

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО  
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка  
імені професора В.В. Овчарова»

**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

**РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ  
ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ СТРУМУ**

для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»

зі спеціальності 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»



Мелітополь, 2020

УДК 621.3(075)

**Основи електропривода:** Методичні вказівки до лабораторної роботи «Регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною частоти струму» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 24 с.

**Розробники:** к.т.н., доцент Квітка С.О.,  
к.т.н., доцент Постнікова М.В.,  
асистент Речина О.М.

**Рецензент:** д.т.н., професор Діордієв Володимир Трифонович Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова  
Протокол №6 від 9 січня 2020 р.

Затверджено методичною комісією факультету енергетики і комп'ютерних технологій ТДАТУ  
Протокол №5 від 29 січня 2020 р.

© Квітка С.О.  
Постнікова М.В.  
Речина О.М.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В<br>ЛАБОРАТОРІЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                        | 4  |
| КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....   | 7  |
| ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ<br>АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ<br>ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ ..... | 8  |
| 1 Мета роботи .....   | 8  |
| 2 Основні теоретичні відомості .....  | 8  |
| 3 Завдання самостійної роботи студента .....  | 14 |
| 4 Програма роботи.....  | 14 |
| 5 Технічна характеристика лабораторного устаткування .....  | 15 |
| 6 Вказівки щодо виконання роботи.....   | 15 |
| 7 Вказівки щодо оформлення звіту.....   | 21 |
| 8 Контрольні питання .....  | 22 |
| 9 Список літератури.....  | 23 |
| ДОДАТОК А Зразок оформлення титульного листа звіту з лабораторної<br>роботи .....                                 | 24 |

## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В ЛАБОРАТОРІЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

На лабораторних заняттях студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з дослідження і налагодження електроприводів.

Лабораторні роботи з електропривода відрізняються від лабораторних робіт з електротехніки і електричних машин складністю схем, великою кількістю різного електрообладнання (електричні машини, вимірювальні прилади, апаратура керування) і відмінностями в режимах їх роботи.

Якщо раніше студент вивчав окремі види обладнання, то тепер - роботу комплекту обладнання, призначеного для виконання певної виробничої функції. Тому при виконанні лабораторних робіт з електропривода студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, уміти складати схеми електроприводів, регулювати і налагоджувати як машини і апарати зокрема, так і весь електропривод у цілому.

Роботи з електропривода виконують бригадами по 2-4 чоловіки. Кожна бригада повинна виконувати всі лабораторні роботи передбачені календарно-тематичним планом кафедри. Одержавши графік виконання робіт, студент завчасно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи підручника, складаючи повні робочі схеми дослідження, таблиці, виконуючи необхідні розрахунки.

До виконання робіт допускаються студенти, які мають оформлений звіт з попередньої роботи, які знають зміст та методику виконання наступної 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 із обладнанням робочого місця і перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття він може виконувати роботу.

Для роботи студент самостійно вибирає вимірювальні прилади, реостати, апарати керування і складає схему. При цьому необхідно керуватися правилом, що силові кола й кола керування збирають окремо; з'єднують спочатку послідовні, а потім паралельні кола. Також необхідно дотримуватись правила: не закріпляти 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 вмиканням під напругу 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 опір шунтового реостату в колі збудження двигунів постійного струму - повністю виведено.

Напругу на затискачі електродвигуна потрібно подавати послідовним

вмиканням апаратури управління 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 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 акуратно записують у таблиці фіксації експериментальних даних, 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 теорії електропривода доводиться мати справу з відкритими схемами і при невиконанні елементарних правил електробезпеки можна потрапити під електричну напругу.

Перед початком роботи в лабораторії теорії 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 ознайомитись з правилами техніки безпеки та надання першої допомоги потерпілому від електричного струму; прийняти їх до обов'язкового виконання та розписатися про це в спеціальному журналі. 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 вмиканням схеми під напругу необхідно попередити товаришів по роботі і перевірити, чи не доторкається хтось до струмоведучих 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, викладачеві чи лаборантові. Без їх дозволу знову схему не вмикати. Результати дослідів потрібно показати керівникові 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 теорії 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 автоматі.

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.

## КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кількісна оцінка за виконання кожної лабораторної роботи визначається за наступними показниками:

1. вхідний контроль у лабораторну роботу, за який максимально можна отримати 20 % від загальної кількості балів за лабораторну роботу;

2. підготовка та оформлення звіту з лабораторної роботи, за який максимально можна отримати 30 % від загальної кількості балів;

3. вихідний контроль з лабораторної роботи (захист лабораторної роботи), за який максимально можна отримати 50 % від загальної кількості балів.

