

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



**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра електропривода**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА» (ЧАСТИНА 2)**

**для студентів спеціальності**

**141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2021

Колб А. А. Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електропривода» (Частина 2) для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А.А.Колб. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2021. – 47 с.

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

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

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

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

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### 1. Найменування роботи

Дослідження частотно-керованого асинхронного електропривода

### 2. Мета роботи

Вивчення силової схеми і системи управління тиристорним перетворювачем частоти ТПЧ з проміжною ланкою постійного струму, механічних характеристик і енергетичних показників частотно-керованого асинхронного привода.

### 3. Програма роботи

- 3.1. Ознайомитись з лабораторною установкою.
- 3.2. Вивчити силову схему ТПЧ і систему управління.
- 3.3. Засвоїти основні теоретичні положення.
- 3.4. Зняти дані для побудови механічних характеристик двигуна і залежності ККД і  $\cos\alpha$  від навантаження для різних значень швидкості при наявності і відсутності ІР компенсації.
- 3.5. За допомогою електронного осцилографа спостерігати і замалювати форму кривих напруги і струму обмотки статора.
- 3.6. Побудувати механічні характеристики двигуна  $n=f(M)$ , а також залежності  $U_c=f(M)$ ,  $\eta=f(M)$  і  $\cos\alpha=f(M)$ , провести аналіз отриманих результатів.

### 4. Теоретична частина і опис лабораторної установки

Тиристорний перетворювач частоти ТПЧ, принципову схему якого приведено на рис. 8.1, призначений для плавного регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором шляхом зміни частоти напруги, що підводиться до двигуна.

ТПЧ складається з керованого випрямляча (міст УВ), інвертора І з відсікаючими діодами Д1 Д6, групи вентилів зворотного струму (міст ОД) і системи управління. Тиристорний перетворювач частоти перетворює трифазну змінну напругу мережі 320 В, 50 Гц, у трифазну напругу регульованої амплітуди і частоти згідно із законом

$$\frac{(U_c - I_c R_c)}{f} = \text{const},$$

де  $U_c$ ,  $I_c$ ,  $R_c$  - напруга, струм і опір обмотки статора;  $f$  - частота напруги статора.

Силовий ланцюг ТПЧ виконаний на тиристорах типу Т - 150 і вентилях ВКД - 200. Дросель ДРЗ і конденсатор С виконує роль фільтра на виході керованого випрямляча.

Зворотний міст ОД на некерованих вентилях, ввімкнений зустрічно-паралельним керованим вентилям, виконує наступні функції. При активно - індуктивному навантаженню моменти переходу через нуль вихідної напруги і

струму не співпадають за фазою. За рахунок ЕРС самоіндукції, що наводиться в індуктивності навантаження, зворотні вентиля виявляються відкритими на тих інтервалах, де струм і напруга навантаження мають протилежні знаки. При цьому забезпечується періодичний обмін енергією між індуктивністю ланцюга навантаження і конденсатором  $C$  досить великої місткості. З метою зменшення циркулюючих струмів у ланцюг зворотних вентилів включені додаткові опори  $R_{g1}$  і  $R_{g2}$ .

Дроселі ДР1 і ДР2 застосовуються як вхідна індуктивність інвертора, що запобігає миттєвому розряду комутуючих конденсаторів  $C_1$   $C_6$  у контурі комутації.

Інвертор І зібраний за мостовою схемою. Послідовно з керованими вентилями Т1 Т6 ввімкнені відсікаючі діоди Д1 Д6, які виключають шунтування комутуючих конденсаторів кожного плеча інвертора з боку інших плечей і навантаження.

Комутація в інверторі здійснюється за допомогою паралельно ввімкнених конденсаторів  $C_1$  і  $C_6$ . Припустимо, що відкритий тиристор  $T_1$ , а конденсатор  $C_1$  заряджений напругою  $U_{c1}$  з полярністю "+" ліворуч, а "-" праворуч. Для вимкнення вентиля  $T_1$  подається керуючий імпульс на тиристор  $T_3$ . Після вмикання  $T_3$  утвориться ланцюг розряду конденсатора  $C_1$  по ланцюгу: "+"  $C_1$ , тиристор  $T_1$ , тиристор  $T_3$ , "-"  $C_1$ . Під дією розрядного струму ємності  $C_1$  тиристор  $T_1$  вимикається і після цього на ньому підтримується замикаюча напруга протягом часу розряду конденсатора  $C_1$  за ланцюгом: "+"  $C_1$ , діод Д1, діод Д7 моста ОД, дросель ДР2,  $T_3$  "-"  $C_1$ . Для зменшення швидкості наростання анодного струму тиристорів при їх вмиканні послідовно з ними ввімкнені дроселі.

Регулювання напруги і частоти перетворювача здійснюється узгодженим впливом на вхід системи управління конвертором БСУІ і випрямлячем БСУВ. Задавальна напруга  $U_z$  з блоку керування БК поступає через задавач інтенсивності ЗІ на вхід системи управління інвертором і, перетворюючись за допомогою мултивібратора Ройера в змінну напругу з частотою, пропорційною  $U_z$ , однозначно визначає вихідну частоту інвертора.

На вхід підсумувального пристрою підсилювача П системи управління випрямлячем БСУВ подається різниця між задавальною напругою  $U_z$  і сигналом зворотного зв'язку, пропорційний  $E=U_c-I_cR_c$ . Оскільки підсилювач має великий коефіцієнт підсилення, то результуючий сигнал на його вході  $U_z-(U_c-I_cR_c)\approx 0$ , тобто  $U_z$  пропорційне  $E=U_c-I_cR_c$ , де  $E$  - ЕРС обмотки статора, що визначає величину поточкозчеплення двигуна 1. Сигнал зворотного зв'язку, пропорційний  $I_cR_c$ , по суті здійснює позитивний зворотний зв'язок за струмом статора. При цьому кут регулювання керованого випрямляча автоматично встановлюється таким, щоб вихідна напруга випрямляча  $U_e$  (а, отже, і інвертора), за вирахуванням активного падіння напруги в ланцюгу статора ( $I_cR_c$ ), була пропорційна  $U_z$ , тобто частоті інвертора.  $E=U_c-I_cR_c$ , то виконується закон регулювання  $E/f=const$ , при цьому  $\psi_1=const$ .

Тоді значення критичного моменту, а, отже, і перевантажувальної здатності двигуна на всіх частотах залишаються приблизно однаковими.

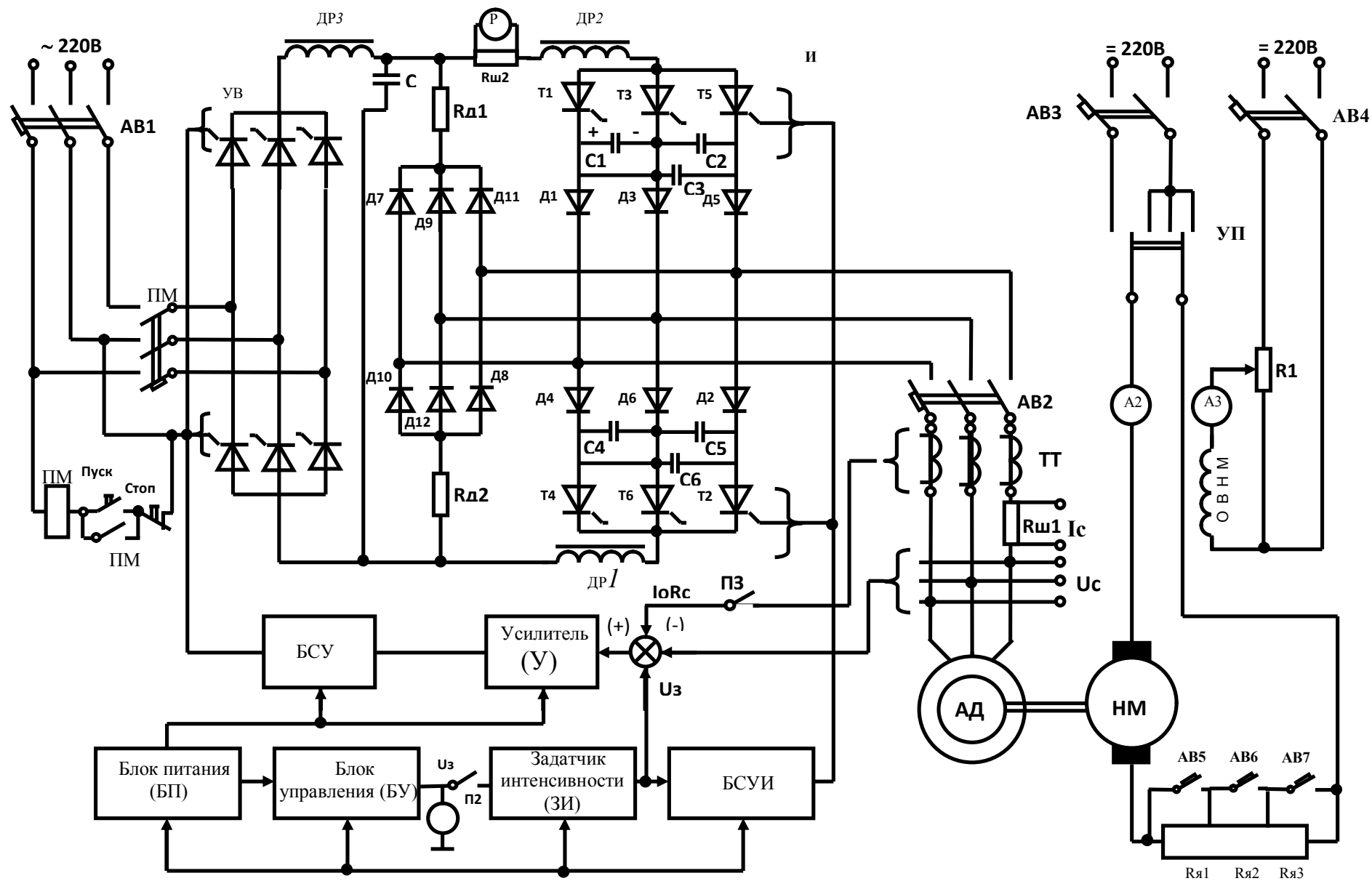


Рис.8.1. Принципова схема лабораторної установки

#### 4. Порядок виконання роботи

4.1. Отримання даних для побудови залежності  $n=f(M)$ ,  $U_c=f(M)$ ,  $\eta=f(M)$  і  $\cos\varphi=f(M)$  при наявності  $IR$  компенсації і  $n=500$  об/хв:

4.1.1. Ввімкнути АВ2 і встановити двигунець потенціометра  $\Pi_2$  блоку управління БУ в нульове положення.

4.1.2. Ввімкнути автомат АВ1.

4.1.3. Натиснути кнопку "Пуск".

4.1.4. Встановити потенціометром  $\Pi$  блока управління частоту обертання  $n=500$  об/хв.

4.1.5. Ввімкнути автомат АВ4 обмотку збудження навантажувальної машини (НМ) і встановити з допомогою  $R_1$  мінімальне значення струму збудження.

4.1.6. Перемикач УП встановити в положення "ДТ".

4.1.7. Ввімкнути автомати АВ5 і АВ6.

4.1.8. Плавнo збільшуючи струм збудження навантажувальної машини з допомогою  $R_1$ , зняти 5-6 точок вказаної залежності. При цьому струм якоря НМ не повинен перевищувати 14 А, а струм збудження - 0,8 А, результати вимірювань занести в табл. 8.1.

4.1.9. Після зняття даних встановити з допомогою  $R_1$  мінімальне значення струму збудження НМ.

4.2. Зняття даних для побудови залежності  $n=f(M)$ ,  $U_c=f(M)$ ,  $\eta=f(M)$  і  $\cos\varphi=f(M)$  при  $n=1000$  об/хв:

4.2.1. Вимкнути АВ6.

4.2.2. Потенціометром  $\Pi_2$  блока управління встановити  $n=1000$  об/хв;

4.2.3. Повторити пункти 4.1.8 і 4.1.9.

4.3. Зняття даних для побудови залежності  $n=f(M)$ ,  $U_c=f(M)$ ,  $\eta=f(M)$  і  $\cos\varphi=f(M)$  при  $n=1500$  об/хв:

4.3.1. Вимкнути АВ5.

4.3.2. Потенціометром  $\Pi_2$  блока управління встановити  $n=1500$  об/хв.

4.3.3. Повторити пункти 4.1.8 і 4.1.9.

4.4. Зняття механічних характеристик при відсутності  $IR$  компенсації і  $n=500$ , 1000 і 1500 об/хв.

Механічні характеристики при відсутності  $IR$  компенсації знімаються таким же чином як і при наявності компенсації. Для цього треба вимкнути  $IR$  компенсацію і повторити пункти 4.1, 4.2 і 4.3.  $IR$  компенсація вимикається викладачем за допомогою перемикача ПЗ, встановленого в шафі перетворювача.

Таблиця 8.1

Дані дослідів і розрахунків

| №№<br>п/п | Виміряно |       |       |      |       |       | Обчислено |       |                |        |
|-----------|----------|-------|-------|------|-------|-------|-----------|-------|----------------|--------|
|           | $n$      | $U_c$ | $P_1$ | $Q$  | $I_a$ | $I_e$ | $M$       | $P_2$ | $\cos \varphi$ | $\eta$ |
|           | об/хв    | В     | КВт   | квар | А     | А     | Нм        | КВт   | -              | %      |

Примітка. Під таблицею залишити місце для запису 35 вимірювань.

У лабораторній установці для вимірювання активної і реактивної потужностей використовується вимірник потужності, виконаний на датчиках Хола. Для отримання значення реактивної потужності необхідно свідчення приладу помножити на  $\sqrt{3}$ .

