальмування при $R_{\partial} = 16$ Ом.

9. Дослідити механічну характеристику $\omega = f(M)$ ДПС НЗ в режимі гальмування противмиканням при $R_{\partial} = 16$ Ом.

10. За експериментальними даними побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

11. Провести аналіз характеристик, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом.

12. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

Робоче місце №1							
М1		М2		М3		М4	
Тип	П-22	Тип	П-31	Тип	ПН-17,5	Тип	4А80В4БСУ1
P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,24	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	230	U_n , В	380/220
I_n , А	5,9	I_n , А	4,35	I_n , А	5,4	I_n , А	3,6/6,2
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1430	n_n , об/хв	1400
η_n , %	77	η_n , %	70	η_n , %	72	η_n , %	77
m , кг	43,8	m , кг	53	m , кг	78	m , кг	20,8
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ГОСТ	ПЭК-49	ГОСТ	ПЭК-49
Робоче місце №2							
М1		М2		М3		М4	
Тип	П-31	Тип	П-32	Тип	П-32	Тип	4А80В4У3
P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	230	U_n , В	380/220
I_n , А	8,6	I_n , А	6,5	I_n , А	6,5	I_n , А	3,52/6,1
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1395
η_n , %	79	η_n , %	71	η_n , %	71	η_n , %	75
m , кг	53	m , кг	62	m , кг	62	m , кг	13,8
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ТУ	16-525.564-84
Додатковий опір , що вводиться у якірне коло $R_o = 16 \text{ Ом}$							
Амперметр							
Вольтметр							

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати електромеханічні характеристики досліджуваного двигуна за каталожними даними: природну та штучну при введенні в коло якоря додаткового опору R_{δ} .

Розрахунок електромеханічних характеристик ДПС НЗ проводять згідно рівняння (9) за двома із трьох точок, координати яких найлегше визначити. Координати точок відповідають:

- режиму ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n}, \quad I_{я} = 0. \quad (16)$$

- режиму номінального навантаження

$$\omega_{ні} = \frac{U_n - I_{ян}(R_{я} + R_{\delta})}{k\Phi_n}, \quad I_{я} = I_{ян}. \quad (17)$$

- режиму короткого замикання

$$\omega = 0, \quad I_{я} = I_{к.з.} = \frac{U_n}{(R_{я} + R_{\delta})}. \quad (18)$$

На практиці найчастіше користуються координатами перших двох точок.

Параметр $k\Phi_n$ розрахувати за рівнянням (11), опір якірної обмотки ДПС НЗ – за рівнянням (5). Швидкість ідеального холостого ходу не залежить від опору обмоток якоря, тому для розрахунку характеристик достатньо обчислити координати режиму ідеального холостого ходу $(0; \omega_0)$ та координати режиму номінального навантаження за умови $R_{\delta} = 0$ ($I_{ян}; \omega_{н пр}$) та $R_{\delta} = 16 \text{ Ом}$ ($I_{ян}; \omega_{н шт}$).

За результатами розрахунків в одній системі координат побудувати природну та штучну електромеханічні характеристики $\omega = f(I_{я})$ дослідного двигуна.

3. Розрахувати і побудувати природну та штучну (при введенні у якірне коло додаткового опору $R_{\delta} = 16 \text{ Ом}$) механічні характеристики $\omega = f(M)$ дослідного двигуна.

Оскільки магнітний потік машини залишається незмінним, то зовнішній вигляд механічних характеристик ДПС НЗ ідентичний електромеханічним характеристикам і для їх побудови достатньо визначити електромагнітний момент дослідного електродвигуна при номінальному навантаженні $M_{емн} = k\Phi_n I_{ян}$.

Механічну характеристику побудувати за трьома точками з координатами $(0; \omega_0)$, $(M_{емн}; \omega_{н пр})$, $(M_{емн}; \omega_{н шт})$.

4. Експериментально визначити опір обмоток двигуна та привести їх до розрахункової робочої температури.

Загальні рекомендації щодо проведення досліду та обробки експериментальних даних наведено у розділі 2. Експериментальні дані занести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Експериментальні дані по визначенню опору обмоток ДПС НЗ типу _____

$t_l = \text{_____}^\circ\text{C}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$R_{t_2}, \text{Ом}$
<i>Я1-Я2</i>					
<i>Н1-Н2(Ш1-Ш2)</i>					

5. Схема електрична принципова експериментальної установки для зняття залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M1 - M2$ $\omega = f(M_{втрат})$ представлена на рисунку 10.

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M1$. Автоматом $QF1$ подати живлення на регульований випрямляч напруги VD . Замкнути рубильник $S1$. Змінюючи напругу на якорі машини $M1$ від 0 до 240 В вимірюють струм якорного кола та швидкість обертання машин. Дані занести до таблиці 3.

Величину електромагнітного моменту, необхідного для обертання системи $M1 - M2$ на холостому ході визначаємо за рівнянням

$$M_{втрати} = k\Phi_n I_{яM1i}, \quad (19)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними дослідного двигуна;
 $I_{яM1i}$ – струм якоря машини $M1$.

Таблиця 3 – Дані досліду залежності моменту втрат від кутової швидкості $\omega = f(M_{втрат})$ в системі машин $M1 - M2$

$U_{я}, \text{В}$	40	80	120	160	200	240
$I_{я}, \text{А}$						
$n, \text{об/хв}$						
$\omega, \text{рад/с}$						
$M_{втрат}, \text{Н}\cdot\text{м}$						

Зміна напрямку обертання системи машин $M1 - M2$ не впливає на величину втрат – графік залежності $\omega = f(M_{втрат})$ у III квадранті симетричний графіку у I квадранті відносно початку координат. Графік $\omega = f(M_{втрат})$ має розрив при зміні знаку кутової швидкості. Величина розриву чисельно дорівнює подвоєним втратам в агрегаті $M1 - M2$ при швидкості обертання рівній нулю.

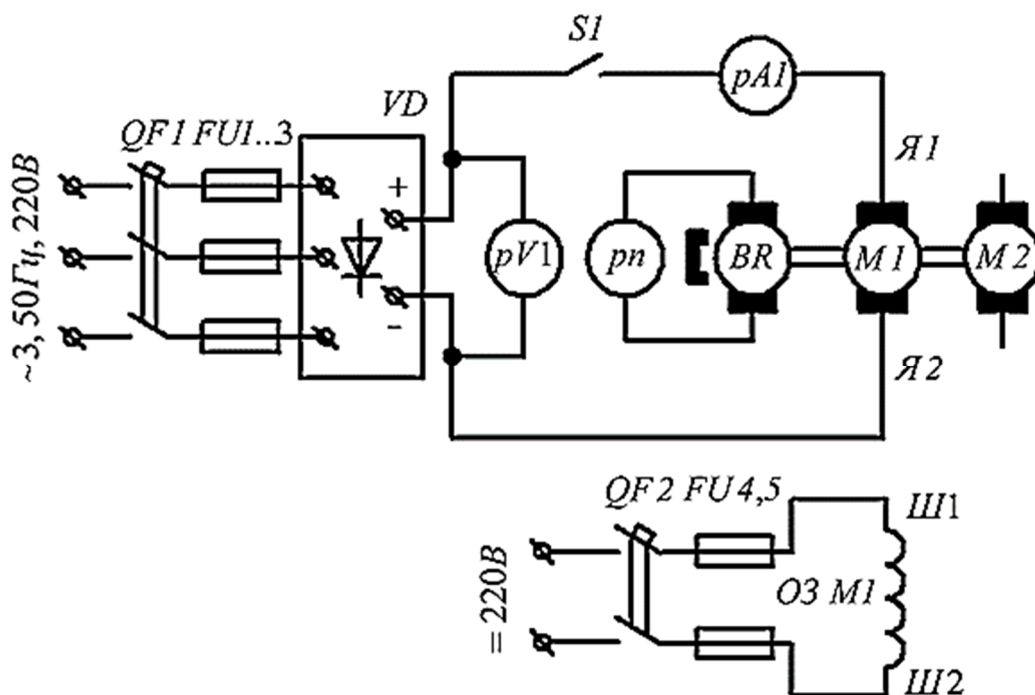


Рисунок 10 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження залежності моменту втрат в системі машин $M1-M2$ від швидкості

6. Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик ДПС НЗ представлена на рисунку 11.

Підготувати експериментальну установку до проведення дослідів за методикою, викладеною у розділі 2. Перемикач $S2$ встановити в положення 1. Під час проведення усіх дослідів струм в обмотці збудження машини $M2$ підтримувати незмінним.

7. Електромеханічну $\omega = f(I_a)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики ДПС НЗ починають знімати з режиму генераторного гальмування, а потім переходять до двигунного режиму. Перед замиканням рубильника $S1$ зафіксувати напрям відхилення стрілки амперметра $pA2$ – двигунний режим. Замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи струм в обмотці збудження машини $M3$ перевести досліджуваній двигун в генераторний режим. Перша точка характеристики знімається за максимальної швидкості обертання машини $M1$, що не має перевищувати більш ніж у 1,3 рази швидкість ідеального холостого ходу обертання ДПС НЗ та при струмі не більше $1,5I_{ян}$. Поступово зменшуючи струм в обмотці збудження машини $M3$, знімають декілька точок характеристики в режимі генераторного гальмування до частоти обертання магнітного поля статора n_0 . Струм якоря в генераторному режимі записують зі знаком мінус. При переході з режиму генераторного гальмування обов'язково записується точка характеристики, що відповідає режиму ідеального холостого ходу і далі, плавно зменшуючи струм в обмотці збудження машини $M3$, машину $M1$ перевести в

двигунний режим, збільшуючи навантаження на валу. Експериментальні дані занести до таблиці 4. Після закінчення досліду установку повернути у вихідне положення, ввести реостат R_0 в коло якоря та аналогічно виконаному раніше, зняти дані для побудови штучних електромеханічної та механічної характеристик в генераторному режимі та режимі двигуна.

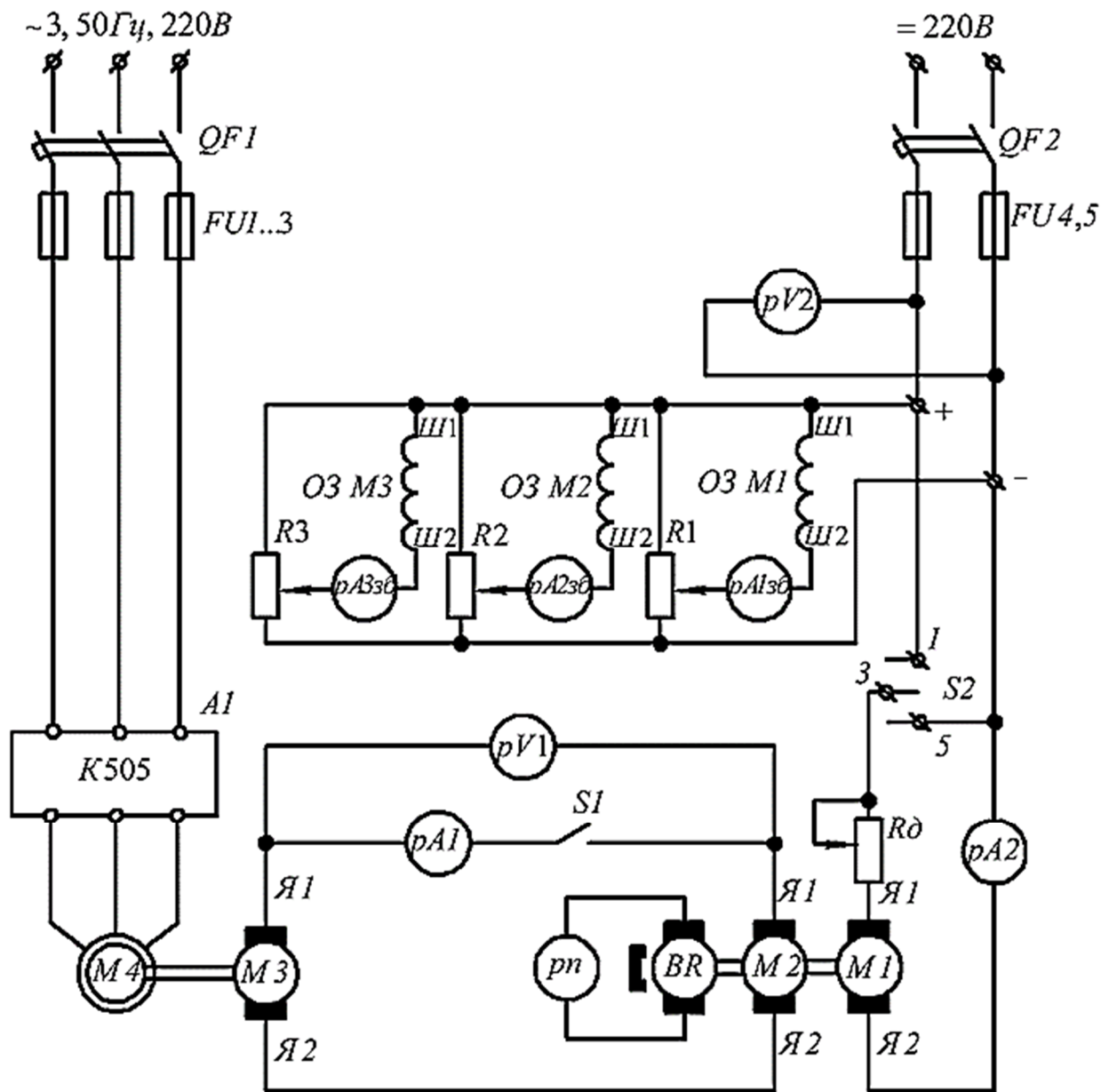


Рисунок 11 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик ДПС НЗ

Електромагнітний момент навантажувальної машини M_2

$$M_{EM M2i} = k\Phi_0 I_{я M2i}, \quad (20)$$

де $k\Phi_{\delta}$ – параметр машини $M2$, що залежить від величини магнітного потоку під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_{\delta}$ можна розрахувати за формулою

$$k\Phi_{\delta} = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_{н M2}, \quad (21)$$

де $k\Phi_{н M2}$ – параметр машини при номінальному магнітному потоці розрахувати за рівнянням (11).

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент ДПС НЗ $M1$ визначається
– у двигунному режимі

$$M_{EM M1} = |M_{EM M2}| + |M_{втрат}|, \quad (22)$$

– у генераторному режимі

$$M_{EM M1} = -|M_{EM M2}| + |M_{втрат}|. \quad (23)$$

8. Для дослідження характеристик ДПС НЗ у режимі динамічного гальмування при повністю введеному опорі $R_{\delta} = R_{2,\delta} = 16 \text{ Ом}$ необхідно підготувати дослідну установку згідно рекомендацій розділу 2. При цьому в обмотці збудження машини $M3$ встановити мінімальний струм, в обмотці збудження машини $M2$ – максимальний. Рубильник $S2$ перевести у положення 5. Замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи струм в обмотці збудження машини $M3$ зняти гальмівну характеристику двигуна $M1$. Результати експерименту записати в таблицю 5. Струм якоря записати зі знаком мінус.

Електромагнітний момент навантажувальної машини $M2$ визначити як

$$M_{EM M2i} = k\Phi_{н M2} I_{я M2i}, \quad (24)$$

Електромагнітний момент ДПС НЗ $M1$ в режимі динамічного гальмування визначається

$$M_{EM M1} = -|M_{EM M2}| + |M_{втрат}| \quad (25)$$

Таблиця 4 – Результати експериментального дослідження МХ і ЕМХ ДПС НЗ у двигунному та генераторному режимах роботи

Умови проведення досліджу	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Електромагнітний момент машини M_2			Момент втраг $M_{втраг}$, Н·м	Момент ДПС НЗ M_I $M_{EM M_I}$, Н·м
			$I_{яM_2}$, А	$I_{зб}$, А	$M_{EM M_2}$, Н·м		
$R_0 = 0 \text{ Ом}$	Генераторне гальмування						
	Двигунний режим						
$R_0 = 16 \text{ Ом}$	Генераторне гальмування						
	Двигунний режим						
Додаткові експериментальні дані							
Номінальний струм збудження машини M_2 $I_{збн} = \underline{\hspace{2cm}}$ А							

Таблиця 5 – Результати експериментального дослідження МХ і ЕМХ ДПС НЗ у режимі динамічного гальмування

Умови проведення досліджу	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Електромагнітний момент машини $M 2$		Момент втрат $M_{втрат}$, Н·м	Момент ДПС НЗ $M1$ $M_{EM M1}$, Н·м
			$I_{яM2}$, А	$M_{EM M2}$, Н·м		
$R_{\phi} = 16 \text{ Ом}$						
Додаткові експериментальні дані						
Номинальний струм збудження машини $M 2$ $I_{збн} = \underline{\hspace{2cm}}$ А;						

9. Для виконання досліджу гальмування противмиканням необхідно виключити установку з мережі постійної та змінної напруги. Розімкнути рубильник $S1$. Змінити напрям обертання двигуна $M 4$ зміною порядку чергування будь-яких двох фаз напруги живлення. Рубильник $S2$ перевести у положення 1. Запустити двигуни $M 4$ та $M 1$. Встановити номінальний струм в обмотці збудження машини $M 2$ та мінімальний в обмотці збудження $M 3$. Замкнути рубильник $S1$, при цьому швидкість двигуна сповільниться. Досліджуваний двигун буде працювати в двигунному режимі. Поступово збільшуючи струм в обмотці збудження машини $M 3$, зменшити швидкість двигуна $M 1$ до нуля, а потім змінити напрям його обертання. Результати експерименту занести до таблиці 6. Після закінчення досліджу установку вимкнути з мережі.

Електромагнітний момент навантажувальної машини $M 2$ визначити за (24).

Електромагнітний момент ДПС НЗ $M 1$ в режимі гальмування противмиканням визначається

$$M_{EM M1} = |M_{EM M2}| + |M_{втрат}|. \quad (26)$$

10. За експериментальними даними таблиць 4 - 6 в одній системі координат побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи.

Таблиця 6 – Результати експериментального дослідження МХ і ЕМХ характеристик ДПС НЗ у режимі гальмування противмиканням

Умови проведення досліджу	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Електромагнітний момент машини $M2$		Момент втрат $M_{втрат}$, Н·м	Момент ДПС НЗ $M1$ $M_{EM M1}$, Н·м
			$I_{яM2}$, А	$M_{EM M2}$, Н·м		
$R_0 = 16 \text{ Ом}$						
Додаткові експериментальні дані						
Номинальний струм збудження машини $M2$ $I_{збн} = \text{_____}$ А;						

11. Порівняти результати розрахунку механічної характеристики за каталожними та експериментальними даними.

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку та графіки механічних і електромеханічних характеристик досліджуваного двигуна, розраховані за каталожними даними.
3. Схеми електричні принципові експериментальних установок рисунки 10, 11.
4. Результати розрахунку моменту втрат холостого ходу у системі машин $M1 - M2$.
5. Графіки залежностей електромеханічних $\omega = f(I_{я})$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик досліджуваного ДПС НЗ за різних режимів роботи, отримані експериментальним шляхом.
6. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. За принциповою електричною схемою пояснити метод зворотної роботи електричних машин?
2. Від чого залежить ЕРС і електромагнітний момент ДПС НЗ?

3. Дайте визначення електромеханічній та механічній характеристиці ДПС НЗ.
4. Дайте визначення природної і штучної механічної характеристик?
5. Записати рівняння електромеханічної і механічної характеристики двигуна постійного струму і проаналізувати їх.
6. Як розрахувати і побудувати природні МХ і ЕМХ ДПС НЗ за каталожними даними?
7. Як визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС НЗ за даними каталогу і за дослідними даними?
8. Пояснити, чому характеристики ДПС НЗ представляють собою прямі лінії? Від чого залежить жорсткість характеристик?
9. Назвіть режими роботи ДПС НЗ.
10. Як перевести двигун в режим генераторного гальмування?
11. Як зміниться механічна характеристика ДПС НЗ при введенні опору в коло якоря?
12. Як здійснити гальмування противмиканням ДПС НЗ?
13. Як здійснити динамічне гальмування ДПС НЗ?
14. Як визначити струм якоря у гальмівних режимах ДПС НЗ?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.
2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: вивчити електромеханічні і механічні характеристики трифазного АД; засвоїти методику розрахунку і експериментального одержання електромеханічних та механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

1 Основні теоретичні відомості

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Область застосування асинхронних електродвигунів досить широка – від приводів пристроїв автоматики до приводу потужного горновидобувного обладнання: екскаваторів, подрібнювачів, млинів тощо.

Для асинхронних електродвигунів існує дві електромеханічні характеристики – залежності кутової швидкості обертання ротору машини від величини струму ротора $\omega = f(I_2')$ або струму статора $\omega = f(I_1)$. З практичної точки зору більш зручно користуватися залежністю за струмом статора.

Механічною характеристикою АД називається залежність кутової швидкості обертання валу машини від електромагнітного моменту $\omega = f(M)$.

Природні характеристики електродвигуна можна одержати при забезпеченні номінальних значень показників мережі живлення і параметрів машини.

Рівняння електромеханічної (ЕМХ) і механічної (МХ) характеристики асинхронного двигуна можуть бути одержані на основі розгляду спрощеної Г- подібної схеми заміщення фази статора, зображеної на рисунку 1.

При виведенні рівняння ЕМХ і МХ прийняті такі припущення:

- активний опір обмотки ротора не залежить від частоти струму в ньому;
- насичення магнітної системи двигуна не впливає на величину індуктивних опорів обмоток статора і ротора;
- провідність контура намагнічування не залежить від навантаження, а лише від напруги;
- додаткові втрати енергії у двигуні не враховуються;
- моменти, що створюються магніторушійними силами вищих гармонічних складових не враховуються.

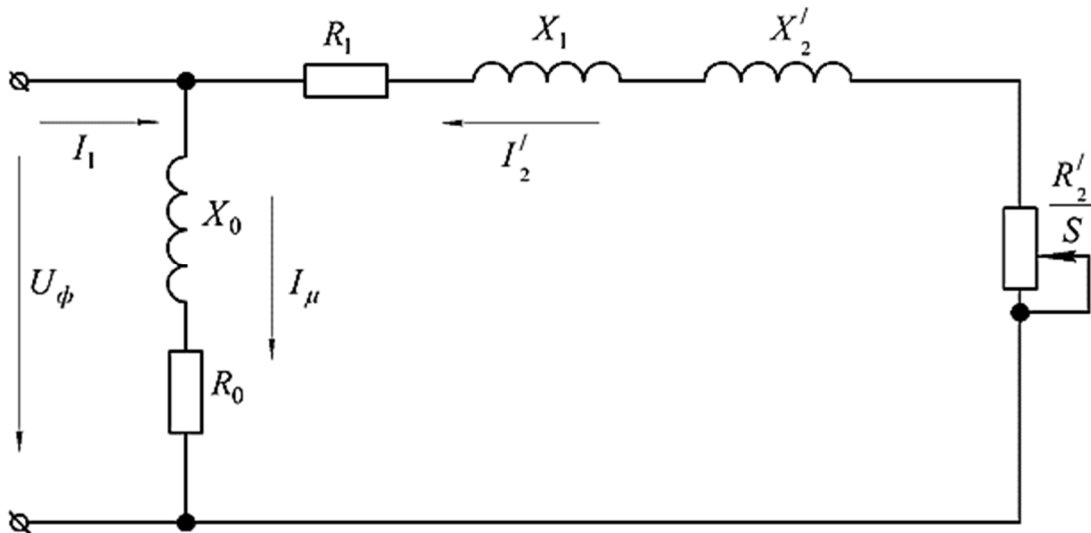


Рисунок 1 – Г- подібна схема заміщення фази статора асинхронного електродвигуна

Згідно із схемою заміщення фазний струм обмотки ротора, зведений до обмотки статора, визначається залежністю

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (1)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги, В;

S – ковзання електродвигуна, в.о.;

R_1, X_1 – активний та індуктивний опір обмотки статора, Ом;

R_2', X_2' – приведені активний і індуктивний опір обмотки ротора, Ом.

Електромеханічну характеристику по струму статора можна отримати через провідності схеми заміщення

$$I_1 = U_\phi \left[\frac{1}{R_0 + jX_0} + \frac{1}{R_1 + R_2' / S + jX_k} \right] \quad (2)$$

або

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (-I_2')^2}, \quad (3)$$

де X_k – індуктивний опір двигуна при короткому замиканні, Ом;

R_0, X_0 – активний та індуктивний опір контура намагнічування, Ом;

I_μ – струм намагнічування – струм холостого ходу, А.

За рівнянням (2) зручно аналізувати роботу АД за різних енергетичних режимів роботи, а рівняння (3) дозволяє практично визначити струм статора та побудувати ЕМХ за струмом статора.

Струм намагнічування визначають

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1n}^2 + (-I'_{2n})^2}, \quad (4)$$

де I_{1n} , I'_{2n} – відповідно номінальний струм статора і номінальний приведений струм ротора, А.

Номінальний струм статора

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi_n \eta_n}, \quad (5)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

U_n – номінальна лінійна напруга, Ом;

$\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності, в.о.;

η_n – номінальний ККД електродвигуна, в.о.

З рівняння (2) можна зробити наступні висновки:

– при синхронній швидкості ($S = 0$) двигун споживає струм намагнічування $I_1 = I_{\mu}$;

– при нерухомому роторі ($S = 1$) двигун споживає пусковий струм $I_1 = I_n$; пусковий струм двигуна не залежить від навантаження, а залежить від параметрів двигуна (R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2) і величини напруги U_{ϕ} на обмотці статора;

– при швидкості, більшій за синхронну ($S < 0$) активна складова струму статора змінює свій знак – машина працює в генераторному режимі.

Часто ЕМХ АД показують у вигляді залежності струму від ковзання S . На рисунку 2 наведені ЕМХ $\omega = f(I'_2)$, $\omega = f(I_1)$. На осі ординат відкладені кутова швидкість і ковзання, які пов'язані між собою співвідношенням

$$\omega = \omega_0(1 - S), \quad (6)$$

де ω_0 – синхронна швидкість обертання електродвигуна, рад/с.

Електромеханічна характеристика має наступні характерні точки:

- 1) $S = 0$, $\omega = \omega_0$, $I'_2 = 0$, $I_1 = I_{\mu}$ – ідеального холостого ходу;
- 2) $S = 1$, $\omega = 0$, $I_1 = I_n$ – короткого замикання (пуску);

3) $S_1 = -R_2' / R_1$, $\omega_1 = \omega_0(1 - S_1)$, $I_2' = I_{2\max}' = U_\phi / X_k$ – максимального значення струму в області від'ємних ковзань;

4) $S \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \mp\infty$, $I_2' = I_\infty = U_\phi / \sqrt{R_1^2 + X_k^2}$ – асимптотичне значення струму ротора при безмежному збільшенні ковзання і швидкості.

Рівняння механічної характеристики АД можна отримати із рівняння балансу потужності в колі ротора.

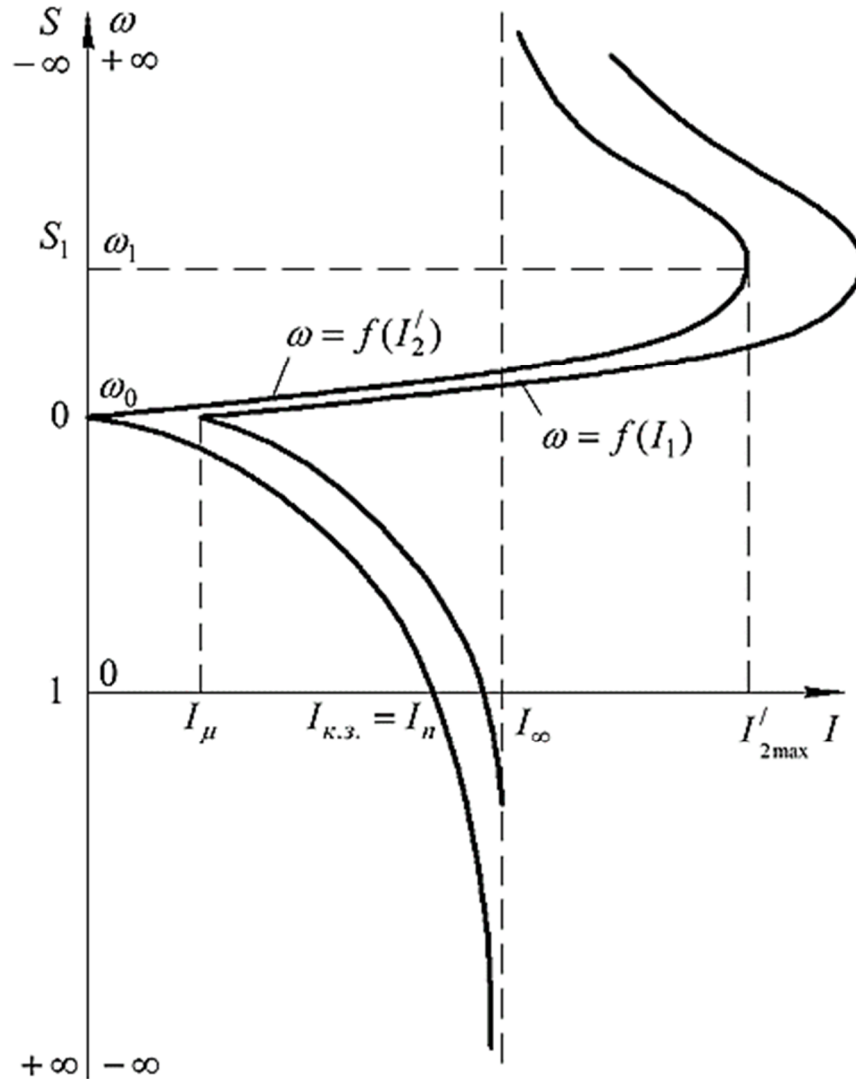


Рисунок 2 – Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна за струмом ротора $\omega = f(I_2')$ та статора $\omega = f(I_1)$

Згідно з законом Джоуля-Ленца втрати потужності в колі ротора, виражені через електричні величини

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2'. \quad (7)$$

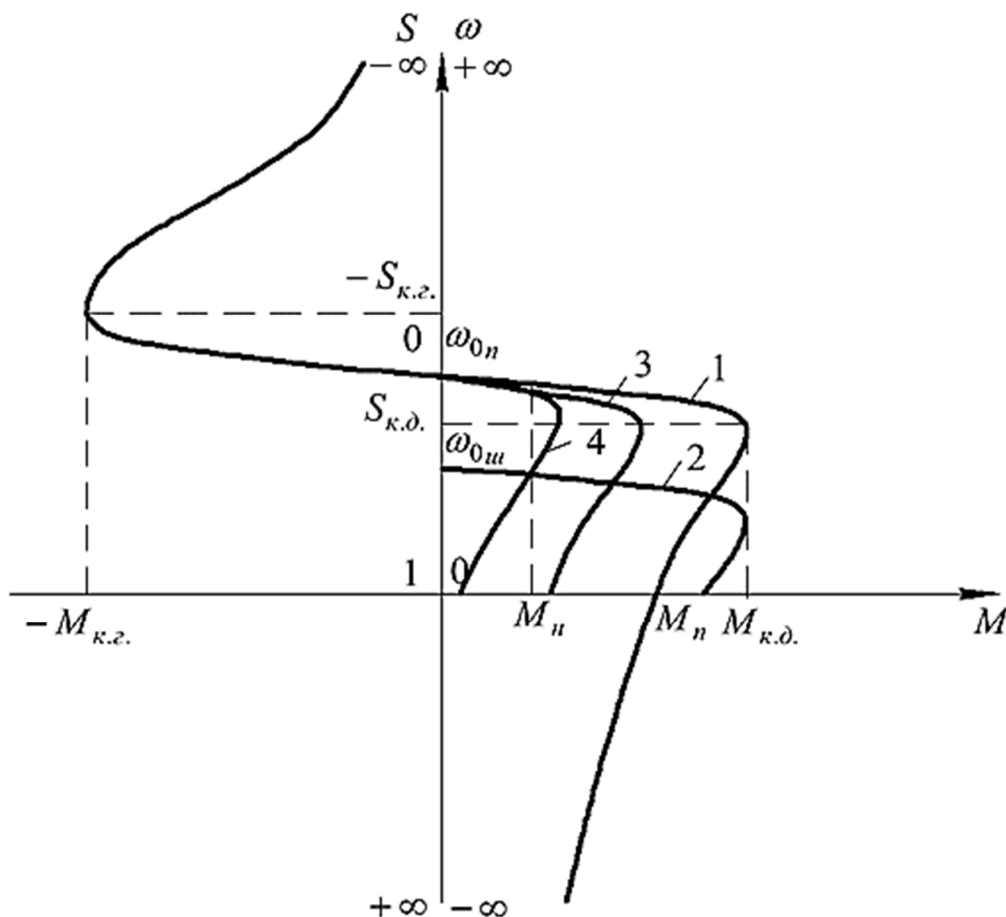
Втрати потужності в колі ротора виражені через механічні величини АД – різниця між електромагнітною потужністю $\Delta P_2 = M\omega_0$ і корисною механічною потужністю на валу $\Delta P_2 = M\omega$.

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 S. \quad (8)$$

Прирівнявши (7) і (8) отримаємо рівняння електромагнітного моменту двигуна в параметричній формі

$$M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_0 S} = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 S \left[(R_1 + R_2'/S)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (9)$$

Механічна характеристика, побудована за (9) має вигляд, показаний на рисунку 3 крива 1.



1 – природна, 2, 3, 4 – штучні при зміні частоти напруги живлення $f_1 < f_{1н}$,
при зниженні напруги живлення $U_1 < U_{1н}$ та введенні в коло статора
додаткового опору $Z_1 > Z_0$ відповідно

Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна

Графік залежності має два екстремуми: критичні (максимальні) моменти у двигунному (1 чверть) і генераторному (2 чверть) режимах. Взявши похідну рівняння (9) по S та розв'язавши рівняння отримаємо значення критичного ковзання, при якому двигун розвиває максимальний момент

$$S_{\kappa} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (10)$$

Підставивши S_{κ} в (9) одержимо вираз максимального моменту

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (11)$$

Критичний момент АД є найбільшим значенням електромагнітного моменту, який може розвивати двигун, що працює при заданих значеннях напруги і опорах. У формулі (11) знак «+» ставлять при розрахунку характеристики в двигунному режимі роботи, знак «-» – у генераторному.

Якщо у (9) замість S підставити значення ковзання при пуску $S = 1$, то дістанемо вираз для пускового моменту

$$M_n = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (12)$$

Пусковий момент не є найменшим значенням моменту в двигунному режимі. При малих кутових швидкостях ($S_{min} = 0,8 \dots 0,85$) МХ АД має провал внаслідок впливу асинхронних моментів від вищих непарних гармонік в магнітному полі обмоток. Це необхідно враховувати при пуску двигуна під навантаженням.

Аналізуючи рівняння (9, 10, 11) можна зробити наступні висновки:

- крутий момент АД пропорційний квадрату напруги;
- критичне ковзання за абсолютною величиною однакове для двигунного і генераторного режимів;
- критичне ковзання не залежить від напруги, а лише від параметрів двигуна;
- критичне ковзання пропорційне активному опору кола ротора;
- критичний момент за абсолютною величиною в режимі генератора більший, ніж у двигунному режимі, що обумовлено впливом падіння напруги на активному опорі статора.

На рисунку 3 наведена механічна характеристика АД і її характерні точки, визначивши координати яких можна побудувати природну МХ:

- 1) $S = 0, \quad \omega = \omega_0, \quad M = 0$ – ідеального холостого ходу;
- 2) $S = 1, \quad \omega = 0, \quad M = M_{к.з.} = M_n$ – точка короткого замикання (пуску);
- 3) $S = S_{к.д.}, \quad \omega = \omega_{к.д.}, \quad M = M_{к.д.}; \quad S = -S_{к.з.}, \quad \omega = \omega_{к.з.}, \quad M = -M_{к.з.}$ – точки максимальних моментів в режимі двигуна і генератора;
- 4) $S = S_n, \quad \omega = \omega_n, \quad M = M_n$ – точка номінального режиму;
- 5) $S \rightarrow \pm\infty, \quad \omega \rightarrow \mp\infty, \quad M \rightarrow 0$ – асимптота МХ, якою є вісь швидкості.

Енергетичний режим роботи АД визначається величиною і знаком ковзання, а саме:

- 1) $S = 0, \quad \omega = \omega_0$ – режим ідеального холостого ходу (машина споживає з мережі струм намагнічування, ротор двигуна обертає робоча машина);
- 2) $0 < S < 1, \quad \omega_0 > \omega > 0$ – двигунний режим;
- 3) $S = 1, \quad \omega = 0, \quad M = M_{к.з.} = M_n$ – режим короткого замикання (споживана з мережі електрична енергія витрачається на нагрівання опорів обмоток двигуна);
- 4) $S < 0, \quad \omega > \omega_0$ – режим рекуперативного гальмування (генераторний режим паралельно з мережею живлення);
- 5) $S > 1, \quad \omega < 0$ – режим гальмування противмиканням (генераторний режим послідовно з мережею живлення);
- 6) Режим динамічного гальмування – генераторний режим незалежно від мережі змінного струму.

В двигунному режимі роботи АД споживає активну та реактивну енергії з мережі. При цьому електрорушійні сили статора і ротора співпадають за напрямком, оскільки обертальне магнітне поле перетинає провідники статора і ротора в одному напрямку. Знаки електромагнітного моменту та швидкості співпадають. Механічні характеристики розташовуються у I та III квадрантах (рисунок 4).

Точки A, B, C, D, F відповідають характерним точкам роботи: пускового моменту, мінімального моменту, максимального моменту, номінального навантаження та ідеального холостого ходу відповідно.

