

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра тракторів, автомобілів
та технічного сервісу машин**

Ярошенко Л. В.

***ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН
Частина 2***

ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

***Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт для студентів
сільськогосподарських вищих навчальних закладів
спеціальності 6.091902 –
“Механізація сільського господарства”***

ВІННИЦЯ – 2002

УДК 631.3-52:621.31(075.3)

Ярошенко Л. В. Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів спеціальності 6.091902 – “Механізація сільського господарства”: В 5 ч. – Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2002. - Ч. 2.: Двигуни постійного струму. – 26 с.

Рецензенти:

д. т. н., проф. каф. ТЕГІЗБ ВДТУ А. Ф. Пономарчук,
д. т. н., проф., зав. каф. ТА ТСМ ВДАУ В. Ф. Анісімов

Приведено методичні вказівки та короткі теоретичні пояснення до виконання лабораторних робіт із дисципліни “Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин” (частина 2 – “Двигуни постійного струму”). Методичні вказівки складено відповідно до базової навчальної програми з даної дисципліни. Розглянуто будову, принцип роботи, методику розрахунку та правила вибору двигунів постійного струму сільськогосподарського призначення.

Розраховано на студентів факультету механізації сільського господарства, спеціальність 6.091902 – “Механізація сільського господарства”

*Рекомендовано науково-методичною радою
Вінницького державного аграрного університету
(протокол № 2 від 7 жовтня 2002 року)*

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: дослідити регульовальну та швидкісну характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження методом безпосереднього навантаження та виявити вплив послідовної обмотки на швидкісну характеристику двигуна.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЯСНЕННЯ

Колекторні машини постійного струму можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі рушія (двигуна). Якщо двигун постійного струму під'єднати до джерела постійного струму з напругою U , то в обмотці збудження та в обмотці якоря машини появляться струми. В результаті взаємодії струму якоря з магнітним полем обмотки збудження на якорі електродвигуна створюється обертовий електромагнітний момент M . Під дією цього моменту якорь починає обертатись, отже двигун працюватиме у режимі рушія і приводитиме у рух з'єднану із ним машину, споживаючи при цьому електроенергію із мережі і перетворюючи її у механічну. У процесі роботи двигуна його якорь обертається у магнітному полі, при цьому в обмотці якоря індукується електрорушійна сила (ЕРС) E , напрям якої можна визначити за правилом "правої руки". У двигуні ЕРС направлена назустріч струму якоря $I_{Я}$ і тому її називають зворотною. Її можна визначити за законом електромагнітної індукції:

$$E = k_e \Phi \omega, \quad (1)$$

де E - зворотна електрорушійна сила, що індукується в обмотках якоря при його обертанні;

k_e - постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна;

Φ - магнітний потік одного полюса обмотки збудження;

ω - кутова швидкість якоря.

Для електричного кола якоря двигуна, що працює в установленому режимі, справедливий Другий закон Кірхгофа:

$$U = E + (R_{Я} + R_{II})I_{Я}, \quad (2)$$

де U - напруга на затискачах якоря;

$R_{я}$ - опір в обмотці якоря;

$R_{п}$ - величина додаткового (пускорегулювального) опору у колі якоря;

$I_{я}$ - сила струму в обмотці якоря.

Величину обертового електромагнітного моменту M , що створюється на якорі електродвигуна, можна визначити за законом електромагнітних сил:

$$M = k_M \Phi I_{я}, \quad (3)$$

де k_M - постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна.

Якщо з рівнянь (1) та (2) визначити кутову швидкість ω , то отримаємо формулу *електромеханічної характеристики двигунів постійного струму*:

$$\omega = \frac{U - (R_{я} + R_{п})I_{я}}{k_e \Phi}. \quad (4)$$

З формули (4) видно, що регулювати кутову швидкість якоря двигуна постійного струму можна шляхом зміни напруги на затискачах якоря U або магнітного потоку обмотки збудження - Φ , або величини додаткового (пускорегулювального) опору у колі якоря - $R_{п}$.

Підставивши у формулу (4) значення сили струму з формули (3), отримаємо формулу механічної характеристики двигунів постійного струму:

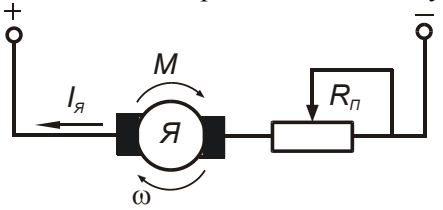
$$\omega = \frac{U}{k_e \Phi} - M \frac{(R_{я} + R_{п})}{k_M k_e \Phi^2}. \quad (5)$$

Двигун постійного струму паралельного збудження (шунтовий двигун) (див. мал. 4.1). Характерною особливістю даного двигуна є те, що обмотка збудження ОЗ включена паралельно до обмотки якоря, отже струм у цій обмотці (струм збудження) I_3 і її магнітний потік Φ не залежать від навантаження і є величинами постійними (при постійному R_p , якщо не враховувати реакції якоря), отже $I_3 = const$ і $\Phi = const$, звідки, враховуючи формулу (3), отримаємо:

$$M = k_1 I_{я},$$

де $k_1 = k_M \Phi = const$ - постійний коефіцієнт.