## 5. Обробка експериментальних даних

5.1. Момент на валу асинхронного двигуна визначається за струмом якоря і струму збудження навантажувальної машини

5.2.

$$M = K\Phi I_{\text{я}}, \text{ Нм.}$$

При ненасиченій магнітній системі НМ, що приблизно дотримується при струмі збудження  $I_{\text{в}} \leq 0.8 \text{ А}$ ,

$$\Phi = K_{\phi} I_{\text{в}}.$$

При цьому

$$M = K K_{\phi} I_{\text{в}} I_{\text{я}} = C I_{\text{в}} I_{\text{я}}.$$

Для НМ лабораторної установки

$$C = 1,6, \text{ Нм/А}^2.$$

5.2. Потужність на валу асинхронного двигуна

$$P_2 = M\omega = M \cdot n / 9550; \text{ кВт.}$$

5.3. Коефіцієнт корисної дії визначається як

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%,$$

де  $P_1$  - потужність, споживана з мережі.

5.4. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}}$$

Примітки. З метою зменшення струмів статора і ротора АД при його стопорінні напруга, що підводиться до статора двигуна, зменшена в 2 рази шляхом відповідного перемикавання, що проводиться викладачем. При цьому момент АД зменшується приблизно в 4 рази, що приводить до відповідної зміни форми механічної характеристики АД.

## 6. Зміст звіту

6.1. Назва і мета лабораторної роботи.

6.2. Програма роботи.

- 6.3. Принципова схема лабораторної установки.
- 6.4. Таблиця з даними результатів обчислень і вимірювань.
- 6.5. Залежність  $n=f(M)$ ,  $U_c=f(M)$ ,  $\eta=f(M)$  і  $\cos\varphi=f(M)$  для різних швидкостей двигуна.
- 6.6. Аналіз отриманих результатів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### 1. Найменування роботи

Дослідження дросельного асинхронного привода

### 2. Мета роботи

Вивчення принципу регулювання частоти обертання, механічних характеристик і властивостей дросельного асинхронного привода (ДАП).

### 3. Програма роботи

- 3.1. Вивчити принцип регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна в системі ДАП.
- 3.2. Ознайомитись з принциповою схемою лабораторного стенда, розташуванням і призначенням апаратів управління і вимірювальних приладів.
- 3.3. Отримати дані для розрахунку і побудови механічних  $n=f(M)$  і зовнішніх  $U_1=f(I_2)$  характеристик асинхронного двигуна в розімкненій системі управління при напругах на обмотці статора  $U_1 = 70, 140, 200$  В.
- 3.4. Отримати дані для розрахунку і побудови механічних  $n=f(M)$  і зовнішніх  $U_1=f(I_2)$  характеристик асинхронного двигуна в замкненій системі ДАП при початкових напругах  $U_1 = 70, 140, 200$  В.
- 3.5. За даними дослідів і розрахунків побудувати механічні і зовнішні характеристики асинхронного двигуна в розімкненій і замкненій системах ДАП.
- 3.6. Розрахувати жорсткість механічних характеристик і діапазон регулювання частоти обертання для розімкненої і замкненої систем ДАП.
- 3.7. Виконати аналіз властивостей у розімкненій і замкненій системах ДАП.

### 4. Теоретична частина

Одним з способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів є зміна індуктивного опору ланцюга статора. Як змінний індуктивний опір у системі ДАП використовують магнітні підсилювачі з виходом на змінному струмі, робочі обмотки яких вмикають послідовно обмоткам статора двигуна (рис. 9.1). За рахунок падіння напруги  $U$  на робочих обмотках магнітного підсилювача знижується величина напруги  $U_1$  на обмотках статора. Змінюючи струм  $I_{oy}$  в обмотці управління ОУ магнітного підсилювача, можна плавно змінювати індуктивний опір його робочих обмоток і, отже, напругу  $U_1$ . Однак механічні характеристики асинхронного двигуна з індуктивним опором у ланцюгу

статора не забезпечують глибокого регулювання частоти обертання, так як знижується максимальний момент, і не дозволяють отримати стійкої роботи привода при частоті обертання менше критичної (рис. 9.2). Щоб отримати стійкий режим роботи привода і розширити діапазон регулювання при частотах обертання нижче критичної, вводять негативний зворотний зв'язок за частотою обертання (рис. 9.3). У приведеній схемі індуктивний опір робочих обмоток силового магнітного підсилювача СМП залежить від величини струму в задаючій обмотці ОЗПМУ проміжного магнітного підсилювача ПМУ. При наявності зворотного зв'язку за частотою обертання напруги на ОЗПМУ

$$U_{oz}=U_2-U_{oc}= U_2-K_{oc}n, \quad (9.1)$$

де  $U_2$  - задавальна напруга;  $U_{oc}$  - напруга зворотного зв'язку;  $n$  - частота обертання ротора;  $K_{oc}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку.

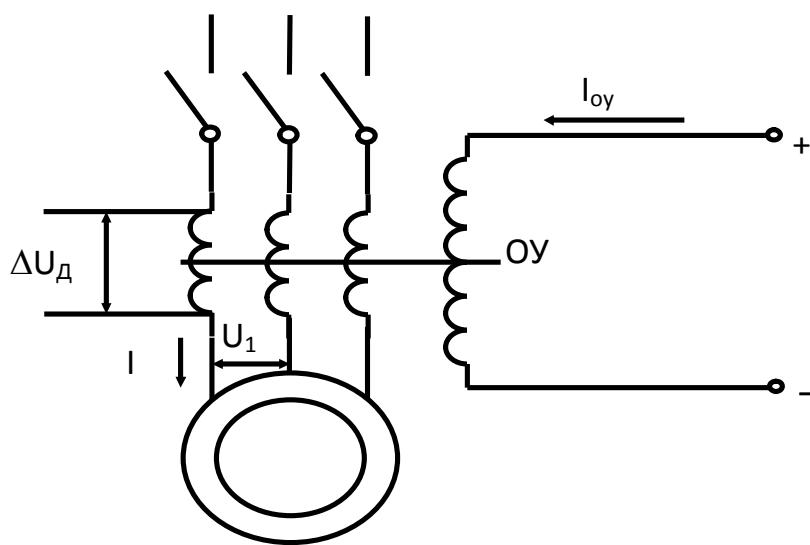


Рис. 9.1. Асинхронний привід з магнітним підсилювачем в ланцюгу статора.  
Напруга на затискачах обмотки статора

$$U_1 = K_y U_{oz}, \quad (9.2)$$

де  $K_y$  - сумарний коефіцієнт підсилення ПМУ і СМП. Підставивши (9.1) в (9.2), отримаємо

$$U_1 = K_y (U_2 - K_{oc} n).$$

З останнього виразу випливає, що зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на валу спричиняє збільшення напруги на затискачах статора. Із зростанням напруги збільшується момент двигуна до значення, що забезпечує роботу привода з частотою обертання, відповідною заданій, але при іншому значенні статичного моменту. Таким чином, застосування негативного зворотного зв'язку за частотою обертання дозволяє в залежності від величини задавальної напруги отримати серію механічних характеристик, що забезпечують широкий діапазон регулювання частоти обертання (рис. 9.2).

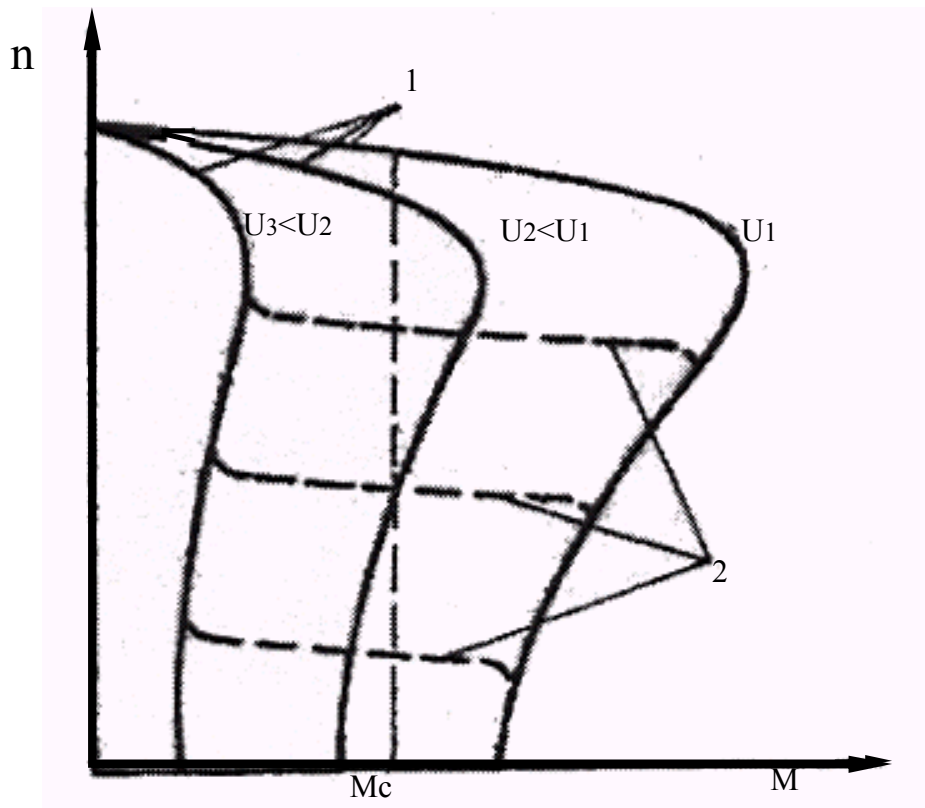


Рис. 9.2. Механічні характеристики системи ДАП: 1- розімкненої; 2 – замкненої

### 3. Загальні відомості про лабораторну установку

Принципова схема лабораторної установки для дослідження дросельного асинхронного привода приведена на рис. 9.3. Статор асинхронного двигуна АД отримує живлення від силового магнітного підсилювача СМП, задавальна обмотка ОЗСМП якого включена на вихід проміжного магнітного підсилювача ОСПМУ регулюється за допомогою резисторів  $R_4$  і  $R_5$ , в задавальній обмотці ОЗПМУ - резистором  $R_6$ , включених по потенціометричній схемі. Зворотний негативний зв'язок за частотою обертання ротора двигуна здійснюється з допомогою тахогенератора ТГ. Коефіцієнт зворотного зв'язку регулюється резистором  $R_7$ .

Момент на валу асинхронного двигуна створюється навантажувальною машиною НМ, яка працює в режимі динамічного гальмування. Режим роботи навантажувальної машини задається універсальним перемикачем УП. Для обмеження струму якоря навантажувальної машини при великих частотах обертання в ланцюг якоря вмикається резистор  $R_2$ . При обертанні якоря з малою частотою резистор  $R_2$  шунтують автоматичним вимикачем АВЗ. Величина моменту, що розвивається навантажувальною машиною, регулюється зміною магнітного потоку за рахунок зміни струму в обмотці збудження ОВ за допомогою резистора  $R_1$ .

Вмикнення ланцюгів змінного і постійного струму, а також їх захист здійснюється автоматичними повітряними вимикачами АВ4 і АВ1 відповідно.

## 5.Порядок виконання роботи.

5.1.Отримання даних для розрахунку і побудови механічних і зовнішніх характеристик розімкненої системи ДАП (п.2.3).

5.1.1.Ввімкнути постійну напругу автоматом АВ1.

5.1.2.На виході резистора  $R_6$  встановити напругу, що дорівнює нулю (за вольтметром V2).

5.1.3.Резистором  $R_1$  встановити струм збудження навантажувальної машини, що дорівнює нулю (за амперметром A1).

5.1.4.Ввімкнути змінну напругу автоматом АВ4. Асинхронний двигун повинен стояти.

5.1.5.Встановити коефіцієнт зворотнього зв'язку за частотою обертання ротора, що дорівнює нулю (резистор  $R_7$ ).

5.1.6.Задаючим резистором  $R_6$  встановити одне із заданих в п.2.3 напруг на обмотці статора  $U_1$ .

5.1.7.Встановити коефіцієнт зворотнього зв'язку за частотою обертання ротора, рівний нулю (резистор  $R_7$ );

5.1.8.Задаючим резистором  $R_6$  встановити одне із заданих в п.2.3 напруг на обмотці статора  $U_1$ ;

5.1.9.Записати в таблицю 9.1 напругу  $U_1$ , струм ротора  $I_2$  і частоту обертання ротора  $n$ ;

5.1.10.Перемикачем УП ввімкнути навантажувальну машину в режим динамічного гальмування.

5.1.11.Збільшимо струм в обмотці збудження навантажувальної машини резистором  $R_1$ , змінити навантаження на валу асинхронного двигуна і записати значення  $U_1$ ,  $I_2$  і  $n$  у табл. 9.1. При різному навантаженні асинхронного двигуна зробити 5-6 вимірів.

5.1.12.Досліди з п.п. 5.1.6...5.1.9 виконати при інших значеннях  $U_1$ , вказаних в п.2.3.

5.2. Отримання даних для розрахунку і побудови механічних і зовнішніх характеристик замкненої системи ДАП (п. 2.4).

5.2.1. Зменшити струм в обмотці збудження навантажувальної машини до нуля і розімкнути ланцюг якоря перемикача УП;

5.2.2. Встановити струм в задавальній обмотці ОЗСМУ силового магнітного підсилювача 400 mA.

5.2.3. Збільшуючи напругу зворотного зв'язку потенціометром  $R_7$ , встановити коефіцієнт зворотного зв'язку за частотою обертання ротора, при якому  $U_1=80$  В.

5.2.4. Задавальним резистором  $R_6$  встановити одне із значень напруг статора, вказаних в п. 2.4. Значення  $U_1$ ,  $I_2$  і  $n$  записати в табл. 9.2.

5.2.5. Змінюючи навантаження на валу асинхронного двигуна у відповідності з пп 5.1.8, 5.1.9, зробити 5-6 вимірів  $U_1$ ,  $I_2$  і  $n$  і дані записати в табл. 9.2;

5.2.6.Досліди з пп 5.2.4, 5.2.5 повторити при інших напругах статора, вказаних в п.2.4.