Рекуперативне гальмування (генераторне гальмування) виникає, коли кутова швидкість ротора перевищує синхронну ($\omega > \omega_0$) за рахунок енергії, яка поступає на вал АД від зовнішнього джерела. При цьому ЕРС ротора змінює свій знак, так як обертальне магнітне поле перетинає його провідники в зворотному напрямку, а ЕРС статора зберігає свій знак. При цьому активна потужність віддається в мережу. Реактивна потужність споживається з мережі як і в режимі двигуна. Знаки електромагнітного моменту та швидкості протилежні. При цьому знак швидкості залишається таким же, як у двигунному режимі, а момент – змінює знак. Механічні характеристики розташовуються у II та IV квадрантах (рисунок 5).

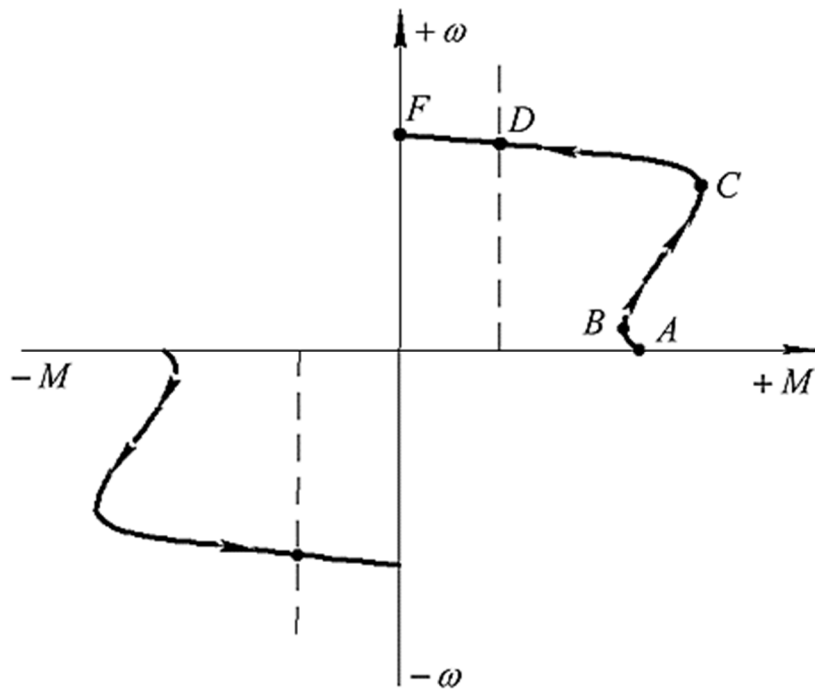


Рисунок 4 – Механічні характеристики АД

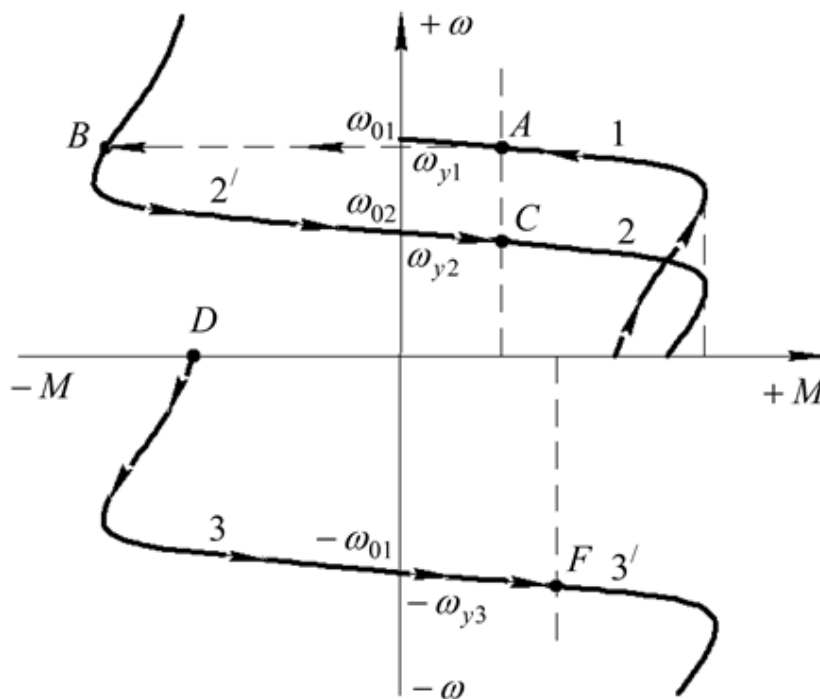


Рисунок 5 – Механічні характеристики АД при рекупераційному гальмуванні

Режим може виникнути при: частотному керуванні і зниженні частоти перетворювача; перемиканні багатшвидкісного двигуна з меншого числа пар полюсів на більше (з вищої швидкості на нижчу); спуску вантажу. В усіх цих випадках АД працює як асинхронний генератор паралельно з мережею живлення.

Механічні характеристики АД, що відповідають рекупераційним гальмівним режимам, наведено на рисунку 5 – криві 2' та 3'. Процес зниження швидкості АД супроводжується переходом двигуна у режим РГ. Припустимо,

що АД працював на МХ 1 в точці A з кутовою швидкістю ω . При перемиканні на нижчу швидкість робоча точка АД переходить в точку B на МХ 2', ділянка якої $B - \omega_{02}$ відповідає рекуперативному гальмуванню. В точці C МХ 2 АД працює з усталеною швидкістю ω_{y2} . Рекуперативне гальмування може бути реалізовано в ЕП вантажопідйомних механізмів при спуску вантажу. Для цього (після реверсування) АД вмикається в точці D в напрямку спуску вантажу МХ 3. Після розгону він працює в точці F МХ 3' з усталеною кутовою швидкістю $-\omega_{y3}$. При цьому здійснюється процес спуску вантажу з віддачею активної енергії в мережу.

Гальмування противмиканням для АД з к.з. ротором може бути здійснено для приводів як з реактивними, так і активними моментами опору зміною чергування двох фаз напруги живлення АД на ходу. При цьому знак електромагнітного моменту змінюється на протилежний, а знак швидкості – зберігається. Характеристики знаходяться у II і IV квадрантах (рисунок 6).

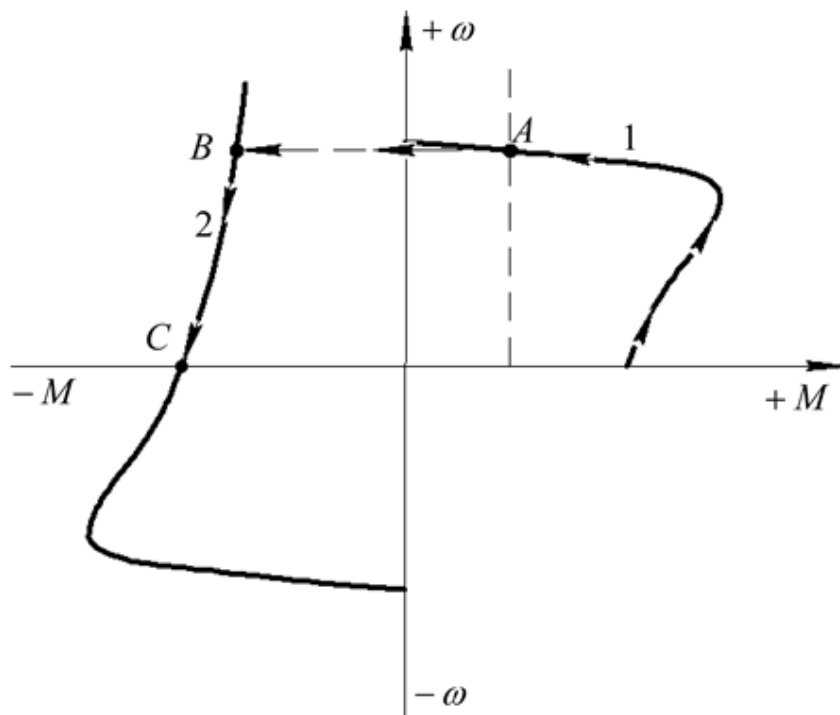


Рисунок 6 – Механічні характеристики АД при гальмуванні противмиканням

Припустимо, що АД працює в точці A двигунного режиму на МХ 1. При зміні чергування двох фаз робоча точка переходить в точку B на МХ 2, ділянка якої $B - C$ відповідає гальмуванню противмиканням. В момент зупинки в точці C двигун вимикають.

При гальмуванні противмиканням, як правило, необхідно обмежувати струм і момент АД, що досягається ввімкненням додаткових резисторів в коло статора або ротора.

Недоліками гальмування противмиканням АД є великі втрати енергії і

мала жорсткість МХ. Аналітично МХ АД у режимі гальмування противмиканням описуються тими ж рівняннями, що й МХ двигунного режиму. При цьому слід відзначити, що режим противмикання має місце при ковзаннях, більших за одиницю.

Електродинамічне гальмування АД здійснюється при відключенні працюючого електродвигуна від мережі живлення та подачі в обмотку статора постійного струму або підключенням паралельно до обмоток статора конденсаторів. В першому випадку маємо режим динамічного гальмування з незалежним збудженням, у другому – із самозбудженням.

Щоб створити режим електродинамічного гальмування АД із збудженням постійним струмом, треба вимкнути двигун з мережі змінного струму і ввімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рисунку 7, обмеживши постійний струм до значення 3...4 кратності струму холостого ходу двигуна. Постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор ЕД. В обмотці ротора наводиться ЕРС, під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. Взаємодією струму ротора з нерухомим магнітним полем статора створюється гальмівний момент. При зниженні кутової швидкості ротора до нуля ЕРС, струм в обмотці ротора і гальмівний момент також зменшуються до нуля. Після зупинки ротора двигун вимикають. Характеристики розташовуються у II і IV квадрантах.

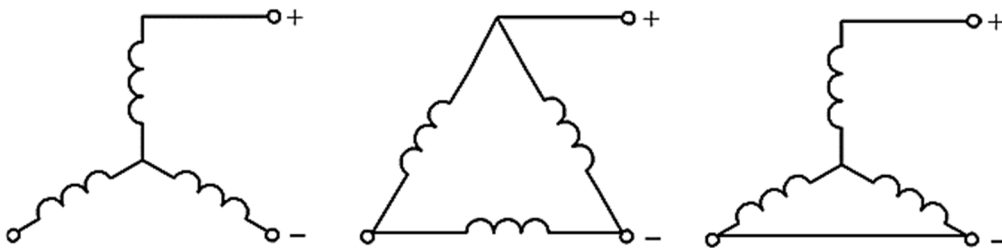


Рисунок 7 – Схеми з'єднання обмоток статора при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

Механічні характеристики АД з КЗ ротором, що працює в режимі електродинамічного гальмування представлена на рисунку 8.

Практично механічну характеристику асинхронного двигуна отримують при розрахунку за каталожними даними за п'ятьма характерними точками та за рівнянням Клосса

$$M_i = \frac{2M_{\kappa}(1 + \alpha S_{\kappa})}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i} + 2\alpha S_{\kappa}}, \quad (13)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$ – відношення активного опору обмотки статора до приведенного значення опору обмотки ротора, в.о. Приймаємо $\alpha = 1$;
 S_i – ковзання електродвигуна, в.о.

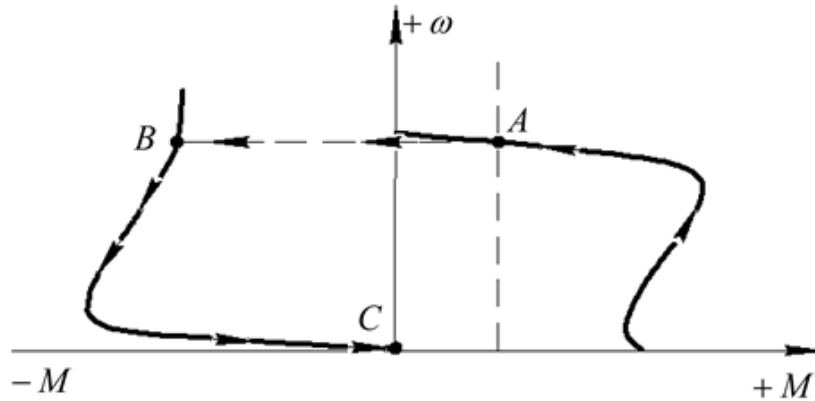


Рисунок 8 – Механічні характеристики АД при динамічному гальмуванні

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 4, лекція «Статичні механічні та електромеханічні характеристики трифазних асинхронних електродвигунів»; 2, с. 79-98; 3, с. 37-47; 4, с. 428-434].
2. Відповісти на контрольні запитання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.
2. Розрахувати та побудувати природну електромеханічну характеристику досліджуваного асинхронного електродвигуна $\omega = f(I_1)$.
3. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну та штучну (при $U_m = 220 \text{ В}$) механічні характеристики трифазного АД $\omega = f(M)$ за п'ятьма характерними точками.
4. Експериментально визначити омичний опір фази статора АД та привести його до розрахункової робочої температури.
5. Провести дослід по встановленню залежності моменту втрат в системі машин $M_4 - M_3$ від швидкості $\omega = f(M_{втрат})$.
6. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик трифазного асинхронного двигуна.
7. Дослідити електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики АД в генераторному, двигунному режимах та у режимі гальмування

протівмиканням при з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

8. Дослідити механічну характеристику $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування із збудженням постійним струмом при різній величині струму збудження.

9. Дослідити механічні характеристики $\omega = f(M)$ АД при однофазному живленні і з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

10. Дослідити механічні характеристики асинхронного двигуна $\omega = f(M)$ при вмиканні опору R_δ в одну фазу статора при з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 B$. Величину опору R_δ розрахувати так, аби пусковий момент знизився у два рази порівняно з природним.

11. За експериментальними даними побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

12. Провести аналіз механічних характеристик, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом (при цьому врахувати, що експеримент проводиться при зниженій напрузі $\sim 220 B$).

13. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

Робоче місце №1							
М1		М2		М3		М4	
1	2	3	4	5	6	7	8
Тип	П-22	Тип	П-31	Тип	ПН-17,5	Тип	4А80В4БСУ1
P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,24	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	230	U_n , В	380/220
I_n , А	5,9	I_n , А	4,35	I_n , А	5,4	I_n , А	3,6/6,2
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1430	n_n , об/хв	1400
η_n , %	77	η_n , %	70	η_n , %	72	η_n , %	77
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
m , кг	43,8	m , кг	53	m , кг	78	μ_k	2,2
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ГОСТ	ПЭК-49	μ_n	2
-	-	-	-	-	-	μ_{min}	1,6
-	-	-	-	-	-	$\cos\varphi_n$	0,83

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8
-	-	-	-	-	-	k_i	5
-	-	-	-	-	-	m, кг	20,8
-	-	-	-	-	-	ГОСТ	ПЭК-49
Робоче місце №2							
M1		M2		M3		M4	
Тип	П-31	Тип	П-32	Тип	П-32	Тип	4A80B4У3
P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	230	U_n , В	380/220
I_n , А	8,6	I_n , А	6,5	I_n , А	6,5	I_n , А	3,52/6,1
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1395
η_n , %	79	η_n , %	71	η_n , %	71	η_n , %	75
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
m, кг	53	m, кг	62	m, кг	62	μ_k	2,2
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	μ_n	2
-	-	-	-	-	-	μ_{min}	1,6
-	-	-	-	-	-	$\cos\varphi_n$	0,83
-	-	-	-	-	-	k_i	5
-	-	-	-	-	-	m, кг	13,8
-	-	-	-	-	-	ТУ	16-525.564-84
Комплект вимірювальний К 505							
Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5							
Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с							
Амперметр							
Вольтметр							

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати природну електромеханічну характеристику досліджуваного асинхронного електродвигуна $\omega = f(I_1)$.

Розрахунок електромеханічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором за каталожними даними можливий, хоча обчислення виходять громіздкі. Для інженерних розрахунків з достатнім ступенем точності може бути використана універсальна електромеханічна характеристика трифазного АД з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення, приведена у відносних одиницях (рисунки 9).

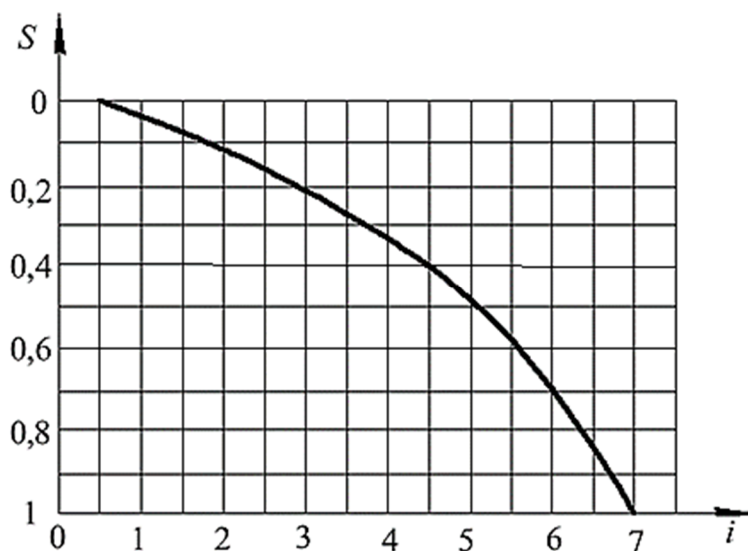


Рисунок 9 – Універсальна електромеханічна характеристика АД з к.з. ротором загальнопромислового призначення

Дійсне значення струму статора при будь-якому ковзанні визначається

$$I_{1i} = i I_{1n}, \quad (14)$$

де i – кратність струму, в.о.;

I_{1n} – номінальний струм двигуна, А. Визначається за (5).

Кутову швидкість при будь-якому ковзанні можна визначити

$$\omega_i = \omega_0 (1 - S_i). \quad (15)$$

Розрахунки зручно вести за таблицею 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку електромеханічної характеристики АД з короткозамкненим ротором

i , в.о.							
I_{1i} , А							
S_i , в.о.							
ω_i , рад/с							

Електромеханічну характеристику побудувати у координатах $\omega = f(I_1)$.

3. Розрахувати та побудувати природну та штучну (при $U_m = 220 \text{ В}$) механічні характеристики трифазного АД $\omega = f(M)$.

Механічну характеристику будують за п'ятьма характерними точками:

1. Точка ідеального холостого ходу із координатами $\omega = \omega_0, M = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за рівнянням

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (16)$$

2. Точка номінального навантаження $\omega = \omega_n$, $M = M_n$.

Номінальна кутова швидкість визначається за рівнянням

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (17)$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент, що розвиває двигун

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (18)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

3. Точка максимальної перевантажувальної здатності $\omega = \omega_k$, $M = M_k$.

Швидкість, за якої двигун розвиває максимальний момент

$$\omega_k = \omega_0(1 - S_k). \quad (19)$$

Критичне ковзання

$$S_k = S_n \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2S_n(\mu_k - 1)}}{1 - 2S_n(\mu_k - 1)}. \quad (20)$$

Номінальне ковзання

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}. \quad (21)$$

Максимальний момент, який розвиває двигун

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (22)$$

де μ_k – кратність максимального моменту, в.о.

4. Точка мінімального моменту $\omega = \omega_{\min}$, $M = M_{\min}$.

Швидкість, за якої двигун досягає мінімального моменту

$$\omega_{\min} = \omega_0(1 - S_{\min}), \quad (23)$$

де S_{\min} – ковзання, при якому спостерігається провал моменту, в.о.,
 $S_{\min} = 0,8...0,85$.

Мінімальний момент двигуна

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_n, \quad (24)$$

де μ_{\min} – кратність мінімального моменту, в.о.

5. Точка пускового моменту $\omega = 0, M = M_n$.

Пусковий момент двигуна

$$M_n = \mu_n M_n, \quad (25)$$

де μ_n – кратність пускового моменту, в.о.

Момент, що розвиває двигун при зниженні напруги на його обмотках визначається

$$M'_{i(U_M)} = k_U^2 M_{i(U_n)}, \quad (26)$$

де $k_U = \frac{U_M}{U_n}$ – коефіцієнт зниження напруги, в.о.;

U_M – дійсне значення напруги мережі, В;

U_n – номінальна напруга електродвигуна, В.

За розрахунковими даними в одній системі координат побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна.

4. Експериментально визначити омичний опір фази статора АД та привести його до розрахункової робочої температури.

Загальні рекомендації щодо проведення досліду та обробки експериментальних даних наведено у розділі 2. Експериментальні дані занести до таблиці 3.

Таблиця 3 – Експериментальні дані по визначенню омичного опору фази статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу _____

$t_1 = \text{_____} \text{ } ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$	$R_{t_2}, \text{ Ом}$
C_1-C_4					
C_2-C_5					
C_3-C_6					

5. Схема електрична принципова експериментальної установки для зняття залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M4 - M3$ $\omega = f(M_{втрат})$ представлена на рисунку 10.

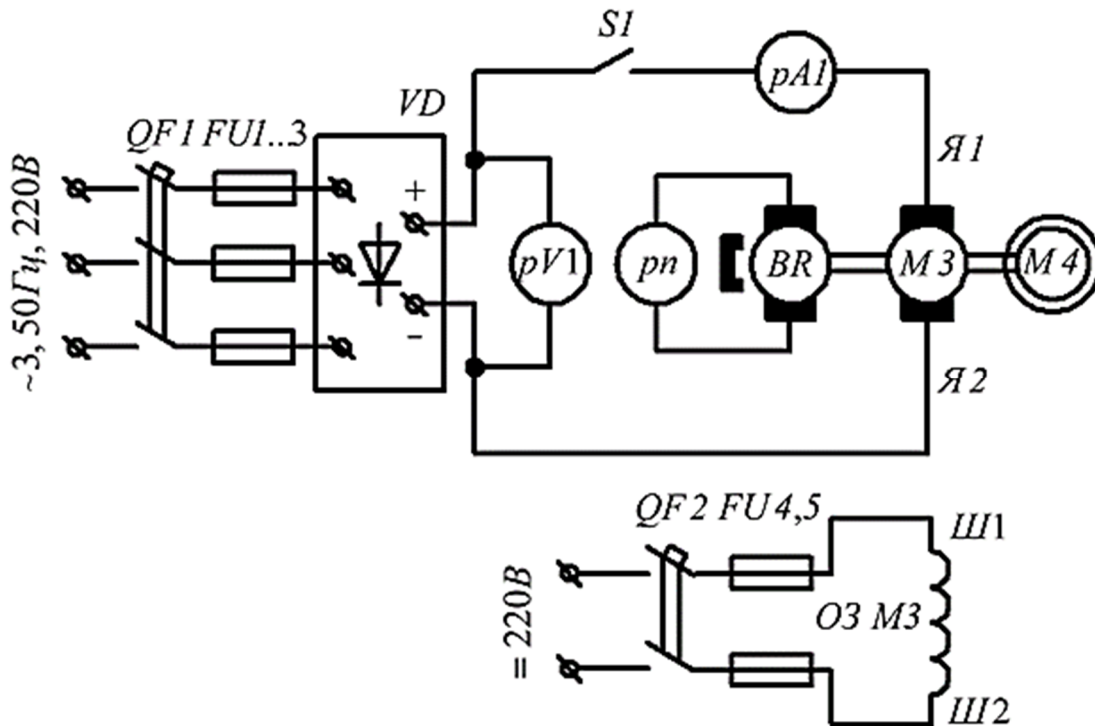


Рисунок 10 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження залежності моменту втрат в системі машин $M4 - M3$ від швидкості

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M3$. Автоматом $QF1$ подати живлення на регульований випрямляч напруги VD . Замкнути рубильник SI . Змінюючи напругу на якорі машини $M3$ від 0 до 240 В вимірюють струм якорного кола та швидкість обертання машин. Дані занести до таблиці 4.

Таблиця 4 – Дані досліду залежності моменту втрат від кутової швидкості $\omega = f(M_{втрат})$ в системі машин $M4 - M3$

$U_{я}, В$	40	80	120	160	200	240
$I_{я}, А$						
$n, об/хв$						
$\omega, рад/с$						
$M_{втрат} Н\cdot м$						

Величину електромагнітного моменту, необхідного для обертання системи $M4 - M3$ на холостому ході визначаємо за рівнянням

$$M_{втрати} = k\Phi_n I_{яМ3i}, \quad (27)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними навантажувальної машини постійного струму;

$I_{яМ3i}$ – струм якоря машини МЗ .

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (28)$$

де $R_{я}$ – опір кола якоря, що визначається за паспортними даними або безпосереднім вимірюванням, Ом.

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}. \quad (29)$$

Зміна напрямку обертання системи машин М4 - МЗ не впливає на величину втрат – графік залежності $\omega = f(M_{втрати})$ у III квадранті симетричний графіку у I квадранті відносно початку координат. Графік $\omega = f(M_{втрати})$ має розрив при зміні знаку кутової швидкості. Величина розриву чисельно дорівнює подвоєним втратам в агрегаті М4 - МЗ при швидкості обертання рівній нулю.

6. Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з к.з. ротором представлена на рисунку 11.

Підготувати експериментальну установку до проведення дослідів за методикою, викладеною у розділі 2. Під час проведення усіх дослідів струм в обмотці збудження машини М3 підтримувати незмінним.

7. Електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики асинхронного двигуна починають знімати з режиму генераторного гальмування, а потім переходять до двигунного режиму та гальмування противмиканням. Перед замиканням рубильника S1 зафіксувати напрям відхилення стрілки амперметра та ватметра вимірювального комплексу К505 – двигунний режим. Замкнути рубильник S1. Збільшуючи струм в обмотці збудження машини М2 перевести двигун в генераторний режим. Перша точка характеристики знімається за максимальної швидкості обертання двигуна М4, що не має перевищувати більш ніж у 1,5 рази синхронну швидкість обертання АД. Поступово зменшуючи струм в обмотці збудження машини М2, знімають декілька точок характеристики в режимі генераторного гальмування до точки синхронної кутової швидкості n_0 . Струм якоря в генераторному режимі записують зі знаком мінус. При переході з режиму генераторного гальмування обов'язково записується точка характеристики, що відповідає режиму ідеального холостого ходу і далі, плавно зменшуючи струм в обмотці збудження машини М2, двигун М4 перевести в двигунний режим, збільшуючи

навантаження на валу. Експериментальні дані занести до таблиці 5. Після закінчення досліду установку повернути у вихідне положення.

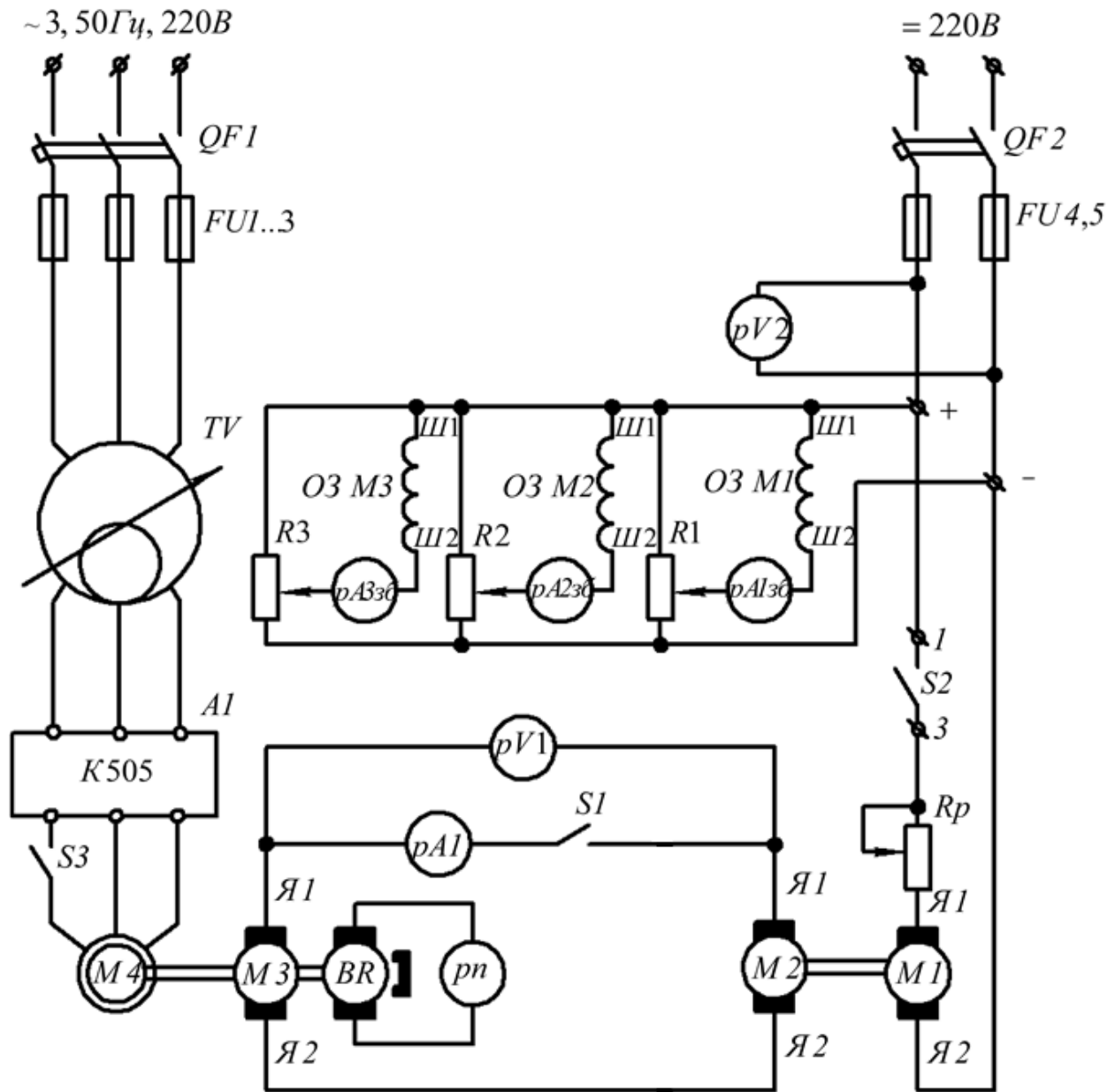


Рисунок 11 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з короткозамкненим ротором

Для виконання досліду гальмування противмиканням необхідно виключити установку з мережі постійної та змінної напруги. Розімкнути рубильник $S1$. Змінити напрям обертання двигуна $M4$ зміною порядку чергування будь-яких двох фаз напруги живлення. Запустити двигуни $M4$ і $M1$.

Таблиця 5 – Результати експериментального дослідження МХ і ЕМХ АД у режимах роботи: генераторного гальмування, двигунному і гальмуванні противмиканням

Струм статора АД I_l, A	Частота обертання $n, \text{об/хв}$	Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$	Електромагнітний момент машини M_3		Момент втрат $M_{\text{втрат}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Н}\cdot\text{м}$
			$I_{яM3}, A$	$M_{EM M3}, \text{Н}\cdot\text{м}$			
Генераторне гальмування							
Двигунний режим							
Гальмування противмиканням							
Додаткові експериментальні дані							
Струм збудження машини M_3 $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}}$ А, $I_{збн} = \underline{\hspace{2cm}}$ А;							
Напряга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В.							

Встановити номінальний струм в обмотці збудження машини M_3 та мінімальний в обмотці збудження M_2 . Замкнути рубильник $S1$, при цьому швидкість двигуна сповільниться. Досліджуваний двигун буде працювати в двигунному режимі. Поступово збільшуючи струм в обмотці збудження машини M_2 , зменшити швидкість двигуна M_4 до нуля, а потім змінити напрям його обертання. Результати експерименту занести до таблиці 5. Після закінчення дослідів установку вимкнути з мережі.

Електромагнітний момент навантажувальної машини M_3

$$M_{EM M3i} = k\Phi_{\delta} I_{яM3i}, \quad (30)$$

де $k\Phi_{\delta}$ – коефіцієнт, що залежить від величини магнітного потоку генератора під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_{\delta}$ можна розрахувати як

$$k\Phi_{\delta} = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_{н}. \quad (31)$$

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при нарузі мережі U_m визначається

- у двигунному режимі та при гальмуванні противмиканням

$$M_{U_m} = |M_{EM M3}| + |M_{втрат}| \quad (32)$$

- у генераторному режимі

$$M_{U_m} = -|M_{EM M3}| + |M_{втрат}| \quad (33)$$

Природну механічну характеристику досліджуваного АД отримують при перерахунку моменту машини на номінальну напругу 380 В згідно з рівнянням (26).

8. Для дослідження механічної характеристики $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування із збудженням постійним струмом зібрати схему рисунку 12. Схема з'єднання статорних обмоток АД – «трикутник».

Величину тормозного опору R_p вибрати за умовою

$$R_p = \frac{U_{зб}}{I_{зб}}, \quad (34)$$

де $U_{зб}$ – напруга постійного струму, що подається на статорну обмотку АД, В,

$$U_{зб} = 12...24 \text{ В};$$

$$I_{зб} \text{ – струм збудження АД, А, } I_{зб} = (1,5...2)I_0;$$

I_0 – струм холостого ходу фази статора при номінальній напрузі, А.

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M3$. Ввімкнути автоматичний вимикач $QF1$. Регулятором $VD2$ подати номінальну напругу на якір машини $M3$. Ротор АД $M4$ обертається ДПС $M3$. Регулятором $VD1$ подати напругу 12...24 В на будь-які два виводи статора АД.

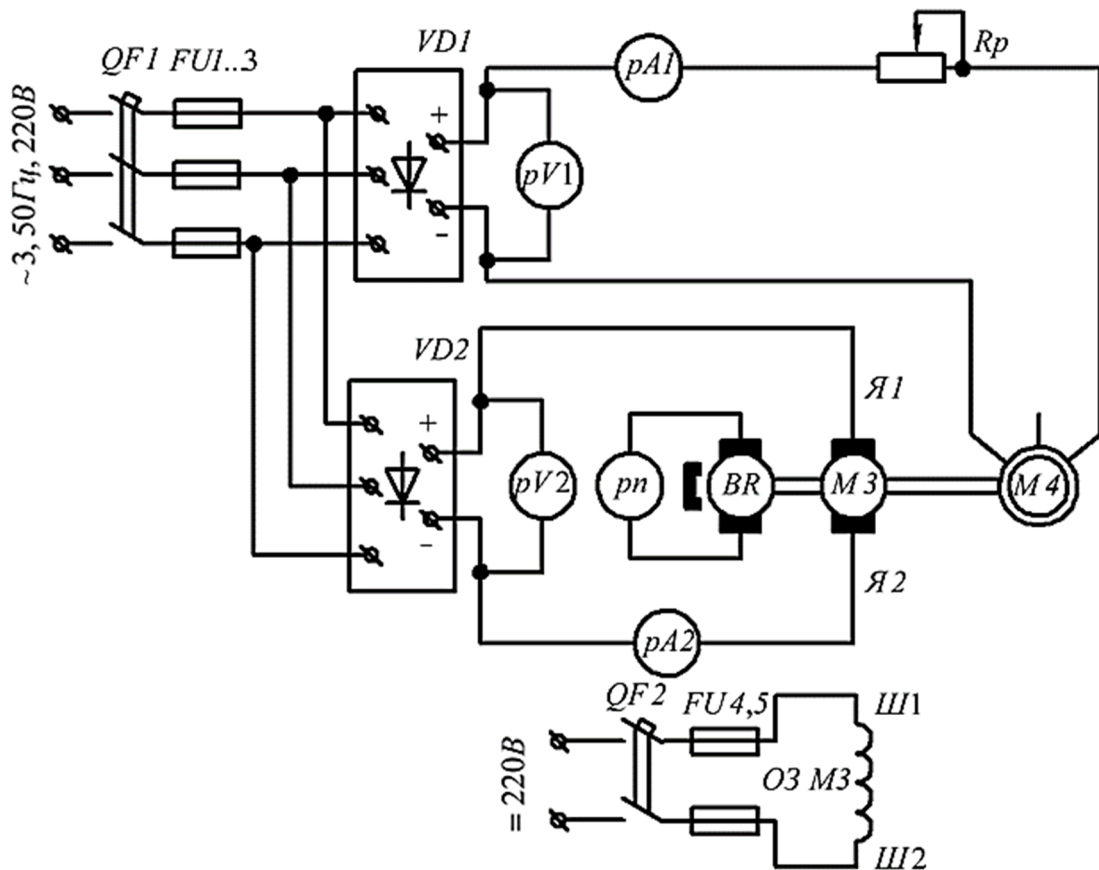


Рисунок 12 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з к.з. ротором в режимі динамічного гальмування при збудженні статора постійним струмом

При цьому величина постійного струму збудження АД не має перевищувати $(3...4)I_0$. Обертаючи ротор досліджуваного двигуна $M4$ машиною $M3$ досліджують залежність $\omega = f(M)$ при зміні кутової швидкості від ω_0 до 0. Швидкість обертання регулювати зміною якірної напруги машини $M3$. Дані дослідів занести до таблиці 6. Зміною величини тормозного опору R_p зменшити величину постійного струму збудження до значення $2I_0$ і повторити дослід динамічного гальмування. Дані дослідів занести до таблиці 6.