Вхідний контроль у лабораторну роботу здійснюється шляхом усного опитування студента на початку заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Підготовка та оформлення звіту з лабораторної роботи здійснюється студентом безпосередньо на лабораторному занятті. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно виконаним пунктам звіту. Приклад оформлення титульного листа звіту наведено у додатку А.

Вихідний контроль з лабораторної роботи здійснюється шляхом тестування наприкінці заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Лабораторна робота вважається виконаною успішно, якщо студент у підсумку отримав не менше, ніж 60 % балів. У протилежному випадку студент зобов'язаний підвищити бал за лабораторну роботу у відведений термін на консультації викладача, який її проводив. Підвищення рейтингу полягає у виконанні певних завдань щодо лабораторної роботи: вхідний контроль, підготовка та оформлення звіту, вихідний контроль. Підвищити рейтинг з лабораторної роботи можна не більше, ніж до 60 % балів.

У разі пропуску лабораторного заняття студент повинен його відпрацювати у відведений термін на консультації викладача, який його проводив. Якщо лабораторне заняття пропущене з поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимальну кількість балів. Якщо лабораторне заняття пропущене без поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимально 60 % балів.

# ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ

**1 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 живлячого струму

## 2 Основні теоретичні відомості

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

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

де  $p$  – кількість пар полюсів;

$S$  – ковзання електродвигуна, в.о.

Частотно регульований 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. Частотно регульований 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 вверх 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 ( $\Delta P = P_1 S$ ). Частотно регульований привод за статичними і динамічними характеристиками не поступається приводам постійного струму.

В частотно регульованих 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 частотно регульовані асинхронні двигуни проектують без урахування пускових характеристик, які забезпечуються системою керування (можуть мати дещо знижену перевантажувальну здатність, менший активний опір обмотки ротору і, як наслідок, вищий ККД). Частотно регульовані двигуни проектують з можливістю роботи при значно знижених швидкостях обертання, тому вони мають незалежну систему вентиляції. У серії АИ передбачено два виконання частотно регульованих 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. Виробництво перших максимально уніфіковане з двигунами загального призначення – мають самовентиляцію.

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 управління 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  $U$  асинхронного двигуна 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  $M_{\kappa}$  – максимальний момент електродвигуна, Нм;

$M_c$  – момент опору робочої машини, Нм.

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  $\omega_0$ ,  $X_k$  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 в механічній характеристиці 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 напруг 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 перевантажувальної 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 $x = -1$ $\left( M_c \sim \frac{1}{f} \right)$ | $\frac{f_1}{f_2}$                  | <i>const</i>                       | $\sqrt{\frac{f_2}{f_1}}$                       |
| для механізмів з $x = 0$ $(M_c = const)$                        | <i>const</i>                       | $\frac{f_2}{f_1}$                  | $\frac{f_2}{f_1}$                              |
| 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 $x = 2$ $(M_c \sim f^2)$                       | $\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2$ | $\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^3$ | $\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2$             |

Аналіз, проведений академіком М.П. Костенко на базі спрощеної кругової діаграми, показав, що при дотриманні умови (6) буде мати місце сталість  $\cos\varphi$ , а ККД електричної машини буде функцією частоти і не залежить від характеру навантаження і при регулюванні швидкості буде залишатись приблизно однаковим.

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.