### 5.3. Вимикання установки

- 5.3.1. Резистором  $R_1$  встановити струм в обмотці збудження навантажувальної машини, рівний нулю. Розімкнути якірний ланцюг.
- 5.3.1. Зменшуючи напругу на виході резистора  $R_6$ , зупинити привід.
- 5.3.2. Вимкнути змінну напругу автоматом АВ4.
- 5.3.3. Вимкнути постійну напругу автоматом АВ1

## 6. Обробка експериментальних даних

6.1. Електромагнітний момент асинхронного двигуна розраховується в

$$\text{відповідності з формулою } M = 9.55 \cdot \frac{(m \cdot I_2^2 \cdot r_2)}{(n_0 - n)} \text{ Н м}$$

де  $m$  число обмоток фаз ротора,  $r_2 = 1.5$  Ом - активний опір обмотки однієї фази ротора;  $n_0$  частота обертання магнітного поля, що створюється обмоткою статора.. Значення електромагнітного моменту записати в табл. 9.1 і 9.2.

6.2. За даними табл. 9.1, 9.2 побудувати зовнішні  $U_1 = f(I_2)$  і механічні  $n = f(M)$  характеристики розімкненої і замкненої систем ДАП при різних задавальних сигналах.

6.3. Для лінійних ділянок характеристик розрахувати їх жорсткість, яка визначається з виразу  $\beta = \Delta M / \Delta n$ ,

Де  $\Delta n$  зміна частоти обертання ротора, відповідна зміні моменту на величину  $\Delta M$ .

Величиною  $\Delta n$  задаємося на лінійній ділянці механічної характеристики і за залежністю  $\Delta n = f(\Delta M)$  визначаємо  $\Delta M$ .

6.4. Діапазон регулювання для розімкненої і замкненої систем ДАП визначається для ділянок характеристик, що забезпечують стійку роботу привода, за формулою:

$$D = \frac{n_{\min}}{n_{\max}},$$

де  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  мінімальні і максимальні частоти обертання ротора двигуна при однаковому електромагнітному моменті.

6.5 Аналіз отриманих результатів виконати шляхом зіставлення механічних характеристик, їх жорсткості і діапазонів регулювання розімкненої і замкненої систем ДАП.

Таблиця 9.1

Дані дослідів і розрахунків при дослідженні розімкненої системи ДАП

| №<br>n/n | Виміряно |       |       | Обчислено |                    |     |                                 |   |
|----------|----------|-------|-------|-----------|--------------------|-----|---------------------------------|---|
|          | $U_1$    | $I_2$ | $n$   | $n_0 - n$ | $9.55 m I_2^2 r_2$ | M   | $\beta$                         | D |
|          | В        | А     | об/хв | об/хв     | Вт                 | Н м | $\frac{H \cdot m \cdot xв}{об}$ | - |

Примітка. Під таблицею залишити місце для запису 20 вимірювань.

Таблиця 9.2

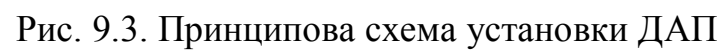
Дані дослідів і розрахунків при дослідженні замкненої системи ДАП

| №<br>n/n | Виміряно |       |       | Обчислено |                    |     |                                 |   |
|----------|----------|-------|-------|-----------|--------------------|-----|---------------------------------|---|
|          | $U_1$    | $I_2$ | $n$   | $n_0-n$   | $9.55 m I_2^2 r_2$ | M   | $\beta$                         | D |
|          | В        | А     | об/хв | об/хв     | Вт                 | Н м | $\frac{H \cdot m \cdot xв}{об}$ | - |

Примітка. Під таблицею залишити місце для запису 20 вимірювань.

## 7. Зміст звіту

- 7.1 Найменування і номер лабораторної роботи.
- 7.2 Мета і програма роботи.
- 7.3 Схема установки (рис. 9.3).
- 7.4 Таблиці з результатами вимірів і розрахунків.
- 7.5 Приклади визначення величин, що розраховуються (моменту, крутості, діапазону регулювання).
- 7.6 Графічна залежність  $U_1=f(I_2)$ ,  $n=f(M)$  для розімкненої і замкненої систем.
- 7.7 Короткі висновки з аналізу отриманих результатів.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### 1. Найменування роботи

Дослідження електропривода системи асинхронний двигун – електромагнітна муфта ковзання

### 2. Мета роботи

Вивчення особливостей електропривода системи асинхронний двигун - електромагнітна муфта ковзання (АД-ЕМК), зняття механічних характеристик привода при відсутності та наявності зворотних зв'язків.

### 3. Програма роботи

- 3.1. Вивчити основні теоретичні положення системи, що досліджується.
- 3.2. Ознайомитися з лабораторною установкою.
- 3.3. Отримати дані для побудови робочої ділянки природної механічної характеристики асинхронного двигуна.
- 3.4. Отримати дані для побудови механічних характеристик ЕМК при відсутності зворотних зв'язків.
- 3.5. Отримати дані для побудови механічних характеристик при наявності негативного зворотного зв'язку за швидкістю.
- 3.6. Отримати дані для побудови механічних характеристик ЕМК при наявності негативного зворотного зв'язку за швидкістю і роботою вузла відсічки за моментом.
- 3.7. Побудувати за результатами дослідів і розрахунків вказані характеристики.
- 3.8. Визначити енергетичні показники привода системи АД-ЕМК

### 4. Теоретична частина

#### 4.1. Загальні відомості.

Спрощена принципова схема електропривода з електромагнітною муфтою ковзання (ЕМК) приведена на рис. 10.1.

ЕМК - електрична машина, що складається з якоря 1 та індуктора 2, які розташовані концентрично і розділені повітряним зазором.

Частина муфти, яка жорстко пов'язана з валом двигуна АД, є ведучою, а друга, сполучена з привідним валом робочої машини РМ, - віденої. На індукторі розташовуються полюси з обмоткою збудження 3, яка отримує живлення від джерела постійного струму. За допомогою індуктора в повітряному зазорі створюється змінно розподілене у просторі магнітне поле.

Якір муфти в приводах великої потужності являє собою магнітопровід, виконаний з листової електротехнічної сталі, з розміщеною на ньому фазною чи короткозамкнутою обмоткою у вигляді білячої клітки.

Принцип роботи ЕМК аналогічний принципу роботи багатозазного асинхронного двигуна. Однак є і відмінність: в асинхронному двигуні магнітне поле, що обертається співпадає за допомогою багатозазної обмотки, що підживлюється

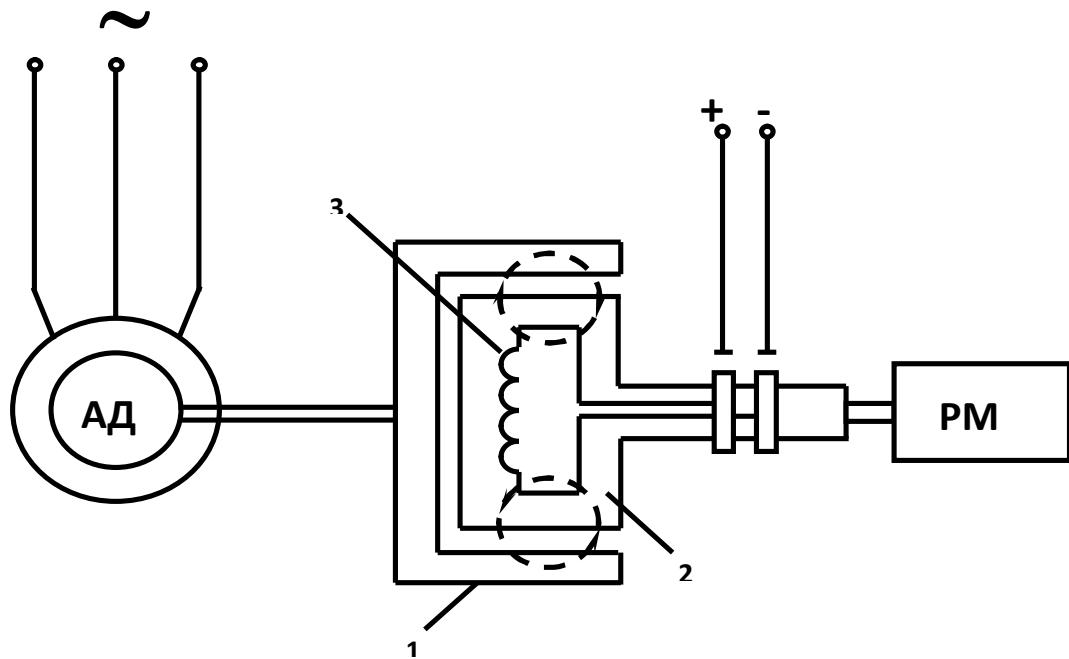


Рис.10.1. Спрощена схема електромагнітної муфти

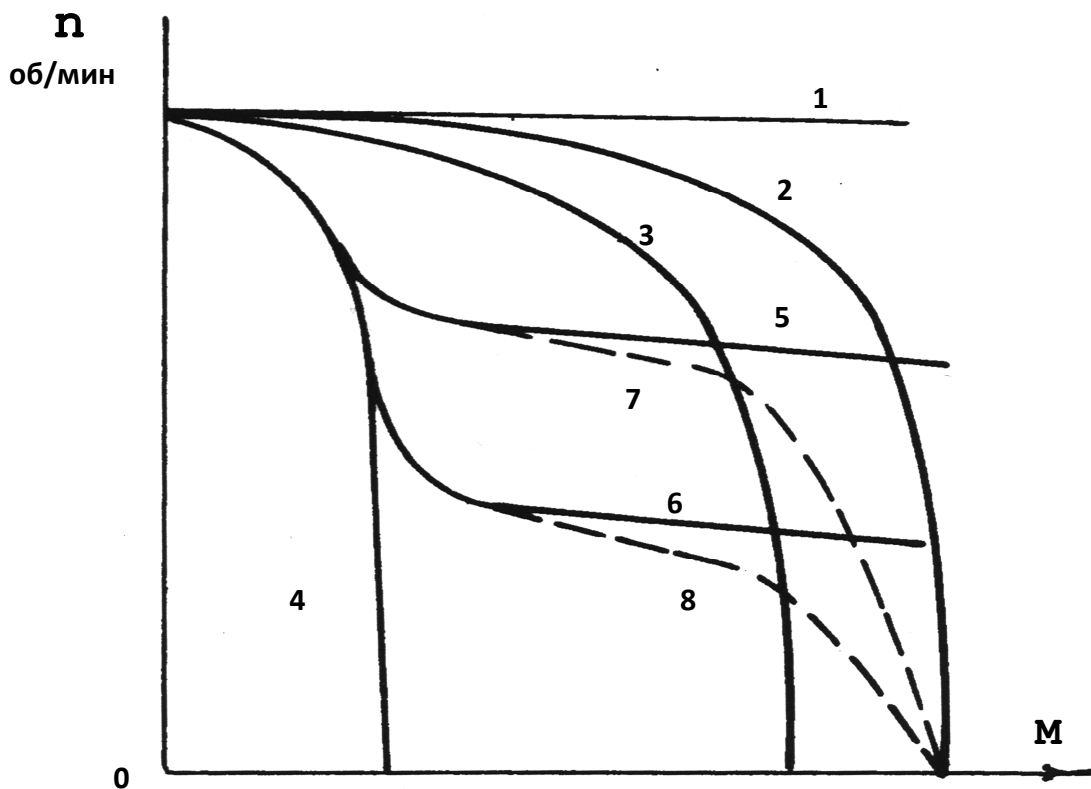


Рис. 10.2. Механічні характеристики електромагнітної муфти

від джерела змінного струму, в муфті ковзання відносно якоря здійснюється обертання полюсів з постійним магнітним потоком. У корі під дією магнітного потоку індукується ЕРС змінного струму, амплітуда і частота, якої залежить від різниці швидкостей ведучої та веденої частин муфти, з'являється струм і обертаючий момент. Змінюючи струм в обмотці збудження, можна отримати різні механічні характеристики, аналогічні механічним характеристикам багатофазного асинхронного двигуна при регулюванні напруження, що підводиться до нього.

Найбільш просту конструкцію має ЕМК з якорем із масивного сталевого осердя (як у нашому випадку). Обертальний момент цієї муфти створюється вихровими струмами, що наводяться в осерді. Зразковий вигляд характеристик електромагнітної муфти з масивним електроприводом показаний на рис. 10.2

Для збудження витрачається порівняно невелика потужність, яка становить 0.1 до 2% муфтою потужності, що передається.

При допомозі ЕМК можуть бути вирішені наступні технологічні завдання: регулювання частоти обертання привода при постійній частоті обертання привідного двигуна; стабілізація частоти обертання на виході муфти при певній частоті на вході; синхронізація обертання приводів; підтримка необхідного розподілу навантаження між приводами одного механізму; швидке оточення і розчеплення валів до і під час роботи привода; згладжування ударів від двигуна до механізму при пуску і від механізму до двигуна під час роботи; пуск привідного двигуна без навантаження та подальший розгін механізму згідно з будь-яким законом, з будь-якою пусковою діаграмою, в тому числі з моментом, що перевищує пусковий момент привідного двигуна (але в межах максимального); обмеження та регулювання обертального моменту, що передається.

### 3.2. Управління ЕМК

При постійній частоті обертання привідного двигуна зміною струму збудження муфти можна забезпечити плавне регулювання частоти обертання механізму в діапазоні від номінальної частоти обертання вихідного вала муфти до нуля.

Номінальна частота обертання вихідного вала

$$n_{2н} = n_1(1-S_{2н}),$$

де  $n_{2н}$  - номінальна частоти обертання вихідного вала муфти;

$n_1$  - частота обертання двигуна;

$S_{2н}$  - номінальне ковзання муфти.