Електромагнітний момент двигуна $M3$ визначають як

$$M_{EM M3i} = k\Phi_n I_{я M3i}. \quad (35)$$

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при динамічному гальмуванні

$$M_{M4} = -|M_{EM M3}| + |M_{втрат}|. \quad (36)$$

Таблиця 6 – Результати експериментального дослідження механічних характеристик АД у режимі динамічного гальмування

Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Електромагнітний момент машини $M3$		Момент втрат $M_{втрат}$, Н·м	Момент АД M_{M4} , Н·м
		$I_{яM3}$, А	M_{EMM3} , Н·м		
Струм збудження АД $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}}$ А					
Струм збудження АД $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}}$ А					

9. Дослідити механічні характеристики $\omega = f(M)$ АД при однофазному живленні і з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» при напрузі мережі $U_m = 220\text{ В}$. Для цього запустити експериментальну установку (рисунок 11). Після досягнення сталої частоти обертання досліджуваного двигуна $M4$ виключити вимикач $S3$ у фазі статора і перевести його таким чином у неповнофазний режим. Після врівноваження ЕРС машин $M3$ та $M2$ замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи навантаження на валу двигуна $M4$ шляхом зменшення струму в обмотці збудження машини $M2$ дослідити механічну характеристику АД при зміні швидкості від синхронної до повної зупинки. Дані вимірів занести до таблиці 7. Після закінчення дослідження установку відключити, привести схему у початкове положення.

10. Для дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна $\omega = f(M)$ при обмеженні пускового моменту в одну фазу статора ввести активний опір R_0 (рисунок 13). При цьому обмотку статора з'єднати за схемою «зірка», а на виводи подати напругу $U_m = 220\text{ В}$. Величину опору R_0 розрахувати так, аби пусковий момент знизився у два рази порівняно з природним.

Результати експериментального дослідження МХ АД при обмеженні пускового моменту занести до таблиці 8.

Таблиця 7 – Результати експериментального дослідження МХ АД при однофазному живленні

Струм статора АД I_1, A	Частота обертання $n, \text{об/хв}$	Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$	Електромагнітний момент машини $M3$		Момент втрат $M_{\text{втрат}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Н}\cdot\text{м}$
			$I_{\text{я}M3}, \text{A}$	$M_{\text{ЕМ}M3}, \text{Н}\cdot\text{м}$			
Додаткові експериментальні дані							
Струм збудження машини $M3$ $I_{\text{зб}} = \underline{\hspace{2cm}}$ А;							
Напруга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В.							

Таблиця 8 – Результати експериментального дослідження МХ АД при обмеженні пускового моменту

Струм статора АД I_1, A	Частота обертання $n, \text{об/хв}$	Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$	Електромагнітний момент машини $M3$		Момент втрат $M_{\text{втрат}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Н}\cdot\text{м}$
			$I_{\text{я}M3}, \text{A}$	$M_{\text{ЕМ}M3}, \text{Н}\cdot\text{м}$			
Додаткові експериментальні дані							
Струм збудження машини $M3$ $I_{\text{зб}} = \underline{\hspace{2cm}}$ А;							
Напруга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В.							

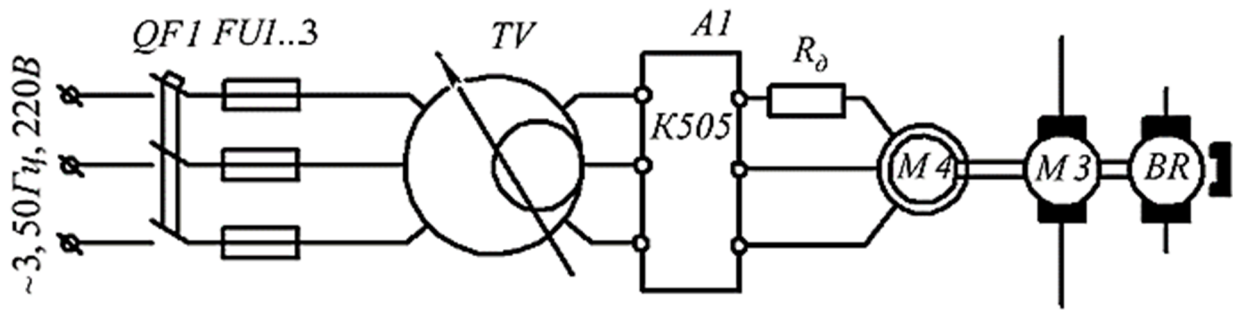


Рисунок 13 – Схема електрична принципова вмикання АД при дослідженні механічних характеристик АД з обмеженням обертального моменту

Значення опору R_δ визначають за формулою

$$R_\delta = \frac{3U_M}{2\sqrt{3}K_i I_n} \left[\frac{1-2\mu_{ni}}{2\mu_{ni}} \cos\varphi_k + \sqrt{\left(\frac{1-2\mu_{ni}}{2\mu_{ni}} \cos\varphi_k \right)^2 + \frac{1-\mu_{ni}}{\mu_{ni}}} \right], \quad (37)$$

де μ_{ni} – заданий відносний пусковий момент, в.о.;

$\cos\varphi_k$ – коефіцієнт потужності короткого замикання, в.о.

$$\mu_{ni} = \frac{M_{in}}{M_n}, \quad (38)$$

де M_{in} – потрібний пусковий момент двигуна, Н·м;

M_n – природний пусковий момент електродвигуна, Н·м.

11. За експериментальними даними таблиць 5 - 8 побудувати електро-механічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

12. Порівняти результати розрахунку механічної характеристики за каталожними та експериментальними даними. Врахувати факт проведення досліду при зниженій напрузі мережі $U_M = 220 \text{ В}$.

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку та графіки механічних і електромеханічної характеристик досліджуваного двигуна, розраховані за каталожними даними.
3. Схеми електричні принципові експериментальних установок рисунки 10 - 13.
4. Результати розрахунку моменту втрат та механічних характеристик АД.

5. Графіки залежностей електромеханічних $\omega = f(I_1)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик досліджуваного АД за різних режимів роботи, отримані експериментальним шляхом.

6. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. Дайте визначення електромеханічній характеристиці АД.

2. На основі схеми заміщення фази АД виведіть рівняння його електромеханічної характеристики.

3. За якими характерними точками можна побудувати природну електромеханічну характеристику АД з короткозамкненим ротором?

4. Що називають механічною характеристикою АД? Поняття природної і штучної механічних характеристик?

5. Як залежить момент АД від підведеної до нього напруги?

6. Що таке критичне ковзання АД і від чого воно залежить?

7. Які висновки можна зробити при аналізі рівняння механічної характеристики АД у параметричній формі?

8. Яким рівнянням описується залежність пускового моменту АД від ковзання?

9. За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику АД з короткозамкненим ротором?

10. Назвіть режими роботи АД.

11. Як здійснити гальмування противмиканням АД?

12. Як збільшити гальмівний момент при динамічному гальмуванні АД?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.

2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.

3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.

4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку і експериментального одержання електромеханічних та механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором; дослідити вплив додаткового опору в колі ротора на характеристики двигуна.

1 Основні теоретичні відомості

Основною конструктивною відмінністю асинхронних двигунів з фазним ротором є можливість вводу додаткового опору у роторне коло машини. Загалом, складність конструкції, достатньо висока вартість машини не сприяють їх широкому розповсюдженню. Асинхронні електродвигуни з фазним ротором використовують у приводах з важкими умовами пуску, для обмеження пускових струмів або там, де потрібне регулювання швидкості обертання в невеликому діапазоні. Це приводи ліфтових механізмів, підйомних кранів та ін. Потужність двигунів з фазним ротором становить від 1,5 до 250 кВт при закритому виконанні.

Електромеханічні $\omega = f(I_2')$, $\omega = f(I_1)$ і механічні характеристики двигунів з фазним ротором аналогічні характеристикам асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором і можуть бути описані наступними рівняннями

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (1)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги, В;

S – ковзання електродвигуна, в.о.;

R_1, X_1 – активний та індуктивний опори обмотки статора, Ом;

R_2', X_2' – приведений активний та індуктивний опори обмотки ротора, Ом.

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (-I_2')^2}, \quad (2)$$

де I_μ – струм намагнічування – струм холостого ходу, А.

На рисунку 1 наведені електромеханічні характеристики асинхронного електродвигуна за струмом ротора $\omega = f(I_2')$ та за струмом статора $\omega = f(I_1)$.

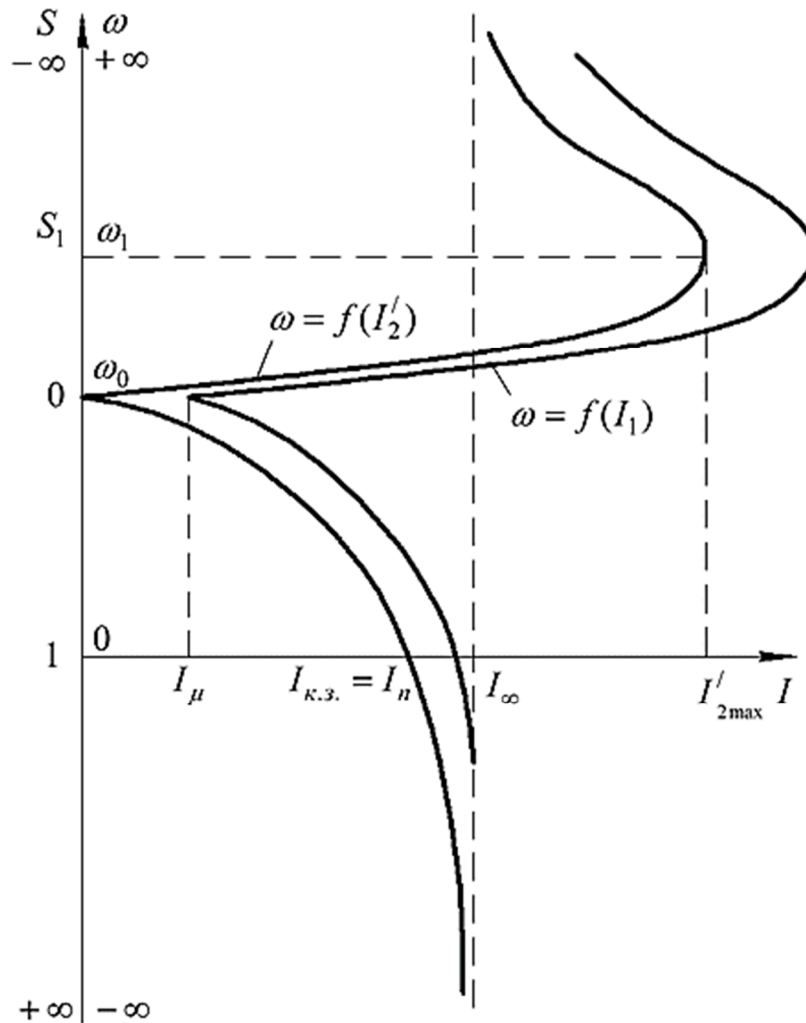


Рисунок 1 – Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна за струмом ротора $\omega = f(I_2')$ та статора $\omega = f(I_1)$

Рівняння електромагнітного моменту двигуна в параметричній формі має вигляд

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

де ω_0 – синхронна швидкість обертання електродвигуна, рад/с.

Залежність $\omega = f(M)$, побудована за рівнянням (3), має вигляд, показаний на рисунку 2.

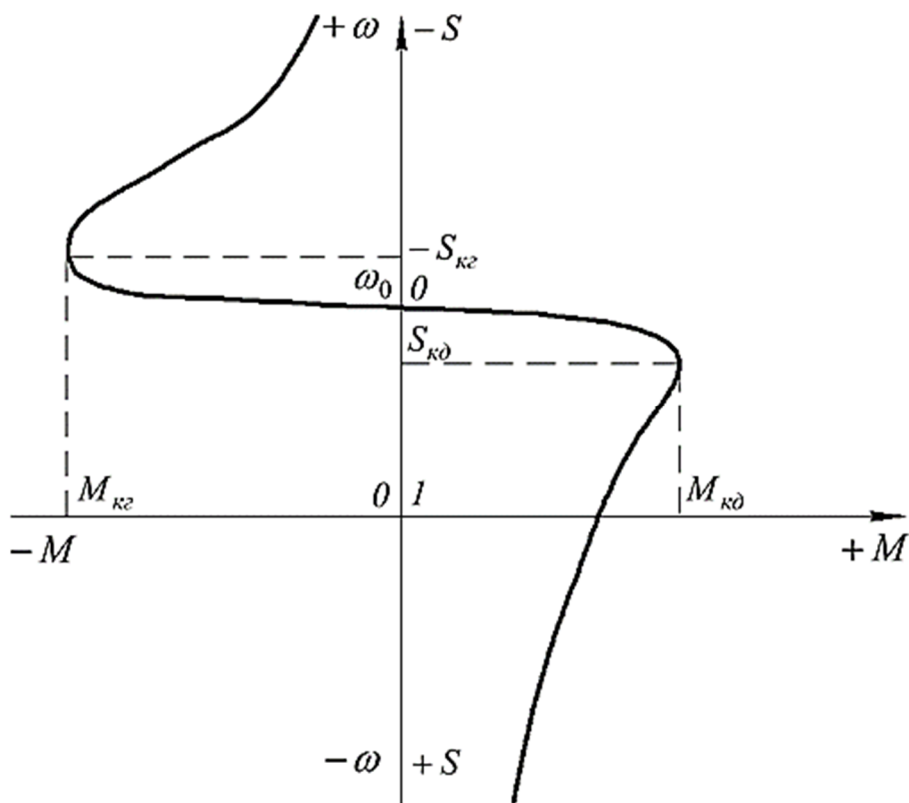


Рисунок 2 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Графік залежності має два екстремуми: критичні (максимальні) моменти в двигунному і генераторному режимах. Координати точок максимумів моменту (критичне ковзання S_k і максимальний момент M_k) знаходять як

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (4)$$

$$M_k = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (5)$$

Критичний момент АД є найбільшим значенням електромагнітного моменту, який може розвивати двигун, що працює при заданих значеннях напруги і опорях R_1, X_k .

У формулах (4) і (5) знак «+» ставлять при розрахунку характеристики в двигунному режимі роботи, знак «-» – у генераторному.

Аналізуючи рівняння (1-5) можна зробити наступні висновки:

- при ковзанні $S = 0$ струм ротора дорівнює нулю;

- при ковзанні $S = I$ в роторі протікає пусковий струм, незалежний від навантаження;
- крутний момент АД пропорційний квадрату напруги;
- критичне ковзання за абсолютною величиною однакове для двигунного і генераторного режимів;
- критичне ковзання не залежить від напруги, а лише від параметрів двигуна;
- критичне ковзання пропорційне активному опору кола ротора;
- критичний момент за абсолютною величиною в режимі генератора більший, ніж у двигунному режимі, що обумовлено впливом падіння напруги на активному опорі статора.

З рівнянь (4) та (5) випливає, що критичне ковзання АД пропорційне активному опору кола ротора, а його критичний момент не залежить від даного опору. Внаслідок цього у АД з фазним ротором при введенні резисторів в коло ротора максимум кривої моменту зміститься в сторону більших ковзань.

Штучну механічну характеристику, що відповідає заданому значенню додаткового опору $R_{2\partial}$, ввімкненого в коло фазного ротора, знаходять перерахуванням ковзань за формулою

$$S_{ui} = S_{ni} \frac{R_2 + R_{2\partial}}{R_2}, \quad (6)$$

де S_{ui} , S_{ni} – ковзання на штучній і природній механічній характеристиці, в.о.;

R_2 , $R_{2\partial}$ – активний опір фази обмотки ротора та додаткового реостата, Ом.

Опір фази ротора визначають

$$R_2 = R_{2н} S_n = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} I_{2н}} S_n, \quad (7)$$

де $R_{2н}$ – номінальний опір фази ротора, Ом;

$E_{2н}$ – ЕРС ротора при $S = 1$, В;

S_n – номінальне ковзання ЕД, в.о.;

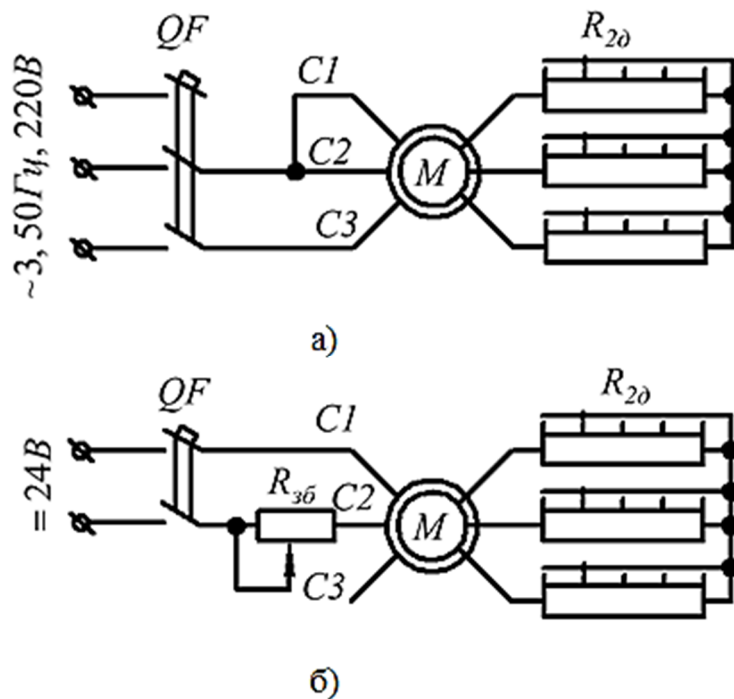
$I_{2н}$ – номінальний струм ротора, А.

Принцип побудови штучних МХ наведено на рисунку 4.

Енергетичний режим роботи АД з фазним ротором визначається величиною і знаком ковзання, а саме:

- 1) $S = 0$, $\omega = \omega_0$ – режим ідеального холостого ходу (машина споживає з мережі струм намагнічування, ротор двигуна обертає робоча машина);

- 2) $0 < S < 1$, $\omega_0 > \omega > 0$ – двигунний режим – сімейство кривих 1 рисунку 4;
- 3) $S = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{к.з.} = M_n$ – режим короткого замикання (споживана з мережі електрична енергія витрачається на нагрівання опорів обмоток двигуна);
- 4) $S < 0$, $\omega > \omega_0$ – режим рекуперативного гальмування (генераторний режим паралельно з мережею живлення) – сімейство кривих 2 рисунку 4. Має місце при частоті обертання ротора вище синхронної;
- 5) $S > 1$, $\omega < 0$ – режим гальмування противмиканням (генераторний режим послідовно з мережею живлення) – сімейство кривих 3 рисунку 4. Має місце при зміні напрямку обертання магнітного поля під час обертання ротора двигуна. Цей спосіб дає можливість знизити швидкість до нуля;
- 6) $1 > S > 0$, $\omega_0 < \omega < 0$ – режим динамічного гальмування (генераторний режим незалежно від мережі змінного струму) – сімейство кривих 4 рисунку 4. Може бути здійсненим при збудженні статора змінним і постійним струмом.



а – при збудженні статора змінним струмом і з'єднанні обмотки за схемою «трикутник»; б – при збудженні постійним струмом

Рисунок 3 – Схема вмикання трифазного асинхронного електродвигуна з фазним ротором у режимі динамічного гальмування

Динамічне гальмування при збудженні змінним струмом надійно гальмує систему, якщо критичне ковзання більше одиниці (додатковий опір роторного кола $R_{2\delta} = (10...20)R_2$). При збудженні статорної обмотки постійним струмом сприятливі гальмівні характеристики мають місце, якщо опір кола ротора збільшений приблизно у 5...10 разів. Струм збудження при динамічному

гальмуванні дають в 2...3 рази більший, ніж струм холостого ходу в трифазному режимі при номінальній напрузі.

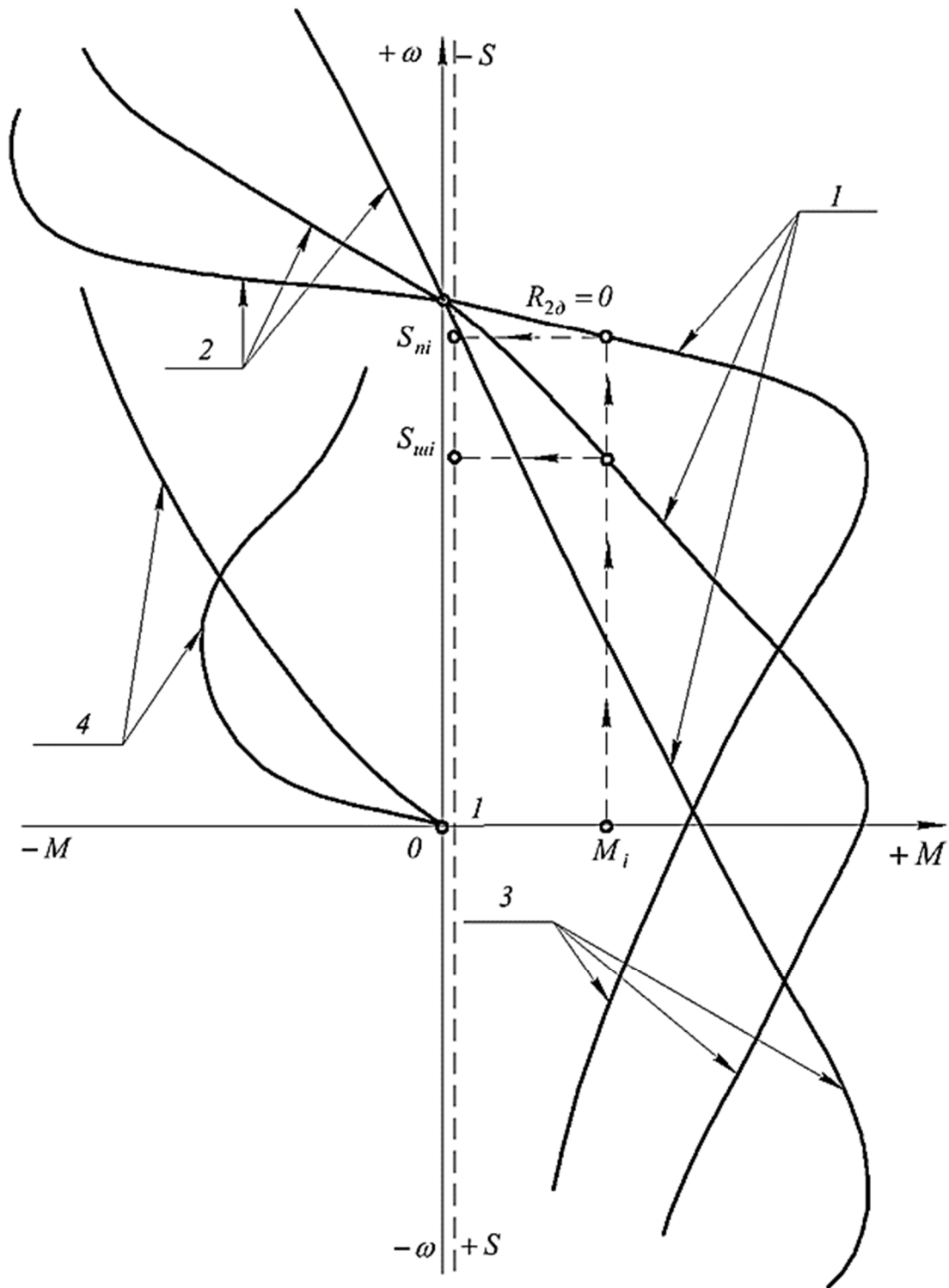


Рисунок 4 – Принцип побудови штучних механічних характеристик при введенні додаткового активного опору у роторне коло машини та ілюстрація енергетичних режимів роботи АД з фазним ротором

Двигуни з фазним ротором завдяки особливостям конструкції дозволяють змінювати в них опір роторного кола для отримання необхідних параметрів їх механічних характеристик. На практиці цю властивість застосовують або з метою регулювання швидкості АД, або обмеження пускових струмів і моментів. Необхідно мати на увазі, що введення додаткового опору у коло ротора призводить до збільшення втрат енергії, а отже, і зниження ККД двигуна.

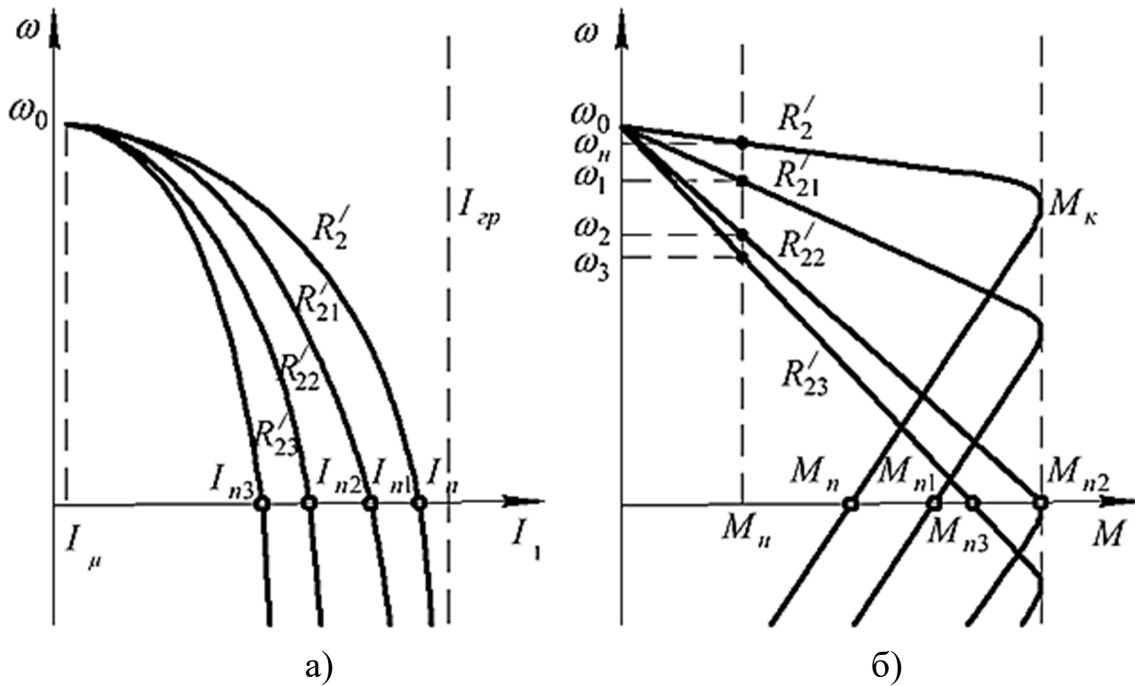
Значний пусковий струм зменшує надійність роботи апаратури керування, захисту і автоматики тощо. Великий пусковий момент сприяє швидкому спрацюванню передавального механізму. Крім того, при пуску порівняно потужних двигунів ($P_n \geq 11 \text{ кВт}$) від сільськогосподарських мереж через великі пускові струми сильно знижується напруга як на їх затискачах, так і на інших двигунах, що живляться від цієї мережі. Пусковий момент двигуна при зниженій напрузі значно знижується, що може унеможливити пуск такого двигуна в даній точці мережі та привести до зупинки під навантаженням працюючих електродвигунів.

Саме тому пускові властивості двигунів визначаються в першу чергу значенням пускового струму I_n або його кратністю $k_i = I_n / I_n$ і значенням пускового моменту M_n або його кратністю $\mu_n = M_n / M_n$. Двигун з гарними пусковими властивостями розвиває значний пусковий момент при порівняно невеликому пусковому струмі. Однак отримання такого поєднання пускових властивостей в асинхронних двигунах пов'язане з певними труднощами, а іноді виявляється неможливим. АД з фазним ротором спроможні забезпечити найбільш сприятливе співвідношення між пусковим моментом і пусковим струмом: значний пусковий момент при невеликому пусковому струмі ($k_i = 2 \dots 3$). До недоліків пускових властивостей двигунів з фазним ротором слід віднести деяку складність, тривалість і неекономічність пускової операції, що обумовлено невиробничими витратами електроенергії на пусковому реостаті.

Аналізуючи рівняння (1), (3) під час пуску електродвигуна при $S = 1$ стає зрозумілим, що спостерігається однозначна залежність між пусковим струмом і величиною додаткового опору – зі збільшенням опору зменшується струм. В той час як залежність пускового моменту від величини активного опору роторного кола неоднозначна. Електромеханічні і механічні характеристики АД при введенні додаткового активного опору у роторне коло представлені на рисунку 5. Вплив збільшеного значення активного опору на пусковий момент двигуна представлено на рисунку 6.

Як видно з рисунків 5 та 6, за відсутності додаткового опору (R'_{20}) пусковий момент рівний M_n . При введенні додаткового активного опору, коли опір роторного кола становить $R'_{21} = R'_2 + R'_{20} < X_1 + X'_2$ пусковий момент зростає і за умови $R'_{22} = R'_2 + R'_{20x} = X_1 + X'_2$ досягає найбільшого значення

$M_{n \text{ найб}} = M_{\kappa}$. За умови $R'_{23} = R'_2 + R'_{2\delta} > X_1 + X'_2$ пусковий момент зменшується.



а – електромеханічна; б – механічна

Рисунок 5 – Характеристики АД при введенні додаткового активного опору у роторне коло

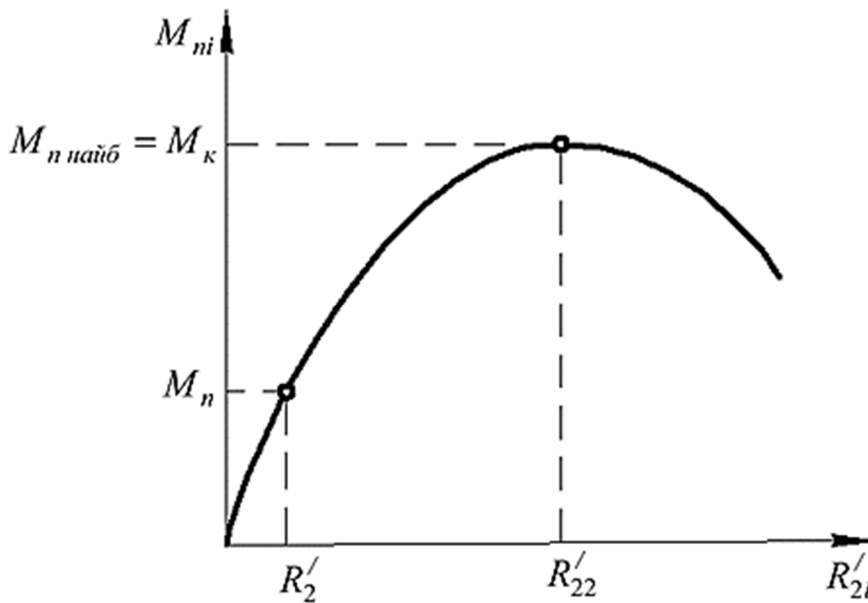


Рисунок 6 – Залежність пускового моменту від активного опору кола ротора

При виборі величини опору пускового реостату виходять із умов пуску двигуна: якщо двигун вмикають при значному навантажувальному моменті на

валу, опір пускового реостату вибирають таким, щоб забезпечити найбільший пусковий момент; якщо ж двигун вмикають при невеликому навантажувальному моменті, коли пусковий момент не має визначального значення для пуску, доцільно обирати опір пускового резистору за умовою $R'_{23} = R'_2 + R'_{2\partial} > X_1 + X'_2$. В цьому випадку пусковий момент дещо менший за максимальне значення, проте пусковий струм значно зменшується.

Для регулювання частоти обертання АД у коло ротора замість пускового вмикають регулювальний реостат, що дозволяє змінювати активний опір кола ротора при струмах навантаження. При цьому збільшення активного опору роторного кола веде до зниження швидкості обертання машини при незмінному навантаженні АД – точки $\omega_1 - \omega_3$ на графіку рисунку 4, б.

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 2, лекція «Статичні механічні та електромеханічні характеристики трифазних асинхронних електродвигунів. Природні та штучні механічні характеристики трифазних асинхронних електродвигунів. Механічні характеристики АД у гальмівних режимах. Способи пуску, обмеження пускових струмів і моментів АД»; 2, с. 81-94; 215-218, 3, с. 101-103; 4, с. 463-465; 481-483].

2. Відповісти на контрольні запитання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. Експериментально визначити омичний опір фази статора R_1 , ротора R_2 АД, опір пускового реостату R_x по ступенях. Привести ці опори до розрахункової робочої температури.

3. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну та штучну (при введенні в коло ротора усіх ступенів пускового реостату) механічні характеристики трифазного АД $\omega = f(M)$ при зміні ковзання від -1 до 2 та номінальній напрузі мережі.

4. Провести дослід по встановленню залежності моменту втрат в системі машин $M5 - M6$ від швидкості $\omega = f(M_{втрат})$.

5. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором.

6. Дослідити електромеханічні $\omega = f(I_1)$ та механічні $\omega = f(M)$ характеристики АД в генераторному і двигунному режимах роботи при різних опорах в колі ротора і з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 В$.

7. Дослідити електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики АД в режимі гальмування противмиканням при введенні усіх ступенів пускового реостату у коло ротора і з'єднані обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_M = 220 В$.

8. Дослідити електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики АД в режимі динамічного гальмування при збудженні статора змінним струмом за умови введення усіх ступенів пускового реостату у коло ротору і з'єднані обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_M = 220 В$.

9. За експериментальними даними побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

10. Провести аналіз механічних характеристик, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом (при цьому врахувати, що експеримент проводиться при зниженій напрузі $\sim 220 В$).

11. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

Робоче місце №1							
М1		М2		М5		М6	
1	2	3	4	5	6	7	8
Тип	П-22	Тип	П-31	Тип	АК51/6	Тип	П-32
P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,7	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	380/220	U_n , В	230
I_n , А	5,9	I_n , А	4,35	I_n , А	5/8,5	I_n , А	6,5
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	905	n_n , об/хв	1450
η_n , %	77	η_n , %	70	η_n , %	72,5	η_n , %	71
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
m , кг	43,8	m , кг	53	$\cos\phi_n$	0,7	m , кг	67,5
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	μ_k	2,7	ГОСТ	183-55
-	-	-	-	E_2 , В	57/33	-	-
-	-	-	-	X_1 , Ом	5,6	-	-
-	-	-	-	X_2' , Ом	3,7	-	-
-	-	-	-	m , кг	80	-	-
-	-	-	-	ГОСТ	183-55	-	-
Робоче місце №2							
М1		М2		М5		М6	
Тип	П-31	Тип	П-32	Тип	АК51/6	Тип	П-32
P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,7	P_n , кВт	1,5

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8
$U_H, В$	220	$U_H, В$	230	$U_H, В$	380/220	$U_H, В$	230
$I_H, А$	8,6	$I_H, А$	6,5	$I_H, А$	5/8,5	$I_H, А$	6,5
$n_H, об/хв$	1500	$n_H, об/хв$	1450	$n_H, об/хв$	905	$n_H, об/хв$	1450
$\eta_H, \%$	79	$\eta_H, \%$	71	$\eta_H, \%$	72,5	$\eta_H, \%$	71
Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е	Клас ізоляції	Е
$m, кг$	53	$m, кг$	62	$\cos\varphi_H$	0,7	$m, кг$	67,5
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	μ_k	2,7	ГОСТ	183-55
-	-	-	-	$E_2, В$	57/33	-	-
-	-	-	-	$X_1, Ом$	5,6	-	-
-	-	-	-	$X_2', Ом$	3,7	-	-
-	-	-	-	$m, кг$	80	-	-
-	-	-	-	ГОСТ	183-55	-	-
Комплект вимірювальний К 505							
Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5							
Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с							
Комплект пускових опорів, що вводиться у роторне коло $R_x = 4 Ом$							
Амперметр							
Вольтметр							

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Експериментально визначити омичний опір фази статора R_1 , ротора R_2 АД, опір пускового реостату R_x по ступенях. Привести ці опори до розрахункової робочої температури.

Загальні рекомендації щодо проведення досліду та обробки експериментальних даних наведено у розділі 2.

Опір пускового реостату по ступенях R_{xi} визначити як середнє арифметичне по фазам

$$R_{xi} = \frac{\sum_{k=1}^m R_k}{m}, \quad (8)$$

де i – порядковий номер ступені пускового реостату;

k – порядковий номер досліду;

m – кількість фаз.

Експериментальні дані занести до таблиці 2.

Таблиця 2 – Експериментальні дані по визначенню омичного опору фази статора, ротора АД з фазним ротором типу _____ та опору пускового реостату по ступенях

$t_1 = \text{_____} \text{ } ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$	$R_{t_2}, \text{ Ом}$
C_1-C_4					
C_2-C_5					
C_3-C_6					
P_1-P_4					
P_2-P_5					
P_3-P_6					
R_{x1}					
R_{x2}					
R_{x3}					
R_x					

3. Розрахувати та побудувати природну та штучну (при введенні в коло ротора усіх ступенів пускового реостату) механічні характеристики трифазного АД з фазним ротором $\omega = f(M)$ при зміні ковзання від -1 до 2 та номінальній напрузі мережі.

Механічну характеристику будують за характерними точками для двигунного і генераторного режиму роботи асинхронної машини з фазним ротором та формулою Клосса.

Характерними точками природної механічної характеристики є:

1. Точка ідеального холостого ходу із координатами $S = 0, \omega = \omega_0, M = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за рівнянням

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (9)$$

де f – частота мережі живлення, Гц;

p – число пар полюсів.

2. Точка номінального навантаження у двигунному режимі $S = S_n, \omega = \omega_n, M = M_n$.

Кутова номінальна швидкість визначається як

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (10)$$

де n_n – номінальна швидкість обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент, що розвиває двигун

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (11)$$

де P_H – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

Номінальне ковзання

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}. \quad (12)$$

3. Точки максимальних моментів у двигунному режимі $S = S_K, \omega = \omega_{K\partial}, M = M_{K\partial}$ та генераторному $S = -S_K, \omega = \omega_{K2}, M = -M_{K2}$.

Критичне ковзання у генераторному і двигунному режимі розраховується за (4).

Швидкість, за якої машина розвиває максимальний момент

$$\omega_K = \omega_0 (1 \mp |S_K|). \quad (13)$$

При розрахунках у (13) знак «-» для двигунного режиму, «+» – для генераторного режиму.

Максимальний момент машини визначають за (5).