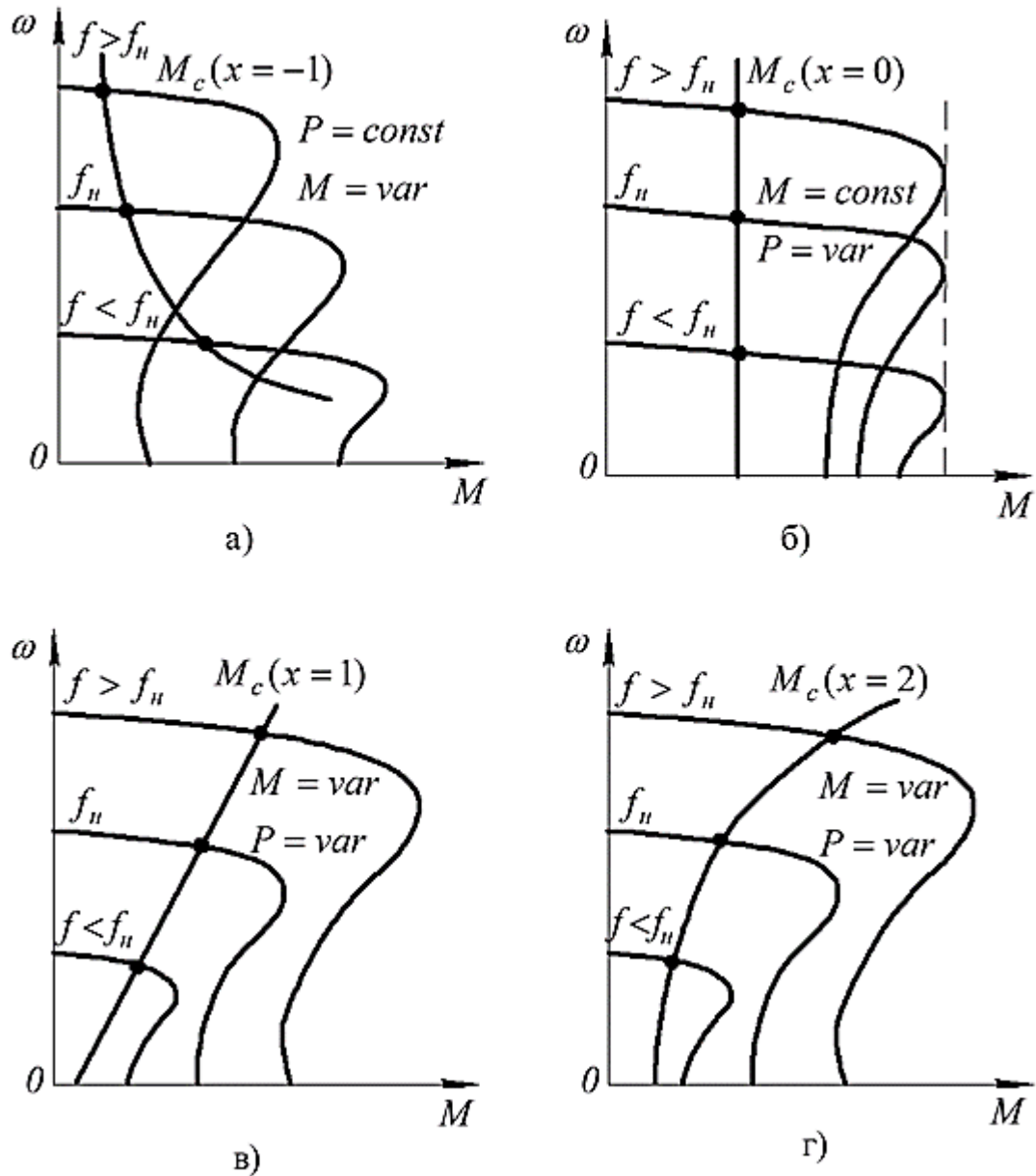


Рисунок 1 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості за законом збереження перевантажувальної здатності в залежності від виду механічної характеристики робочої машини:

- 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)