Номінальне ковзання муфти

$$S_{2н} = (n_1 - n_{2н}) / n_1.$$

При змінній частоті обертання привідного двигуна і пов'язаного з ним вхідного вала електромагнітної муфти регулюванням струму збудження можна забезпечити стабілізацію частоти обертання вихідного вала муфти.

Для ЕМК знайшли застосування різні схеми управління, зокрема, з використанням магнітних підсилювачів.

### 3.3. Енергетичні показники

Перетворення енергії і втрати в електроприводі системи АД-ЕМК ілюструється енергетичною діаграмою, показаною на рис 10.3.

Споживана з мережі потужність  $P_c$  за вирахуванням втрат у двигуні у вигляді механічної потужності  $P_{\partial 6}$  поступає на ведучий вал муфти. Утрати а ЕМК

$$P_{\text{ЕМК}} = P_{s2} + P_6 + P_2 + P_{\text{мх ЕМК}},$$

де  $P_{s2}$  - втрати на ковзання, що виділяються у вигляді тепла в якорі муфти;

$P_6$  - втрати на збудження в обмотці збудження, розміщеної на індукторі;

$P_r$  - втрати на гістерезіс;

$P_{\text{мх ЕМК}}$  - механічні втрати.

Утрати ковзання, що становлять основну частину втрат в ЕМК, пропорційні ковзанню муфти

$$P_{s2} = P_1 S_2,$$

де  $P_1$  - потужність вихідного вала муфти за вирахуванням механічних втрат у ведучій частині.

Механічні втрати включають в себе вентиляційні втрати і втрати на тертя в підшипниках ведучої і віденої частини. Механічні втрати на віденому валу внаслідок їх малості на рис 10.4 і в подальших розрахунках умовно віднесені до веденого вала. Тому

$$P_1 = P_{\partial 6} - P_{\text{мх ЕМК}},$$

Утрати на гістерезіс невеликі в порівнянні з втратами ковзання і складають біля 1% їх величини (ними можна знехтувати).

$$P_6 = I_6^2 R_6,$$

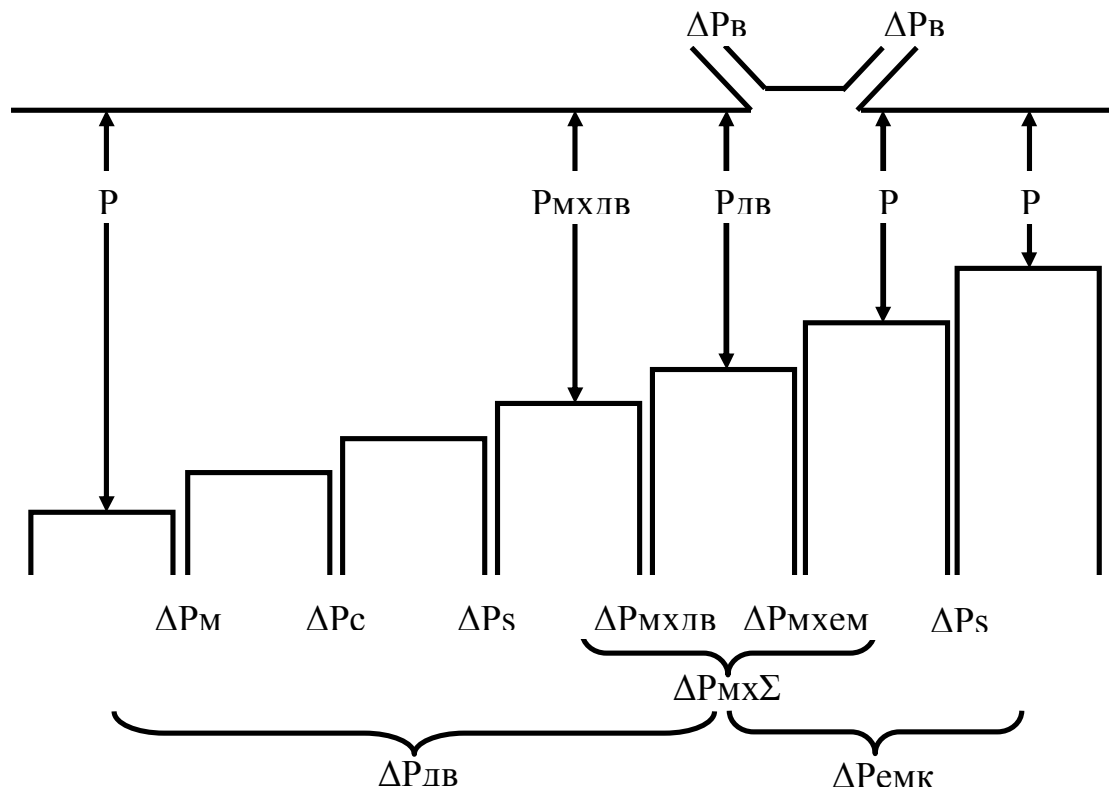


Рис. 10.3. Енергетична діаграма привода ЕМК.

де  $I_{\phi}$  - струм збудження муфти;

$R_{\phi}$  опір обмотки збудження.

У залежності від опору потужність, споживана двигуном з мережі, і втрати в ЕМК на регульовальних частотах обертання будуть різними.

У загальному випадку залежність моменту опору

$$M_c = m_0 M_i + M_i (1 - m_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^k$$

де  $M_c$  - момент опору механізму на регульовальній частоті обертання;

$m_0$  стала складова моменту опору механізму, що не залежить від зміни частоти обертання, в частках від  $M_n$ ;

$M_n$  момент опору механізму при номінальній частоті обертання  $n_n$ ;

$k$  - коефіцієнт що характеризує зміну моменту опору із зростанням частоти обертання.

Значення коефіцієнта що залежить від механічної характеристики механізму;

а)  $k=0$  для механізмів постійного моменту (механізми підйому, конвертори і т.п.), коли момент опору не залежить від швидкості;

б)  $k=-1$  для механізмів постійної потужності (моталки, деякі інші станки), коли момент опору обернено пропорційний частоті обертання, а потужність, споживана механізмом, залишається постійною;

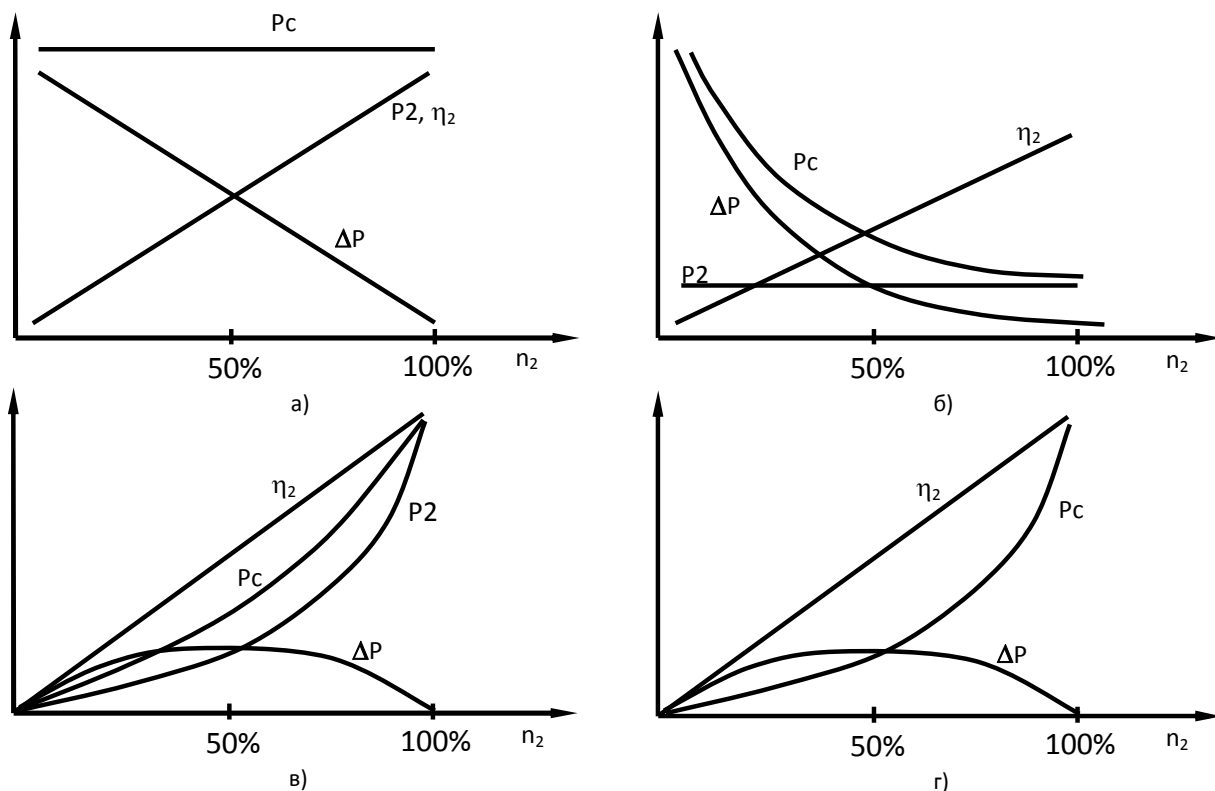


Рис. 10.4. Енергетичні показники привода з ЕМК при різних механічних характеристиках механізму:  $k = 0$ (а);  $k = -1$ (би);  $k = 2$ (в);  $k = 1$ (г).

с)  $k=2$  для механізмів з вентиляційною характеристикою (вентилятори, відцентрові насоси, веслові гвинти і т.п.) , коли момент опору механізму пропорційний другій мірі механізму;

д)  $k=1$  для механізмів, у яких момент опору прямо пропорційний частоті обертання (наприклад, генератор постійного струму, якір якого замкнутий на активний опір).

ККД електромагнітної муфти визначається відношенням потужності, що поступає на вал механізму, до потужності на вихідному валі муфти  $P_{\text{ов}}$

$$\eta = \frac{P_2}{P_{\text{ов}}} = \frac{n_2}{n_1} = 1 - S_2$$

Як видно з цього виразу, кожній регульовальній частоті обертання відповідає ККД, який із збільшенням частоти регулювання буде відповідно зменшуватись. ККД привода системи АД-ЕМК рівний добутку ККД двигуна і ККД муфти.

#### 4.2. Загальні відомості про лабораторну установку

Принципова схема лабораторної установки системи автоматичного управління ЕМК за допомогою магнітних підсилювачів приведених на рис.10.5.

Схема може забезпечити автоматичну стабілізацію частоти обертання вихідного вала ЕМК, що здійснюється шляхом відповідної зміни струму збудження ЕМК. Обмотка збудження муфти ОЗ ЕМК ввімкнена до випрямляча ВП4, який живиться від силового магнітного підсилювача СМП.

На обмотку зміщення ОЗ СМП силового підсилювача подається від випрямляча ВП1 напруга зміщення, значення якої встановлюється резистором  $R_1$ . На обмотку управління ОУ СМП через резистор  $R_2$  і випрямляч ВП3 подається струм управління від проміжного магнітного підсилювача ПМУ, який спільно з силовим підсилювачем СМП дозволяє отримувати необхідний коефіцієнт підсилення потужності, крім того здійснити порівняння сигналу уставки та сигналу зворотного зв'язку.

На обмотку зміщення ОЗ ПМУ проміжного підсилювача від випрямляча ВП1 через резистор  $R_5$  подається напруга зміщення. На задаючу обмотку ОЗ ПМУ від потенціометра - задавальника  $R_6$  подається напруга уставки. На обмотку негативного зворотного зв'язку ООСІ ПМУ подається сигнал з датчика частоти обертання - тахогенератора ТГ2.

Різниця сил намагнічуючої обмотки і обмотки негативного зворотного зв'язку визначає вихідний струм ПМУ, тобто в кінцевому результаті, струмом у обмотці збудження ЕМК.

Негативний зворотний зв'язок за швидкістю, що здійснюється за допомогою обмотки ООСІ ПМУ, дозволяє стабілізувати задану частоту обертання веденого вала муфти. Якщо частота обертання з якої-небудь причини відхиляється від заданої у бік збільшення (зменшення), починає відповідно зростати (зменшуватись) струм у обмотці ООСІ ПМУ. Це приводить до зменшення

(збільшенню) струму на виході проміжного, а, отже, і силового магнітного підсилювача, тобто в обмотці 0В ЕМК, що спричиняє зменшення (збільшення) частоти обертання віденого вала до заданого значення.

Для обмеження моменту, що передається від двигуна на механізм, передбачили вузол відсічки за моментом. У лабораторній установці це завдання може вирішуватися двома способами: введенням нелінійного негативного зворотного зв'язку за струмом (при допомозі обмоток 0002 ПМУ) і використанням явища насичення проміжного магнітного підсилювача ПМУ. При навантаженні привода вихідний струм ПМУ росте завдяки підмагнічуючій дії зворотного зв'язку за швидкістю. Коли вихідний струм досягає струму насичення, зростання струму збудження муфти припиняється, а отже відбувається обмеження навантаження. Величина струму насичення як наслідка, і допустимого навантаження регулюється додатковим опором  $R_2$ . Зазначимо, що при збільшенні опору знижується не тільки струм відсічки, але і коефіцієнт посилення ПМУ.

Тому зменшується інтенсивність зворотного зв'язку за швидкістю, і механічні характеристики в їх робочій частині стають більш м'якими.

## 5. Порядок виконання роботи

Перед вмиканням лабораторної установки необхідно пересвідчитися в тому, що всі вимикачі і тумблери, що знаходяться на лицьовій панелі, вимкнені, а опір  $R_2$  в ланцюгу обмотки управління силового магнітного підсилювача СМП повністю виведений.