4. Точка пускового моменту (короткого замикання) $S = 1, \omega = 0, M = M_n$.

Пусковий момент двигуна

$$M_n = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (14)$$

Момент, який розвиває машина при будь-якому навантаженні S_i , може бути визначений за рівнянням Клосса

$$M_i = \frac{M_{K\partial} (1 + q)}{\frac{S_i}{S_K} + \frac{S_K}{S_i} + q}, \quad (15)$$

де $q = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$, в.о.

Швидкість обертання АД за будь-якого ковзання можна визначити за виразом

$$\omega_i = \omega_0(1 - S_i). \quad (16)$$

Штучну механічну характеристику при введенні додаткового опору у коло ротора знаходять шляхом перерахунку ковзань за формулою

$$S_{ui} = S_{ni} \frac{R_2' + R_{2\delta}'}{R_2'} = S_{ni} \frac{K^2 R_2 + K^2 R_{2\delta}}{K^2 R_2} = S_{ni} \frac{K^2 (R_2 + R_{2\delta})}{K^2 R_2} = S_{ni} \frac{R_2 + R_{2\delta}}{R_2}, \quad (17)$$

де S_{ui}, S_{ni} – ковзання на штучній і природній механічній характеристиці, в.о.;
 $R_{2\delta}'$ – зведений до обмотки статора активний опір додаткового реостата, Ом;
 $R_2, R_{2\delta}$ – активний опір фази обмотки ротора та додаткового реостата, Ом;
 K – коефіцієнт трансформації електродвигуна, в.о.

Швидкість обертання АД при ковзанні S_{ui} можна визначити за виразом

$$\omega_{ui} = \omega_0(1 - S_{ui}). \quad (18)$$

Результати розрахунків звести до таблиці 3 та в одній системі координат побудувати природну і штучну механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором.

Таблиця 3 – Результати розрахунку механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором

Природна															
S_{ni} , в.о.	-1	-0,8	-0,5	$-S_k$	-0,2	-0,1	0	S_n	0,2	S_k	0,5	0,8	1	1,5	2
ω_{ni} , рад/с				ω_{k2}			ω_0	ω_n		$\omega_{k\delta}$			0		
M_i , Нм				$-M_{k2}$			0	M_n		$M_{k\delta}$			M_n		
Штучна															
S_{ui} , в.о.							0								
ω_{ui} , рад/с							ω_0								

4. Схема електрична принципова експериментальної установки для зняття залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M_5 - M_6$ $\omega = f(M_{втрат})$ представлена на рисунку 7.

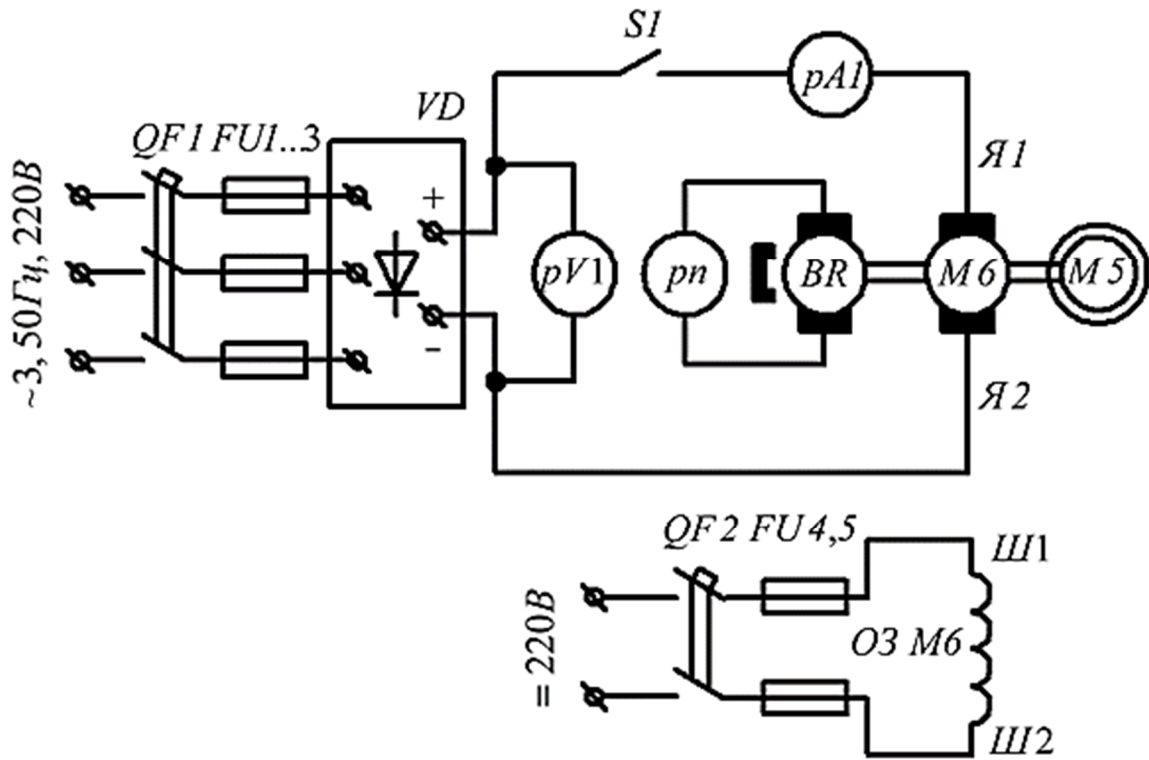


Рисунок 7 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження залежності моменту втрат в системі машин $M5 - M6$ від швидкості

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M6$. Автоматом $QF1$ подати живлення на регульований випрямляч напруги VD . Замкнути рубильник SI . Змінюючи напругу на якорі машини $M6$ від 0 до 240 В вимірюють струм якорного кола та швидкість обертання машин. Дані занести до таблиці 4.

Таблиця 4 – Дані досліду залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M5 - M6$ $\omega = f(M_{втрат})$

$U_{я}, В$	40	80	120	160	200	240
$I_{я}, А$						
$n, об/хв$						
$\omega, рад/с$						
$M_{втрат} Нм$						

Величину електромагнітного моменту, необхідного для обертання системи $M5 - M6$ на холостому ходу визначаємо за рівнянням

$$M_{втрати} = k\Phi_n I_{яM6i}, \quad (19)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними навантажувальної машини постійного струму;
 $I_{яМ6i}$ – струм якоря машини М6 .

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (20)$$

де $R_{я}$ – опір кола якоря, що визначається за паспортними даними або безпосереднім вимірюванням, Ом.

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}. \quad (21)$$

Зміна напрямку обертання системи машин М5 - М6 не впливає на величину втрат – графік залежності $\omega = f(M_{втрат})$ у III квадранті симетричний графіку у I квадранті відносно початку координат. Графік $\omega = f(M_{втрат})$ має розрив при зміні знаку кутової швидкості. Величина розриву чисельно дорівнює подвоєним втратам в агрегаті М5 - М6 при швидкості обертання рівній нулю.

5. Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з фазним ротором представлена на рисунку 8.

Підготувати експериментальну установку до проведення дослідів за методикою, викладеною у розділі 3.2. Під час проведення усіх дослідів струм в обмотці збудження машини М6 підтримувати незмінним.

6. Електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором в генераторному і двигунному режимах роботи дослідити при різних опорах в колі ротора і з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 \text{ В}$. Спочатку досліджують характеристики за умови короткозамкненого ротору, а потім при введенні у коло ротора додаткового опору R_x . Характеристики починають знімати з режиму генераторного гальмування і переходять до двигунного режиму. Перед замиканням рубильника $S1$ зафіксувати напрям відхилення стрілки амперметра та ватметра вимірювального комплексу К505 – двигунний режим. Замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи струм в обмотці збудження машини М2 перевести двигун в генераторний режим. Перша точка характеристики знімається за максимальної швидкості обертання двигуна М5, що не має перевищувати більш ніж у 1,5 рази синхронну швидкість обертання АД. Поступово зменшуючи струм в обмотці збудження машини М2, знімають декілька точок характеристики в режимі генераторного гальмування до точки синхронної кутової швидкості n_0 . Струм якоря в генераторному режимі записують зі знаком мінус. При переході з режиму генераторного гальмування обов'язково записується точка характеристики, що відповідає режиму ідеального холостого ходу і далі, плавно зменшуючи струм в

обмотці збудження машини $M2$, двигун $M5$ перевести в двигунний режим, збільшуючи навантаження на валу. Експериментальні дані занести до таблиці 5. Після закінчення досліду установку вимкнути і повернути у вихідне положення. Ввести у коло ротора додатковий опір R_x і повторити дослід.

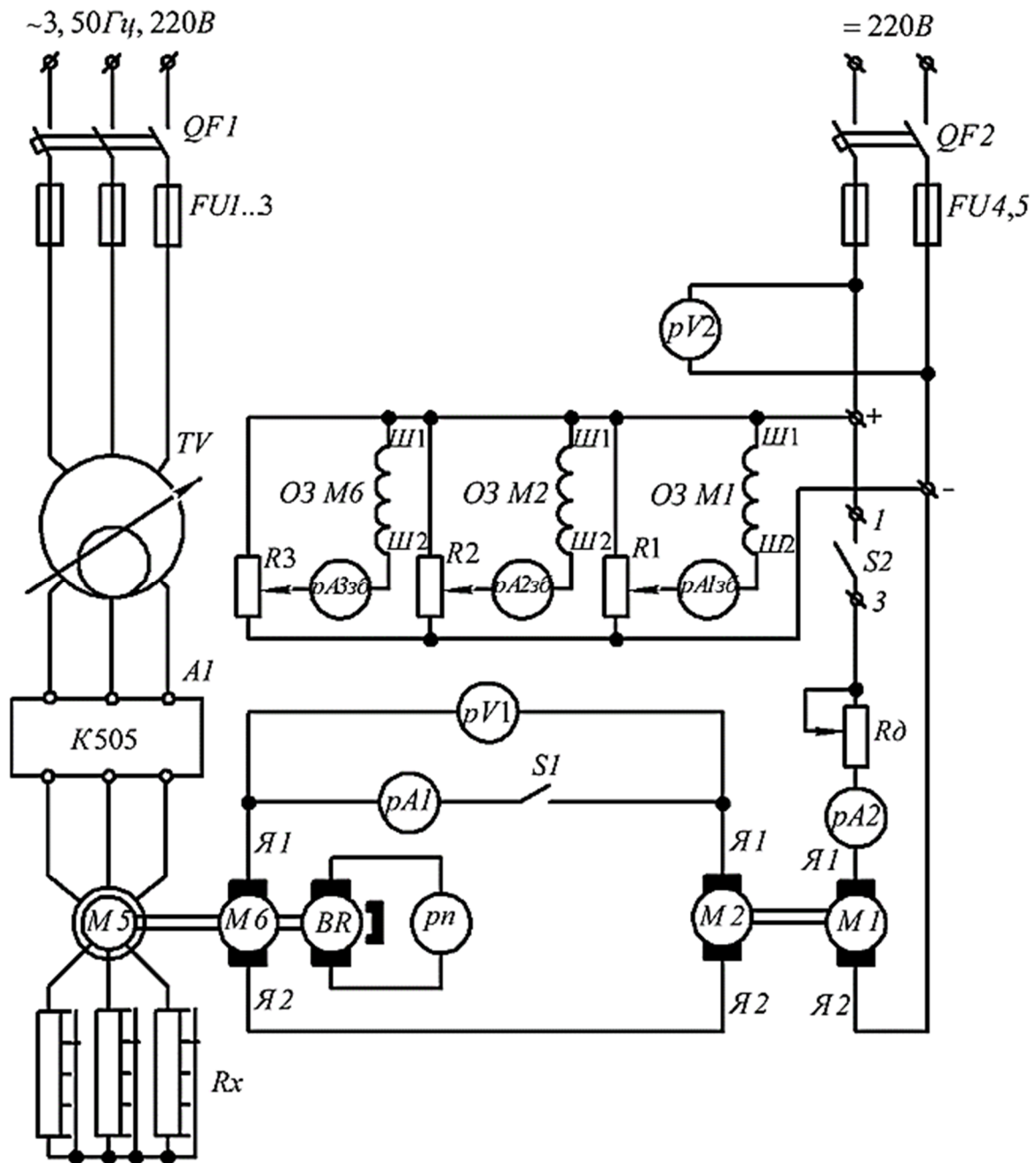


Рисунок 8 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з фазним ротором

Таблиця 5 – Результати експериментального дослідження механічних і електромеханічних характеристик АД типу _____ у режимах двигуна та генераторного гальмування

Струм статора АД $I_1, \text{А}$	Частота обертання $n, \text{об/хв}$	Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$	Електромагнітний момент машини M_6		Момент втрат $M_{\text{втрат}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Н}\cdot\text{м}$
			$I_{яM6}, \text{А}$	$M_{EM M6}, \text{Н}\cdot\text{м}$			
Додатковий опір у колі ротора АД $R_{2\delta} = 0 \text{ Ом}$							
Генераторне гальмування							
Двигунний режим							
Додатковий опір у колі ротора АД $R_{2\delta} = R_x = \text{_____ Ом}$							
Генераторне гальмування							
Двигунний режим							
Додаткові експериментальні дані							
Струм збудження машини M_6 $I_{зб} = \text{_____ А}$, $I_{збн} = \text{_____ А}$;							
Напруга живлення статора АД $U_m = \text{_____ В}$.							

Електромагнітний момент навантажувальної машини $M6$

$$M_{EM M6i} = k\Phi_{\delta} I_{я M6i}, \quad (22)$$

де $k\Phi_{\delta}$ – коефіцієнт, що залежить від величини магнітного потоку генератора під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_{\delta}$ можна розрахувати як

$$k\Phi_{\delta} = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_{н}. \quad (23)$$

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при нарузі мережі U_m визначається

– у двигунному режимі

$$M_{U_m} = |M_{EM M6}| + |M_{втрат}| \quad (24)$$

– у генераторному режимі

$$M_{U_m} = -|M_{EM M6}| + |M_{втрат}| \quad (25)$$

Природну механічну характеристику досліджуваного АД отримують при перерахунку моменту машини на номінальну напругу 380 В згідно з рівнянням

$$M_{i(U_m)} = k_U^2 M_{i(U_n)}, \quad (26)$$

де $k_U = \frac{U_m}{U_n}$ – коефіцієнт зниження напруги, в.о.;

U_m – дійсне значення напруги мережі, В;

U_n – номінальна напруга електродвигуна, В.

7. Для виконання досліду гальмування противмиканням необхідно виключити установку з мережі постійної та змінної напруги. Розімкнути рубильник $S1$. Змінити напрям обертання двигуна $M5$ зміною порядку чергування будь-яких двох фаз напруги живлення. Ввести усі ступені пускового реостату у коло ротора. Запустити двигуни $M1$ та $M5$. Встановити номінальний струм в обмотці збудження машини $M6$ та мінімальний в обмотці збудження $M2$. Замкнути рубильник $S1$, при цьому швидкість двигуна сповільниться.

Досліджуваний двигун буде працювати в двигунному режимі. Поступово збільшуючи струм в обмотці збудження машини $M2$, зменшити швидкість двигуна $M5$ до нуля, а потім змінити напрям його обертання. Результати експерименту занести до таблиці 6. Після закінчення досліду установку вимкнути з мережі.

Таблиця 6 – Результати експериментального дослідження механічних і електромеханічних характеристик асинхронного двигуна типу _____ у режимі гальмування противмиканням

Струм статора АД I_1, A	Частота обертання $n, об/хв$	Швидкість обертання $\omega, рад/с$	Електромагнітний момент машини $M6$		Момент втрат $M_{втрат}, Н\cdot м$	Момент АД при U_m , $M_{U_m}, Н\cdot м$	Момент АД при U_n , $M_{U_n}, Н\cdot м$
			$I_{яM6}, A$	$M_{EM M6}, Нм$			
Додаткові експериментальні дані							
Струм збудження машини $M6$ $I_{збн} = \underline{\hspace{2cm}}$ А;							
Напряга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В.							

Експериментальні дані досліду обробити за методикою викладеною у пункті 6. Електромагнітний момент АД при нарузі мережі U_m в режимі гальмування противмиканням визначається

$$M_{U_m} = -|M_{EM M6}| + |M_{втрат}| \quad (27)$$

8. Для дослідження електромеханічної $\omega = f(I_1)$ і механічної характеристики $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування при збудженні статора змінним струмом зібрати схему рисунку 9. Схема з'єднання статорних обмоток АД – «трикутник» при нарузі мережі $U_m = 220 В$. В коло ротора ввести додатковий активний опір $R_{20} \cong 20R_2$.

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M6$. Ввімкнути автоматичний вимикач $QF1$. За допомогою індукційного регулятора TV встановити струм збудження АД у 2...3 рази більший за струм холостого ходу в трифазному режимі при номінальній нарузі. Ротор АД

$M5$ обертають за допомогою ДПС $M6$ і досліджують залежність $\omega = f(M)$ при зміні кутової швидкості від 0 до ω_0 . Для чого регулятором VD подають напругу на якір машини $M6$. Швидкість обертання регулювати зміною якірної напруги машини $M6$. Дані досліду занести до таблиці 7.

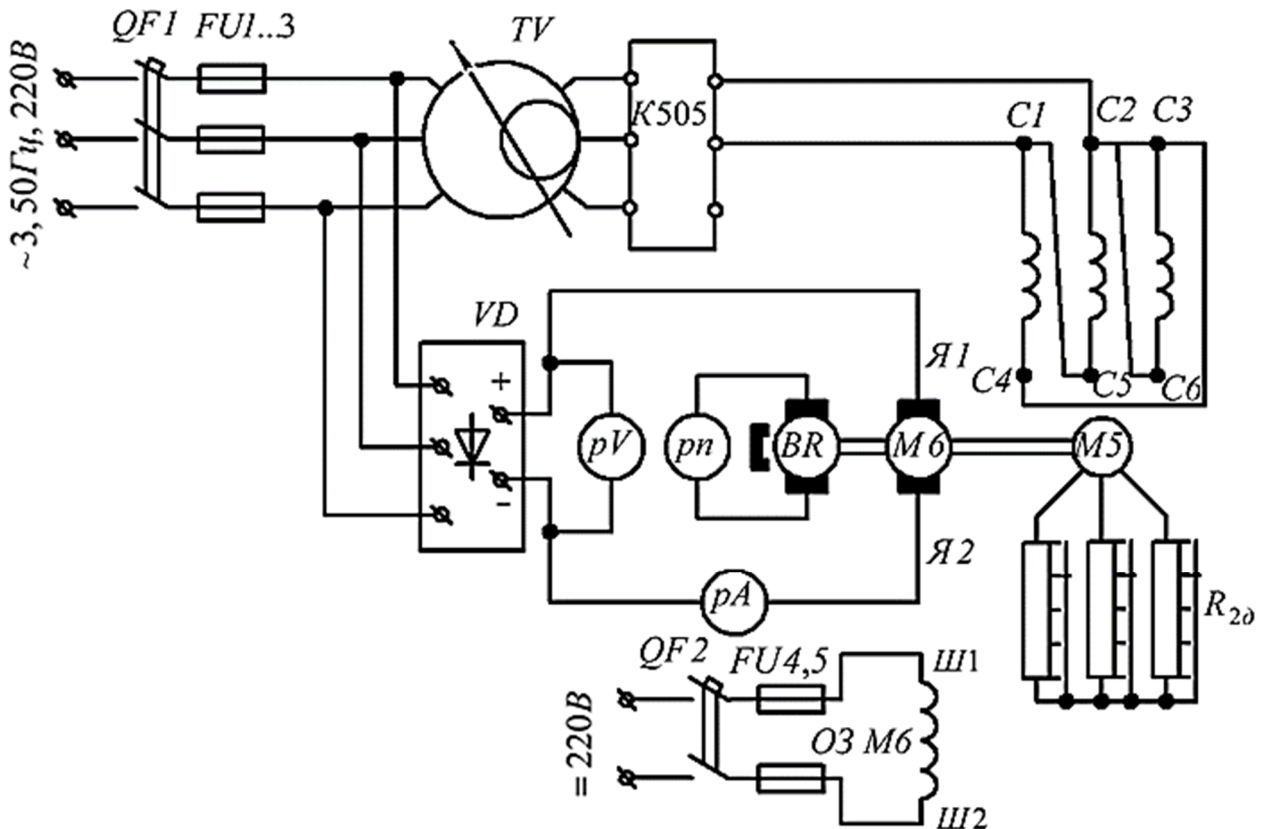


Рисунок 9 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з фазним ротором в режимі динамічного гальмування при збудженні статора змінним струмом

Електромагнітний момент двигуна $M6$ визначають як

$$M_{EM M6i} = k\Phi_n I_{яM6i}. \quad (28)$$

Величина моменту втрат $M_{втрat}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрat})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при динамічному гальмуванні

$$M_{M5} = -|M_{EM M6}| + |M_{втрat}|. \quad (29)$$

9. За експериментальними даними таблиць 4 - 7 побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

10. Порівняти результати розрахунку механічної характеристики за каталожними та експериментальними даними. Врахувати факт проведення досліду при зниженій напрузі мережі $U_m = 220$ В.

Таблиця 7 – Результати експериментального дослідження механічних характеристик АД у режимі динамічного гальмування

Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Електромагнітний момент машини M_6		Момент втрат $M_{втрат}$, Н·м	Момент АД $M_{М5}$, Н·м
		$I_{яМ6}$, А	$M_{ЕМ М6}$, Н·м		
Струм збудження АД $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}} А$					

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку та графіки природної та штучної механічних характеристик досліджуваного двигуна, розраховані за каталожними даними.
3. Схеми електричні принципові експериментальних установок рисунки 7-9.
4. Результати розрахунку моменту втрат та механічних характеристик АД.
5. Графіки залежностей електромеханічних $\omega = f(I_1)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик досліджуваного АД за різних режимів роботи, отримані експериментальним шляхом.
6. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. Дайте визначення електромеханічній характеристиці АД.
2. Що називають механічною характеристикою АД? Поняття природної і штучної характеристик?
3. Що таке критичне ковзання АД і від чого воно залежить?
4. Які висновки можна зробити при аналізі рівняння механічної характеристики АД у параметричній формі?
5. Як зміниться пусковий момент при введенні в коло ротора додаткового активного опору?
6. Які переваги має трифазний АД з фазним ротором в порівнянні з АД з короткозамкненим ротором?
7. Назвіть режими роботи АД.
8. Як зміниться максимальний момент і критичне ковзання АД при введенні додаткового активного опору у роторне коло?
9. Як зміниться максимальний момент і критичне ковзання АД при введенні додаткового реактивного опору у роторне коло?
10. Як впливає частота мережі на величину максимального моменту та критичного ковзання двигуна?
11. Які гальмівні режими роботи АД з фазним ротором Ви знаєте та як їх здійснити?
12. Режим роботи АД визначається величиною та знаком ковзання. Назвіть межі зміни ковзання та кутової швидкості ротора двигуна для всіх режимів роботи АД.
13. Як впливає величина опору ротора на величину пускового струму АД?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>
2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО (ПАРАЛЕЛЬНОГО) ЗБУДЖЕННЯ ЗМІНОЮ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА

Мета роботи: вивчити способи регулювання кутової швидкості електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження; дослідити електромеханічні і механічні характеристики ДПС НЗ та характер зміни моменту, потужності і ККД за різних способів регулювання швидкості

1 Основні теоретичні відомості

Регулювання швидкості електропривода – це примусова зміна швидкості за допомогою певного пристрою відповідно до вимог технологічного процесу незалежно від величини статичного моменту на валу двигуна. Швидкість обертання електродвигунів регулюють двома способами – параметричним і в замкнених системах. При параметричному регулюванні в розімкнених системах швидкість змінюють шляхом зміни параметрів електричного кола двигуна (опору, ємності, індуктивності) або напруги. Якість такого регулювання, як правило, невисока. З метою одержання процесу регулювання з високими якісними показниками застосовують замкнені системи електроприводів із зворотними зв'язками.

Сьогодні, незважаючи на те, що більшість електричних мереж забезпечують змінну напругу, електродвигуни постійного струму використовуються досить широко. Загалом, більшість промислових приводів, де потрібне точне регулювання швидкості обертання, реалізовані на базі ДПС. Також вони широко використовуються як в електричному транспорті (метро, тролейбус, трамваї, приміська залізниця), так і у підйомній техніці, металообробних станках та ін.

В загальному випадку рівняння електромеханічної характеристики ДПС НЗ описується рівнянням

$$\omega = \frac{U_{я} - I_{я}(R_{я} + R_{\partial})}{k\Phi}, \quad (1)$$

де $U_{я}$ – напруга живлення якірного кола, В;

$I_{я}$ – струм якірного кола, А;

$R_{я}$ – внутрішній опір двигуна, Ом;

R_{∂} – додатковий опір якірного кола, Ом;

k – конструктивна стала двигуна;

Φ – магнітний потік двигуна, Вб.

Згідно з (1), швидкість двигуна постійного струму можливо регулювати наступними трьома основними способами:

- включенням додаткового опору R_d у коло обмотки якоря;
- зміною величини магнітного потоку Φ ;
- зміною величини напруги живлення U_y .

При цьому відзначимо, що регулювання швидкості двигуна зміною струму якоря I_y неможливе, хоча на перший погляд це впливає із рівняння (1). В режимі навантаження двигун при кожній швидкості ω автоматично розвиває електромагнітний момент $M = k\Phi I_y$ рівний моменту опору на валу M_c , тому струм якоря при $\Phi = const$ матиме цілком визначене значення, аби у сталому режимі роботи приводу виконувалась умова $M = M_c$.

Регулювання кутової швидкості зміною величини напруги живлення.

Двигуни постійного струму серії 2П виготовляються з незалежним збудженням, а серії 4П – з незалежним і паралельним. Для регулювання швидкості приводів зміною напруги на якорі використовують двигуни незалежного збудження.

Двигуни серії 4П допускають регулювання швидкості від номінальної до максимальної, зазначеної в каталожних даних, при номінальній напрузі на обмотці збудження зміною напруги на якорі тривалістю не більше 5 хв. при номінальному струмі якоря і тривало – зі струмом якоря $0,8I_n$. При цьому для двигунів з номінальною напругою якірного кола 110, 220 і 440 В допустиме підвищення напруги на якорі дорівнює відповідно 220, 330 і 460 В.

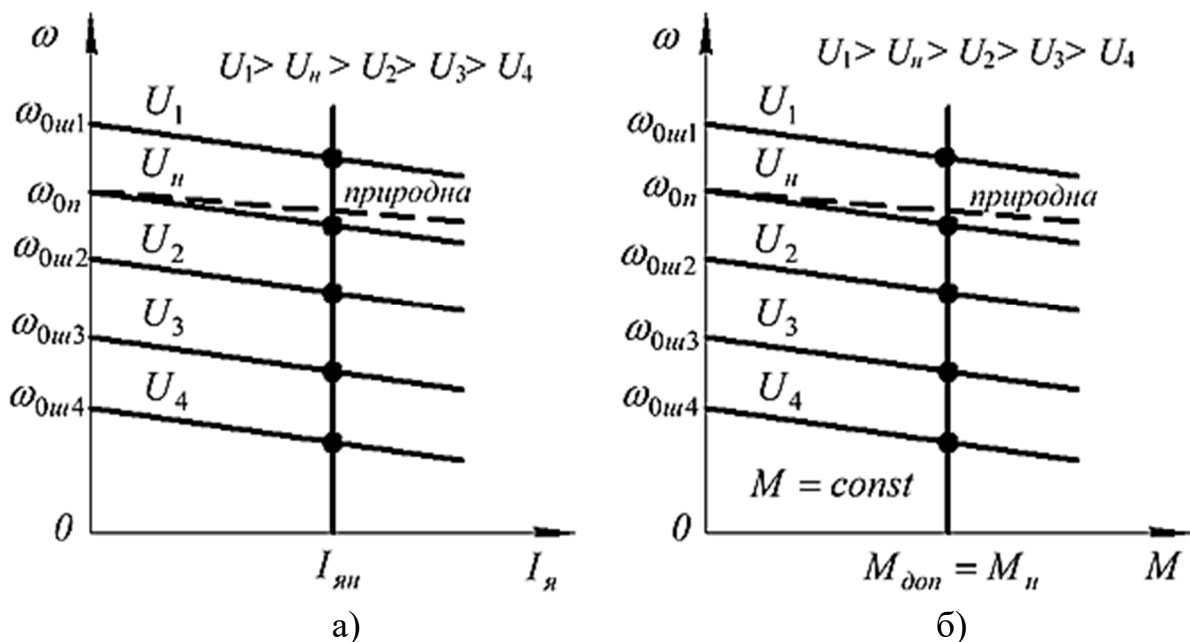
З метою регулювання швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі використовують перетворювачі, що мають на виході регульовану постійну напругу. В сучасних приводах найчастіше використовують статичні перетворювачі трифазної напруги в регульовану постійну, побудовані на силових тиристорах або транзисторах. Рідше використовують машинні перетворювачі з використанням генератора постійного струму. Ці системи скорочено називають «керований вентиль-двигун» (КВ-Д) або «генератор-двигун» (Г-Д).

Тиристорний перетворювач напруги дає можливість регулювати швидкість обертання ДПС НЗ з коефіцієнтом плавності близьким до 1. При цьому діапазон регулювання невеликий – 8...10, що пояснюється збільшенням опору якірного кола (еквівалентний опір регулятора напруги і за наявності опір реактора) і відповідно зменшенням жорсткості характеристик. Тиристорний привод має досить високий ККД – 0,85...0,9.

При живленні ДПС НЗ по системі КВ-Д є можливість реверсування електродвигуна за наявності реверсивного тиристорного перетворювача напруги (ТПН). Гальмівні режими роботи ДПС НЗ, якірне коло якого живиться від тиристорного перетворювача напруги, можуть мати місце лише при активному статичному моменті опору.

До недоліків слід віднести: пульсуючий характер напруги і струму в якірному колі, що призводить до появи переривчастого режиму роботи двигуна, що погіршує роботу привода в замкнутій системі із зворотним зв'язком по струму. Пульсуючий характер напруги і струму в якірному колі двигуна зумовлює використання реактора в якірному колі. При збільшенні діапазону регулювання тиристорного електропривода знижується коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності установки. Тиристорні приводи спотворюють форму напруги і струму джерела живлення. ТПН мають невисоку перевантажувальну здатність по струму і напрузі, що в окремих випадках обмежує їх використання. Незважаючи на недоліки привода з ТПН, на сьогодні він найбільше задовольняє вимоги технологічного процесу в промисловості і окремих установках у сільському господарстві.

Для регулювання швидкості обертання двигуна в системі «генератор-двигун» необхідно мати мережу змінної і постійної напруги. Живлення ДПС від системи Г-Д дає можливість одержати сімейство електромеханічних і механічних характеристик, які мають менший модуль жорсткості, ніж природна характеристика. Якщо двигун і генератор приблизно однакової потужності, то має місце співвідношення $R_{яд} \approx R_{яг}$, при цьому модуль жорсткості характеристик приблизно у 2 рази менший, ніж у двигуна, що працює від мережі. Зниження модуля жорсткості знижує діапазон регулювання швидкості в системі Г-Д до 5...8. Система Г-Д дає можливість реверсувати двигун і забезпечує роботу машини в усіх гальмівних режимах як з активним, так і реактивним моментом опору. При цьому характер регулювання – плавний і схема керування системою досить проста.



а – електромеханічні; б – механічні

Рисунок 1 – Характеристики ДПС НЗ при регулюванні швидкості зміною напруги якоря

До недоліків системи Г-Д необхідно віднести, насамперед, збільшення кількості електричних машин до трьох (асинхронний двигун, генератор і двигун постійного струму). При цьому установлена потужність системи становить дещо більше трикратної потужності двигуна. Система має низький ККД, особливо на понижений швидкості обертання.

В процесі регулювання швидкості допустимим навантаженням вважається таке, при якому в тривалому режимі струм в якорному колі не перевищує номінальні значення $I_{дон} = I_{ян}$, що сприяє підтриманню температурного режиму двигуна в межах допустимих значень. Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ зміною напруги на якорі здійснюється за умови сталого номінального магнітного потоку $\Phi = \Phi_n$, тому допустиме навантаження на валу машини залишається незмінним $M_{дон} = M_n = k\Phi_n I_{ян}$. При цьому потужність на валу машини буде змінюватись прямопропорційно швидкості $P_2 = M_{дон}\omega$. Тому регулювання напруги на якорі ДПС НЗ забезпечує роботу привода при незмінному статичному моменті.

Регулювання швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі, як правило, здійснюється вниз від основної, але можливе регулювання з підвищенням швидкості за умови не перевищення допустимих значень напруги якоря і навантаження двигуна. Аналіз рівняння (1) показує, що при зміні напруги на якорі, кут швидкості двигуна змінюється пропорційно значенням напруги живлення. Електромеханічні (механічні) характеристики паралельні між собою, їх жорсткість не змінюється, оскільки опір якорного кола незмінний.

Основні показники регулювання швидкості електроприводів з ДПС НЗ при зміні величини напруги якоря наступні:

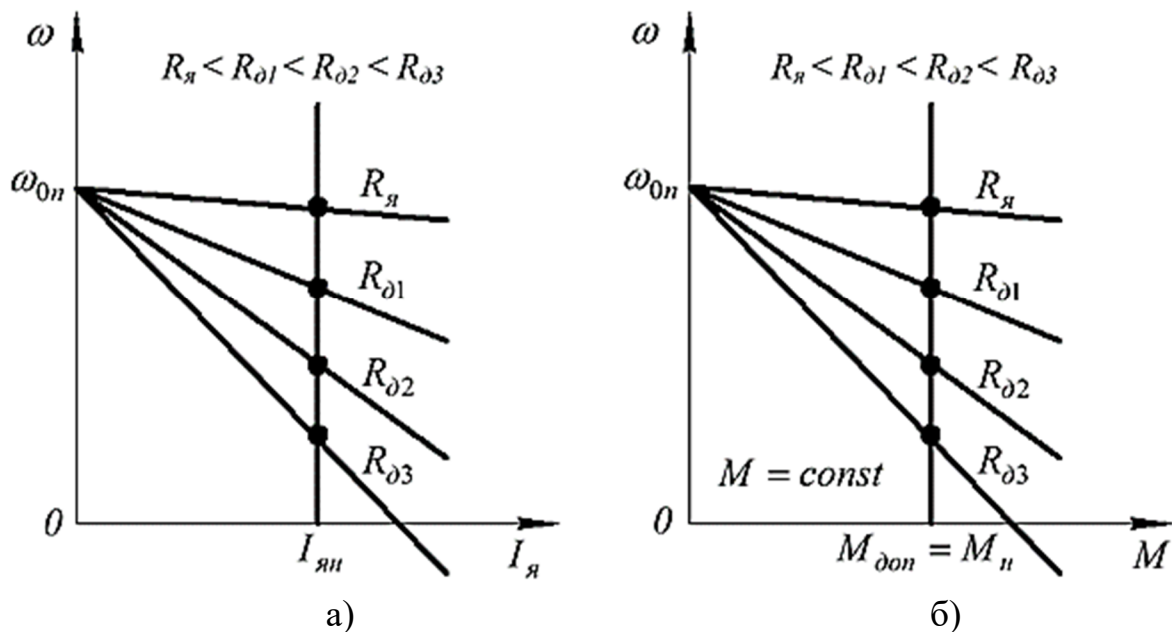
1. Діапазон регулювання – у системі КВ-Д 8:1...10:1, у системі Г-Д 5:1...8:1;
2. Характер регулювання – плавний;
3. Напрямок регулювання – як в меншу, так і в більшу сторону від основної;
4. Стабільність роботи постійна – характеристики не змінюють жорсткість, тому забезпечується стійка робота двигуна за будь-якої швидкості в робочому діапазоні зміни навантаження;
5. Допустиме навантаження двигуна: залишається незмінним, спосіб забезпечує раціональний режим роботи машин з механічною характеристикою незалежною від швидкості;
6. Спосіб економічний – двигуни зберігають своє значення ККД; потрібне джерело постійного струму з регульованою напругою.

Регулювання кутової швидкості зміною опору якорного кола.

Даний метод регулювання часто називають реостатним, оскільки в силове коло включаються резистори (реостати), спроможні пропускати великі струми. На відміну від пускових і гальмівних резисторів, які вибирають по струму для

короткочасного режиму, резистори для регулювання швидкості обертання можуть працювати в тривалому режимі. Отже, при їх виборі залежно від струму враховують фактичний режим роботи. Опір регулювального резистора може змінюватись плавно або ступінчасто і як наслідок швидкість регулюється плавно або дискретно.

Аналіз рівняння (1) показує, що зміна опору якірного кола не впливає на швидкість ідеального холостого ходу, а природна і штучні характеристики виходять з однієї точки (рисунок 2). Вочевидь, що даний спосіб дозволяє лише зменшувати кутову швидкість обертання порівняно зі швидкістю на природній характеристиці аж до зупинки двигуна. Однак із введенням додаткового опору у якірне коло жорсткість характеристик суттєво знижується і як наслідок незначні зміни моменту опору на валу машини призводять до значних коливань швидкості, що в окремих випадках може спричинити зупинку двигуна. Невелика жорсткість штучних реостатних механічних характеристик обмежує діапазон регулювання до 3:1. Слід відзначити, що при зниженні струму (моменту) двигуна регулювання стає малоефективним.



а – електромеханічні; б – механічні

Рисунок 2 – Характеристики ДПС НЗ при введенні додаткового опору у якірне коло

При незмінному струмі обмотки збудження і постійній тепловіддачі двигуна допустиме навантаження на валу машини залишається незмінним $M_{дон} = M_n = k\Phi_n I_{ян.}$, а механічна потужність на валу двигуна буде знижуватись прямопропорційно швидкості $P_2 = M_{дон}\omega$ – тобто регулювання здійснюється при $M = const$. Спосіб забезпечує раціональний режим роботи машин з механічною характеристикою незалежною від швидкості.