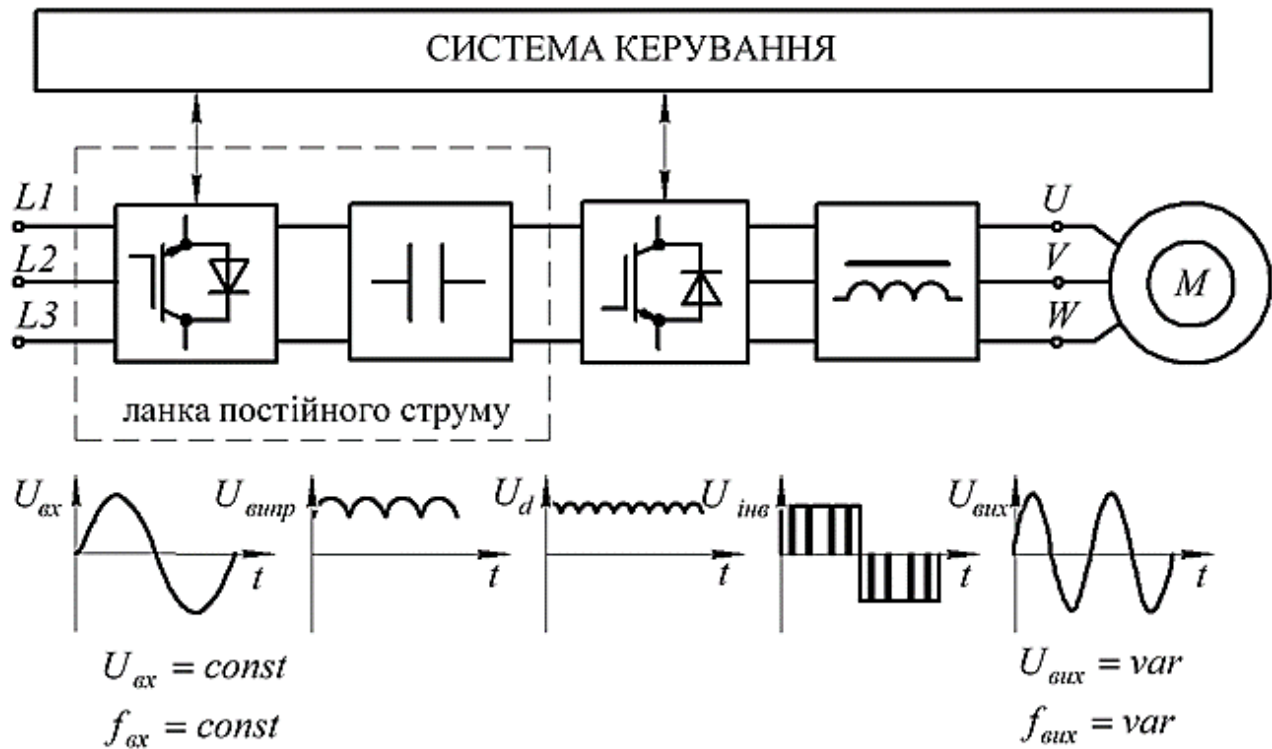


Рисунок 2 – Блочно-структурна схема перетворювача частоти та осцилограми сигналу на виході його блоків

Силовa 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.

Регульовальні властивості асинхронних двигунів при частотному управлінні характеризуються наступними показниками:

1. Діапазон регулювання – 12:1...16:1, у замкнених 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.

### 3 Завдання самостійної роботи студента

1. Опрацювати матеріали 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, частотно регульованих приводів та теоретично дослідити роботу машини при живленні від перетворювача частоти.

2. Виконати навчально - контролюючі завдання до даної лабораторної роботи на НІП ТДАТУ (кількість правильних відповідей має бути не менше 60%).

3. Відповісти на контрольні запитання.

4. Виконати пункт 3 звіту та накреслити таблиці 2, 3 та 4.

### 4 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  $\omega_0$ . 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  $U = \varphi(f)$  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 живлячого струму.

8. Оформити звіт по лабораторній роботі.

## 5 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

| М1 (двигун)   |        | М2 (генератор) |        | М3(генератор) |        | М4(двигун)    |              |
|---|--------|----------------|--------|---------------|--------|---------------|--------------|
| 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     | $\mu_k$       | 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»<br>Номінальна вхідна напруга – 380 В<br>Номінальна вхідна частота – 50 Гц<br>Вхідна потужність – 5,9 кВА<br>Номінальний вихідний струм – 9,6 А<br>Номінальна вихідна напруга – 380 В змінного струму<br>Діапазон вихідної частоти – 0...500 Гц |        |                |        |               |        |               |              |
| Комплект вимірювальний К 505<br>Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5<br>Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с   |        |                |        |               |        |               |              |
| Амперметр   |        |                |        |               |        |               |              |
| Амперметр   |        |                |        |               |        |               |              |
| Вольтметр   |        |                |        |               |        |               |              |
| Тахогенератор   |        |                |        |               |        |               |              |

## 6 Вказівки щодо виконання 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  $\omega_0$  і частоті струму 30 Гц, 50 Гц та 60 Гц.

Для розрахунку природної механічної характеристики АД рекомендується використати спрощену формулу Клосса

$$M_i = \frac{2M_k}{\frac{S_i}{S_k} + \frac{S_k}{S_i}}, \quad (9)$$

де  $M_k$  - критичний момент електродвигуна, Нм;

$S_i$  - поточне значення ковзання, в.о.;

$S_k$  - критичне ковзання, в.о.

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (10)$$

де  $M_n$  - номінальний момент електродвигуна, Нм;

$\mu_k$  - кратність максимального моменту, в.о.