Оскільки приводу, що вивчається, властива велика механічна і електромагнітна інерція, швидке обертання рукояток резисторів і автотрансформатора, недопустиме, а зняття показань приладів необхідно здійснювати тільки після закінчення перехідного процесу, коли частота обертання віденої частини і потужність, споживана асинхронним двигуном, не змінюються.

5.1. Зняття механічних характеристик при відсутності зворотних зв'язків.

5.1.1. Запустити асинхронний двигун.

5.1.2. Подати напругу в силові обмотки СМП, в обмотку збудження навантажувальної машини ОВНМ і в обмотку завдання проміжного магнітного підсилювача ОЗЛМУ.

5.1.3. Встановити мінімальну напругу завдання і максимальний струм збудження НМ.

5.1.4. Після закінчення перехідного процесу закортити обмотку якоря НМ. Відена частина муфти при цьому обертається з швидкістю, що не перевищує 100 об/хв.

5.1.5 Плавнo збільшуючи струм задавальної обмотки ОЗПМУ, довести струм збудження ЕМК до 0.6 А (при цьому струм якоря НМ не повинен перевищувати 30 А). Записати в табл. 10.1 показання приладів.

5.1.6 Увести в ланцюг якоря НМ додатковий опір. Записати показання приладів.

5.1.7 Плавнo зменшуючи струм збудження НМ до нуля, зняти ще 6-8 точок механічної характеристики.



- 5.1.8 Повторити пункти 5.1.3...5.1.7 при менших значеннях струму збудження муфти (в тому числі при мінімально можливому, рівному струму холостого ходу СМП).
- 5.2. Зняття механічних характеристик із зворотним зв'язком за швидкістю.
- 5.2.1 Установити задану викладачем інтенсивність зворотного зв'язку за швидкістю.
- 5.2.2 Установити максимальний струм завдання ПМУ і записати його в табл. 10.2
- 5.2.3 Установити мінімальний струм збудження НМ.
- 5.2.4 Збільшуючи струм збудження НМ, зняти знову 8-10 точок механічної характеристики. Записати в табл. 10.2 показання приладів.
- 5.2.5 Знизити струм збудження НМ до нуля і встановити менший сигнал завдання. Записати величину струму завдання в табл. 10.2 показання приладів.
- 5.2.6 Повторити пункти 5.2.3...5.2.5.
- 5.3 Встановити задану викладачем інтенсивність зворотного зв'язку за швидкістю і струмообмеженням.
- 5.3.1 Установити мінімальний струм завдання, не змінюючи додаткового опору в ланцюгу зворотного зв'язку за швидкістю.
- 5.3.2 Додатковий опір  $R_2$  в ланцюгу ОУ СМП і збільшити струм збудження НМ до максимуму.
- 5.3.3 Після закінчення перехідного процесу закортити коло якоря НМ.
- 5.3.4 Плавню виводячи  $R_2$ , довести споживану потужність до 2.4...3.2 кВт. При цьому струм якоря НМ не повинен перевищувати 30 А. Після закінчення перехідного процесу. Записати в табл. 10.3 показання приладів.
- 5.3.5 Увести в ланцюг якоря НМ додатковий опір і зняти показання приладів.
- 5.3.6 Плавню знижуючи струм збудження НМ до нуля, зняти знову 8-10 точок механічної характеристики.
- 5.3.7 Установити такий же струм завдання ПМУ, як при знятті механічної характеристики без струмообмеження (див. табл. 10.2).
- 5.3.8 Повторити пункти 5.3.2...5.3.7.
- 5.4 Дослідження енергетичних характеристик електропривода
- 5.4.1 Вимкнути зворотний зв'язок за швидкістю, вивести опори  $R_2$ , встановити максимальний струм збудження ЕМК.
- 5.4.2 Установити струм збудження навантажувальної машини, при якому споживана асинхронним двигуном потужність рівна 2.8...3.2 кВт.
- 5.4.3 Плавню знижуючи струм збудження ЕМК до мінімуму, записати в табл. 10.4 показання приладів при його значеннях.

Таблиця 10.1

Дані для побудови і розрахунків механічних характеристик при відсутності зворотних зв'язків

| №<br>п.п | Виміряно                |       |                     |       |       |       | Обчислено               |                 |       |
|----------|-------------------------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------------------------|-----------------|-------|
|          | Споживана<br>потужність |       | Споживаний<br>струм |       | $n_1$ | $n_2$ | Струмоз<br>будж.<br>ЕМК | $M_{\text{дв}}$ | $M_e$ |
|          | $P_c'$                  | $P_c$ | $I_1'$              | $I_1$ |       |       |                         |                 |       |
|          | діл.                    | Вт    | діл.                | А     | об/хв | об/хв | А                       | Н м             | Н м   |

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 25 вимірювань.

Таблиця 10.2

Дані для побудови і розрахунків механічних характеристик при відсутності зворотних зв'язків

| №<br>п.п | Виміряні             |       |                  |       |       |                    | Обчислено |
|----------|----------------------|-------|------------------|-------|-------|--------------------|-----------|
|          | Споживана потужність |       | Споживаний струм |       | N2    | Струм завдання ПМП | $M_2$     |
|          | $P_c'$               | $P_c$ | $I_1'$           | $I_1$ |       |                    |           |
|          | діл.                 | Вт    | діл.             | А     | Об/хв | мА                 | Н м       |

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 25 вимірювань.

Таблиця 10.3

Дані для побудови і розрахунків механічних характеристик із зворотним зв'язком за швидкістю і струмообмеженням

| №<br>п.п | Виміряні             |       |                  |       |       |                    | Обчислено |
|----------|----------------------|-------|------------------|-------|-------|--------------------|-----------|
|          | Споживана потужність |       | Споживаний струм |       | $n_2$ | Струм завдання ПМП | $M_2$     |
|          | $P_c'$               | $P_c$ | $I_1'$           | $I_1$ |       |                    |           |
|          | діл.                 | Вт    | діл.             | А     | Об/хв | мА                 | Н м       |

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 25 вимірювань.

Таблиця 10.4

Дані дослідів і розрахунків при дослідженні енергетичних характеристик

| №<br>п.п | Виміряні                |       |                       |       |       |       | Обчислено              |       |        |
|----------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|------------------------|-------|--------|
|          | Споживана<br>потужність |       | Спожива-<br>ний струм |       | $n_1$ | $n_2$ | Струм<br>збудж.<br>ЕМК | $P_2$ | $\eta$ |
|          | $P_c'$                  | $P_c$ | $I_1'$                | $I_1$ |       |       |                        |       |        |
|          | діл.                    | Вт    | діл.                  | А     | об/хв | Об/хв | А                      | Н м   | %      |

Примітка: Під таблицею залишити місце для запису 25 вимірювань.

### 6.Обробка експериментальних даних

Електромагнітний момент асинхронного двигуна визначаються за формулою

$$M_{ad} = \frac{P_{\Sigma}}{\omega_0} = \frac{P_c - \Delta P_{ct} - 3I_1^2 R_1}{\pi n_0} \cdot 30,$$

де  $P_c, I_1$  – активна потужність (Вт) і струм фази статора (А), що споживається двигуном із мережі;

$\Delta P_{ct} = 259$  Вт – утрати у сталі двигуна;

$R_1 = 0.846$  Ом – активний опір фази статора;

$n_0 = 1000$  об/хв – синхронна частота обертання.

Активна потужність і струм фази статора визначається з показання приладів

$$P_c = 1000 P_c' \cdot K_{TT};$$

$$I_1 = (I_1' \cdot K_{TT}) \frac{1}{\sqrt{3}},$$

де  $P_c'$  – показання кіловатметра, ділення (. табл.10.1...10.3);

$I_1'$  – показання амперметра АІ у ланцюгу трансформатора струму, ділення( табл. 10.1...10.3);

$\hat{E}_{TT} = 4$  – коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Момент на відомому валу муфти відрізняється від моменту привідного двигуна на величину моменту механічних втрат в двигуні і муфті

$$M_2 = M_{\dot{a}\ddot{a}} - \frac{\Delta P_{i\delta}}{\omega_1},$$

де  $\Delta P_{i\delta} = 345$  Вт – потужність сумарних механічних утрат;

$\omega_1 = (\pi \cdot n_1) \frac{1}{30}$  – кутова частота обертання ведучого вала, рад/с.

Результати розрахунків заносяться в таблиці 10.1...10.3, за даними яких будуються механічні характеристики приводного двигуна  $n_1 = f(M_2)$  і всього привода  $n_2 = f(M_2)$  у розімкнутій системі, у замкнутої зі зворотним зв'язком за швидкістю, а також із зв'язком за швидкістю і струмообмеженням (всі характеристики будуються в одній системі координат).

За даними табл. 10.4 будується залежність ККД привода, спожитої з мережі потужності і корисної потужності на веденому валу від частоти його обертання.

Корисна потужність визначається як

$$P_2 = M_2 \omega_2.$$

ККД привода

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_c} \, \%.$$

Для одного з рядків табл. 10.4 (за вказівкою викладача) будується енергетична діаграма (рис. 10.4). Необхідні величини визначаються так:

Утрати в міді обмотки статора двигуна

$$\Delta P_M = 3I_1^2 R_1;$$

Утрати в сталі двигуна

$$\Delta P_{cm} = 259mB,$$

Утрати ковзання двигуна:

$$\Delta P_{S1} = (P_c - \Delta P_M - \Delta P_{cm}) \cdot S_1;$$

ковзання двигуна

$$S_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0};$$

механічна потужність двигуна

$$P_{MXDB} = P_c \cdot (\Delta P_M + \Delta P_{cm} + \Delta P_{S1});$$

сумарні механічні втрати в приводі

$$\Delta P_{MX\Sigma} = 345 \text{ Вт};$$

механічна потужність, що підводиться до ведучого валу муфти

$$P_1 = P_{MXDX} - \Delta P_{MX\Sigma};$$

утрати ковзання ЕМК

$$\Delta P_{S2} = P_1 S_2;$$

ковзання муфти

$$S_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1};$$

корисна потужність на веденому валу

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{S2};$$

утрати в обмотці збудження ЕМК

$$\Delta P_g = I_g^2 R_g,$$

де  $R_{\hat{a}} = 12\hat{n}$  .

Енергетична діаграма будується в масштабі.

## 7. Зміст звіту.

- 7.1 Найменування, мета і програма роботи.
- 7.2 Принципова електрична схема лабораторної установки (рис. 10.5).
- 7.3 Табл. 10.1...10.4 з результатами вимірювань і обчислень.
- 7.4 Механічні характеристики природного двигуна і ЕМК. (за даними табл. 10.1...10.3).
- 7.5 Енергетична діаграма електропривода системи АД-ЕМК (табл. 10.4 і рис. 10.4).
- 7.6 Залежність ККД привода, споживаної потужності і корисної потужності на відомому валу від частоти обертання останнього (за даними табл. 10.4).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### 1. Найменування роботи

Експериментальне визначення динамічних параметрів  
електропривода з двигуном постійного струму

### 2. Мета роботи

Експериментальне визначення електромагнітних експериментальних постійних часу обмотки збудження і ланцюга якоря двигуна постійного струму незалежного збудження, електромеханічної постійної часу електропривода.

### 3. Програма роботи

- 3.1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
- 3.2. Виконати вимірювання на змінному струмі частоти 50 Гц для визначення індуктивності ланцюга якоря при двох значеннях струму збудження двигуна.
- 3.3. Виміряти внутрішній опір ланцюга якоря двигуна.
- 3.4. Зняти осцилограму залежності кутової швидкості обертання двигуна  $\omega = f(t)$  при пуску електропривода без навантаження.
- 3.5. Зняти осцилограму залежності струму збудження  $i_B = f(t)$  при ввімкненні обмотки збудження двигуна на постійну напругу мережі.
- 3.6. Розрахувати індуктивність ланцюга якоря, внутрішній опір якоря, момент інерції привода, електромеханічну постійну часу, електромагнітну постійну часу обмотки якоря, усереднене значення електромагнітної постійної часу обмотки збудження цією постійною в залежності від струму збудження.

#### 4. Теоретична частина

У перехідних режимах електроприводів одночасно і взаємопов'язано діють теплові, механічні і електромагнітні процеси. Зміна теплового стану, електропривода в більшості випадків не впливає на швидкопротикаючі механічні і електромагнітні процеси, що називаються електромеханічними перехідними.

Для силового ланцюга двигуна постійного струму незалежного збудження при пуску в один рівень можуть бути записані наступні рівняння електричної і механічної рівноваги:

$$U = C\omega + iR + L_{\text{я}} \frac{di}{dt};$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt};$$

де  $U$  – напруга живлячого ланцюга, В;

$C$  – стала двигуна;

$\omega$  – кутова швидкість обертання, 1/с;

$R$  – опір якірного ланцюга двигуна, Ом;

$L_{\text{я}}$  – індуктивність якірного ланцюга, Гн;

$i$  – струм якоря, А;

$M$  – момент двигуна, н М;

$M_c$  – момент опору, Н м;

$J$  – момент інерції привода, кг м<sup>2</sup>.

При постійному магнітному потоці двигуна  $\Phi_{\delta} = \text{const}$  момент статичний (в даному випадку момент холостого ходу) і момент, що розвивається двигуном, можуть бути записані відповідно

$$M_c = Ci_{\text{xx}} \quad \text{і} \quad M = Ci$$

Визначивши значення струму якоря та його похідну і підставивши його у формулу напруги, після нескладних перетворень отримаємо

$$T_{\text{я}} T_{\text{м}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{\text{м}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_y,$$

Електромагнітна стала  $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R}$  часу ланцюга якоря, що має розмірність часу та визначає початкову швидкість протікання електромагнітних процесів;  $T_{\text{м}} = IR_{\text{я}}/C^2$  - електромеханічна стала часу, що визначає початкову швидкість протікання механічних процесів,  $\omega_y$  - стале значення кутової швидкості обертання.