Реостатне регулювання швидкості дає можливість створювати режим роботи двигуна у будь-якому з чотирьох квадрантів. Крім того, зона гальмування противмиканням і динамічного гальмування порівняно із системами КВ-Д, Г-Д значно більша. При активному моменті опору згадані гальмівні режими формуються в четвертому квадранті, а при реактивному – у другому.

Реостатне регулювання швидкості ДПС НЗ характеризується низьким ККД. Повна потужність, яку споживає двигун з електричної мережі при $M_c = const$, визначається залежністю

$$P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} = \omega_0 M. \quad (2)$$

де ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу, рад/с;

M – електромагнітний момент, що розвиває двигун, Н·м.

Механічна потужність дорівнює

$$P_2 = \omega M. \quad (3)$$

де ω – поточне значення швидкості обертання двигуна, рад/с.

Коефіцієнт корисної дії характеризується відношенням

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\omega M}{\omega_0 M} = \omega^*. \quad (4)$$

У зв'язку із значними втратами енергії при реостатному регулюванні швидкості ДПС НЗ його використовують в короткочасних режимах та в установках з малим діапазоном регулювання. Перевагами даного способу регулювання є простота і незначні капітальні вкладення на обладнання.

Основні показники регулювання швидкості електроприводів з ДПС НЗ при реостатному способі регулювання швидкості наступні:

1. Діапазон регулювання – не перевищує 3:1;
2. Характер регулювання – як правило, ступінчастий і лише при регулюванні швидкості двигунів малої потужності використовуються реостати, що забезпечують плавне регулювання швидкості;
3. Напрямок регулювання – вниз від основної швидкості;
4. Стабільність роботи – зі зменшенням швидкості знижується: при низькій частоті обертання можливі коливання швидкості при нестабільному навантаженні і нестійка робота приводу аж до зупинки двигуна;
5. Допустиме навантаження двигуна: залишається незмінним, спосіб забезпечує раціональний режим роботи машин з механічною характеристикою незалежною від швидкості;
6. Спосіб неекономічний як наслідок виникнення додаткових електричних

втратах у реостаті; потрібен спеціальний регулювальний реостат чи регулювальний опір, що допускає тривалу роботу при робочих струмах. Подібне обладнання для регулювання швидкості двигунів середньої і великої потужності має порівняно великі габарити і вартість.

Регулювання кутової швидкості зміною величини магнітного потоку.

Двигуни постійного струму серії 2П і 4П допускають регулювання кутової швидкості зниженням струму збудження (магнітного потоку). Ці серії двигунів мають незалежне збудження, що дозволяє регулювати швидкість вгору від номінального значення. Основною ознакою цих двигунів є каталожне значення максимальної швидкості. Якщо двигуни призначені для регулювання швидкості лише вниз від номінального значення, як двигуни серії П, то в каталожних даних наводять лише номінальні частоти обертання і суттєво підвищувати їх швидкість обертання небажано.

Відношення максимальної частоти обертання до номінальної різне для кожного типу двигуна і номінальної напруги. Так, для двигунів типорозміру 4ПФ112 з номінальними потужностями 4; 3,15; 2 кВт на номінальну напругу 220 В номінальна частота обертання відповідно становить 900; 750 і 450 об/хв, а максимальна для всіх трьох двигунів – 5000 об/хв. Отже, не існує єдиного значення кратності підвищення частоти обертання відносно номінальної. При збільшенні номінальної частоти обертання двигуна, як правило, згадана кратність зменшується. Так, для двигуна типорозміру 4ПБ100S2 номінальною потужністю 1,5 кВт і номінальною частотою обертання 3000 об/хв максимальна частота обертання становить 4000 об/хв. Регулювання швидкості ДПС НЗ зменшенням магнітного потоку характеризується порівняно невеликою потужністю в колі регулювання – обмотці збудження.

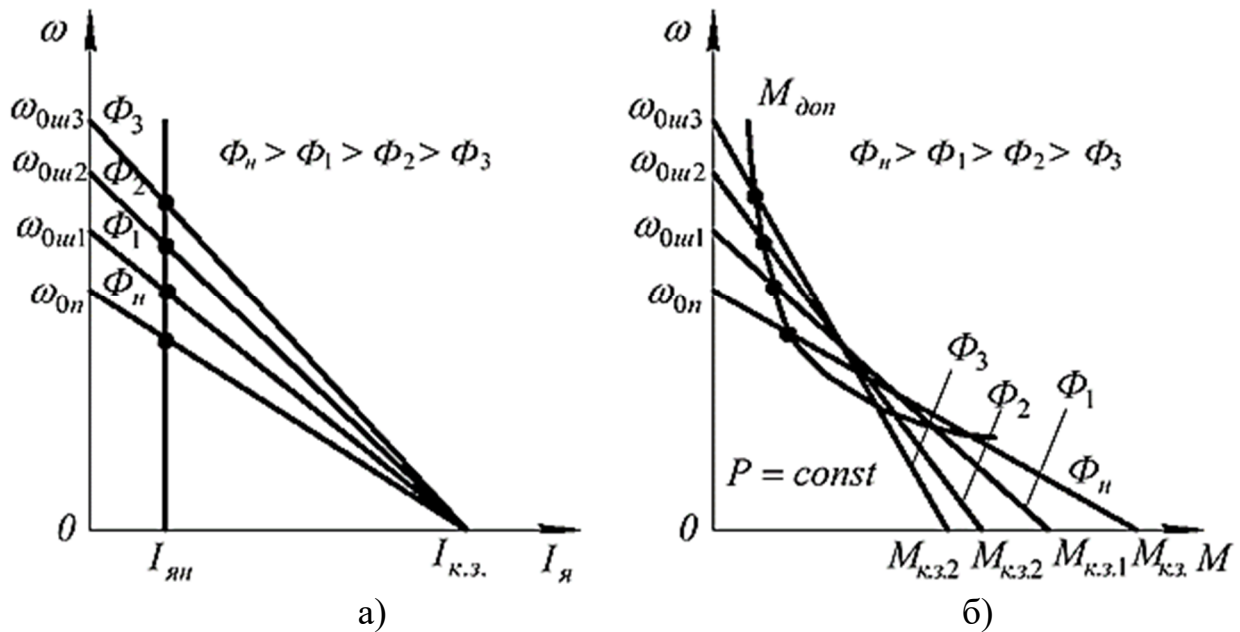
Для ДПС НЗ струм обмотки збудження становить 5...10 % номінального струму машини. В розімкнених системах з двигунами невеликої потужності струм обмотки збудження можна регулювати повзунковим реостатом, що дає можливість забезпечити високу плавність регулювання. У приводах середньої і великої потужності для живлення обмотки збудження використовують статичні перетворювачі трифазної змінної напруги в регульовану постійну напругу. При цьому перетворювач може мати окремо регульовану постійну напругу для якірного кола і окремо для кола збудження – двозонний регулятор.

З аналізу рівняння (1) видно, що швидкість ідеального холостого ходу із зменшенням збудження збільшується. Оскільки струм двигуна при нерухомому якорі не залежить від величини магнітного потоку, то природна і штучні характеристики перетинають вісь абсцис в точці струму короткого замикання

$$I_{\text{я}} = I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}}}. \text{ Механічні характеристики при ослабленні магнітного потоку не}$$

мають спільної точки на осі моментів, оскільки кожному значенню магнітного потоку відповідає певне значення моменту короткого замикання – початкового

пускового моменту $M_{к.з.i} = k\Phi_i I_{к.з.}$. Загальний вигляд характеристик представлено на рисунку 3.



а – електромеханічні; б – механічні

Рисунок 3 – Характеристики ДПС НЗ при регулюванні швидкості зміною магнітного потоку

Штучні механічні характеристики не зберігають жорсткість і, як наслідок, погіршується стабільність регулювання швидкості обертання. Діапазон регулювання двигунів серії 4П різних типорозмірів становить 3...8, а серії 2П – 2...4. Діапазон регулювання швидкості двигунів загального призначення – 1,1...2. Максимальна швидкість обертання обмежується механічною міцністю ротора та погіршенням комутації на колекторі. Мінімальна швидкість при зміні магнітного потоку має місце при номінальному струмі збудження.

Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ зміною магнітного потоку здійснюється за умови $U_я = U_н, I_я = I_{дон} = I_я_н$, тому допустиме навантаження на валу машини для запобігання її перевантаження має бути знижене до $M_{дон} = k\Phi_i I_н$. При цьому потужність на валу машини залишається незмінною

$$P_2 = M_{дон} \omega = k\Phi_i I_н \cdot \frac{U_н - I_н R_я}{k\Phi_i} = I_н (U_н - I_н R_я) = P_1 - \Delta P_{ел} = const.$$

Тому даний спосіб регулювання відноситься до регулювання з постійною потужністю. Регулювання швидкості обертання зменшенням магнітного потоку найкраще використовувати в приводах робочих машин, статичний момент яких зворотно-пропорційний швидкості обертання.

Економічні показники регульованого електропривода ослабленням магнітного потоку порівняно високі. В якірному колі додаткові втрати електроенергії

відсутні. Втрати в регулюючому резисторі в обмотці збудження незначні. Цей спосіб регулювання швидкості обертання може використовуватись комбіновано з іншими способами регулювання швидкості.

Основні показники регулювання швидкості електроприводів з ДПС НЗ при ослабленні магнітного потоку наступні:

1. Діапазон регулювання – для двигунів загального призначення (серії П) – 1,1:1...2:1, двигунів спеціального призначення – 2:1...8:1;
2. Характер регулювання – плавний;
3. Напрямок регулювання – тільки вище від основної;
4. Стабільність роботи – характеристики знижують жорсткість, проте забезпечується стійка робота двигуна при швидкостях в межах допустимої;
5. Допустиме навантаження двигуна: зменшується з ростом швидкості, спосіб забезпечує раціональний режим роботи машин, статичний момент яких зворотно-пропорційний швидкості обертання;
6. Спосіб економічний – регулювання швидкості здійснюється при високому значенні ККД двигуна; для регулювання швидкості ослабленням потоку використовується порівняно просте обладнання невисокої вартості. Значення моменту двигуна при основній швидкості визначає його габарити та вартість. Тому з двох двигунів однакової потужності та максимальної кутової швидкості регульований двигун буде мати тим більші розміри, чим ширше діапазон регулювання.

Для машин з прямолінійно-зростаючою ($x = 1$) та вентиляторною ($x = 2$) характеристиками в розімкнених системах регульованих приводів постійного струму незалежного збудження неможливо забезпечити раціональний режим роботи зміною параметрів ні якірного кола, ні кола збудження. Допустиме навантаження на двигун повинно прийматись при можливому максимальному значенні швидкості обертання. При нижчих швидкостях обертання двигун буде не завантажений.

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 4, лекція «Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ»; 2, с. 157-182; 3, с. 54-77; 4, с. 262-268]. Вивчити способи і показники регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму незалежного збудження.

2. Відповісти на контрольні запитання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну і штучні електромеханічні характеристики $\omega = f(I_a)$ ДПС НЗ при введенні в коло якоря

додаткового опору R_{∂} ; при зміні магнітного потоку $\Phi = 0,5\Phi_n$; при напрузі живлення якірного кола $U_{я} = 0,3 U_{ян}$.

3. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання.

4. Зняти експериментальні дані для побудови електромеханічних $\omega = f(I_{я})$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик ДПС НЗ:

– при регулюванні швидкості зміною опору якірного кола: $R_{я}, R_{я} + 0,25R_{\partial}, R_{я} + 0,5R_{\partial}, R_{я} + 0,75R_{\partial}, R_{я} + R_{\partial}$;

– при регулюванні швидкості зміною величини магнітного потоку (зміною струму в обмотці збудження): $I_{збн}, 0,8I_{збн}, 0,6I_{збн}, 0,5I_{збн}$;

– при регулюванні швидкості зміною напруги живлення якірного кола: $U_{ян}, 0,75U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0,3U_{ян}$.

5. Побудувати в одній системі координат графіки електромеханічних і механічних характеристик ДПС НЗ, отримані розрахунковим та експериментальним шляхом.

6. Розрахувати та побудувати залежності $P_2 = f(\omega), M_{дон} = f(\omega), \eta = f(\omega)$ за різних способів регулювання швидкості ДПС НЗ.

7. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

Позиційне позначення	Тип	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	η_n , в.о.	n_n , об/хв	n_{max} , об/хв	m , кг	ГОСТ
Робоче місце 1									
M1	П-22	1	220	5,9	0,77	1500	3000	43,8	183-55
G1	П-31	1	230	4,35	0,79	1450	3000	53	183-55
Робоче місце 2									
M1	П-31	1,5	220	8,6	0,79	1500	3000	53	183-55
G1	П-32	1,5	230	6,5	0,79	1450	3000	62	183-55
Трифазний керований випрямляч напруги									
Номінальна вхідна напруга – 220 В									
Номінальна вхідна частота – 50 Гц									
Вхідна потужність – 2,5 кВА									
Номінальний вихідний струм – 10 А									
Номінальна вихідна напруга – 220 В постійного струму									
Діапазон регулювання вихідної напруги – 1-240 В постійного струму, 0-220 В змінного однофазного струму									

Продовження таблиці 1

Навантажувальний реостат $R_{нав} = 16 \text{ Ом}$	
Регулювальний реостат $R_{\delta} = 16 \text{ Ом}$	
Амперметр	
Амперметр	
Вольтметр	
Тахогенератор	

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати електромеханічні характеристики досліджуваного двигуна за каталожними даними: природну; при введенні в коло якоря додаткового опору R_{δ} ; при зміні магнітного потоку $\Phi = 0,5\Phi_n$; при напрузі живлення якірної кола $U_{я} = 0,3 U_{ян}$.

Розрахунок електромеханічних характеристик ДПС НЗ проводять за рівнянням (1). Для двигунів постійного струму незалежного збудження величина магнітного потоку не залежить від навантаження машини, тому зовнішній вигляд електромеханічних характеристик – пряма, яку можна побудувати за двома із трьох точок, координати яких найлегше визначити. Координати точок відповідають:

- режиму ідеального холостого ходу

$$\omega_{0i} = \frac{U_{я}}{k\Phi}, \quad I_{я} = 0. \quad (5)$$

- режиму номінального навантаження

$$\omega_{ni} = \frac{U_{я} - I_{ян}(R_{я} + R_{\delta})}{k\Phi}, \quad I_{я} = I_{ян}. \quad (6)$$

- режиму короткого замикання

$$\omega = 0, \quad I_{я} = I_{к.з.і} = \frac{U_{я}}{(R_{я} + R_{\delta})}. \quad (7)$$

На практиці найчастіше користуються координатами перших двох точок. Внутрішній опір двигуна визначають як

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}, \quad (8)$$

де η_n – номінальний ККД, в.о.

Параметр $k\Phi$ залежить лише від величини магнітного потоку і якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для розрахунків точністю $k\Phi$ можна розрахувати як

$$k\Phi = \frac{I_{зб}}{I_{зб_n}} k\Phi_n, \quad (9)$$

де Φ_n – номінальний магнітний потік ДПС, Вб.

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (10)$$

де ω_n – номінальна кутова швидкість ДПС, рад/с.

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (11)$$

де n_n – номінальна швидкість обертання електродвигуна, об/хв.

За результатами розрахунків в одній системі координат побудувати природну та штучні електромеханічні характеристики дослідного двигуна.

3. Зібрати схему електричну принципову експериментальної установки для дослідження електромеханічних та механічних характеристик ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання, що представлена на рисунку 4.

4. Зняти експериментальні дані для побудови електромеханічних $\omega = f(I_{я})$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик ДПС НЗ. Досліди проводять наступним чином. Автоматом $QF2$ подати напругу на обмотки збудження машин постійного струму $M1$ і $G1$, при цьому реостат $R1$ в колі обмотки збудження машини $M1$ має бути повністю виведеним, а $R2$ в колі обмотки збудження генератора введеним. Автоматичним вимикачем $QF1$ подати живлення на трифазний керований випрямляч напруги VD . На виході випрямляча встановити напругу рівну номінальному значенню напруги досліджуваного двигуна $M1$ та при повністю введеному регульовальному (пусковому) опорі R_0 замкнути перемикач $S1$ і тим самим підключити до мережі живлення ДПС НЗ $M1$. Після розгону двигуна пусковий опір повністю вивести. Встановити досліджуваному двигуну номінальне навантаження шляхом зміни струму збудження генератора $G1$ за допомогою реостата $R2$ та зміною опору навантаження $R_{нав}$.

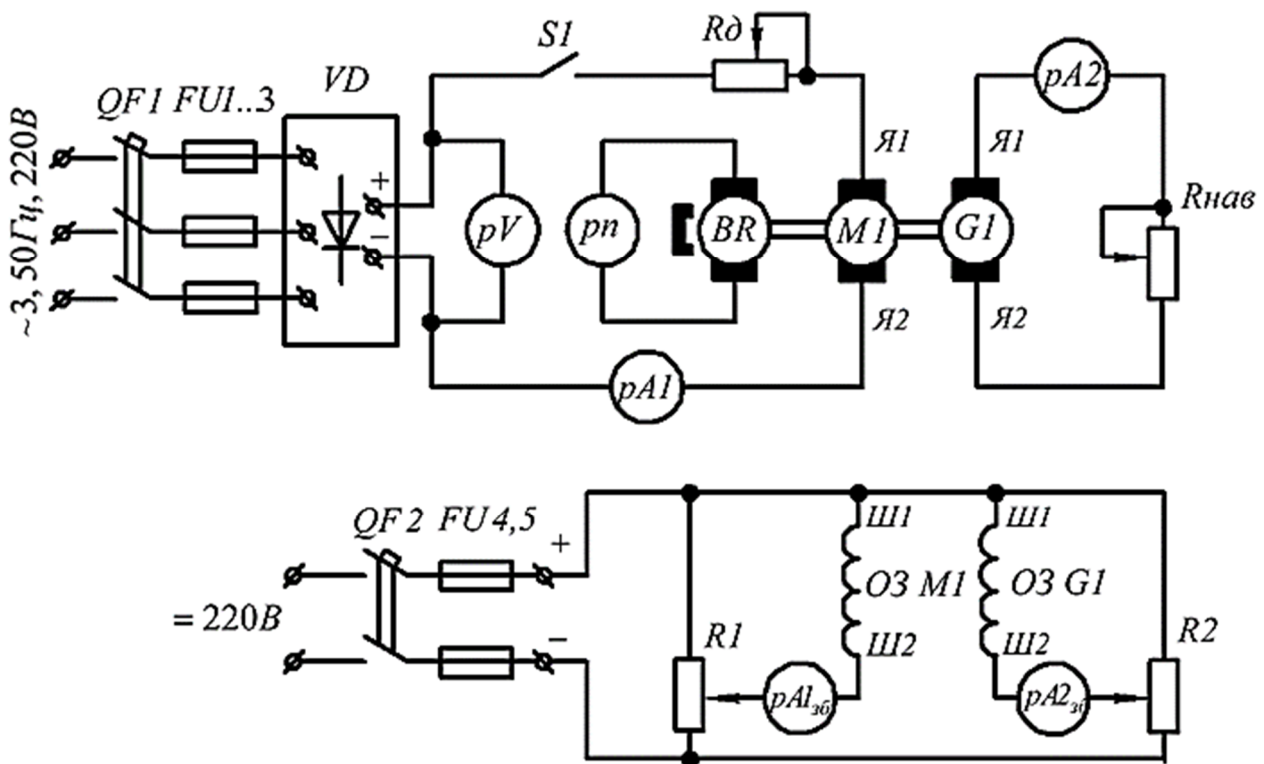


Рисунок 4 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження способів регулювання швидкості ДПС НЗ

Провести дослід регулювання швидкості ДПС НЗ введенням додаткового опору у коло якоря. Під час проведення досліду напруга і струм збудження досліджуваного двигуна залишаються незмінними і повинні мати номінальні значення $U_{я} = U_{ян}$, $I_{зб} = I_{збн}$, струм навантаження ДПС НЗ підтримувати сталим. Опір регулювального реостату в колі якоря змінювати в межах $0; 0,25R_{\delta}; 0,5R_{\delta}; 0,75R_{\delta}; R_{\delta}$. Дані досліду занести до таблиці 2.

Провести дослід регулювання швидкості ДПС НЗ зміною величини магнітного потоку (зміною струму збудження). Під час проведення досліду напруга досліджуваного двигуна залишається незмінною і рівною номінальному значенню $U_{я} = U_{ян}$, додатковий опір у колі якоря має бути повністю виведеним $R_{\delta} = 0$, струм навантаження ДПС НЗ підтримувати сталим. Струм в обмотці збудження двигуна $M1$ змінювати в межах $I_{збн}, 0,8I_{збн}, 0,6I_{збн}, 0,5I_{збн}$. Дані досліду занести до таблиці 3.

Провести дослід регулювання швидкості ДПС НЗ зміною напруги живлення якорного кола. Під час проведення досліду струм збудження досліджуваного двигуна залишається незмінним і рівним номінальному значенню $I_{зб} = I_{збн}$, додатковий опір у колі якоря має бути повністю виведеним $R_{\delta} = 0$, струм навантаження ДПС НЗ підтримувати сталим. Напругу якоря змінювати в межах $U_{ян}, 0,75U_{ян}, 0,5U_{ян}, 0,3U_{ян}$. Дані досліду занести до таблиці 4.

Таблиця 2 – Результати експериментального дослідження регулювання швидкості ДПС НЗ введенням додаткового опору у коло якоря

Умови проведення досліджу	Додатковий опір R_{∂} , Ом	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Потужність на валу P_2 , Вт	Момент двигуна M , Н·м	ККД двигуна η , в.о.
$U_{я} = U_{ян} = \text{--- В};$ $I_{зб} = I_{збн} = \text{--- А};$ $I_{я} = I_{ян} = \text{--- А};$ $R_{\partial} = var.$	0					

Таблиця 3 – Результати експериментального дослідження регулювання швидкості ДПС НЗ зміною величини магнітного потоку

Умови проведення досліджу	Струм збудження $I_{зб}$, А	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Потужність на валу P_2 , Вт	Момент двигуна M , Н·м	ККД двигуна η , в.о.
$U_{я} = U_{ян} = \text{--- В};$ $R_{\partial} = 0 \text{ Ом};$ $I_{я} = I_{ян} = \text{--- А};$ $I_{зб} = var.$						

Швидкість обертання розраховують за рівнянням

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (12)$$

де n – частота обертання електродвигуна, об/хв.

Таблиця 4 – Результати експериментального дослідження регулювання швидкості ДПС НЗ зміною напруги живлення якірного кола

Умови про- ведення дослідю	Напруга якоря $U_{я}$, В	Частота обертання n , об/хв	Швидкість обертання ω , рад/с	Потужність на валу P_2 , Вт	Момент двигуна M , Н·м	ККД двигуна η , в.о.
$I_{зб} = I_{збн} = \text{---} \text{ А};$ $R_{\partial} = 0 \text{ Ом};$ $I_{я} = I_{ян} = \text{---} \text{ А};$ $U_{я} = var.$						

Потужність на валу двигуна без урахування втрат у сталі знаходять за виразом

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{ел\ я} = U_{я} I_{ян} - I_{ян}^2 (R_{я} + R_{\partial}), \quad (13)$$

де P_1 – потужність споживана з електромережі, Вт;

$\Delta P_{ел\ я}$ – втрати потужності зумовлені тепловою дією струму, Вт.

Момент, що розвиває двигун

$$M = \frac{P_2}{\omega}. \quad (14)$$

Коефіцієнт корисної дії при регулюванні швидкості визначається як

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{U_{я} I_{ян}}. \quad (15)$$

Побудову експериментальних електромеханічних $\omega = f(I_{я})$ і механічних $\omega = f(M)$ характеристик ДПС НЗ проводять за двома характерними точками: ідеального холостого ходу і номінального режиму роботи. Швидкість ідеального холостого ходу ω_{0i} визначити розрахунковим шляхом, використовуючи вирази (5), (9), (10). Координати номінального режиму роботи взяти з експериментальних даних.

5. Функціональні залежності механічної потужності на валу двигуна $P_2 = f(\omega)$, допустимого моменту навантаження $M_{дон} = f(\omega)$, ККД машини

$\eta = f(\omega)$ за різних способів регулювання швидкості ДПС НЗ побудувати в одній системі координат за розрахунковими даними таблиць 2 - 4. При цьому врахувати, що $M_{дон} = M$.

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку електромеханічних характеристик досліджуваного двигуна за різних способів регулювання швидкості обертання за каталожними даними.
3. Електричну схему лабораторної установки для дослідження способів регулювання швидкості обертання ДПС НЗ.
4. Таблиці з результатами експериментальних досліджень.
5. Результати розрахунку електромеханічних і механічних характеристик ДПС за експериментальними даними.
6. Графіки електромеханічних $\omega = f(I_{я})$ і механічних $\omega = f(M)$ характеристик ДПС НЗ отримані розрахунковим та експериментальним шляхом.
7. Результати розрахунку і графіки залежностей $P_2 = f(\omega)$, $M_{дон} = f(\omega)$, $\eta = f(\omega)$ за різних способів регулювання швидкості ДПС НЗ.
8. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. Що розуміють під поняттям регулювання швидкості електроприводів?
2. Назвіть можливі способи регулювання швидкості двигунів постійного струму?
3. Перерахуйте основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів?
4. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості ДПС НЗ при введенні додаткового опору у коло якоря?
5. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості ДПС НЗ при зміні величини магнітного потоку?
6. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості ДПС НЗ при зміні напруги живлення якірного кола?
7. Які системи живлення використовують у сучасних електроприводах з ДПС при регулюванні швидкості зміною напруги якірного кола? Дайте стислу характеристику системи «керований вентиль - двигун» і «генератор - двигун».
8. Що називають електромеханічною і механічною характеристикою ДПС? Привести рівняння електромеханічної і механічної характеристики ДПС.
9. Навести електромеханічні і механічні характеристики ДПС при регулю-

ванні швидкості зміною величини магнітного потоку. Пояснити чому електро- механічні характеристики перетинаються з віссю абсцис в одній точці, а механічні характеристики – ні?

10. Для якого характеру навантаження оптимальним варіантом регулювання швидкості ДПС є введення додаткового опору у якірне коло; зміна напруги якірного кола; зміна величини магнітного потоку?

11. За яких умов регулювання швидкості зміною магнітного потоку буде проходити зі сталою потужністю? Як при цьому зміниться момент двигуна?

11. Як зміняться момент, споживана потужність і потужність на валу двигуна при регулюванні швидкості обертання зміною опору якірного кола при сталому значенні живлячого струму?

12. Як зміняться момент, споживана потужність і потужність на валу двигуна при регулюванні швидкості зміною напруги якірного кола при сталому значенні струму живлення?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.

2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.

3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.

4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ СТРУМУ

Мета роботи: вивчити закони керування асинхронним двигуном при частотному регулюванні швидкості для різних виробничих машин; дослідити механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна при регулюванні швидкості зміною частоти струму.

1 Основні теоретичні відомості

Важливе місце при застосуванні асинхронних двигунів сьогодні займає частотне регулювання швидкості, яке є найбільш ефективним. Згідно формули, швидкість обертання ротору машини ω прямо пропорційна частоті f мережі живлення

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}(1 - S), \quad (1)$$

де p – кількість пар полюсів;

S – ковзання електродвигуна, в.о.

Частотнорегульований привод є основою енергозберігаючих систем і застосовується там, де технологічний процес вимагає зміни швидкості обертання механізмів в широкому діапазоні, підтримання стабільності параметрів, забезпечення синхронної роботи декількох приводів. Частотнорегульований привод має високі динамічні властивості і легко вбудовується в сучасні системи автоматизації та контролю. Частотне регулювання ефективно застосовується на підприємствах енергетики, промисловості і комунального господарства.

Даний спосіб дозволяє регулювати швидкість обертання електроприводів ввєрх від номінального значення і вниз. Верхня межа регулювання швидкості обмежується механічною міцністю ротора і, як правило, не повинна перевищувати номінальну більше ніж у два рази. Мінімальна швидкість обертання обмежується нестабільною роботою перетворювача при низьких частотах та погіршенням умов охолодження електродвигуна.

Частотне регулювання має найкращі показники регулювання швидкості порівняно з іншими способами: забезпечує плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні, а статичні характеристики мають високу жорсткість. Основна відмінність цього способу регулювання від інших полягає в роботі двигуна при різних швидкостях з малим ковзанням, а відповідно і невеликими втратами енергії ($\Delta P = P_1 S$). Частотнорегульований привод за статичними і динамічними характеристиками не поступається приводам постійного струму.

В частотнорегульованих електроприводах можна застосовувати двигуни загального призначення. При цьому їх техніко-економічні показники (в залежності від обраного закону регулювання) дещо знижуються: коефіцієнт корисної дії знижується в середньому на 2...3 %, а $\cos \varphi$ – на 2...5 %.

Спеціальні асинхронні двигуни для частотного регулювання проектують без урахування пускових характеристик, які забезпечуються системою керування (можуть мати дещо знижену перевантажувальну здатність, менший активний опір обмотки ротора і, як наслідок, вищий ККД). Двигуни для частотного регулювання проектують з можливістю роботи при значно знижених швидкостях обертання, тому вони мають незалежну систему вентиляції. У серії АИ передбачено два виконання двигунів тривалого режиму роботи на номінальну частоту струму 60 Гц: для роботи в діапазоні регулювання швидкості обертання 1:3,75 та в діапазоні 1:22,5.

Зміна частоти струму на затискачах двигуна призводить до зміни його параметрів: індуктивного опору обмоток, струму намагнічування, магнітного потоку двигуна і відповідно до зміни енергетичних показників і температурного режиму роботи машини. Тому в залежності від виробничих потреб на практиці зі зміною частоти струму змінюють і інші параметри за певним законом: збереження перевантажувальної здатності двигуна, сталості магнітного потоку машини, мінімуму втрат та ін.

Найбільшого практичного застосування отримав закон частотного керування при збереженні перевантажувальної здатності двигуна, вперше обґрунтований академіком М.П. Костенко. Згідно із цим законом при регулюванні частоти струму f необхідно змінювати і напругу живлення U АД в залежності від виду механічної характеристики робочої машини.

Отримаємо закон зміни напруги від частоти струму.

Умова збереження перевантажувальної здатності АД

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_c} = const, \quad (2)$$

де M_{κ} – максимальний момент електродвигуна, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Як відомо, максимальний момент двигуна становить

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}, \quad (3)$$

Параметри ω_0 , X_k залежать від частоти струму. Зробивши припущення, що $R_1 = 0$, критичний момент виражається залежністю

$$M_{\kappa} = C \frac{U_{\phi}^2}{f_1^2}, \quad (4)$$

де C – постійна величина.

Перевантажувальна здатність двигуна при різних частотах струму, згідно з (2) має вигляд

$$\frac{U_{\phi n}^2}{f_{1n}^2 M_{cn}} = \frac{U_{\phi}^2}{f_1^2 M_c} = \lambda. \quad (5)$$

На основі виразу (5) можна отримати основний закон частотного регулювання при збереженні перевантажувальної здатності двигуна у відносних одиницях

$$U_1^* = f_1^* \sqrt{M_c^*}, \quad (6)$$

де U_1^* , f_1^* , M_c^* – відповідно напруга, частота струму і статичний момент опору у відносних одиницях.

Статичний момент опору робочої машини у відносних одиницях, якщо зробити припущення, що момент зрушення $M_o = 0$, записується

$$M_c^* = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x = \left(\frac{f}{f_n} \right)^x = f^{*x} \quad (7)$$

З урахуванням (7) рівняння (6) матиме вигляд

$$U_1^* = f_1^* \sqrt{f^{*x}}, \quad (8)$$

де x – показник степеня механічної характеристики робочої машини.

Рівняння (8) описує закон, за яким необхідно змінювати напругу АД при зміні частоти струму для будь-якої робочої машини.

Згідно з (8) для збереження перевантажувальної здатності двигуна необхідно:

– для робочих машин з механічною характеристикою, що не залежить від швидкості ($x = 0$) змінювати напругу і частоту за законом $\frac{U}{f} = const$;

– для робочих машин з прямолінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x = 1$) змінювати напругу і частоту за законом $\frac{U}{f\sqrt{f}} = \frac{U}{\sqrt{f^3}} = const$;

– для робочих машин з нелінійно-зростаючою (вентиляторною) механічною

характеристикою ($x = 2$) змінювати напругу і частоту за законом $\frac{U}{f^2} = const$,

–для робочих машин з нелінійно - спадаючою механічною характеристикою ($x = -1$) змінювати напругу і частоту за законом $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$.

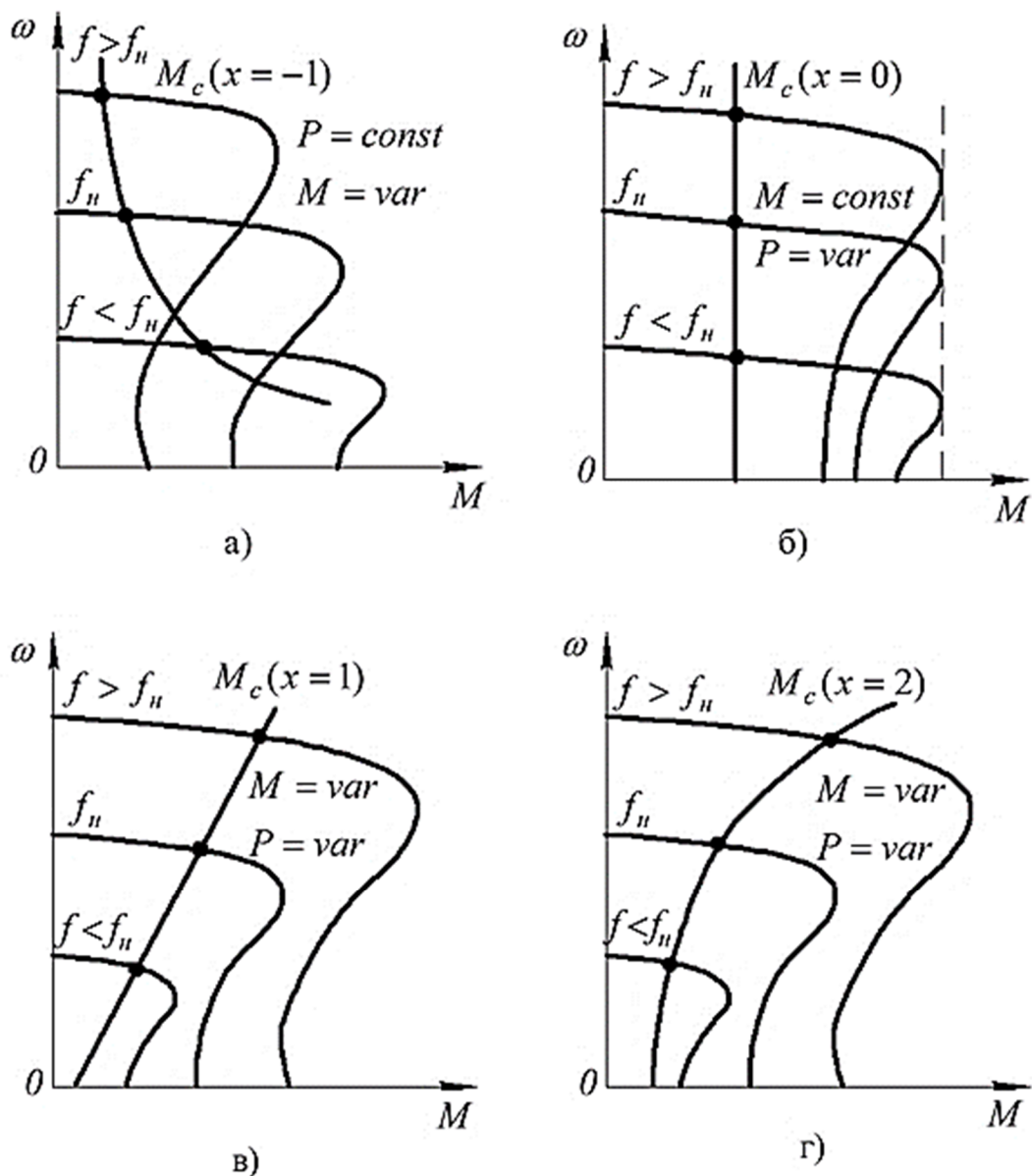
У таблиці 1 зіставлені значення моментів, потужностей і напруги при різному характері залежності статичного моменту опору робочої машини від швидкості. На рисунку 1 представлені механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості за законом збереження переважувальної здатності в залежності від виду механічної характеристики робочої машини.

Таблиця 1 – Закони зміни еквівалентного моменту, потужності і напруги асинхронного електродвигуна при різному характері залежності статичного моменту опору робочої машини від швидкості

Характер зміни статичного моменту	$\frac{M_2}{M_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$
для механізмів з $x = -1$ $\left(M_c \sim \frac{1}{f} \right)$	$\frac{f_1}{f_2}$	$const$	$\sqrt{\frac{f_2}{f_1}}$
для механізмів з $x = 0$ $(M_c = const)$	$const$	$\frac{f_2}{f_1}$	$\frac{f_2}{f_1}$
для механізмів з $x = 1$ $(M_c \sim f)$	$\frac{f_2}{f_1}$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{\frac{3}{2}}$
для механізмів з $x = 2$ $(M_c \sim f^2)$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^3$	$\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$

Для регулювання частоти широко використовуються перетворювачі частоти з різною елементною базою і схемами керування. В останній час на зміну тиристорним схемам перетворювачів частоти розроблені схеми на силових IGBT транзисторах. На рисунку 2 показана блочно-структурна схема перетворювача частоти.