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

де  $P_n$  - номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$\omega_n$  - номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

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

де  $n_n$  - номінальна швидкість 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  $S_n$  - номінальна ковзання електродвигуна, в.о.

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

де  $\omega_o$  - 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, Нм;

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

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

де  $\mu_{kf}$  - кратність максимального моменту ЕД 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 переважувальної 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  $\omega_{of}$  - синхронна кутова швидкість обертання при заданій частоті струму  $f$ , визначається за (15), рад/с.

Результати розрахунків звести до таблиці 2 та в одній системі координат побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна за різної частоти живлячого струму згідно заданого закону регулювання.

Таблиця 2 – 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 |
| $\omega_i$ , рад/с                  | $\omega_o$     |       |      |       |     |     | $\omega_K$     |     |     |     | 0 |
| $M_i$ , Нм                          | 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 |
| $\omega_i$ , рад/с                  | $\omega_{o30}$ |       |      |       |     |     | $\omega_{K30}$ |     |     |     | 0 |
| $M_i$ , Нм                          | 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 |
| $\omega_i$ , рад/с                  | $\omega_{o60}$ |       |      |       |     |     | $\omega_{K60}$ |     |     |     | 0 |
| $M_i$ , Нм                          | 0              |       |      |       |     |     | $M_{K60}$      |     |     |     |   |

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  $U = \varphi(f)$  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 клавіші «Останов/Зброс» . Дані досліду занести до таблиці 3. За розрахунковими даними таблиці 3 побудувати залежність  $U = \varphi(f)$ . Визначити закон частотного регулювання. При невідповідності закону частотного регулювання характеру навантаження лабораторної установки - виконати настройку частотного перетворювача під керівництвом навчального майстра лабораторії.

Таблиця 3 – Дані дослідження залежності вихідної напруги на затискачах перетворювача від частоти  $U = \varphi(f)$