Для обчислення значень  $T_{\text{м}}$  можна застосовувати метод, заснований на інтегруванні приведенного рівняння і використанні осцилограми при пуску електропривода без навантаження. Інтегруючи ліву і праву частини рівняння, отримаємо

$$T_{\text{я}} T_{\text{м}} \left| \frac{d\omega}{dt} \right|_0^{\infty} + T_{\text{м}} |\omega|_0^{\infty} = \int_0^{\infty} (\omega_0 - \omega) dt$$

Використовуючи початкові (при  $t=0$   $\omega_{(0)}=0$ ;  $\frac{d\omega}{dt(0)}=0$ ) і кінцеві умови при

$t = \infty$ ,  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ,  $\omega = \omega_y$  отримаємо

$$T_m = \int_0^\infty \frac{\omega_y - \omega}{\omega_y} dt = \frac{S_1 m_t m_\omega}{m_\omega} = \frac{S_1 m_t}{A_1} \quad (11.1)$$

де  $S_1$  – площа (см<sup>2</sup>), обмежена на осцилограмі лінією  $\omega_y$  і кривим  $\omega=f(t)$ ,  
 $A_1$  – відрізок (см), пропорційний  $\omega_y$  (рис. 11.1),  
 $m_t$  – масштаб часу (с/см).

Для ланцюга обмотки збудження при вмиканні на постійну напругу  $U$  справедливе рівняння

$$U = i_\epsilon R_\epsilon + L_\epsilon \frac{di_\epsilon}{dt},$$

де  $i_\epsilon$  – струм збудження, А;

$R_\epsilon$  – опір ланцюга збудження, Ом;

$L_\epsilon$  – індуктивність обмотки збудження, Гн.

Розділивши на  $R_\epsilon$ , отримаємо

$$I_y = i_\epsilon + T_\epsilon \frac{di_\epsilon}{dt}$$

де  $T_\epsilon = L_\epsilon / R_\epsilon$  – електромагнітна стала часу ланцюга збудження, с;

$I_y$  – стале значення струму збудження, А.

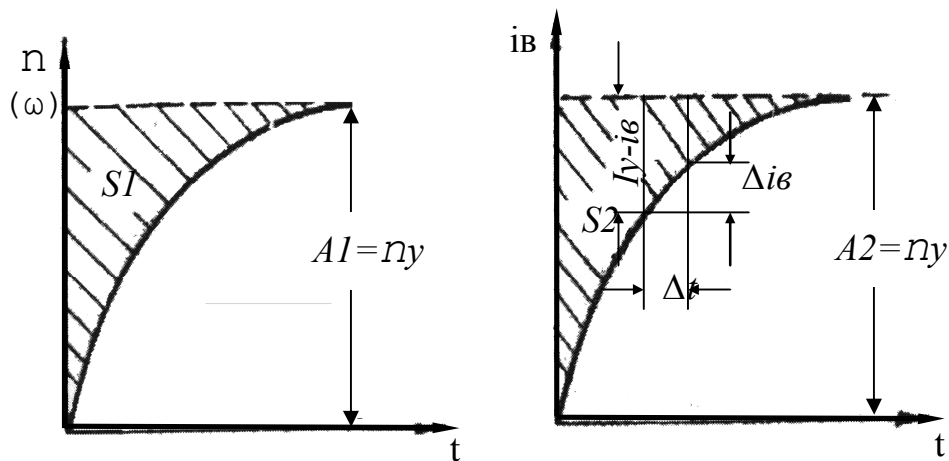


Рис.11.2. Осцилограма  $n=f(t)$  та  $i_B=f(t)$

Застосовуючи методику, викладену вище при визначенні  $T_m$ , і враховуючи, що при  $t=0$   $i_\epsilon=0$ ,  $f$  при  $t=i=I_y$ , для усередненого значення ТВ отримаємо

$$T_B = \int_0^\infty \frac{I_y - i_B}{I_y} dt = \frac{S_2 m_t}{A_2}, \quad (11.2)$$

де  $S_2$  – площа (см<sup>2</sup>), обмежена лінією  $I_y$  і кривим  $i_\epsilon = f(t)$ ,  
 $A_2$  – ордината (см), пропорційна  $I_y$  (див. рис. 11.2);  
 $m_t$  – масштаб часу (с/см).

Для визначення  $T_B$  в функції струму перейдемо до кінцевих приростів. Рівняння приймає вигляд

$$T_\epsilon = \frac{(I_y - i_\epsilon) \Delta t}{\Delta i_\epsilon}, \quad (11.3)$$

даючи на осцилограмі  $i_\epsilon = f(t)$  невеликі прирости часу і визначаючи графічно прирости  $\Delta i_\epsilon$  можна визначити  $T_\epsilon$  при різних токах збудження.

## 5. Порядок виконання роботи.

- 5.1 Ознайомитися зі схемою, приведеною на рис. 11.3 і схемою на лицьовій панелі стенда. Записати паспортні дані електричної машини і номінали резисторів системи, що досліджується.
- 5.2 Провести вимірювання на змінному струмі для визначення індуктивності ланцюга якоря. Для цього потрібно:
  - 5.2.1 Перевести перемикач УП2 в положення «~струм».
  - 5.2.2 Ввімкнути автоматичні вимикачі АВ1, АВ4.
  - 5.2.3 Зняти показання амперметра А3 і вольтметра V2.
  - 5.2.4 Дані вимірів записати в табл. 11.1.
  - 5.2.5 Ввімкнути автоматичні вимикачі АВ2, АВ6.
  - 5.2.6 Повторити операції по пп. 4.2.3. і 4.2.4.
  - 5.2.7 Вимкнути автоматичні вимикачі АВ1, АВ2, АВ4, АВ6.
- 5.3 Провести на постійному струмі вимірювання внутрішнього опору ланцюга якоря двигуна.
  - 5.3.1 Перевести перемикачі УП2 в положення «= струм».
  - 5.3.2 Ввімкнути автоматичні вимикачі АВ9, АВ10, АВ2 и АВ5.
  - 5.3.3 Зняти свідчення амперметра А4 і вольтметра V3. При вимірюванні напруги на якорі машини  $U_a$  тумблер поруч з вольтметром V3 короткочасно натиснути на межу «30 В». Дані вимірів записати в табл. 11.1.
  - 5.3.4 Вимкнути автоматичні вимикачі АВ9.
  - 5.3.5 Повторити операції п.4.3.3. при іншому значенні струму якоря.
  - 5.3.6 Вимкнути всі автоматичні вимикачі.



Таблиця 11.1

## Дослідні дані

5.4. Для зняття залежності кутової швидкості обертання двигуна  $\omega=f(t)$  при пуску електропривода без навантаження треба:

#### 5.4.1 Підготувати осцилограф до роботи.

#### 5.4.2 Вимірювальний вхід осцилографа ввімкнути на вихід тахогенератора ТГ.

### 5.4.3 Ввімкнути автоматичні вимикачі АВ9, АВ10, АВ6, АВ2.

5.4.4 Провести декілька пусків і відключення двигуна автоматичним вимикачем АВ5, під час яких зняти осцилограми  $\omega = f(t)$ .

При користуванні електронним осцилографом осцилограма зарисовується з екрана.

5.4.5 Визначити масштаб часу  $m_{t1}$  та записати в табл. 11.1.

5.4.6 За таховольтметром «п» виміряти частоту сталого обертання і записати в табл. 11.1.

5.4.7 Вимкнути всі автоматичні вимикачі.

5.5. Для зняття осцилограми  $i_B = f(t)$  слід:

5.5.1 Ввімкнути в хід осцилографа на виходи шунта Ш2 в ланцюгу обмотки збудження.

5.5.2 Ввімкнути автоматичний вимикач АВ6.

5.5.3 Вмикаючи і вимикаючи автоматичний вмикач АВ2, зняти осцилограму  $i_B = f(t)$ .

5.5.4 Визначити масштаб часу  $m_{t2}$  та записати в табл. 11.1.

5.5.5 Визначити стале значення струму збудження  $I_y$  за амперметром А5 і записати в таблицю 11.1.

5.5.6 Вимкнути всі автоматичні вимикачі.

## 6. Обробка експериментальних даних

6.1. Визначити внутрішній опір ланцюга якоря при двох значеннях струму  $I_1$  і  $I_2$  за формулою (табл. 11.1).

$$r_{я} = \frac{u}{i} \text{ Ом.}$$

Визначаємо середнє значення опору  $r_{я}$ .

6.2 За даними табл. 11.1 обчислити індуктивність ланцюга якоря  $L_{1я}$  і  $L_{я}^2$  при двох струмах збудження, використовуючи відомі співвідношення

$$Z = \frac{U}{I}, \text{ Ом}; \quad X_{я} = \sqrt{Z_{я}^2 - r_{я}^2}, \text{ Ом} \quad L_{я} = \frac{X_{я}}{2\pi f}, \text{ Гн}$$

6.3 Визначити електромагнітну постійну часу внутрішнього ланцюга якоря збудження машини

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{r_{я}}, \text{ с}$$

6.4 Обчислити електромеханічну постійну часу всього ланцюга якоря для умови дослідження осцилографування залежності  $\omega = f(t)$ .

6.5 Результати всіх розрахунків занести в табл. 11.2.

Таблиця 11.2

Розрахункові значення параметрів

|                 |                |                         |                |                |              |                              |                |                          |            |                          |                   |
|-----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------------------|------------|--------------------------|-------------------|
| $R_{я1},$<br>Ом | $R_{я2}$<br>Ом | $R_{я\text{ ср}}$<br>Ом | $L_{1я}$<br>Гн | $L_{2я}$<br>Гн | $T_{я}$<br>с | $R_{я} + R_{\partial}$<br>Ом | $T_{я}''$<br>с | $S_1$<br>см <sup>2</sup> | $T_m$<br>с | $S_2$<br>см <sup>2</sup> | $T_{\theta}$<br>с |
|-----------------|----------------|-------------------------|----------------|----------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------------------|------------|--------------------------|-------------------|

- 6.6 За (11.1) розрахувати електромеханічну постійну часу привода  $T_m$ . При відсутності планіметра площу  $S_1$  обчислювати, замінюючи криві невеликими відрізками прямих і підсумовуючи в подальші елементарні площі трапецій.
- 6.7 Розрахувати за (11.2) усереднене значення електромагнітної постійної обмотки збудження  $T_e$ .
- 6.8 Результати розрахунків за п.п 5.6 і 5.7 занести в табл. 11.2.
- 6.9 Даючи невеликі прирости часу на осцилограми  $i_e = f(t)$ , розрахувати залежність  $T_e = f(t)$  за формулою (11.3). Результати розрахунків занести в табл. 11.3 і побудувати графік.
- 6.10 Зробити аналіз залежності  $T_e = f(i_e)$  і дати короткі пояснення.

Таблиця 11.3

Розрахунок залежності  $T_e = f(i_e)$

| №<br>п/п | $\Delta t$<br>с | $I_e$<br>А | $I_y - i_e$<br>А | $\Delta i_B$<br>А | $T_e$<br>с |
|----------|-----------------|------------|------------------|-------------------|------------|
|----------|-----------------|------------|------------------|-------------------|------------|

Примітка: під таблицею залишити місце для запису 10-15 вимірювань.

## 7. Зміст звіту

- 7.1 Назва роботи, мета і програма.
- 7.2 Принципова схема установки (рис 11.3).
- 7.3 Таблиці 11.1, 11.2, 11.3.
- 7.4 Осцилограми  $\omega = f(t)$ ,  $i_e = f(t)$ .
- 7.5 Графік  $T = f(i_e)$  і пояснення цієї залежності.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

### 1. Найменування роботи

Дослідження теплових процесів асинхронного електродвигуна

### 2. Мета роботи

Вивчити теплові процеси в електродвигуні при його нагріві і охолодженні і визначити параметри, що характеризують їх.

### 3. Програма роботи

- 3.1. Ознайомитися з лабораторною установкою, призначенням електричних машин, схемами їх включення і зрозуміти призначення апаратів управління і вимірювальних приладів.
- 3.2. Записати паспортні дані електричних машин і температуру навколишнього середовища.

- 3.3. Експериментально отримати дані для побудови залежності перевищення температури двигуна у функції часу при роботі його з постійним навантаженням і охолодженням з нерухомим якорем.
- 3.4. За експериментальною залежністю перевищення температури двигуна від часу і його паспортних даних розрахувати параметри, що характеризують теплові процеси.
  - 3.4.1. Стале значення перевищення температури при нагріві двигуна ( $\tau_{cm}$ ).
  - 3.4.2. Постійні часу нагріву і охолодження.
  - 3.4.3. Тепловіддачу при нагріві і охолодженні.
  - 3.4.4. Коефіцієнти погіршення охолодження двигуна при нерухомому якорі.
  - 3.4.5. Теплоємність електродвигуна  $C$ .

#### 4. Теоретична частина

У процесі перетворення електричної енергії в механічну в двигуні втрачається частина енергії, яка йде на збільшення температури. Утрати потужності, що викликають нагрів двигуна, визначаються за відомою залежністю

$$\Delta P = P \left( \frac{1 - \eta}{\eta} \right),$$

де  $P$  – потужність на валу двигуна,  
 $\Delta P$  – втрати потужності в двигуні,  
 $\eta$  – ККД двигуна при заданій потужності  $P$ .

Допустима температура нагріву двигуна визначається типом ізоляції, що застосовується в ньому. У залежності від класу ізоляції встановлюється номінальна потужність двигуна при інших рівних конструктивних параметрах.

При розрахунках електричних машин нагрів оцінюється перевищенням температури їх ізоляції над температурою навколишнього середовища, яка згідно ГОСТу приймається рівною 40°C.