Силова схема складається з трифазного випрямляча, ємнісного фільтра, силового модуля з шести IGBT транзисторів та згладжувального дроселя. Транзистори керуються мікропроцесорною системою. Система керування дозволяє змінювати частоту і діюче значення вихідної напруги за різними законами регулювання.



- а – нелінійно-спадаюча (металообробні верстати);
 б – незалежна від швидкості (підйомні крани, транспортери, конвеєри);
 в – прямолінійно-зростаюча (ГПС з незмінним навантаженням);
 г – нелінійно-зростаюча (вентилятори, відцентрові насоси)

Рисунок 1 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості за законом збереження перевантажувальної здатності в залежності від виду механічної характеристики робочої машини

Регульовальні властивості асинхронних двигунів при частотному керуванні характеризуються наступними показниками:

1. Діапазон регулювання – 12:1...16:1, у замкнутих системах автоматичного керування – до 1000:1;
2. Характер регулювання – плавний;

3. Напрямок регулювання – як в більшу, так і в меншу сторону від основної;
4. Стабільність роботи постійна – забезпечується стійка робота двигуна за будь-якої швидкості із збереженням паспортної перевантажувальної здатності;
5. Допустиме навантаження двигуна: в залежності від закону регулювання;
6. Спосіб економічний – забезпечує регулювання швидкості з високим ККД. Недоліком частотного регулювання є складність і висока вартість перетворювачів частоти.

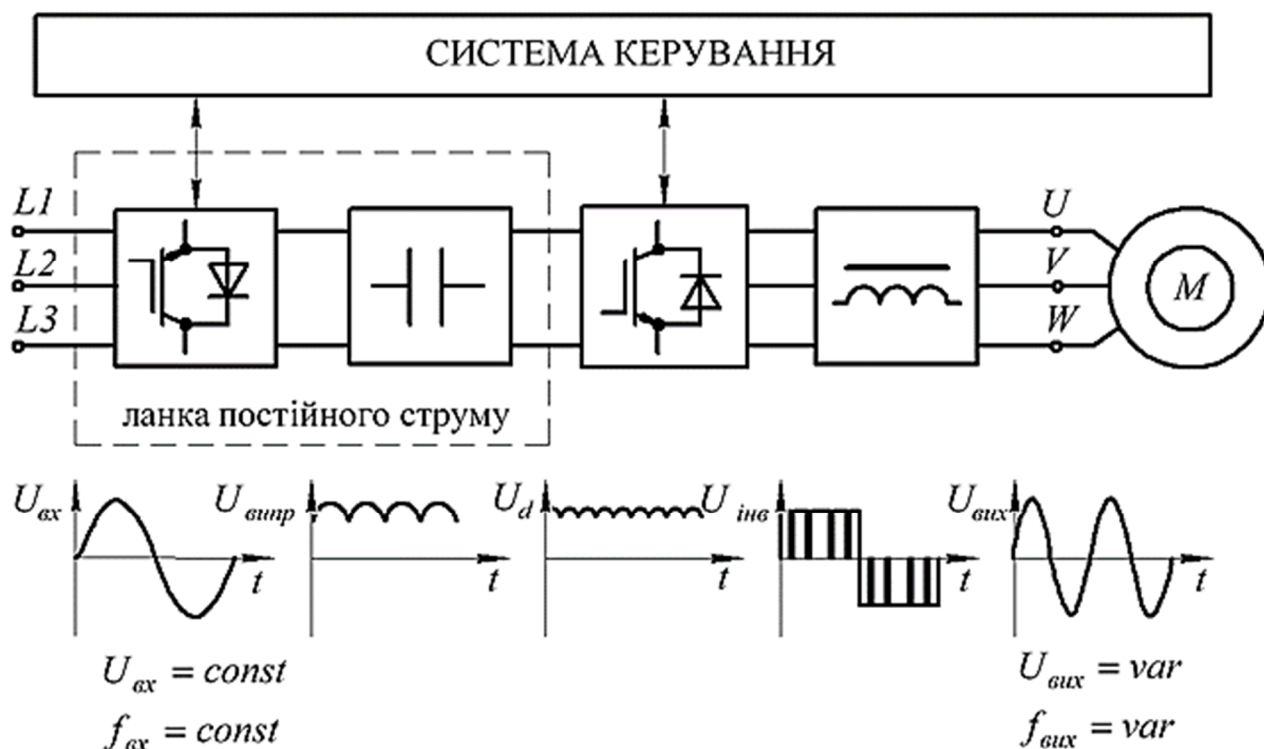


Рисунок 2 – Блочно-структурна схема перетворювача частоти та осцилограми сигналу на виході його блоків

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 4, лекція «Частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів»; 2, с. 209-215; 3, с. 86-95; 4, с. 475-478]. Вивчити принципи побудови перетворювачів частоти, частотнорегульованих приводів.

2. Відповісти на контрольні запитання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну (50 Гц) і штучні (30 Гц; 60 Гц) механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна $\omega = f(M)$ при зміні кутової швидкості обертання від 0 до ω_0 . Характер навантаження задає викладач або прийняти згідно навантаженню лабораторної установки.

3. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна при його живленні від перетворювача частоти.

4. Дослідити залежність зміни напруги на затискачах перетворювача від частоти струму $U = \varphi(f_1)$ при холостому ході двигуна. Частоту струму змінювати від 0 до f_{\max} із шагом 5 Гц.

5. Дослідити електромеханічні $\omega = f(I_1)$ та механічні характеристики $\omega = f(M)$ асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при значеннях вихідної частоти перетворювача 30; 50; 60 Гц.

6. Побудувати в одній системі координат графіки електромеханічних і механічних характеристик трифазного АД, отримані розрахунковим та експериментальним шляхом.

7. За електромеханічними та механічними характеристиками провести аналіз способу регулювання швидкості АД зміною частоти струму живлення.

8. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 2 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

M1		M2		M3		M4	
Тип	П-31	Тип	П-32	Тип	П-32	Тип	АИР80В4
P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5	P_n , кВт	1,5
U_n , В	220	U_n , В	230	U_n , В	230	U_n , В	380/220
I_n , А	8,6	I_n , А	6,5	I_n , А	6,5	I_n , А	3,52/6,1
n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1450	n_n , об/хв	1395
m, кг	53	m, кг	62	m, кг	62	μ_k	2,2
ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	ГОСТ	183-55	m, кг	13,8
						ТУ	16-25.564-84
Перетворювач частоти векторний VB5-43P7 виробництва «ЕЛІМ-Україна» Номінальна вхідна напруга – 380 В Номінальна вхідна частота – 50 Гц Вхідна потужність – 5,9 кВА Номінальний вихідний струм – 9,6 А Номінальна вихідна напруга – 380 В змінного струму Діапазон вихідної частоти – 0...500 Гц							

Продовження таблиці 2

Комплект вимірювальний К 505	
Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5	
Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с	
Амперметр	
Амперметр	
Вольтметр	
Тахогенератор	

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати механічні характеристики досліджуваного двигуна за каталожними даними при зміні кутової швидкості обертання від 0 до ω_0 і частоті струму 30 Гц, 50 Гц та 60 Гц.

Для розрахунку природної механічної характеристики АД рекомендується використати спрощену формулу Клосса

$$M_i = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i}}, \quad (9)$$

де M_{κ} – критичний момент електродвигуна, Нм;

S_i – поточне значення ковзання, в.о.;

S_{κ} – критичне ковзання, в.о.

$$M_{\kappa} = \mu_{\kappa} M_n, \quad (10)$$

де M_n – номінальний момент електродвигуна, Нм;

μ_{κ} – кратність максимального моменту, в.о.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (11)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

ω_n – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (12)$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Критичне ковзання S_k можна визначити за формулою

$$S_k = S_n \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2S_n(\mu_k - 1)}}{1 - 2S_n(\mu_k - 1)}, \quad (13)$$

де S_n – номінальне ковзання електродвигуна, в.о.

$$S_n = \frac{\omega_o - \omega_n}{\omega_o}, \quad (14)$$

де ω_o – синхронна кутова швидкість обертання електродвигуна, рад/с.

$$\omega_o = \frac{2\pi f}{p}. \quad (15)$$

Розрахунок природної механічної характеристики рекомендується проводити при ковзаннях: $S_i = 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,2; 0,3$ і т.д. до $S_i = 1$.

Кутову швидкість обертання двигуна при будь-якому ковзанні S_i визначають за виразом

$$\omega_i = \omega_o(1 - S_i). \quad (16)$$

Штучні механічні характеристики при частотному регулюванні швидкості обертання АД при будь-якому характері навантаження будують за рівнянням

$$M_{if} = \frac{2M_{kf}}{\frac{S_i}{S_{kf}} + \frac{S_{kf}}{S_i}}, \quad (17)$$

де M_{kf} – критичний момент ЕД при заданому законі регулювання, Н·м;

S_{kf} – критичне ковзання ЕД при заданому законі регулювання, в.о.

$$M_{kf} = \mu_{kf} M_n, \quad (18)$$

де μ_{kf} – кратність максимального моменту електродвигуна при заданому законі регулювання, в.о.

$$\mu_{kf} = \mu_k \frac{K_U^2}{K_f^2}, \quad (19)$$

де K_f – коефіцієнт зміни частоти, $K_f = \frac{f}{f_n}$, в.о.;

K_U – коефіцієнт зміни напруги, $K_U = \frac{U}{U_n}$, в.о.

Згідно з (8) при частотному регулюванні швидкості за законом збереження перевантажувальної здатності в залежності від виду механічної характеристики робочої машини: $K_U = \sqrt{K_f}$ ($x = -1$); $K_U = K_f$ ($x = 0$); $K_U = \sqrt{K_f^3}$ ($x = 1$); $K_U = K_f^2$ ($x = 2$).

Критичні ковзання S_{kf} при частотах, відмінних від номінальної, визначають за формулою

$$S_{kf} = \frac{S_k}{K_f}. \quad (20)$$


Кутову швидкість обертання двигуна при будь-якому навантаженні на штучних характеристиках визначають за виразом



$$\omega_{if} = \omega_{of}(1 - S_i). \quad (21)$$

де ω_{of} – синхронна кутова швидкість обертання при заданій частоті струму f , визначається за (15), рад/с.

Результати розрахунків звести до таблиці 3 та в одній системі координат побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна за різної частоти струму живлення згідно заданого закону регулювання.

3. Зібрати схему електричну принципову експериментальної установки для дослідження електромеханічних та механічних характеристик АД за частотного регулювання швидкості, що представлена на рисунку 3. Статорну обмотку двигуна $M4$ з'єднати за схемою «зірка».

4. Дослідити залежність зміни вихідної напруги на затискачах перетворювача від частоти струму $U = \varphi(f_1)$ при холостому ході двигуна. Для цього автоматичним вимикачем $QF1$ подати живлення на перетворювач частоти $A1$. З робочої панелі перетворювача натисканням клавіші «Робота в прямому напрямку»  ввімкнути двигун $M4$. За допомогою аналогового потенціометру змінювати

вихідну частоту від 0 до 60 Гц із шагом 5 Гц. Зміну вихідної напруги знімати з монітору перетворювача частоти. Для перегляду параметрів монітору використовується клавіша «Зсув» . Зупинку двигуна здійснити натисканням клавіши «Останов/Зброс» . Дані дослідів занести до таблиці 4. За даними таблиці 4 побудувати залежність $U = \varphi(f_1)$. Визначити закон частотного регулювання. При невідповідності закону частотного регулювання характеру навантаження лабораторної установки – виконати настройку частотного перетворювача під керівництвом навчального майстра лабораторії.

Таблиця 3 – Результати розрахунку механічних характеристик АД за частотного регулювання при роботі із генератором постійного струму

Природна характеристика $f = 50$ Гц											
S_i , в.о.	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,2	S_K	...	0,8	0,9	1
ω_i , рад/с	ω_o						ω_K				0
M_i , Н·м	0						M_K				
Штучна характеристика $f = 30$ Гц											
S_i , в.о.	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,2	S_{K30}	...	0,8	0,9	1
ω_i , рад/с	ω_{o30}						ω_{K30}				0
M_i , Н·м	0						M_{K30}				
Штучна характеристика $f = 60$ Гц											
S_i , в.о.	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,2	S_{K60}	...	0,8	0,9	1
ω_i , рад/с	ω_{o60}						ω_{K60}				0
M_i , Н·м	0						M_{K60}				

Таблиця 4 – Дані дослідження залежності вихідної напруги на затискачах перетворювача від частоти $U = \varphi(f_1)$

f , Гц	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
U , В													

5. Дослідити електромеханічні $\omega = f(I_1)$ та механічні $\omega = f(M)$ характеристики АД $M4$. Досліди проводять наступним чином. Автоматом $QF2$ подати напругу на обмотки збудження машин постійного струму $M1, M2, M3$, при цьому реостат $R1$ в колі обмотки збудження машини $M1$ має бути повністю виведеним, $R2, R3$ в колах обмоток збудження машин $M2$ і $M3$ введеними. При повністю введеному пусковому опорі R_p замикають перемикач $S2$ і підключають до мережі двигун постійного струму $M1$. Після розгону двигуна пусковий

опір повністю вивести. Автоматичним вимикачем $QF1$ подати живлення на перетворювач частоти $A1$. З робочої панелі перетворювача за допомогою аналогового потенціометру задати вихідну частоту 50 Гц та запустити двигун $M4$ натисканням клавіші «Робота в прямому напрямку». Реостатами $R2$ і $R3$ встановити машинам $M2$ і $M3$ таке збудження, при якому вольтметр $pV2$, ввімкнений паралельно перемикачу $S1$, показуватиме нуль. Замкнути рубильник $S1$.

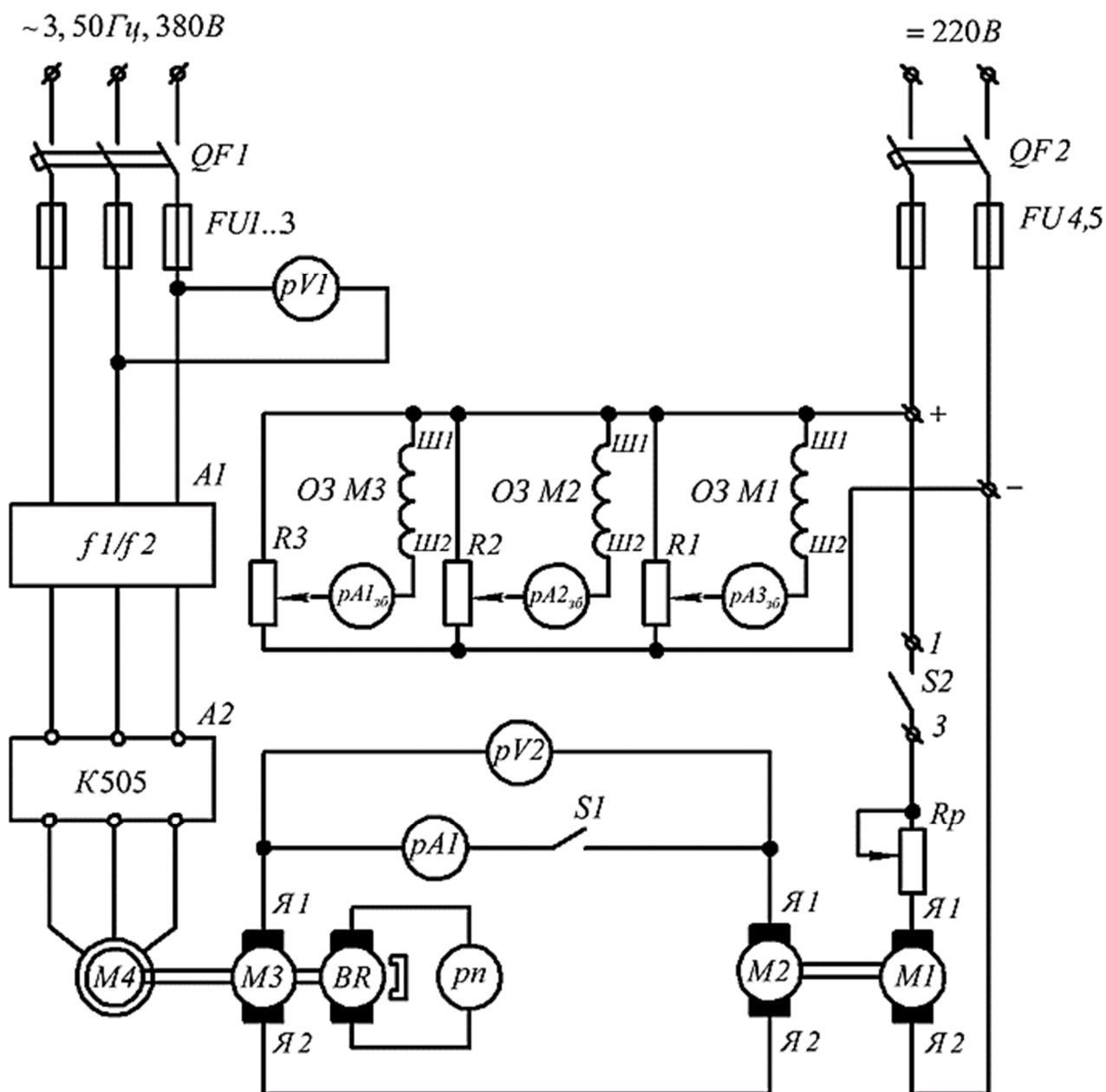


Рисунок 3 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження частотного регулювання швидкості АД

Збільшуючи навантаження на валу досліджуваного двигуна за допомогою реостату $R2$ (зменшення магнітного потоку генератора $M2$ призведе до росту

струму у якірному колі генератора $M3$), вимірюють струм якоря навантажувальної машини $M3$, напругу, струм статора і швидкість обертання досліджуваного двигуна $M4$. Дослід проводити у діапазоні швидкостей від синхронної ω_0 до критичної ω_k . Після закінчення дослідів двигун $M4$ перевести у режим ідеального холостого ходу.

Далі, з робочої панелі перетворювача $A1$ задати нове значення вихідної частоти напруги живлення і за описаною вище методикою повторити дослід. Досліди проводити при значеннях вихідної частоти перетворювача 50 Гц, 60 Гц, 30 Гц. Дані дослідів занести до таблиці 5.

Момент на валу АД визначається без урахування моменту втрат навантажувального генератора $M3$

$$M_{M4i} = M_{M3i}. \quad (22)$$

Електромагнітний момент навантажувального генератора визначається

$$M_{M3i} = k\Phi_\partial I_{ЯM3i}, \quad (23)$$

де $k\Phi_\partial$ – коефіцієнт, що залежить від величини магнітного потоку генератора під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_\partial$ можна розрахувати як

$$k\Phi_\partial = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_n, \quad (24)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними навантажувальної машини постійного струму.

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_я}{\omega_n}, \quad (25)$$

де $R_я$ – опір кола якоря, що визначається за паспортними даними або безпосереднім вимірюванням, Ом.

$$R_я = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}. \quad (26)$$

6. За даними таблиці 5 побудувати електромеханічні $\omega = f(I_1)$ та механічні $\omega = f(M)$ характеристики АД при значеннях вихідної частоти перетворювача 50; 60; 30 Гц.

Таблиця 5 – Дані дослідження електромеханічних $\omega = f(I_1)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні

Струм статора АД, $I_1, \text{А}$	Частота обертання, $n, \text{об/хв}$	Швидкість обертання, $\omega, \text{рад/с}$	Струм якоря $M3$ $I_{ЯМ3}, \text{А}$	Момент двигуна $M4$ $M_{M4}, \text{Н}\cdot\text{м}$
Вихідна частота перетворювача 50 Гц, Напруга на виході перетворювача $U_I = \underline{\hspace{2cm}}$ В				
Вихідна частота перетворювача 60 Гц, Напруга на виході перетворювача $U_I = \underline{\hspace{2cm}}$ В				
Вихідна частота перетворювача 30 Гц, Напруга на виході перетворювача $U_I = \underline{\hspace{2cm}}$ В				
Додаткові експериментальні дані				
Струм збудження машини $M3$ $I_{зб\ 50\text{Гц}} = \underline{\hspace{2cm}}$ А; $I_{зб\ 60\text{Гц}} = \underline{\hspace{2cm}}$ А; $I_{зб\ 30\text{Гц}} = \underline{\hspace{2cm}}$ А; $I_{збн} = \underline{\hspace{2cm}}$ А.				

7. Провести порівняльний аналіз механічних характеристик АД за частотного регулювання отриманих розрахунковим та експериментальним шляхом. Оцінити перевантажувальну здатність двигуна.

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Графіки механічних характеристик двигуна за різної частоти напруги живлення (30; 50; 60 Гц), розраховані за каталожними даними.

3. Електричну схему лабораторної установки для дослідження характеристик АД з короткозамкненим ротором за частотного регулювання.

4. Таблиці з результатами експериментальних досліджень.
5. Результати розрахунку механічних характеристик АД за експериментальними даними.
6. Графіки залежностей $\omega = f(I_1)$, $\omega = f(M)$ за різної частоти напруги живлення (30; 60; 50 Гц), отримані експериментальним шляхом.
7. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. Назвіть можливі способи регулювання швидкості асинхронних електродвигунів?
2. Перерахуйте основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів?
3. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості асинхронних електродвигунів зміною частоти струму?
4. Які переваги та недоліки регулювання швидкості обертання електродвигуна зміною частоти струму?
5. Наведіть закон зміни напруги при зміні частоти струму у відносних одиницях?
6. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного електродвигуна при зміні частоти струму для робочої машини з $x = 0$?
7. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного електродвигуна при зміні частоти струму для робочої машини з $x = -1$?
8. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного електродвигуна при зміні частоти струму для робочої машини з $x = 1$?
9. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного електродвигуна при зміні частоти струму для робочої машини з $x = 2$?
10. З яких основних блоків складається перетворювач частоти?
11. Чим відрізняються інвертори напруги від інверторів струму?
12. Наведіть механічні характеристики асинхронного електродвигуна при живленні від перетворювача частоти.
13. Що таке критичний та пусковий момент, який розвиває електродвигун?
14. Як визначається критичний та пусковий момент?
15. Що називається ковзанням асинхронного електродвигуна?
16. Методика розрахунку механічних характеристик АД за каталожними даними при частотному регулюванні.
17. Як залежить момент, що несе електродвигун, від величини прикладеної напруги, частоти струму за різного характеру навантаження?
18. Як змінюється потужність електродвигуна при зміні частоти струму за різного характеру навантаження?
19. Методика експериментального отримання механічних характеристик АД з к.з. ротором за частотного регулювання швидкості.

20. Чи залежать енергетичні показники АД ($KКД$ та $\cos\varphi$) від величини навантаження при виконанні закону регулювання напруги при зміні частоти струму?

21. Якої умови необхідно дотримуватись при регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочої машини?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.

2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.

3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.

4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСІВ

Мета роботи: дослідити механічні характеристики двошвидкісного асинхронного електродвигуна; показати, що при навантаженні електродвигуна однаковим струмом, потужності на валу за схемою “подвійна зірка” і схемою “трикутник” однакові.

1 Основні теоретичні відомості

Одним із способів регулювання кутової швидкості асинхронних електродвигунів (АД) є регулювання зміною числа пар полюсів у відповідності із виразом

$$n = \frac{60f(1-S)}{p}, \quad (1)$$

де f – частота струму мережі живлення, Гц;

S – ковзання електродвигуна, в.о.;

p – число пар полюсів.

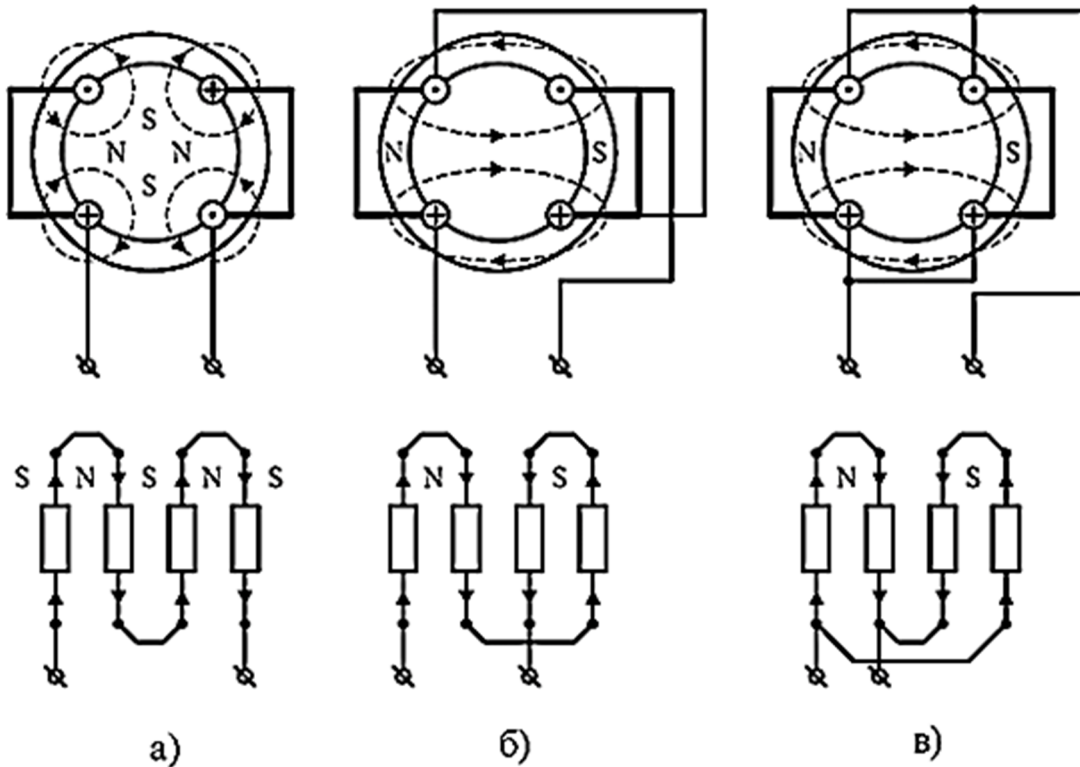
Даний спосіб використовують для машин, що не потребують плавного регулювання кутової швидкості. Це, наприклад, припливні відцентрові вентилятори для тваринницьких та птахівничих приміщень, деякі металообробні верстати, відцентрові сепаратори, вантажні ліфти та лебідки тощо. В цих випадках використовують полюсоперемикаючі (багатошвидкісні) двигуни. Промисловість випускає двигуни на дві, три і чотири частоти обертання із співвідношенням полюсів 4:2; 4:6; 8:4; 8:6; 12:6; 6:4:2; 8:4:2; 8:6:4; 12:8:6:4.

Двошвидкісні двигуни, що мають співвідношення числа пар полюсів 2:1 (полюси 4:2; 8:4; 12:6) мають одну полюсно-перемикаючу обмотку.

У тришвидкісних двигунах дві незалежні обмотки: одна полюсно-перемикаюча з числом полюсів 4:2 для двигунів з $2p = 6:4:2$, $8:4:2$ і $8:4$ для двигунів з $2p = 8:6:4$ та одна звичайна обмотка з числом полюсів $2p = 6$ для двигунів з $2p = 6:4:2$, $8:6:4$ і $2p = 8$ для двигунів з $2p = 8:4:2$. Чотиришвидкісні двигуни з $2p = 12:6:4$ мають дві незалежні полюсно-перемикаючі обмотки з $2p = 8:4$ і $12:6$.

Для зміни числа пар полюсів у співвідношенні 2:1 виконують перемикання секцій статорної обмотки. Схеми вмикання секцій однієї фази обмотки статора, що забезпечують зміну числа пар полюсів вдвічі представлено на рисунку 1.

Струм в секціях обмотки статора при номінальній напрузі не залежить від схеми з'єднання і залишається практично незмінним, незважаючи на те, що опір фази при послідовному і паралельному з'єднаннях секцій змінюється в два рази.



а – узгоджено-послідовне; б – зустрічно-послідовне; в – зустрічно-паралельне

Рисунок 1 – Схеми вмикання секцій однієї фази обмотки статора, що забезпечують зміну числа пар полюсів у співвідношенні 2:1

Незмінність струму в секціях пояснюється зміною електрорушійної сили обмотки статора при зміні кутової швидкості двигуна.

Обмотку статора двошвидкісного двигуна можна перемикає за схемами «трикутник» – Δ , «зірка» – Y , «подвійна зірка» – YY . Промисловість випускає двошвидкісні двигуни зі схемами з'єднання обмоток - Δ/YY і Y/YY . На нижній швидкості обмотка з'єднується за схемою «трикутник» або «зірка», а на вищій – в «подвійну зірку». Відповідні схеми з'єднань та підключень у клемній коробці двигуна приведені на рисунку 2. При маркуванні виводів фазних обмоток багатошвидкісних двигунів цифра перед літерним позначенням вказує на кількість полюсів ($2p$) машини, які створює відповідне з'єднання обмоток.

При перемиканні двошвидкісного двигуна з «трикутника» на «подвійну зірку» мають місце такі співвідношення потужностей і моментів:

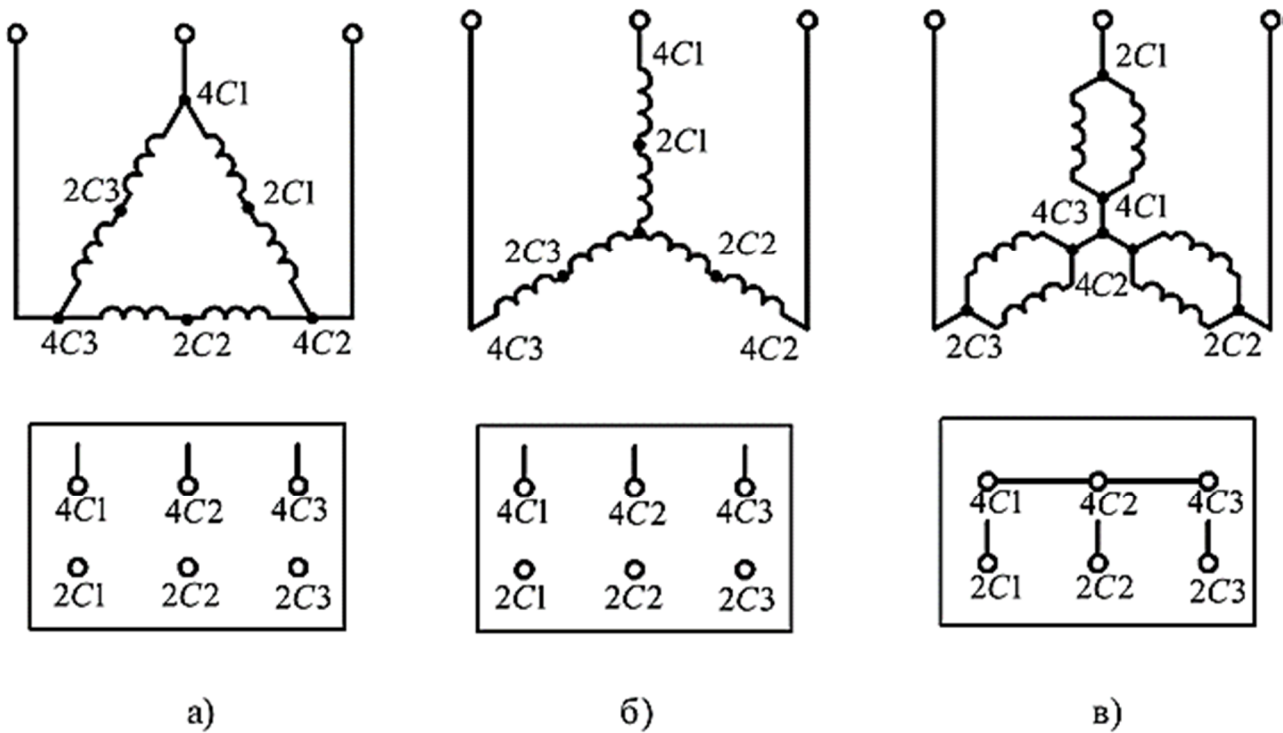
$$P_{1\Delta} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{1\Delta} = \sqrt{3}U_{л}\sqrt{3}I_{\phi}\cos\varphi_{1\Delta} = 3U_{л}I_{\phi}\cos\varphi_{1\Delta},$$

$$P_{1YY} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{1YY} = \sqrt{3}U_{л}2I_{\phi}\cos\varphi_{1YY} = 2\sqrt{3}U_{л}I_{\phi}\cos\varphi_{1YY}, \quad (2)$$

$$\frac{P_{1YY}}{P_{1\Delta}} = \frac{2\sqrt{3}U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1YY}}{3U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1\Delta}} = \frac{2\sqrt{3}}{3} = 1,16 \cong const,$$

$$M_{\Delta} = \frac{P_{\Delta}}{\omega_{\Delta}}, \quad M_{YY} = \frac{P_{YY}}{\omega_{YY}} = \frac{P_{YY}}{2\omega_{\Delta}}, \quad \frac{M_{YY}}{M_{\Delta}} = \frac{P_{YY}}{2\omega_{\Delta}} \cdot \frac{\omega_{\Delta}}{P_{\Delta}} = \frac{2\sqrt{3}}{2 \cdot 3} = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Таким чином, якщо вважати, що $\cos\varphi_{1YY} = \cos\varphi_{1\Delta}$, то при перемиканні двигуна на вищу швидкість потужність залишиться майже незмінною, а момент зменшиться у $\sqrt{3}$ раз. Отже, асинхронні двигуни, що мають полюсно-перемикаючу обмотку за схемою «трикутник» – «подвійна зірка» забезпечують регулювання частоти обертання при постійній потужності і є ефективними при регулюванні швидкості обертання робочих машин із нелінійно-спадаючою механічною характеристикою ($x = -1$).



а – «трикутник» б – «зірка» в – «подвійна зірка»

Рисунок 2 – Схеми з'єднання та підключення статорних обмоток двошвидкісного асинхронного двигуна

При перемиканні двошвидкісного двигуна зі схеми «зірка» на «подвійну зірку» споживана з мережі потужність і крутні моменти визначаються залежностями:

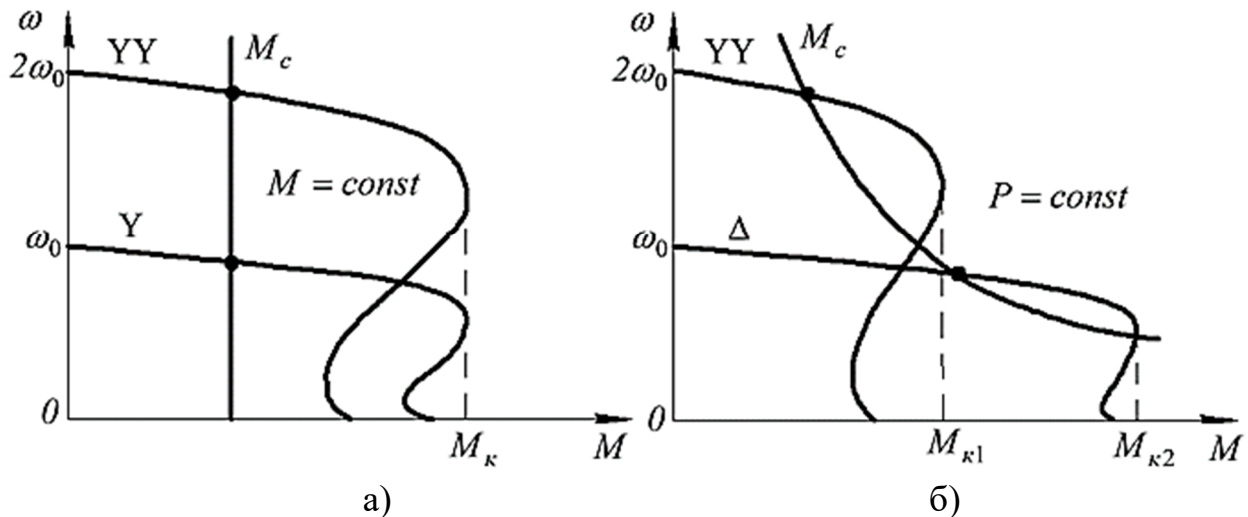
$$P_{1Y} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{1Y} = \sqrt{3}U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1Y},$$

$$P_{1YY} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{1YY} = \sqrt{3}U_{л}2I_{\Phi}\cos\varphi_{1YY} = 2\sqrt{3}U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1YY}, \quad (3)$$

$$\frac{P_{1YY}}{P_{1Y}} = \frac{2\sqrt{3}U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1YY}}{\sqrt{3}U_{л}I_{\Phi}\cos\varphi_{1Y}} = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 2,$$

$$M_Y = \frac{P_Y}{\omega_Y}, \quad M_{YY} = \frac{P_{YY}}{\omega_{YY}} = \frac{P_{YY}}{2\omega_Y}, \quad \frac{M_{YY}}{M_Y} = \frac{P_{YY}}{2\omega_Y} \cdot \frac{\omega_Y}{P_Y} = \frac{2}{2} = 1.$$

Таким чином, якщо вважати, що $\cos\varphi_{1YY} = \cos\varphi_{1\Delta}$, то при перемиканні двигуна на вищу швидкість потужність споживана з мережі зросте вдвічі, а момент залишиться незмінним. Схема перемикання «зірка» - «подвійна зірка» забезпечує регулювання частоти обертання при постійному моменті. Такий спосіб регулювання швидкості є найбільш економічним при регулюванні швидкості обертання робочих машин із механічною характеристикою, що не залежить від швидкості обертання ($x = 0$).