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

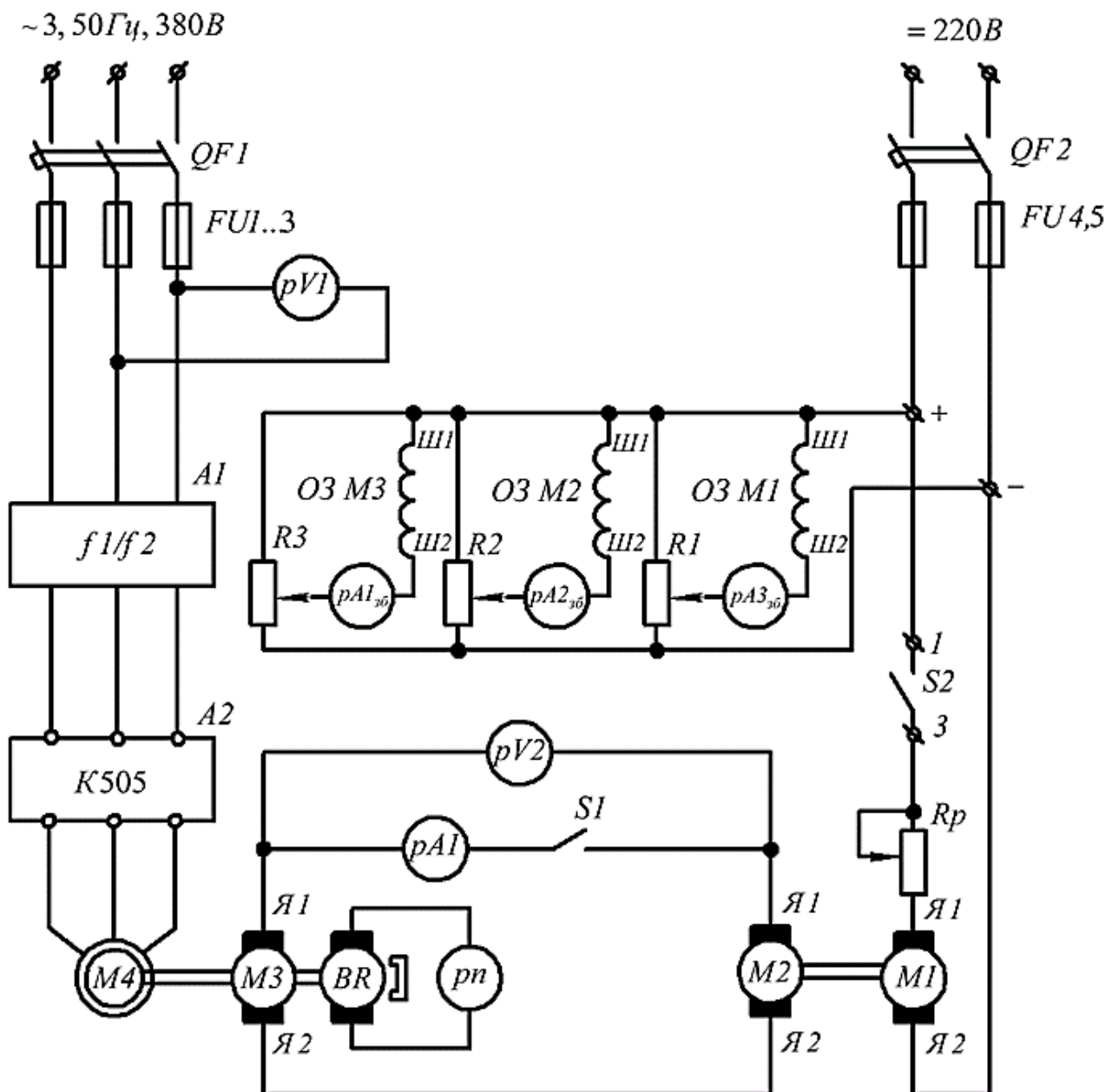


Рисунок 3 - Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження частотного регулювання швидкості АД

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  $Rp$  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 клавіши «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  $S1$ . 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  $\omega_0$  до критичної  $\omega_k$ . Після закінчення дослідів двигун  $M4$  перевести у режим ідеального холостого ходу.

Далі, з робочої панелі перетворювача  $A1$  задати нове значення вихідної частоти живлячої напруги 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 4.

Таблиця 4 - Дані дослідження електромеханічних  $\omega = f(I_1)$  та механічних  $\omega = f(M)$  характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні

| Кількість точок  | Струм статора АД $I_1$ , А | Швидкість обертання $n$ , об/хв | Кутова швидкість обертання $\omega$ , рад/с | Струм якоря $M3$ $I_{ЯМ3}$ , А | Момент двигуна $M4$ $M_{M4}$ , Нм |
|--|----------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|
| Вихідна частота перетворювача 50 Гц.<br>Напруга на виході перетворювача $U_1 = \text{_____}$ В |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 1  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| ...  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 10   |                            |                                 |   |                                |                                   |
| Вихідна частота перетворювача 60 Гц.<br>Напруга на виході перетворювача $U_1 = \text{_____}$ В |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 1  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| ...  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 10   |                            |                                 |   |                                |                                   |
| Вихідна частота перетворювача 30 Гц.<br>Напруга на виході перетворювача $U_1 = \text{_____}$ В |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 1  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| ...  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| 10   |                            |                                 |   |                                |                                   |
| Додаткові експериментальні дані  |                            |                                 |   |                                |                                   |
| Струм збудження машини $M3$ $I_{зб} = \text{_____}$ А  |                            |                                 |   |                                |                                   |

Момент на валу АД визначається без урахування моменту втрат навантажувального генератора  $M_3$

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

Електромагнітний момент навантажувального генератора визначається

$$M_{M3i} = k\Phi_{\partial} I_{ЯМ3i}, \quad (23)$$

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 4 побудувати електромеханічні  $\omega = f(I_1)$  та механічні  $\omega = f(M)$  характеристики АД при значеннях вихідної частоти перетворювача 50; 60; 30 Гц.

7. Провести порівняльний аналіз механічних характеристик АД за частотного регулювання отриманих розрахунковим та експериментальним шляхом. Оцінити переважувальну здатність двигуна.

## 7 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Графіки механічних характеристик двигуна за різної частоти живлячої напруги (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 живлячої напруги (30; 60; 50 Гц), отримані експериментальним шляхом.

7. Аналіз отриманих результатів.

## 8 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 й 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 ( $ККД$  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?

## **9 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. Лаврінченко, 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. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827с., ил.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ЗВІТУ

З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка  
імені професора В.В. Овчарова»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

з дисципліни «Основи електропривода»

**РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ  
ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ СТРУМУ**

ЗВІТ

Студент \_\_\_\_\_ групи

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

П.І.Б.

(підпис)

Службові примітки

Роботу захищено з оцінкою \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Викладач \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

П.І.Б.

(підпис)

\_\_\_\_\_

Мелітополь, 20\_\_ р.