У розрахунках і дослідженнях теплових режимів електричну машину звичайно розглядають як однорідне тіло з теплопровідністю, рівною нескінченності, і приймають кількість енергії, що віддається в довкілля, назовні пропорційну першій мірі перевищення температури. При цих допущеннях основними параметрами, що характеризують теплові процеси в електричних машинах, є:  $C$  - теплоємність двигуна кількості тепла, необхідне для підвищення його температури на 1°C, Дж/град.;  $A$  - тепловіддача двигуна – кількість тепла, що виділяється двигуном у назовні довкілля в одиницю часу при різниці температур в 1°C, Дж/с.град,  $\tau$  - перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища, град.

У процесі роботи двигуна виконується умова теплової рівноваги, яка описується рівнянням

$$P dt = C dt + A dt,$$

де  $P dt$  - енергія, що передається двигуну за час  $dt$ ,  $C dt$  енергія, що виділяється двигуном у довкілля. З приведенного рівняння видно, що із зростанням

перевищення температури двигуна, стане рівним кількості енергії, що віддається в довкілля. При цьому перевищення температури двигуна буде постійним.

У процесі нагріву двигуна перевищення температури змінюється згідно з експонентним законом

$$\tau = \tau_{уст}(1 - l^{t/\theta}) + \tau_{нач}l^{t/\theta},$$

де  $\tau_{уст} = \Delta P/A$  - стале значення перевищення температури двигуна;

$\tau_{нач}$  - перевищення температури двигуна на початку процесу нагріву;

$\theta = C/A$  - стала часу нагріву.

Стала часу нагріву являє собою час, протягом якого температура двигуна досягне сталого значення, відповідного реальним умовам, при яких би нагрів протікав без теплообміну з навколишнім середовищем. Оскільки стала часу нагріву залежить від тепловіддачі  $A$ , то зі зміною умов охолодження змінюється і стала часу нагріву, а, отже, швидкість протікання теплових процесів.

При охолодженні процес охолодження описується рівнянням

$$\tau = \tau_{нач} \cdot l^{-t/\theta_0},$$

де  $\theta_0 = C/A_0$  - стала часу охолодження, яка в загальному випадку більше сталої часу нагріву і залежить від умов охолодження двигуна.

Різні умови нагріву і охолодження електричних машин враховуються в розрахунках коефіцієнтом погіршення умов охолодження, який рівний

$$\beta = A_0/A,$$

де  $A_0$  - тепловіддача двигуна при охолодженні.

## 5.Опис лабораторної установки

Лабораторна установка, схему якої наведено на рис. 12.1, складається з асинхронного двигуна АД з короткозамкненим ротором, навантажувальної машини постійного струму НМ, регулювальних опорів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , комутаційних апаратів в ланцюгу двигуна постійного струму (АВ1, перемикача режиму роботи П) і в ланцюгу статора асинхронного двигуна АВ2.

Для вимірювання перевищення температури двигуна використовується схема одинарного моста, в одне плече якого включено терморезистор  $R_t$ , вмонтований до лобової частини обмотки статора асинхронного двигуна. Інші плечі моста утворюють резистори з постійним опором і балансувальний резистор  $R_\delta$ .

Живлення моста здійснюється постійним струмом від джерела зі стабілізованою напругою. У вимірювальну діагональ ввімкнено мікроамперметр, шкала якого проградуєрована в градусах ( $\tau_0$ ).

Процеси нагріву і охолодження електричних машин досліджується на трифазному асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором ИД. Контроль навантаження двигуна здійснюється за показаннями амперметра АЗ в ланцюгу статора.

Навантажувальна машина НМ призначена для створення навантаження на валу випробуваного двигуна і попереднього розгону його перед вмиканням статора в мережу.



Резистори  $R_2$  і  $R_3$  використовуються для обмеження струму якоря при пуску і спільно з резистором  $R_1$  для регулювання моменту навантажувальної машини.

## 6. Порядок виконання роботи

- 6.1. Виконати балансування датчика температури, для чого Ввімкнути автомат АВ1, живлення вимірювального моста (тумблер Т ) і, змінюючи опір резистора  $R_6$ , добитися відсутності струму у вимірювальній діагоналі.
- 6.2. Щоб уникнути інтенсивного нагріву випробуваного двигуна за час пуску, необхідно заздалегідь розігнати його за допомогою навантажувальної машини, для чого:
  - 6.2.1. Встановити струм в ланцюгу збудження навантажувальної машини 1,5А ( за допомогою резистора  $R_1$  ).
  - 6.2.2. Встановити максимальний опір у ланцюгу якоря навантажувальної машини ( автомати АВ3, АВ4 Вимкнути ).
  - 6.2.3. Ввімкнути навантажувальну машину в режим двигуна (перемикач «П» поставити в положення «ДВ» ).
  - 6.2.4. Додатковий опір у ланцюгу якоря навантажувальної машини зменшити до нуля (Ввімкнути автомати АВ3 і АВ4 ).
- 6.3. Ввімкнути асинхронний двигун ИД в мережу ( автомат АВ2 ).
- 6.4. Ввімкнути навантажувальну машину в режим динамічного гальмування (перемикач «П» перевести в положення «ДТ» ).

Момент переводу навантажувальної машини в режим динамічного гальмування прийнято вважати за початок відліку часу і перевищення температури двигуна ( $t=0$ ;  $\tau=0$  ). У момент вмикання навантаження пустити секундомір.
- 6.5. Резистором  $R1$  встановити навантаження на валу двигуна, при якому струм статора випробуваного двигуна рівний 4,5 А і підтримувати його постійним протягом всього випробування.

Вимірювання температури перегріву двигуна на початку процесу проводити через 2 хв, надалі - через 4 хв. Результати вимірювання записати в табл. 12.1. Останній відлік зробити при температурі перегріву двигуна = 60 град.
- 6.6. Вимкнути випробуваний двигун від мережі ( автомат АВ2 ) і приступити до режиму охолодження при нерухомому роторі. Вимірювання перевищення температури двигуна виконувати через 2 хв. протягом 10÷15хв. Дані записати в табл. 12.1.
- 6.7. Вимкнути лабораторну установку, вимкнути автомат АВ1 і тумблер Т перемикач «П» поставити в положення «0».

Таблиця 12.1.

## Перевищення температури двигуна

| Нагрівання |        |               | Охолодження |        |               |
|------------|--------|---------------|-------------|--------|---------------|
| №          | $t, c$ | $\tau$ , град | №           | $t, c$ | $\tau$ , град |

Примітка: під таблицею залишити місце для запису 15 вимірювань.

## 7. Обробка експериментальних даних

7.1. Визначення сталого значення перевищення температури двигуна при його нагріванні ( рис. 12. 2. ), для чого:

7.1.1. За даними табл. 12. 1. побудувати залежність зміни перевищення температури двигуна від часу.

7.1.2. На осі часу відкласти два рівних відрізки, відповідних приросту часу  $\Delta t$  ( $\Delta t$  приймати рівним 6-10 хв. )

7.1.3. При прийнятих приростах часу визначити прирощення перевищення температури в кінці кожної ділянки  $t_1$  і  $t_2$ .

7.1.4. Через точки початкових значень перевищення температур на кожній ділянці ( точки «а» і «b» провести прямі, паралельні осі часу, до перетину з віссю ординат в точках «d» і «f».

7.1.5. Від точок «d» і «f» відкласти відрізки, пропорційні приросту температур  $\Delta \tau_1$  і  $\Delta \tau_2$  (відрізки  $dс$  і  $fе$  ).

7.1.6. Через точки «с» і «е» провести пряму до перетину з віссю ординат. Точка «д» відповідає сталому перевищенню температури.

7.2. Визначення постійних часу нагріву і охолодження електродвигуна.

У загальному випадку стану часу нагріву і охолодження розраховуються за формулою

$$\theta = t / \ln (\tau_{\text{вуст}} - \tau_{\text{поч}}) / (\tau_{\text{вуст}} - \tau), \quad (12.1)$$

де  $t$  - поточне значення часу;

$\tau$  - перевищення температури при часі  $t$ ,  $\tau_{\text{поч}}$  і  $\tau_{\text{вуст}}$  відповідно початкове і стале значення перевищення температури.

Оскільки при проведенні експерименту з нагріву двигуна  $\tau_{\text{поч}} = 0$ , а при охолодженні  $\tau_{\text{вуст}} = 0$ , то сталі часу рівні:

$$\text{нагріву} \quad \theta = t / \ln (\tau_{\text{вуст}} / (\tau_{\text{вуст}} - \tau)); \quad (12.2)$$

$$\text{охолодження} \quad \theta = t / \ln (\tau_{\text{поч}} / \tau). \quad (12.3)$$

Значення  $t$  і  $\tau$  приймати для середини процесів нагріву і охолодження відповідно до графіків  $\tau = f(t)$  або даних табл. 12.1.

За формулами (12.2.) і (12.3.) розрахувати сталу часу охолодження часу нагріву.

7.3. Визначення тепловіддачі двигуна при нагріванні.

Тепловіддача двигуна при нагріванні  $A$  розраховується за формулою

$$A = \Delta P_1 / (\tau_{\text{вуст}} + \Delta \tau), \text{ Дж / (с град)},$$

де  $\Delta P_1$  - повні втрати потужності в двигуні;

$\Delta\tau = 10^\circ$  - перевищення температури найбільш нагрітих частин двигуна над свідченням датчика температур.

Розрахунок втрат потужності в двигуні виконується на основі паспортних даних в наступному порядку:

визначаємо втрати потужності в двигуні при номінальному режимі

$$\Delta P_n = P_n \left( \frac{1}{\eta_n} - 1 \right), \text{ Вт ( Дж / с )},$$

розраховуємо постійні і змінні втрати

$$\Delta P_{i0} = \Delta P_i \frac{\gamma}{1 + \gamma}, \text{ Вт ( Дж / с )},$$

$$\Delta P_{пер} = \Delta P_n \frac{1}{1 + \gamma}, \text{ Вт ( Дж / с )},$$

У приведених виразах  $P_n$ ,  $\eta_n$  - номінальна потужність і ККД двигуна,  $P_{n \text{ пост}}$ ,  $P_{n \text{ пер}}$  сталі і змінні втрати в двигуні при номінальному режимі,  $\gamma = 0,25$  - коефіцієнт розподілу змінних і сталих втрат.

Повні втрати потужності в двигуні при проведенні дослідів нагріву рівні

$$\Delta P_1 = \Delta P_{n \text{ пост}} + \Delta P_{n \text{ пер}} (I_1 / I_{1n})^2, \text{ Вт ( Дж / с )},$$

де  $I_1$  - струм статора при проведенні дослідів.

7. 4. Розрахунок теплоємності двигуна

$$C = A\theta, \text{ Дж / град.}$$

7.5. Тепловіддача двигуна при охолодженні розраховується за залежністю

$$A_0 = C / \theta_0, \text{ Дж / град},$$

де  $\theta_0$  - стала часу охолодження.

7.6. Коефіцієнт погіршення умов охолодження двигуна розраховується за формулою:

$$\beta = A_0 / A.$$

## 8. Зміст звіту

8. 1. Найменування, мета і програма лабораторної роботи.

8. 2. Розрахунки формули, за якими ведеться обробка експериментальних даних і розшифровка символів у них.

8. 8. Схема лабораторної установки.

8. 4. Таблиці і експериментальні дані.

8. 5. Залежність  $\tau = f(t)$  при нагріві і охолодженні електродвигуна.

8. 6. Графічний розрахунок  $\tau_{вуст}$  при нагріві.

8. 7. Аналітичні розрахунки параметрів, що характеризують теплові процеси.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

### 1. Найменування роботи

Дослідження тиристорного електропривода постійного струму  
з системою підпоряднювального регулювання

### 2 Мета роботи

Вивчення елементної бази, пристрою і способу регулювання координат комплектного двозонного тиристорного електропривода постійного струму типу ЦЮ з двоконтурною системою підлеглого регулювання.

### 3. Програма роботи

- 3.1. Ознайомитися з лабораторною установкою, призначенням і основними блоками комплектного тиристорного електропривода.
- 3.2. Вивчити систему управління тиристорним електроприводом постійного струму з двозонним регулюванням.
- 3.3. Вивчити призначення і принцип дії адаптивних регулювальників струму і швидкості.
- 3.4. Отримати дані для побудови електромеханічних характеристик привода з пропорційним (П) і пропорційно-інтегральним (ПІ) регулювальником швидкості.
- 3.5. За допомогою електронного осцилографа зняти криві перехідного процесу  $n=f(t)$  при ступінчастій зміні і реверсі задаючого сигналу.
- 3.6. Визначити діапазон регулювання швидкості.

### 4. Опис лабораторної установки

#### 4.1. Призначення основних елементів електропривода.

Лабораторна установка, схему якої наведено на рис. 13.1, виконана на базі двозонного комплектного тиристорного електропривода постійного струму типу ЭТУ, що серійно випускається з системою підлеглого регулювання швидкості. Електроприводи типу ЭТУ призначені для створення швидкодіючих і з широким діапазоном регулювання (до 1:1000) приводів металоріжучих станків і роботів, в тому числі з числовим програмним управлінням.

Функціональна схема електропривода, яка відображає взаємозв'язок основних елементів, приведена на рис. 13.2

До складу електропривода входять:

ТПЯ реверсивний тиристорний перетворювач якірного ланцюга;

СИФУ система імпульсно-фазового управління;

ПХ перемикач характеристик;

НЗ нелінійна ланка;

ФПЕ функціональний перетворювач ЕРС;

АРТ адаптивний регулювальник струму;  
АРС адаптивний регулювальник швидкості;  
УА пристрій адаптації;  
ДПВ датчик провідності вентилів;  
ЛПП логічний перемикаючий пристрій;  
ТГ тахогенератор;  
ДТЯ датчик струму якоря;  
ДН - датчик напруги;  
ТПВ тиристорний перетворювач обмотки збудження;  
ДТВ датчик струму збудника;  
Н1, Н2, Н3, В1, В2, В3 транзисторні ключі;

Основним силовим елементом електропривода є реверсивний тиристорний перетворювач для живлення ланцюга якоря, працюючий за принципом роздільного управління комплектами тиристорів «Уперед» і «Назад» оставить непрацюючого комплексу. Це виключає появу урівнюючих струмів.