- а – при регулюванні з постійним моментом;
 б – при регулюванні з постійною потужністю

Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні числа пар полюсів вдвічі

Багатошвидкісні електродвигуни не можуть працювати з високими енергетичними показниками на всіх швидкостях обертання при роботі з машинами, що мають прямолінійно-зростаючу ($x = 1$) і вентиляторну ($x = 2$) характеристики. Допустиме навантаження на двигун повинно прийматись при можливому максимальному значенні швидкості обертання. При нижчих швидкостях обертання двигун буде не завантажений.

До недоліків багатошвидкісних двигунів потрібно віднести великі габарити і масу порівняно з двигунами загальнопромислового виконання, а відповідно і більш високу вартість.

Регулювальні властивості багатошвидкісних асинхронних двигунів характеризуються наступними показниками:

1. Діапазон регулювання швидкості обертання відносно невеликий – 6:1;
2. Характер регулювання – східчастий;
3. Стабільність роботи постійна – забезпечується стійка робота приводу за будь-якої швидкості;
4. Допустиме навантаження двигуна: в залежності від схеми з'єднання обмоток регулювання здійснюється з постійним моментом або з постійною потужністю на валу двигуна;
5. Спосіб економічний – додаткових втрат при перемиканні полюсів не виникає. Для перемикання полюсів використовується відносно проста апаратура.

2 Завдання для самостійної підготовки

1. Опрацювати теоретичний матеріал по рекомендованій літературі [1, тема 4, лекція «Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною числа пар полюсів»; 2, с. 209-215; 3, с. 95-100; 4, с. 472-475]. Вивчити будову і схеми перемикання статорних обмоток двошвидкісних двигунів.

2. Відповісти на контрольні запитання.

3 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. За каталожними даними розрахувати та побудувати механічні характеристики трифазного двошвидкісного асинхронного електродвигуна $\omega = f(M)$ при зміні кутової швидкості обертання від 0 до ω_0 і схемі з'єднання обмоток статора YY, Δ .

3. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик двошвидкісного асинхронного двигуна.

4. Зняти експериментальні дані для побудови залежності моменту втрат системі машин АД-ГПС від швидкості $\omega = f_3(M_{втрат})$.

5. Дослідити електромеханічну $\omega = \varphi_1(I_1)$ та механічну $\omega = f_1(M)$ характеристики, асинхронного двигуна при з'єднанні обмотки статора за схемою «подвійна зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

6. Дослідити електромеханічну $\omega = \varphi_2(I_1)$ та механічну $\omega = f_2(M)$ характеристики, асинхронного двигуна при з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

7. Провести дослід по встановленню співвідношення моментів і потужностей споживаних з мережі при з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» і «подвійна зірка» за номінального навантаження двигуна.

8. За експериментальними даними побудувати електромеханічні і механічні (з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин) характеристики досліджуваного двигуна.

9. Провести аналіз механічних характеристик, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом (при цьому врахувати, що експеримент проводиться при зниженій напрузі $\sim 220\text{ В}$); провести аналіз електромеханічних характеристик, встановивши співвідношення струмів холостого ходу, струмів за критичного ковзання та при пуску. Провести аналіз та встановити співвідношення моментів і потужностей споживаних з мережі при з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» і «подвійна зірка».

10. Оформити звіт з лабораторної роботи.

4 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

M1(двошвидкісний двигун)		G1 (генератор)		G2 (генератор)		
Тип	АИР100L8/4У3		Тип	П-22	Тип	ПБС-32
Схема	YY	Δ	P_n , кВт	1,0	P_n , кВт	1,2
P_n , кВт	2,36	1,4	U_n , В	220	U_n , В	220
U_n , В	380	380	I_n , А	5,9	I_n , А	6,5
I_n , А	5,1	4,9	$I_{збн}$, А	0,5	$I_{збн}$, А	0,5
η_n , %	81	72	η_n , %	76,5	η_n , %	82
$\cos\phi$, в.о.	0,89	0,6	n_n , об/хв	1500	n_n , об/хв	1500
n_n , об/хв	1420	716	m , кг	43,8	m , кг	80
μ_n , в.о.	1,4	1,6	ГОСТ	183-66	ТУ	16-514.207-77
μ_k , в.о.	1,9	2	-	-	-	-
μ_{min} , в.о.	1	1,5	-	-	-	-
m , кг	29,5		-	-	-	-
ГОСТ	183-74		-	-	-	-
Комплект вимірювальний К 505						
Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5						
Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с						
Мультиметр цифровий Digital DT9208A						
Амперметр						
Вольтметр						
Комплекти опорів на 16 Ом; 0,6 Ом						

5 Вказівки щодо виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати механічні характеристики досліджуваного двигуна по каталожним даним при зміні кутової швидкості обертання від 0 до ω_0 і схемі з'єднання обмоток статора YY, Δ.

Механічну характеристику будують за п'ятьма характерними точками та формулою Клосса.

Характерними точками механічної характеристики АД є:

1. Точка ідеального холостого ходу із координатами $\omega = \omega_0, M = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за рівнянням

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (4)$$

2. Точка номінального навантаження $\omega = \omega_n, M = M_n$.

Кутова номінальна швидкість визначається як

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (5)$$

де n_n – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент, що розвиває двигун

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (6)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

3. Точка максимальної перевантажувальної здатності $\omega = \omega_k, M = M_k$.

Швидкість, за якої двигун розвиває максимальний момент

$$\omega_k = \omega_0(1 - S_k). \quad (7)$$

Критичне ковзання

$$S_k = S_n \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2S_n(\mu_k - 1)}}{1 - 2S_n(\mu_k - 1)}. \quad (8)$$

Номинальне ковзання

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}. \quad (9)$$

Максимальний момент, який розвиває двигун

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (10)$$

де μ_k – кратність максимального моменту, в.о.

4. Точка мінімального моменту $\omega = \omega_{\min}$, $M = M_{\min}$.

Швидкість, за якої двигун досягає мінімального моменту

$$\omega_{\min} = \omega_0 (1 - S_{\min}), \quad (11)$$

де S_{\min} – ковзання, при якому спостерігається провал моменту, в.о.,

$$S_{\min} = 0,8 \dots 0,85.$$

Мінімальний момент двигуна

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_n, \quad (12)$$

де μ_{\min} – кратність мінімального моменту, в.о.

5. Точка пускового моменту $\omega = 0$, $M = M_n$.

Пусковий момент двигуна

$$M_n = \mu_n M_n, \quad (13)$$

де μ_n – кратність пускового моменту, в.о.

Додаткові точки для побудови механічної характеристики отримують за рівнянням Клосса

$$M_i = \frac{2M_k(1 + \alpha S_k)}{\frac{S_i}{S_k} + \frac{S_k}{S_i} + 2\alpha S_k}, \quad (14)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2'}$ – відношення активного опору обмотки статора до приведенного

значення опору обмотки ротору, в.о. Приймаємо $\alpha = 1$;

S_i – ковзання електродвигуна, в.о.

Швидкість обертання АД за будь-якого ковзання можна визначити за виразом

$$\omega = \omega_0(1 - S_i). \quad (15)$$

Момент, що розвиває двигун при зниженні напруги на його обмотках визначається

$$M'_{i(U_m)} = k_U^2 M_{i(U_n)}, \quad (16)$$

де $k_U = \frac{U_m}{U_n}$ – коефіцієнт зниження напруги, в.о.;

U_m – дійсне значення напруги мережі, В;

U_n – номінальна напруга електродвигуна, В.

Результати розрахунків звести до таблиці 2 та в одній системі координат побудувати механічні характеристики двошвидкісного асинхронного двигуна при схемі з'єднання статорних обмоток Y-Y та Δ.

Таблиця 2 – Результати розрахунку механічних характеристик двошвидкісного асинхронного двигуна

Схема з'єднання Y-Y											
S_i , в.о.	0			S_n			S_k			S_{min}	1
ω_i , рад/с	ω_0			ω_n			ω_k			ω_{min}	0
M_i , Н·м ($U_m = 380V$)	0			M_n			M_k			M_{min}	M_n
M'_i , Н·м ($U_m = 220V$)											
Схема з'єднання Δ											
S_i , в.о.	0			S_n			S_k			S_{min}	1
ω_i , рад/с	ω_0			ω_n			ω_k			ω_{min}	0
M_i , Н·м ($U_m = 380V$)	0			M_n			M_k			M_{min}	M_n
M'_i , Н·м ($U_m = 220V$)											

3. Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик двошвидкісного АД представлена на рисунку 4. Навантаження для досліджуваного електродвигуна $M1$ створюють два генератори постійного струму $G1$ і $G2$. Величину моменту опору регулюють реоста-

тами у якорних колах $Rp3$, $Rp4$ та у колах обмоток збудження $Rp1$, $Rp2$ генераторів.

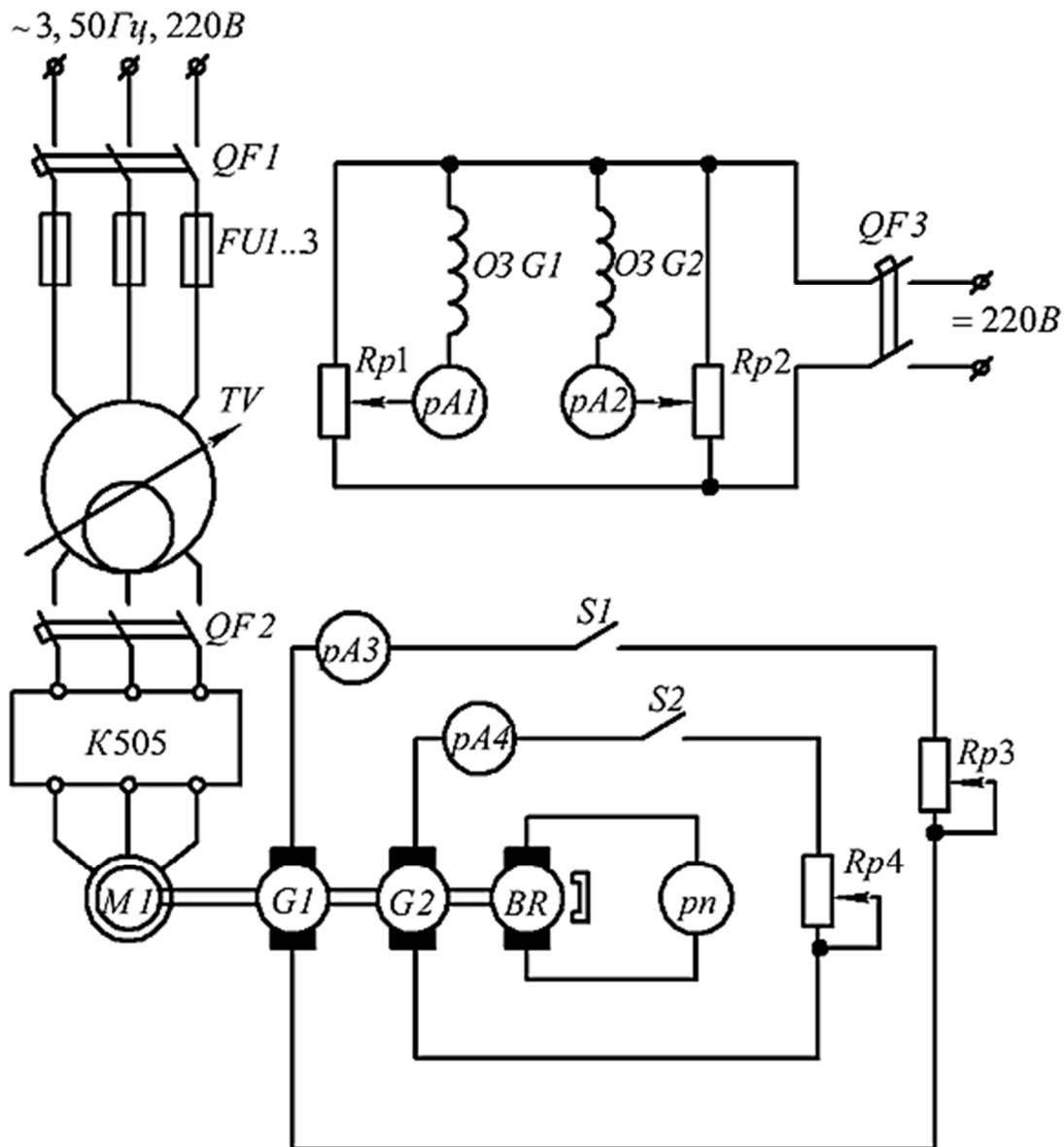


Рисунок 4 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик двошвидкісного АД

4. Провести дослід по визначенню моменту втрат $M_{втрат}$, навантажувальних генераторів $G1$ і $G2$. Дослід проводиться при розімкнених контактах рубильників $S1$ та $S2$ (режим холостого ходу) на двох швидкостях обертання АД. Для цього обмотку АД з'єднують за схемою YU та запускають двигун $M1$ послідовним включенням автоматичних вимикачів $QF1$ та $QF2$. Далі провести вимірювання по фазам потужності, споживаної АД з мережі, та визначити швидкість обертання ротору машини. Результати дослідів занести до таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані дослідження моменту втрат $\omega = f_3(M_{втрат})$ у системі машин АД-ГПС

P_{0A} , Вт	P_{0B} , Вт	P_{0C} , Вт	$\sum P_{втрат}$, Вт	n , об/хв	ω , рад/с	$M_{втрат}$ Н·м
Схема з'єднання - Y-Y						
Схема з'єднання - Δ						

Потужність, що споживає АД з мережі, йде на покриття власних втрат холостого ходу та втрат холостого ходу навантажувальних генераторів (потужністю електричних втрат в обмотці АД нехтуємо)

$$\sum P_{втрат} = P_{0АД} + P_{0ГПС} = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}, \quad (17)$$

де $P_{0АД}$ – потужність холостого ходу асинхронного електродвигуна, Вт;

$P_{0ГПС}$ – сумарна потужність холостого ходу генераторів постійного струму, Вт.

Момент втрат у системі машин АД-ГПС визначається

$$M_{втрат} = \frac{P_{втрат}}{\omega}, \quad (18)$$

де ω – швидкість обертання якорю ГПС, рад/с.

За розрахунковими даними таблиці 3 побудувати залежність $\omega = f_3(M_{втрат})$, яка представляє собою пряму.

5. Зняти електромеханічні та механічні характеристики АД. Для цього обмотку статора двигуна $M1$ з'єднати за схемою «подвійна зірка». Запустити досліджуваний двигун $M1$ послідовним включенням автоматичних вимикачів $QF1$ та $QF2$. Автоматом $QF3$ подати напругу на обмотки збудження генераторів $G1$ і $G2$. Реостатами $Rp1$, $Rp2$ в колі обмоток збудження машин $G1$ і $G2$ встановити номінальний струм. Замкнути рубильники $S1$ і $S2$. Змінюючи навантаження на валу досліджуваного двигуна за допомогою реостатів $Rp3$, $Rp4$ в якірних колах навантажувальних генераторів, вимірюють частоту обертання, струм у якірному колі та колі збудження навантажувальних машин $G1$ і $G2$, струм статора досліджуваного двигуна $M1$. Першу точку зняти за відсутності навантаження машин $G1$ і $G2$. Обов'язково експериментально визначити максимальний момент, що спроможний нести двигун за даної схеми з'єднання обмоток. Вимкнути установку. Змінити схему з'єднання обмоток досліджуваного двигуна $M1$ на «трикутник». Повторити дослід. Дані досліду занести до таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати експериментального дослідження електромеханічних $\omega = \varphi(I_1)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик двошвидкісного АД за схемами з'єднання обмоток YY та Δ за напруги живлення $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ В

Струм статора АД I_1, A	Напруга тахогенератора $U_{ТГ}, B$	Частота обертання $n, об/хв$	Швидкість обертання $\omega, рад/с$	Електромагнітний момент						Момент втрат $M_{втрат}, Н \cdot м$	Момент АД при $U_i, M_{U_i}, Н \cdot м$	Момент АД при $U_n, M_{U_n}, Н \cdot м$
				$I_{збГ1}, A$	$I_{ЯГ1}, A$	$M_{ЕМГ1}, Н \cdot м$	$I_{збГ2}, A$	$I_{ЯГ2}, A$	$M_{ЕМГ2}, Н \cdot м$			
Схема з'єднання – YY												
Схема з'єднання – Δ												

Електромагнітний момент навантажувальних генераторів визначається

$$M_{EMi} = k\Phi_{\delta} I_{Яi}, \quad (19)$$

де $k\Phi_{\delta}$ – коефіцієнт, що залежить від величини магнітного потоку генератора під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_{\delta}$ можна розрахувати як

$$k\Phi_{\delta} = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_n, \quad (20)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними навантажувальної машини постійного струму.

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (21)$$

де $R_{я}$ – опір кола якоря, що визначається за паспортними даними або безпосереднім вимірюванням, Ом.

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}. \quad (22)$$

Сумарний навантажувальний момент $\sum M_{EM}$ знаходиться шляхом додавання електромагнітних моментів генераторів $G1$ і $G2$.

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f_3(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент двошвидкісного АД

$$M_{Ui} = M_{втрат} + \sum M_{EM}. \quad (23)$$

Природну механічну характеристику досліджуваного АД отримують при перерахунку моменту машини на номінальну напругу 380 В згідно з рівнянням (16).

6. Провести дослід по встановленню співвідношення моментів і потужностей споживаних з мережі при з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» і «подвійна зірка». Для цього включити експериментальну установку для роботи в режимі навантаження. Встановити досліджуваному двигуну $M1$ за струмом статора номінальне навантаження шляхом зміни опору у колах збудження та якірних колах навантажувальних генераторів $G1$ і $G2$. Виміряти потужність споживану з мережі АД по фазам, та струм якоря і збудження навантажувальних генераторів.

7. За даними таблиці 4 побудувати на одному графіку механічні характеристики двошвидкісного АД при з'єднанні обмоток за схемою «подвійна зірка» та «трикутник».

За експериментальними даними таблиці 5 визначити співвідношення активних потужностей, споживаних з мережі, $\frac{P_{1YY}}{P_{1\Delta}}$ та моментів, що розвиває

двигун при перемиканні обмоток з «подвійної зірки» на «трикутник» $\frac{M_{YY}}{M_{\Delta}}$.

Таблиця 5 – Результати експериментального дослідження по встановленню співвідношення моментів і потужностей двошвидкісного АД

I_1 , А	P_{1A} , Вт	P_{1B} , Вт	P_{1C} , Вт	$\sum P_1$, Вт	Електромагнітний момент						
					$I_{збG1}$, А	$I_{ЯG1}$, А	M_{EMG1} , Нм	$I_{збG2}$, А	$I_{ЯG2}$, А	M_{EMG2} , Нм	$\sum M_{EM}$, Нм
Схема з'єднання - Y-Y											
Схема з'єднання - Δ											

8. За даними таблиці 4 побудувати електромеханічні характеристики для обох схем вмикання. Для однієї зі схем визначити значення струму холостого ходу, струму при критичному ковзанні та пускового струму в долях від номінального.

9. Порівняти результати розрахунку механічної характеристики за каталожними та експериментальними даними. Врахувати факт проведення досліду при зниженій напрузі мережі $U_m = 220$ В.

6 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку та графіки механічних характеристик досліджуваного двигуна за різних схем з'єднання обмоток, розраховані за каталожними даними.
3. Схему електричну принципову лабораторної установки.
4. Таблиці з результатами експериментальних досліджень.
5. Результати розрахунку моменту втрат та механічних характеристик АД.
6. Графіки залежностей електромеханічної $\omega = \varphi(I_1)$ і механічної $\omega = f(M)$ характеристик досліджуваного АД при з'єднанні обмоток за схемами Y-Y та Δ, отримані експериментальним шляхом.
7. Аналіз отриманих результатів.

7 Контрольні питання

1. Назвіть можливі способи регулювання швидкості асинхронних електродвигунів.
2. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості асинхронних електродвигунів зміною числа пар полюсів.
3. Розкажіть принцип зміни числа полюсів в багатошвидкісних асинхронних електродвигунах.

4. Які переваги й недоліки регулювання швидкості обертання електродвигуна зміною числа пар полюсів?
5. Які схеми перемикання багатошвидкісних електродвигунів Ви знаєте? Як змінюється при цьому швидкість обертання двигуна?
6. Яка схема перемикання обмоток статора забезпечує сталість моменту, сталість потужності?
7. Що таке критичний та пусковий момент, який розвиває електродвигун?
8. Методика розрахунку механічних характеристик АД за каталожними даними.
9. Як залежить момент, що несе електродвигун, від величини прикладеної напруги, кількості пар полюсів?
10. Методика експериментального отримання механічних характеристик двошвидкісного АД при зміні числа пар полюсів.
11. Співвідношення потужностей та моментів АД при перемиканні обмоток зі схеми $Y\bar{Y}$ на Y , Δ ?
12. Для яких робочих механізмів ефективним буде регулювання швидкості при перемиканні обмоток зі схеми $Y\bar{Y}$ на Y , Δ ?

8 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>
2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

**ТЕСТИ ДЛЯ САМОАНАЛІЗУ
З ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА, Ч. 1»**

1. Основне рівняння руху електропривода записується:

$$1) M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$2) M_{\delta} = M_c \pm J \frac{d\omega}{dt};$$

$$3) F_{\text{дин}} = m \frac{d\omega}{dt};$$

$$4) M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H}.$$

2. Механічні характеристики робочих машин описують рівнянням:

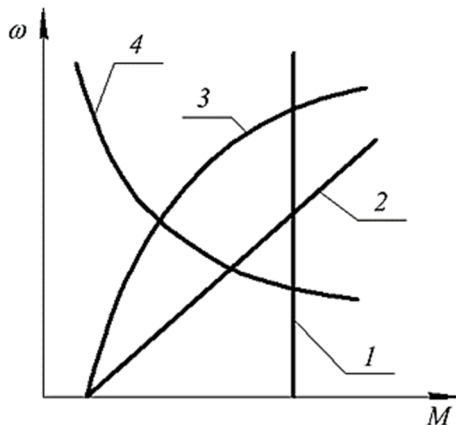
$$1) M_c = \frac{M_{c\omega_0}}{i_p \eta};$$

$$2) M_c = F_{\omega_0} \frac{v_{\omega_0}}{\omega_{\delta}} \cdot \frac{1}{\eta};$$

$$3) M_c = M_o + (M_{сн} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x;$$

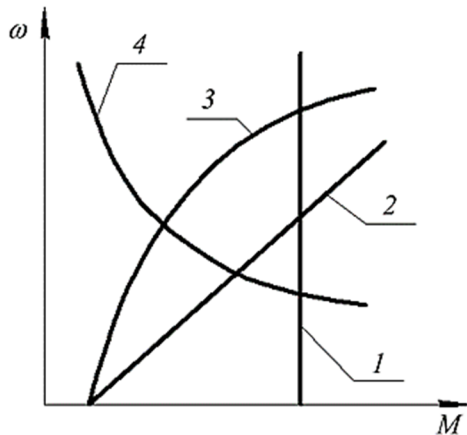
$$4) \pm M_{\delta} \pm M_c = \pm J \frac{d\omega}{dt}.$$

3. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №1:



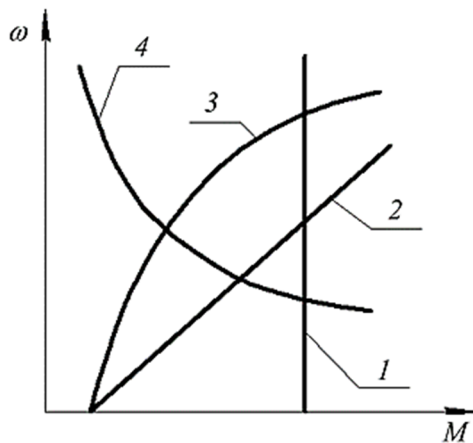
- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

4. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №2:



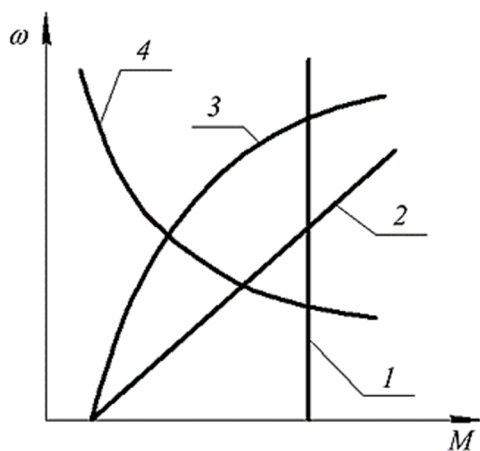
- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

5. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №3:



- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

6. Назвіть робочі машини, механічна характеристика яких має графічний вигляд, який позначений на рисунку під №4:



- 1) генератори постійного струму, зерноочисні машини;
- 2) металообробні станки, зернові норії;
- 3) підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси;
- 4) вентилятори, відцентрові насоси, компресори, сепаратори.

7. При яких умовах привод працює в сталому режимі:

- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

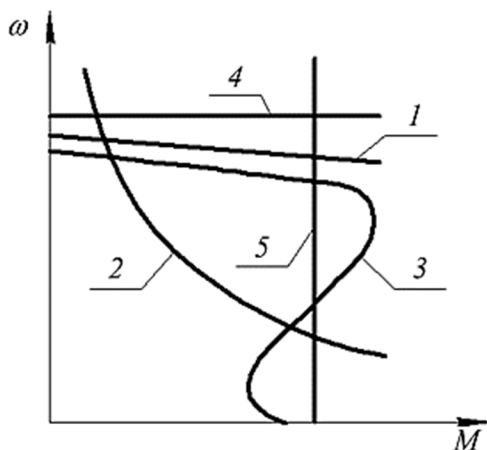
8. При яких умовах має місце уповільнення приводу:

- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

9. При яких умовах має місце прискорення приводу:

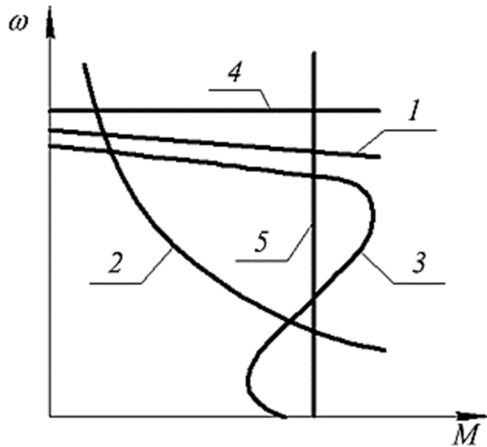
- 1) при $M_{\partial} = M_c, F_{\partial} = F_c, \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{dv}{dt} = 0$;
- 2) при $M_{\partial} > M_c, F_{\partial} > F_c, \frac{d\omega}{dt} > 0, \frac{dv}{dt} > 0$;
- 3) при $M_{\partial} < M_c, F_{\partial} < F_c, \frac{d\omega}{dt} < 0, \frac{dv}{dt} < 0$.

10. Вкажіть природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна:



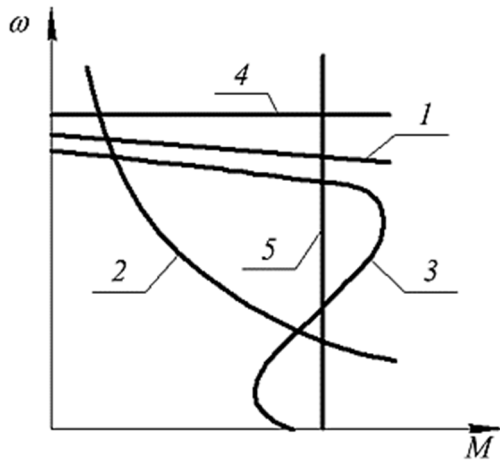
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

11. Вкажіть природну механічну характеристику електродвигуна постійного струму послідовного збудження:



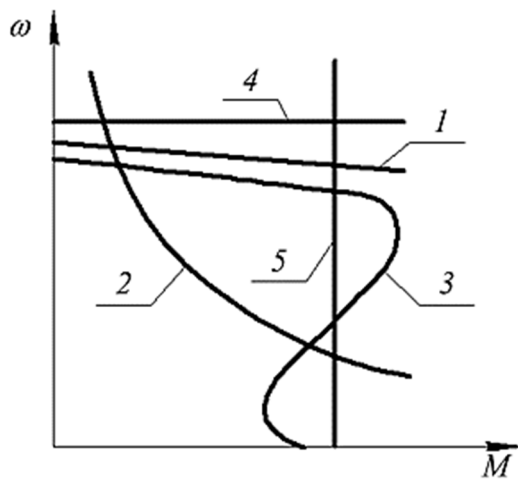
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

12. Вкажіть природну механічну характеристику електродвигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

13. Вкажіть природну механічну характеристику синхронного електродвигуна:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

14. Електроприводом називають (виберіть варіант з найбільш точним і повним визначенням):

- 1) статичний пристрій, призначений для перетворення первинної системи напруги і струму до вторинної системи одержання обертального моменту сили для приведення в рух виконавчих органів робочих машин;
- 2) електромашинний пристрій, в якому механічна енергія передається робочій машині після попереднього перетворення електричної енергії в механічну в приводному електродвигуні;
- 3) область електромеханіки, яка вивчає закони перетворення електричної енергії в механічну та особливості приводу виконавчих органів робочих машин;
- 4) електромеханічну систему, що складається з електродвигуна, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчих органів робочих машин та керування цим рухом.

15. Що розуміють під автоматизованим керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

16. Що розуміють під автоматичним керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

17. Що розуміють під неавтоматичним (ручним) керуванням електроприводом залежно від участі в цих діях людини (оператора)?

- 1) керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично;
- 2) керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора;
- 3) керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом;
- 4) сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки.

18. Що називають розімкненою системою автоматичного керування електроприводом?

- 1) систему, при якій із зміною збудовуючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється;
- 2) систему, при якій із зміною збудовуючої дії змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора;
- 3) систему, при якій основні операції здійснюються без участі оператора;
- 4) систему, при якій оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом.

19. Що називають замкненою системою автоматичного керування електроприводом?

- 1) систему, при якій із зміною збудовуючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється;
- 2) систему, при якій із зміною збудовуючої дії змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора;
- 3) систему, при якій основні операції здійснюються без участі оператора;
- 4) систему, при якій оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню електроприводом.

20. Механічна характеристика робочої машини - це залежність:

- 1) моменту статичних опорів від кутової швидкості;
- 2) моменту статичних опорів від часу;
- 3) потужності статичних опорів від часу;
- 4) потужності статичних опорів від кутової швидкості.

21. Коефіцієнт жорсткості механічної характеристики електродвигуна - це відношення:

- 1) приросту моменту до приросту швидкості;
- 2) приросту моменту до приросту напруги;
- 3) приросту струму до приросту моменту;
- 4) приросту моменту до приросту струму.

22. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму незалежного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

23. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму послідовного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

24. Механічна характеристика, яку має двигун постійного струму змішаного збудження:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

25. Механічна характеристика синхронного двигуна:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

26. Механічна характеристика, яку має трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором при ковзаннях менших за критичне:

- 1) жорстка;
- 2) абсолютно жорстка;
- 3) м'яка;
- 4) абсолютно м'яка.

27. Рівняння електромеханічної характеристики ДПС має вигляд:

1) $\omega = \frac{\pi}{30} n \approx 0,105 n;$

2) $\omega = \frac{U - I_a(R_{\delta\sigma} + R_{я\delta})}{k\Phi};$

3) $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{\delta\sigma} + R_{я\delta})}{(k\Phi)^2};$

4) $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n}.$

28. Рівняння механічної характеристики ДПС має вигляд:

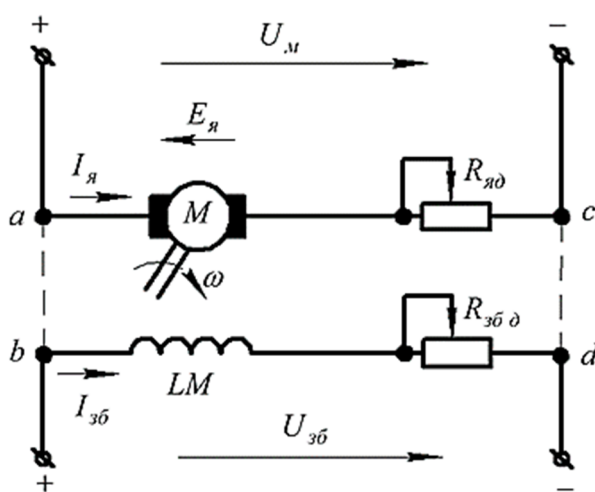
$$1) \omega = \frac{\pi}{30} n \approx 0,105 n;$$

$$2) \omega = \frac{U - I_{я}(R_{\delta в} + R_{я \delta})}{k\Phi};$$

$$3) \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{\delta в} + R_{я \delta})}{(k\Phi)^2};$$

$$4) \omega_0 = \frac{U}{k\Phi_n}.$$

29. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



- 1) послідовного збудження;
- 2) паралельного збудження;
- 3) незалежного збудження;
- 4) змішаного збудження.

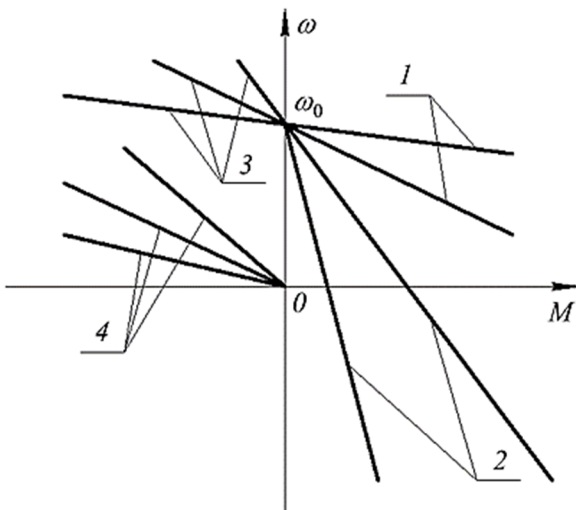
30. При яких умовах ДПС НЗ працює в режимі генераторного (рекуперативного) гальмування:

- 1) коли напрямок дій обертального моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря;
- 2) коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якор під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається з швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$;
- 3) коли обмотка якоря вимикається з мережі і замикається на зовнішній опір або накоротко;
- 4) коли двигун не одержує енергії ні з мережі живлення (за винятком струму збудження), ні з вала ЕД. Якор двигуна обертає робоча машина зі швидкістю, рівною швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$.

31. При яких умовах ДПС НЗ працює в режимі динамічного гальмування:

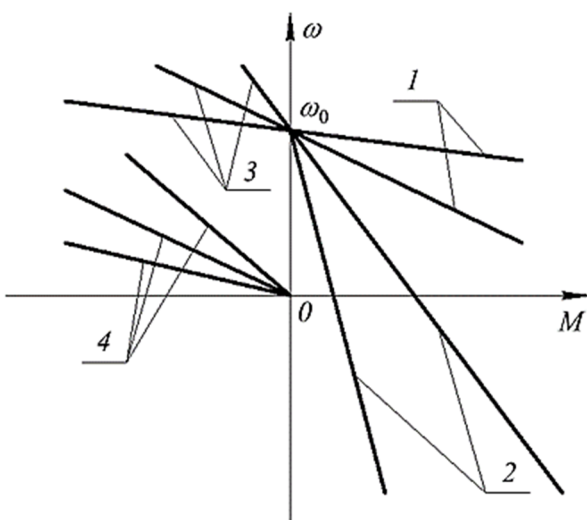
- 1) коли напрямок дій обертального моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря;
- 2) коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якір під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається з швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$;
- 3) коли обмотка якоря вимикається з мережі і замикається на зовнішній опір або накоротко;
- 4) коли двигун не одержує енергії ні з мережі живлення (за винятком струму збудження), ні з вала ЕД. Якір двигуна обертає робоча машина зі швидкістю, рівною швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$.

32. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму гальмування противмиканням (гальмівний спуск):



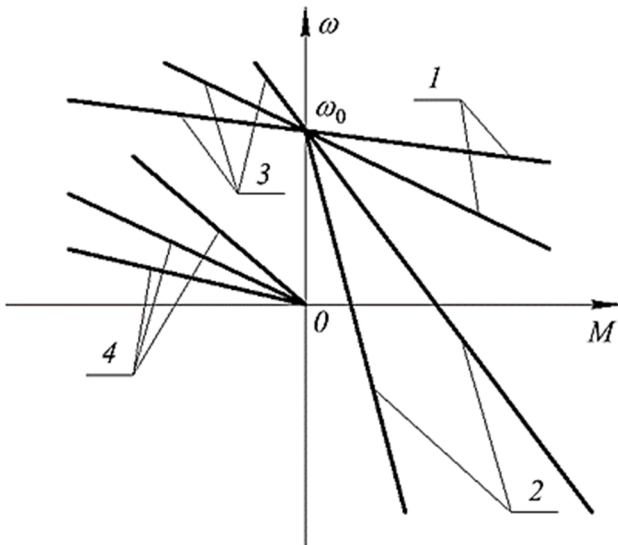
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

33. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму двигуна:



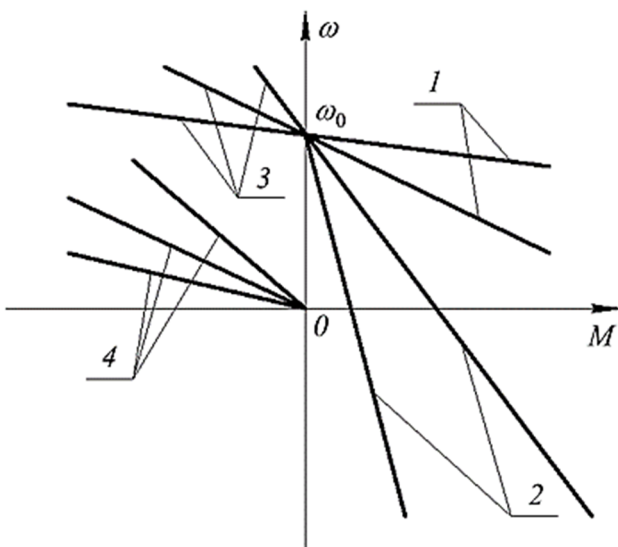
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

34. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму генераторного (рекуперативного) гальмування:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

35. Вкажіть механічну характеристику ДПС НЗ, яка відповідає режиму динамічного гальмування:

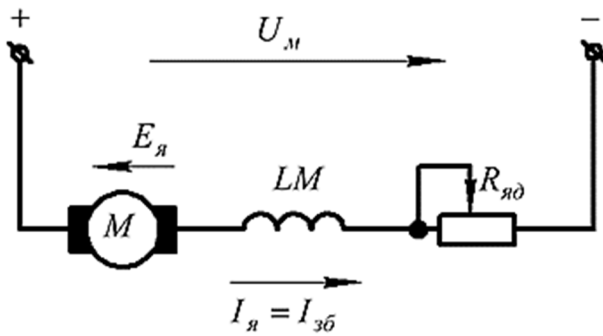


- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

36. Вкажіть два способи, застосуванням кожного з яких можна змінити напрямок обертання ДПС НЗ:

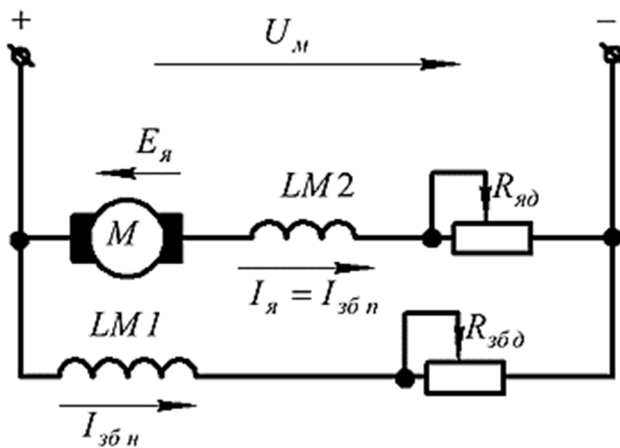
- 1) змінити полярність напруги на якорі;
- 2) змінити полярність напруги на якорі і обмотці збудження;
- 3) змінити полярність напруги на обмотці збудження;
- 4) включити реостат в коло якоря;
- 5) включити реостат в коло обмотки збудження.

37. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



- 1) послідовного збудження;
- 2) паралельного збудження;
- 3) незалежного збудження;
- 4) змішаного збудження.

38. На рисунку наведена схема вмикання ДПС:



- 1) послідовного збудження;
- 2) паралельного збудження;
- 3) незалежного збудження;
- 4) змішаного збудження.

39. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі короткого замикання:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

40. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі двигуна:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

41. При яких умовах асинхронний двигун працює в номінальному режимі:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

42. При яких умовах асинхронний двигун працює в режимі ідеального холостого ходу:

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

43. При яких умовах асинхронний двигун працює в генераторному режимі (режим рекуперативного гальмування):

- 1) $S = 0, \omega = \omega_0$;
- 2) $S = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_n$;
- 3) $0 < S < 1, \omega_0 > \omega > 0$;
- 4) $S < 0, \omega > \omega_0$;
- 5) $S > 1, \omega < 0$;
- 6) $S = S_n, \omega = \omega_n, I = I_n, M = M_n$.

44. Асинхронний електродвигун з фазним ротором має наступні дані:

$M_n = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_n = 137 \text{ рад/с}$; $\mu_k = 2,7$; $\mu_n = 2,3$. Чому буде дорівнювати максимальний момент електродвигуна?

- 1) $34,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 2) $40,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 3) $50,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- 4) $59,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

45. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 20 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

46. Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має наступні дані: $M_n = 27 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_n = 148 \text{ рад/с}$; $\mu_n = 2,0$; $\mu_{min} = 1,6$; $\mu_{max} = 2,2$. Чому буде дорівнювати пусковий момент електродвигуна?

- 1) 43,2 Н·м;
- 2) 54 Н·м;
- 3) 59,4 Н·м;
- 4) 67,5 Н·м.

47. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 10 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

48. Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має наступні дані: $M_n = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_n = 298 \text{ рад/с}$; $\mu_n = 2,1$; $\mu_{min} = 1,6$; $\mu_{max} = 2,2$. Чому буде дорівнювати мінімальний момент електродвигуна?

- 1) 8 Н·м;
- 2) 10,5 Н·м;
- 3) 11 Н·м;
- 4) 12 Н·м.

49. У разі зменшення напруги мережі змінного струму на 30 %, момент асинхронного електродвигуна зменшиться на:

- 1) 19 %;
- 2) 28 %;
- 3) 36 %;
- 4) 51 %.

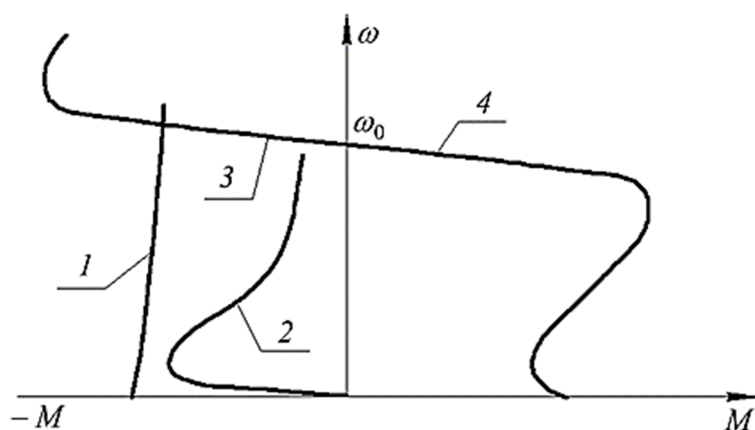
50. Асинхронний електродвигун типу АИР90L4У3 має наступні номінальні дані: $P_n = 2,2 \text{ кВт}$; $U_n = 380 \text{ В}$; $I_n = 5,0 \text{ А}$; $\omega_n = 147 \text{ рад/с}$; $\eta_n = 81 \%$, $\cos\varphi_n = 0,83$. Чому буде дорівнювати номінальний момент електродвигуна?

- 1) 9 Н·м;
- 2) 12 Н·м;
- 3) 15 Н·м;
- 4) 18 Н·м.

51. Асинхронний електродвигун типу АИР100L4У3 має наступні номінальні дані: $P_n = 4,0$ кВт; $U_n = 380$ В; $I_n = 8,5$ А; $\omega_n = 148$ рад/с; $\eta_n = 85\%$, $\cos\varphi_n = 0,84$. Чому буде дорівнювати номінальний момент електродвигуна?

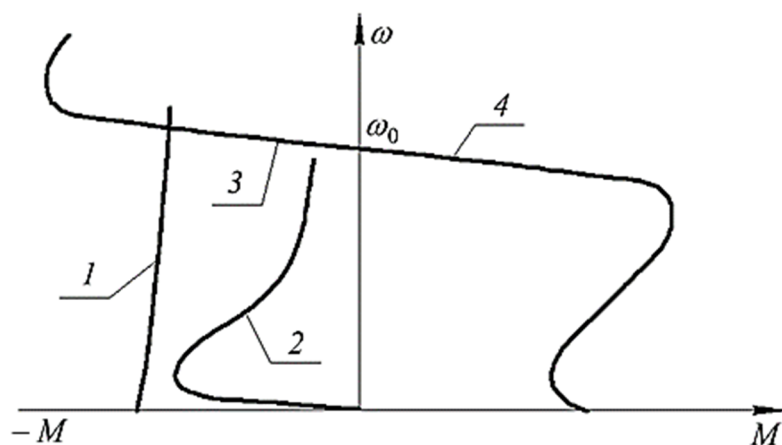
- 1) 15 Н·м;
- 2) 19 Н·м;
- 3) 23 Н·м;
- 4) 27 Н·м.

52. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі генераторного (рекуперативного) гальмування.



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

53. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування.

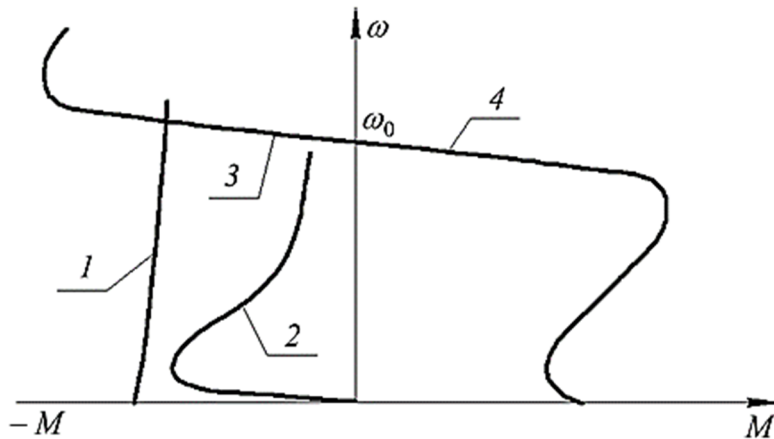


- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

54. Рекуперативне гальмування асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

55. Вкажіть механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі гальмування противмиканням.



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

56. Гальмування противмиканням асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

57. Динамічне гальмування асинхронного електродвигуна здійснюється:

- 1) обертанням ротора двигуна із швидкістю, вищою за синхронну;
- 2) зміною порядку чергування фаз при працюючому двигуні;
- 3) вимкненням обмотки статора із мережі змінного струму і подачею зниженої напруги;
- 4) такий гальмівний режим здійснити неможливо.

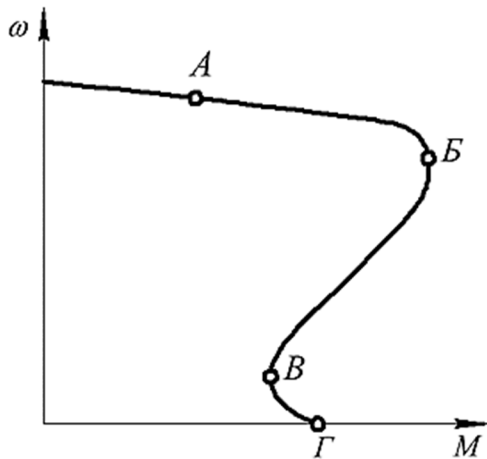
58. Лінійний пусковий струм асинхронного електродвигуна під час пуску з перемиканням обмотки статора із «зірки» на «трикутник» зменшується у:

- 1) 3 рази;
- 2) $\sqrt{3}$ раз;
- 3) 2 рази;
- 4) не зменшується.

59. У сільськогосподарському виробництві найбільше застосування знайшли двигуни:

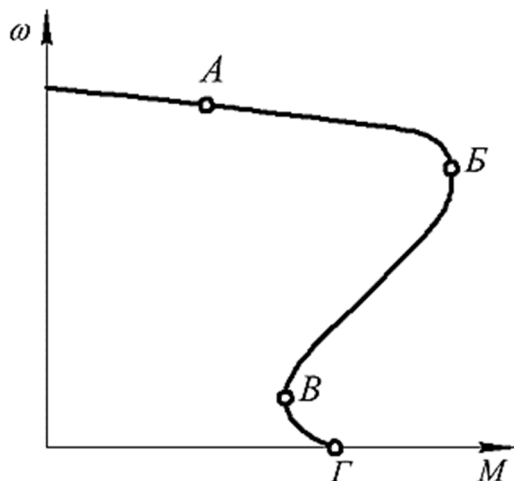
- 1) асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором;
- 2) асинхронні двигуни з фазним ротором;
- 3) синхронні електродвигуни;
- 4) електродвигуни постійного струму.

60. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна мінімальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

61. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна пусковий момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

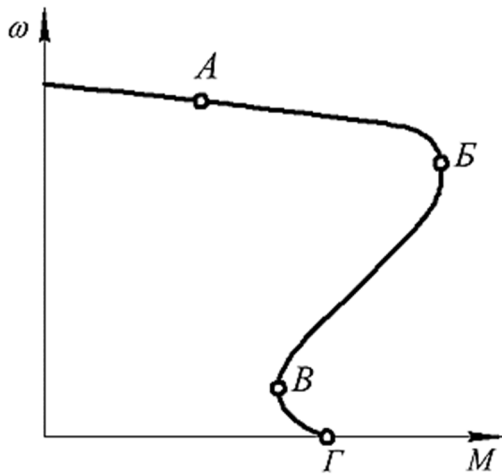
62. Пусковий момент асинхронного електродвигуна з фазним ротором у разі введення в коло ротора активного опору:

- 1) не змінюється;
- 2) зменшується до нуля;
- 3) зростає до величини критичного моменту;
- 4) зростає до величини критичного моменту, а потім зменшується.

63. Для приводу робочих машин з важкими умовами пуску застосовуються асинхронні двигуни:

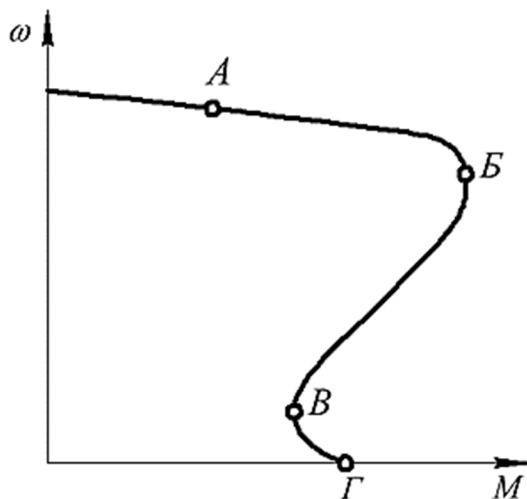
- 1) з підвищеним пусковим моментом;
- 2) з підвищеним ковзанням;
- 3) багатoshвидкісні;
- 4) однофазні.

64. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна номінальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

65. На механічній характеристиці асинхронного електродвигуна максимальний момент позначений точкою:



- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

66. У разі зменшення прикладеної до обмотки якоря напруги у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

67. У разі введення додаткового опору в коло якоря у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

68. У разі зменшення магнітного потоку у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

69. У разі зміни прикладеної до обмотки статора напруги у асинхронного двигуна:

- 1) критичне ковзання не змінюється, а момент двигуна змінюється пропорційно квадрату напруги;
- 2) максимальний момент не змінюється, а критичне ковзання зростає;
- 3) максимальний момент зменшується, а синхронна швидкість зростає;
- 4) максимальний момент зменшується, а критичне ковзання зростає.

70. Механічна характеристика електродвигуна - це залежність:

- 1) кутової швидкості електродвигуна від струму якоря або ротора;
- 2) кутової швидкості електродвигуна від електромагнітного моменту;
- 3) кутової швидкості електродвигуна від прикладеної напруги;
- 4) моменту від струму.

71. Електромеханічна характеристика двигуна постійного струму - це залежність:

- 1) кутової швидкості електродвигуна від струму якоря або ротора;
- 2) кутової швидкості електродвигуна від електромагнітного моменту;
- 3) кутової швидкості електродвигуна від прикладеної напруги;
- 4) моменту від струму.

72. Якщо під час пуску навантаження двигуна становить 120 % від номінального, то пусковий струм асинхронного двигуна:

- 1) збільшиться на 20 %;
- 2) зменшиться на 20 %;
- 3) не зміниться;
- 4) зросте в 1,44 рази.

73. Синхронна кутова швидкість обертання асинхронного електродвигуна типу АИР250М4У3 дорівнює:

- 1) 314 рад/с;
- 2) 157 рад/с;
- 3) 104,7 рад/с;
- 4) 78,5 рад/с.

74. Синхронна частота обертання асинхронного електродвигуна типу АИР160М8У3 дорівнює:

- 1) 3000 об/хв;
- 2) 1500 об/хв;
- 3) 1000 об/хв;
- 4) 750 об/хв.

75. Регулюванням швидкості електропривода називається примусова її зміна без залежності від:

- 1) навантаження;
- 2) навантаження або підтримки її постійного значення при зміні навантаження;
- 3) навантаження і вимог технологічного процесу;
- 4) оптимального передаточного числа редуктора.

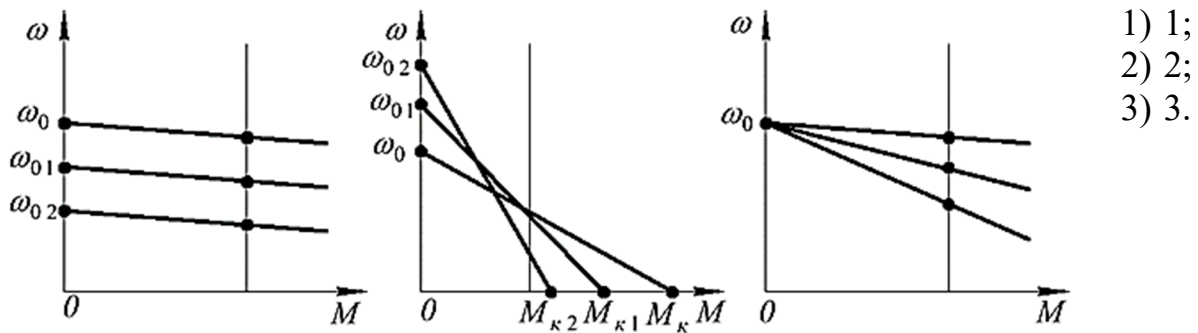
76. Назвіть джерела електричної енергії, від яких одержують живлення двигуни постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною напруги на якорі:

- 1) силові автотрансформатори;
- 2) статичний перетворювач напруги;
- 3) регулятор частоти напруги живлення;
- 4) багатосекційний пусковий реостат.

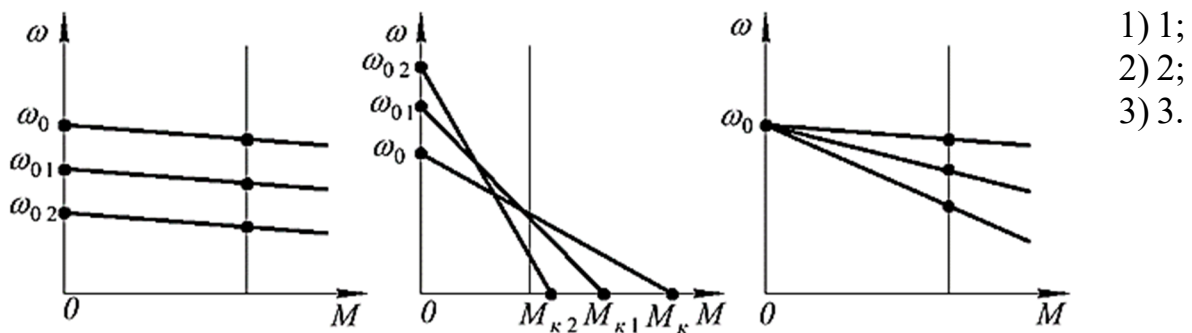
77. Діапазон регулювання кутової швидкості електропривода визначається відношенням при номінальному навантаженні:

- 1) номінальної і мінімальної кутової швидкості;
- 2) максимальної і номінальної кутової швидкості;
- 3) максимальної і мінімальної кутової швидкості;
- 4) статичного перепаду швидкості при регулюванні.

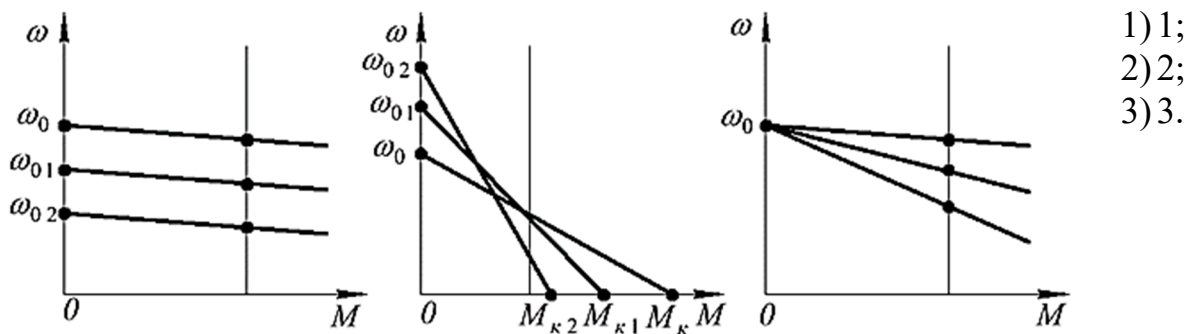
78. Вкажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною опору в колі якоря:



79. Вкажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною магнітного потоку:



80. Покажіть механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при регулюванні швидкості зміною напруги на якорі:



81. Назвіть основні способи регулювання швидкості двигунів постійного струму:

- 1) зміною напруги на якорі двигуна;
- 2) зміною частоти напруги живлення;
- 3) зміною магнітного потоку;
- 4) зміною опору в колі якоря;
- 5) зміною числа пар полюсів обмотки якоря.

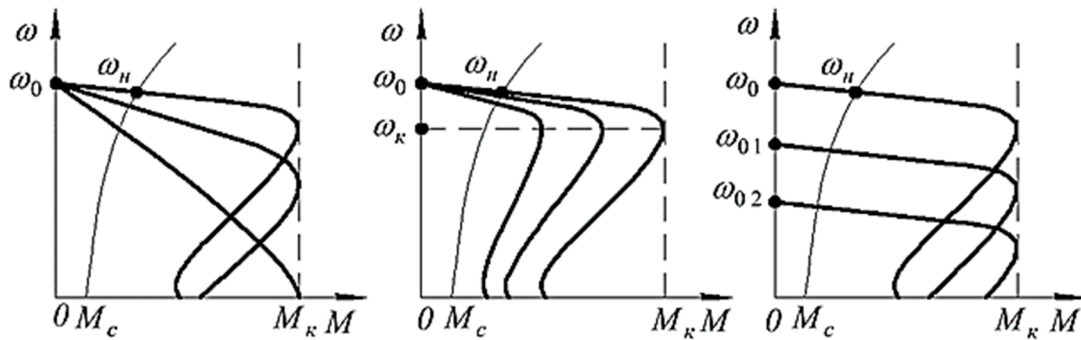
82. Синхронна частота обертання асинхронного електродвигуна типу АИР132М6У3 дорівнює:

- 1) 3000 об/хв;
- 2) 1500 об/хв;
- 3) 1000 об/хв;
- 4) 750 об/хв.

83. Синхронна кутова швидкість обертання асинхронного електродвигуна типу АИР112М2У3 дорівнює:

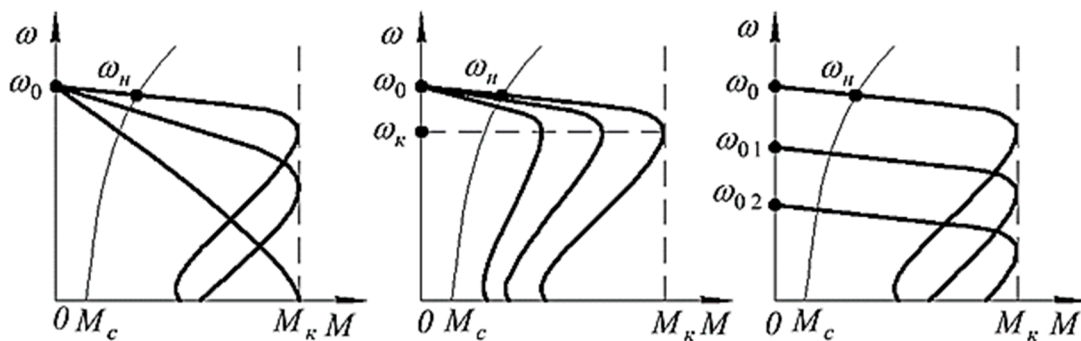
- 1) 314 рад/с;
- 2) 157 рад/с;
- 3) 104,7 рад/с;
- 4) 78,5 рад/с.

84. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором при регулюванні швидкості зміною опору в колі ротору:



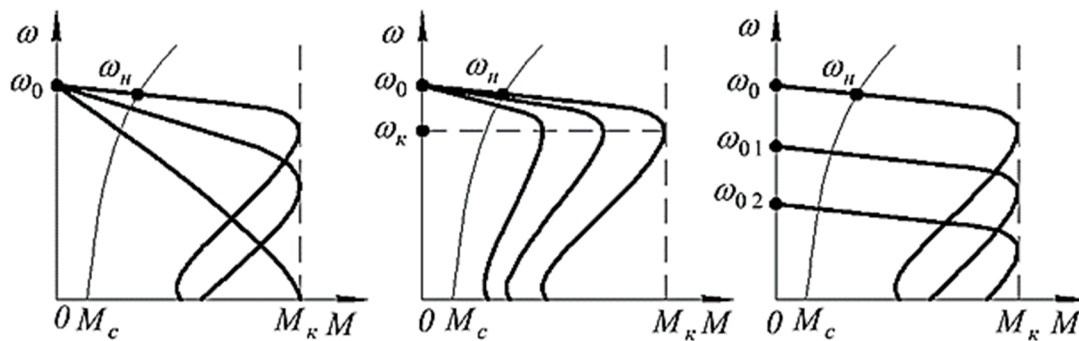
- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

85. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна при регулюванні швидкості зміною напруги на статорі:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

86. Вкажіть механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

87. Стабільність роботи двигуна на заданій швидкості при регулюванні визначається:

- 1) діапазоном регулювання;
- 2) жорсткістю механічної характеристики;
- 3) напрямком регулювання;
- 4) допустимим навантаженням двигуна.

88. Основною умовою для пуску двигуна постійного струму послідовного збудження є:

- 1) вмикання пускового резистору у коло якоря;
- 2) вмикання пускового резистору у коло якоря і навантаження на валу;
- 3) навантаження на валу (20...30) % від номінального;
- 4) відсутність навантаження на валу і вмикання пускового резистору.

89. При якому способі регулювання швидкості асинхронних двигунів втрати потужності в роторі найменші:

- 1) зміною частоти напруги живлення;
- 2) зміною напруги на затискачах обмотки статора;
- 3) зміною опору роторного кола;
- 4) за допомогою каскадних установок.

90. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів з постійним моментом навантаження M_c (для робочої машини з $x = 0$):

- 1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;
- 2) $U_i / f_i = const$;
- 3) $U_i / f_i^2 = const$;
- 4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$

91. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів з вентиляторним моментом навантаження M_c (для робочої машини з $x = 2$):

1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;

2) $U_i / f_i = const$;

3) $U_i / f_i^2 = const$;

4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$.

92. За яким законом необхідно змінювати величину напруги на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму для механізмів, у яких M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості (для робочої машини з $x = -1$):

1) $U_i / \sqrt{f_i} = const$;

2) $U_i / f_i = const$;

3) $U_i / f_i^2 = const$;

4) $U_i / \sqrt{f_i^3} = const$.

93. У разі зменшення прикладеної до обмотки якоря напруги у двигуна постійного струму незалежного збудження:

1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;

2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

94. У разі введення додаткового опору в коло якоря у двигуна постійного струму незалежного збудження:

1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;

2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;

4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

95. У разі зменшення магнітного потоку у двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

96. У разі зміни прикладеної до обмотки статора напруги у асинхронного двигуна:

- 1) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики не змінюється;
- 2) швидкість ідеального холостого ходу не змінюється, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 3) збільшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зменшується;
- 4) зменшується швидкість ідеального холостого ходу, а жорсткість механічної характеристики зростає.

97. У разі введення додаткового опору в коло ротора асинхронного двигуна з фазним ротором:

- 1) критичне ковзання не змінюється, а момент двигуна змінюється пропорційно квадрату напруги;
- 2) максимальний момент не змінюється, а критичне ковзання зростає;
- 3) максимальний момент зменшується, а синхронна швидкість зростає;
- 4) максимальний момент зменшується, а критичне ковзання зростає.

98. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу стрічкового транспортера ($x = 0$) зміною частоти струму необхідно при цьому змінювати напругу пропорційно:

- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

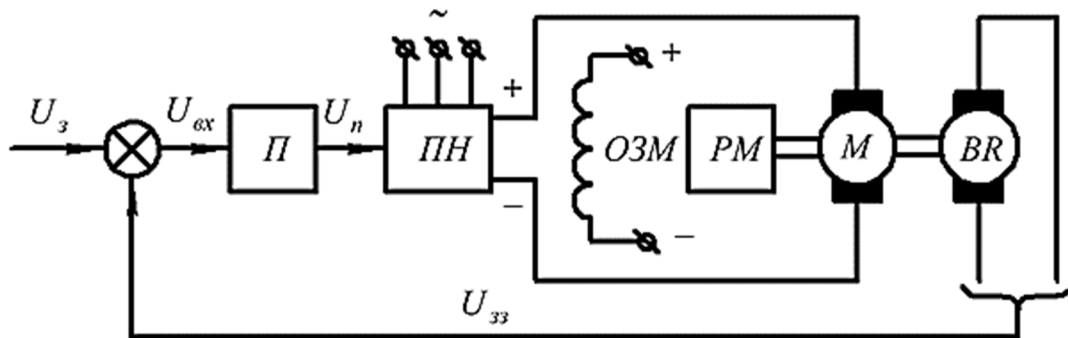
99. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу вентилятора ($x = 2$) зміною частоти струму необхідно при цьому змінювати напругу пропорційно:

- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

100. Під час регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна приводу норії ($x = -1$) зміною частоти струму потрібно при цьому змінювати напругу пропорційно:

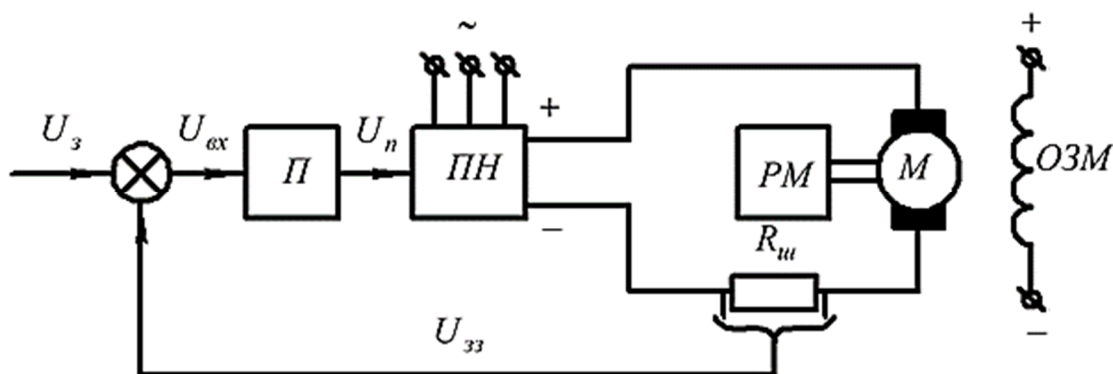
- 1) частоті струму;
- 2) квадрату частоти струму;
- 3) частоті струму у степені $3/2$;
- 4) квадратному кореню з частоти струму.

101. На рисунку зображена структурна схема автоматичного регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження з:



- 1) жорстким додатним зворотним зв'язком по струму якоря;
- 2) жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості;
- 3) жорстким зворотним зв'язком по напрузі на якорі;
- 4) нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму якоря.

102. На рисунку зображена структурна схема автоматичного регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження з:



- 1) жорстким додатним зворотним зв'язком по струму якоря;
- 2) жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості;
- 3) жорстким зворотним зв'язком по напрузі на якорі;
- 4) нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму якоря.

103. Для приводу робочих машин, що потребують плавного регулювання кутової швидкості застосовують асинхронні електродвигуни:

- 1) з підвищеним пусковим моментом;
- 2) з підвищеним ковзанням;
- 3) багатшвидкісні;
- 4) з фазним ротором.

104. Призначення реостата в колі обмотки збудження двигуна постійного струму незалежного збудження:

- 1) регулювати напругу живлення електродвигуна;
- 2) регулювати навантаження;
- 3) регулювати швидкість якоря;
- 4) обмежувати пусковий струм.

105. Вищу від номінальної швидкість двигуна постійного струму незалежного збудження можна одержати в разі зміни:

- 1) опору кола якоря;
- 2) опору кола якоря і напруги;
- 3) напруги;
- 4) струму збудження.

106. У двигуна постійного струму незалежного збудження швидкість якоря перевищує допустиму під час:

- 1) обриву в колі якоря;
- 2) холостого ходу;
- 3) обриву у колі збудження;
- 4) навантаження, меншого за номінальне.

107. При частотному способі регулювання швидкості асинхронного електродвигуна за законом зміни прикладеної напруги $U/f_1 = const$ втрати в сталі двигуна пропорційні частоті струму в степені:

- 1) 1,3;
- 2) 3,3;
- 3) 2;
- 4) 1.

108. Втрати енергії під час гальмування противмиканням двигуна більші за втрати під час його пуску:

- 1) у 3 рази;
- 2) у 2 рази;
- 3) у 4 рази;
- 4) у 2,5 рази.

109. Назвіть основний напрямок зменшення втрат електроенергії в перехідних процесах нерегульованого електропривода:

- 1) зменшенням сумарного моменту інерції механічної частини електропривода;
- 2) поліпшенням інтенсивності розгону системи електродвигун-робоча машина;
- 3) застосуванням маховикового електропривода;
- 4) підвищенням надійності роботи спеціальних регуляторів швидкості і моменту.

110. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при пуску без навантаження?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

111. Яка формула відповідає втратам енергії в асинхронних двигунах при пуску без навантаження?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

112. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при гальмуванні противмиканням?

- 1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$.

113. Яка формула відповідає втратам енергії в двигунах постійного струму незалежного збудження при реверсуванні?

1) $\Delta A = 4 \frac{J\omega_0^2}{2};$

2) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2};$

3) $\Delta A = 3 \frac{J\omega_0^2}{2};$

4) $\Delta A = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right).$

114. Максимальний коефіцієнт корисної дії системи електродвигун - робоча машина відповідає такому навантаженню, коли:

- 1) електродвигун працює з номінальною потужністю;
- 2) змінні втрати в електродвигуні більше постійних в системі;
- 3) постійні і змінні втрати однакові;
- 4) редуктор має оптимальне передавальне число.

115. За якою формулою визначаються повні втрати потужності в електродвигуні при номінальному навантаженні?

1) $\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n};$

2) $\Delta P_n = \Delta P_c + \Delta P_m;$

3) $\Delta P_x = \Delta P_c + \Delta P_m \left(\frac{I_x}{I_n} \right)^2;$

4) $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_m}.$

116. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму незалежного збудження в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі зниження напруги на якорі:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

117. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі збільшення опору в колі якоря:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

118. Втрати енергії в регульованому електроприводі постійного струму в усталеному режимі і незмінному навантаженні в разі зменшення магнітного потоку:

- 1) постійні зменшуються, а змінні не змінюються;
- 2) постійні зменшуються, а змінні зростають;
- 3) втрати залишаються незмінними;
- 4) втрати зростають.

119. Коефіцієнт корисної дії двигуна в разі збільшення його завантаження:

- 1) спочатку зростає до певного значення, а потім зменшується;
- 2) зростає;
- 3) зменшується;
- 4) не змінюється.

120. Змінні втрати потужності в електродвигуні залежать від струму:

- 1) лінійно;
- 2) квадратично;
- 3) логарифмічно;
- 4) не залежать.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.
2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов / Г.Н. Назарьян. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.
5. Олійник В.С. Практикум з електропривода / В.С. Олійник, О.С. Марченко, Є.П. Жулай, Ю.М. Лавріненко. – К.: Урожай, 1995. – 190 с.
6. Назар'ян Г.Н. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник / Г.Н. Назар'ян, Ю.М. Федюшко, О.В. Сотник, О.В. Ковальов. – Х: ТОВ «Планета-прінт», 2016. – 201 с.
7. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 572 с.
8. Савченко П.И. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве / П.И. Савченко, И.А. Гаврилюк, И.Н. Земляной, Н.В. Худобин. – М.: Колос, 1996. – 150 с.
9. Електропривод: посібник для виконання лабораторних та практичних занять / М.Л. Лисиченко, П.І. Савченко, О.К. Тищенко, В.В. Гузенко. – Х.: ХНТУСГ: Факт, 2012. – 270 с.
10. Електропривод у питаннях і відповідях / П.І. Савченко, М.Л. Лисиченко, О.К. Тищенко, В. В. Гузенко. – Х.: ХНТУСГ; Факт, 2012. – 500 с.
11. Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия. – 1974. – 568 с.
12. Ильинский Н.П. Основы электропривода: учебное пособие для вузов / Н.П. Ильинский. – М.: Изд-во МЭИ, 2003 – 224 с.
13. Ильинский Н.П. Общий курс электропривода: учеб. для вузов / Н.П. Ильинский, В.Ф. Козаченко. – М.: Энергоатомиздат, 1992 – 544 с.
14. Ключев В.М. Теория электропривода: учебник для вузов / В.М. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
15. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник / В.В. Москаленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
16. Квітка С.О. Основи електропривода. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Дослідження механічних та електромеханічних характеристик ДПС паралельного (незалежного) збудження» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – 32 с.

17. Квітка С.О. Основи електропривода. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Дослідження механічних та електромеханічних характеристик трифазного АД з короткозамкненим ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – 37 с.

18. Квітка С.О. Основи електропривода. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Регулювання швидкості електроприводів з ДПС незалежного (паралельного) збудження зміною параметрів двигуна» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – 25 с.

19. Квітка С.О. Основи електропривода. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною частоти струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – 24 с.

20. Квітка С.О. Основи електропривода. Методичні вказівки для проведення лабораторної роботи «Дослідження способу регулювання швидкості асинхронного електродвигуна зміною числа пар полюсів» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2019. – 23 с.