Ввімкнення виходу СИФУ до необхідного комплексу тиристорів здійснюється за допомогою логічного перемикаючого пристрою ЛПУ, до складу якого входить датчик нуля струму якоря, і датчик провідності вентилів. Логічний перемикаючий пристрій виконує такі функції:

- вибір потрібного напрямку роботи «Уперед» або «Назад» у залежності від знаку вхідного сигналу;
- вмикання відповідних ключів «В» або «Н», що визначає необхідний напрям струму перетворювача;
- створення витримки часу між зняттям керуючих імпульсів з комплексу, що працював раніше і подачею їх на комплект, що вступає в роботу.

Канал регулювання напруги на якорі виконаний за двоконтурною системою підлеглого регулювання струму якоря і швидкості двигуна. Причому для забезпечення стійкої роботи привода у другій зоні при ослабленні магнітного потоку застосований адаптивний регулювальник швидкості із змінним коефіцієнтом підсилення в функції частоти обертання двигуна. Крім струму у другій зоні регулювання здійснюється зниження максимального рівня вихідної напруги регулювальника швидкості в залежності від напруги тахогенератора, і тим самим знижується уставка струмообмеження.

Для збільшення швидкості вище номінальної зменшується струм в обмотці збудження, яка живиться від тиристорного перетворювача ТПВ. Канал регулювання струму збудження виконаний двоконтурним: контур регулювання струму збудження і контур регулювання ЕРС двигуна.

#### 4.2. Логічний перемикаючий пристрій (ЛПП)

При зміні полярності напруги на виході нелінійної ланки (НЗ) змінюється сигнал на вході перемикача характеристик (ПХ). Після зникнення струму в силовому ланцюгу на виході датчика провідності вентилів (ДПВ), призначеного для індикації відкритого або закритого стану тиристорів, формується сигнал «1». При цьому ЛПП блокує видачу керуючих імпульсів на раніше працюючий комплект



тиристорів, а також запускає елемент відліку витримки часу. Після відліку необхідної витримки часу і відсутності сигналу, що блокує, від датчика провідності вентилів подаються керуючі імпульси на інший комплект тиристорів. Для узгодження однополярної регулювальної характеристики СИФУ  $\alpha=f(U_y)$  з реверсивним сигналом управління  $U_y$  служить перемикач характеристик ПХ (рис 13.2).

Початковий кут регулювання встановлюється  $\alpha_{нач} = 120$  ел. град., максимальний -  $\alpha_{max} = 150$  ел.град., мінімальний -  $\alpha_{min} = 5$  10 ел. град.

#### 4.3. Вузол захисту перетворювача

У електроприводі, що розглядається, передбачені наступні види захистів: максимально-струменевий; від перегріву двигуна при перевантаженнях; усунення повзучої швидкості; від пониження напруги в живлячій мережі.

При спрацюванні всіх видів захистів встановлюється максимальний кут регулювання і відбувається запалювання сигнальної лампочки спрацювання захисту.

Усунення повзучої швидкості при вимиканні задавальної напруги здійснюється шунтуванням ланцюга зворотного зв'язку регулювальників швидкості і струму. Крім шунтування регулювальників відбувається також збільшення кута регулювання до максимального і зняття керуючих імпульсів з тиристорів. Усе це виключає всяку можливість появи струму якоря при відсутності задавального сигналу.

При пониженні живлячої напруги всіх або однієї фази більш ніж на 50% відбувається зняття керуючих імпульсів з тиристорів перетворювача.

#### 4.4. Адаптивні регулювальники струму і швидкості

Для забезпечення постійності коефіцієнта підсилення керованого випрямляча в режимі безперервного і переривчастого струмів, а також для компенсації внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна, застосований адаптивний регулювальник струму, що складається з регулювальника струму РТ (рис. 13.2), нелінійної ланки НЗ і функціонального перетворювача ЕРС (ФПЕ).

Керуюча напруга  $U_y$  на виході нелінійного елемента є сума сигналів, пропорційних струму якоря і ЕРС двигуна.

$$U_y = kU_{pm} + U_e,$$

де  $k$  - коефіцієнт передачі нелінійної ланки.

Сигнал, пропорційний ЕРС двигуна  $U_e$ , формується за допомогою перетворювача ЕРС, що має арксинусну характеристику

$$U_e = \arcsin E_{\partial\partial}.$$

У разі однозонного привода, для якого ЕРС двигуна пропорційна швидкості, на вхід ФПЕ можна подавати напругу тахогенератора.

При регулюванні швидкості вище номінальної шляхом зміни магнітного потоку змінюється електромеханічна стала привода  $T_m$ . Це приводить до порушення оптимальної настройки контура швидкості і виникнення нестійкого режиму роботи. Для усунення цього явища необхідно із зменшенням магнітного потоку змінювати коефіцієнт передачі регулювальника швидкості. Для точної підтримки

коефіцієнта передачі регулювальника швидкості буде потрібне нескінченне число рівнів.

## 5. Порядок виконання роботи

5.1. Ознайомитися з лабораторним стендом і призначенням основних елементів комплектного тиристорного електропривода постійного струму.

5.2. Вивчити функціональну схему і принцип дії системи імпульсно-фазового керування.

5.3. Вивчити принципову схему і призначення адаптивних регулювальників струму і швидкості.

5.4. Отримати дані для побудови електромеханічної характеристики  $n = f(I)$  з ПУ регулювальником швидкості. Для цього необхідно:

5.4.1. Встановити движок потенціометра  $R_1$  і перемикач В1 в нульове положення.

5.4.2. При вимкнутій навантажувальній машині НМ (універсальний перемикач УП в нульове положення) ввімкнути АВ3, АВ5, АВ1, АВ2.

5.4.3. Ввімкнути перемикач В1 в положення В і за допомогою потенціометра  $R_1$  встановити частоту обертання двигуна  $n = 300$  об/хв.

5.4.4. При мінімальному струмі збудження навантажувальної машини НМ (двигок потенціометра  $R_2$  в нульовому положенні) ввімкнути НМ в режим динамічного гальмування, встановивши перемикач УП в положення ДТ.

5.4.5 Ввімкнути АВ7 і, плавно збільшуючи струм збудження НМ, зняти декілька точок залежності  $n = f(I)$ . Після зняття вказаної залежності встановити мінімальний струм збудження НМ і вимкнути АВ7. Результати вимірювань занести в табл 13.1.

5.5. Аналогічним чином отримати дані для побудови залежності  $n = f(I)$  при частотах обертання 500 і 700 об/хв. Для чого з допомогою  $R_1$ , необхідно встановити необхідну частоту обертання.

5.6. Для вказаних частот обертання отримати дані для побудови залежності  $n = f(I)$  при пропорційному регулювальникові швидкості. Для чого необхідно зашунтувати з допомогою В2 ємність в ланцюгу зворотного зв'язку регулювальника швидкості.

Примітка. У всіх дослідах струм якоря машини, що випробовується, не повинен перевищувати 8 А.

5.7. За допомогою електронного осцилографа зняти залежність  $n = f(t)$  при ступінчастій зміні і реверсі задаючого сигналу. Для цього необхідно вимкнути навантажувальну машину і з допомогою потенціометра  $R_1$  встановити  $n = 700$  об/хв.

5.7.1. Включаючи і вимикаючи перемикач В, зняти залежність  $n = f(t)$  при ступінчастій зміні задавального сигналу.

5.7.2. Перемикаючи перемикач В1 з положення «В» в положення «Н» зняти залежність  $n = f(t)$  при реверсі задавального сигналу.

5.8. Вимкнути установку. Встановити движок потенціометра  $R_1$  в нульове положення і вимкнути АВ2, АВ1, АВ5 і АВ3.

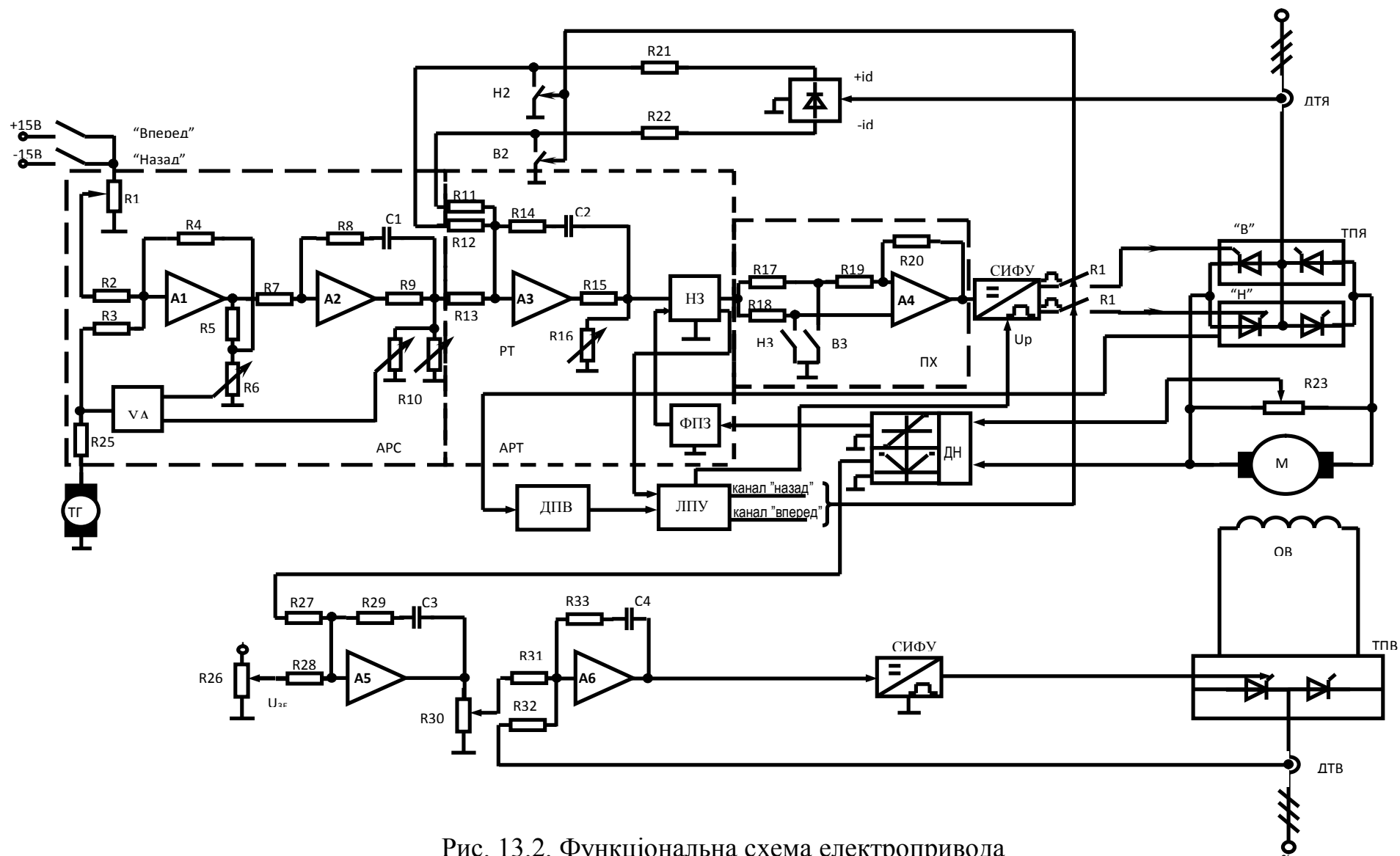


Рис. 13.2. Функціональна схема електропривода

## 6.Обробка експериментальних даних

6.1.За даними табл. 13.1 побудувати електромеханічні характеристики при різних частотах обертання з пропорційним і ПІ регулювальником швидкості.

6.2.Визначити діапазон регулювання при пропорційному і ПІ регулювальникові швидкості.

Табл.13.1.

### Результати вимірювань

| Умови                            | п,<br>об/хв. | №<br>вимірів | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------------|--------------|--------------|---|---|---|---|---|---|---|
| ПІ регулятор швидкості           | 300          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  | 500          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  | 700          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |
| Пропорційний регулятор швидкості | 300          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  | 500          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  | 700          | $I, A$       |   |   |   |   |   |   |   |
|                                  |              | $n, об/хв$   |   |   |   |   |   |   |   |

## 7.Зміст звіту

- 7.1.Назва і мета лабораторної роботи.
- 7.2.Програма роботи.
- 7.3. Принципова схема лабораторної установки (рис. 13.1).
- 7.4.Табл. 13.1 з результатами вимірювань залежності  $n = f(I)$ .
- 7.5.Електромеханічні характеристики двигуна  $n = f(I)$  з пропорційним і ПІ регулятором швидкості.
- 7.6.Розрахунок діапазону регулювання швидкості.
- 7.7.Осцилограми перехідного процесу  $n = f(I)$  при ступінчастій зміні і реверсі задавального сигналу.

## Зміст

- Лабораторна робота № 8. Дослідження частотно-керованого асинхронного електропривода.
- Лабораторна робота № 9. Дослідження дросельного асинхронного привода.
- Лабораторна робота № 10. Дослідження електропривода системи асинхронний двигун-електромагнітна муфта ковзання.
- Лабораторна робота № 11. Експериментальне визначення динамічних параметрів електропривода з двигуном постійного струму.
- Лабораторна робота № 12. Дослідження теплових процесів асинхронного електродвигуна.
- Лабораторна робота № 13. Дослідження тиристорного електропривода постійного струму з системою підпорядковувального регулювання.

**Навчально-методичне видання**

А.А.Колб

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електропривода» (Частина 2)  
для студентів спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготовлено до виходу в світ у Національному технічному університеті  
«Дніпровська політехніка».

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19