Отже обертовий момент шунтового двигуна прямо пропорційний силі струму у якорі:

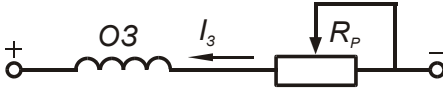


$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я} + R_{п}}$$

При $R_{п} = const$ у формулі механічної характеристики (5) можна ввести заміну:

$$\frac{U}{k_e \Phi} = A = const \text{ і}$$

$$\frac{(R_{я} + R_{п})}{k_M k_e \Phi^2} = B = const.$$

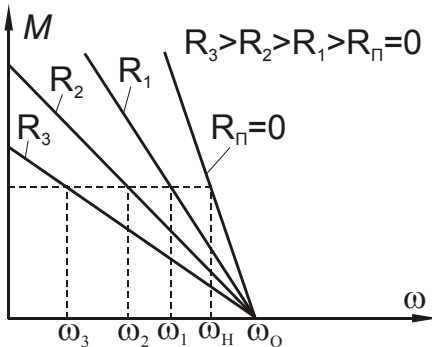


Мал. 4.1 - Електрична схема двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового)

Тоді рівняння механічної характеристики набуде вигляду прямої лінії: $\omega = A - BM$

На мал. 4.2 приведені механічні характеристики двигуна при різних значеннях опору якорного кола $R_{я} + R_{п}$. Для кожного конкретного двигуна $R_{я} = const$ і зміна опору якорного кола зумовлюється зміною $R_{п}$. Чим більший опір якорного кола, тим м'якша механічна характеристика.

При $M = 0$ і $I_{я} = 0$ кутова швидкість двигуна ω_0 називається швидкістю ідеального холостого ходу, отже при ω_0 усі характеристики незалежно від опору $R_{я} + R_{п}$ перетинаються в одній



точці: $\omega_0 = \frac{U}{k_e \Phi}$.

З механічної характеристики шунтового двигуна видно, що момент, який розвиває двигун, автоматично приводиться у відповідність із моментом опору робочої машини. Своєрідним регулятором двигуна тут виступає зворотна електрорушійна сила E . Під дією збільшеного моменту опору робочої машини, зменшується кутова швидкість

Мал. 4.2 - Механічні характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового)

двигуна і відповідно до формули (1) зменшується зворотна ЕРС E , що при постійній напрузі живлення U призводить до зростання сили струму якоря I_A відповідно до формули (2), а отже й обертового моменту двигуна M (відповідно до формули (3)). Кутова швидкість понижується рівно на стільки, скільки необхідно для зменшення зворотної ЕРС E та приведення сили струму якоря I_A у відповідність до збільшеного моменту опору машини. З виразу механічної характеристики видно, що зменшення кутової швидкості при зростанні навантаження тим більше, чим більший опір кола якоря.

Шунтовий двигун належить до двигунів із жорсткою механічною характеристикою, у яких значна зміна моменту супроводжується незначною зміною кутової швидкості. Практично при зміні моменту двигуна від M_{XX} (моменту, який розвиває двигун при холостому ході) до номінального моменту M_H (найбільшого моменту, який може розвивати двигун необмежено довго не перегріваючись) кутова швидкість двигуна ω зменшується у середньому на 3-6 %. Жорсткість шунтового двигуна $\beta = const < 0$.

Однією із важливих характеристик будь-якого двигуна є його перевантажувальна здатність (здатність двигуна долати пікові навантаження), яка визначається за формулою:

$$\mu_K = \frac{M_{\max}}{M_H},$$

де M_{\max} – максимально допустимий момент двигуна.

Шунтові двигуни мають доволі високу перевантажувальну здатність і допускають короткочасні перевантаження у межах $\mu_K = 2 - 2,5$ та 50% перевантаження за струмом протягом однієї хвилини.

Регулювання кутової швидкості двигунів постійного струму паралельного збудження. Способи регулювання кутової швидкості двигунів оцінюються за такими показниками:

- плавністю регулювань;
- діапазоном регулювань, що визначається відношенням найбільшої кутової швидкості до найменшої;
- економічністю регулювань, що визначається вартістю регулювальної апаратури та втратами електроенергії у ній.

З формули електромеханічної характеристики двигуна постійного струму (4) видно, що кутову швидкість шунтового двигуна можна регулювати шляхом зміни напруги на затискачах двигуна, зміни головного магнітного потоку або опору кола якоря.

Введення додаткового опору у коло якоря. Додатковий опір включають у коло якоря аналогічно пусковому реостату R_{II} , але він повинен бути розрахованим на тривале протікання струму. Збільшення величини додаткового опору у колі якоря R_{II} , при постійних U та Φ , призводить до зростання кута нахилу механічних характеристик α (див. мал. 4.3), що пов'язаний із жорсткістю механічної характеристики залежністю:

$$\beta = -\text{arctg} \alpha .$$

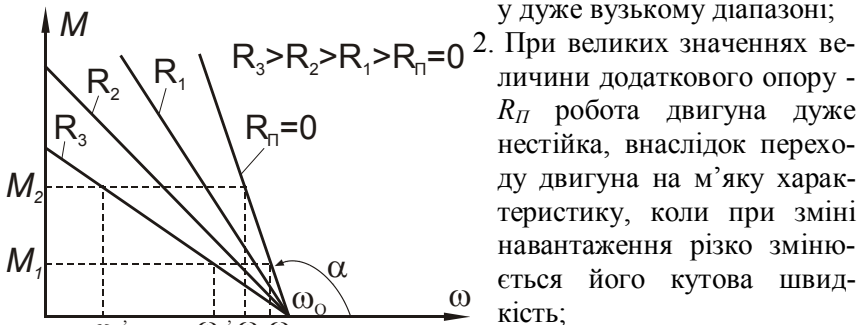
При цьому двигун переходить на більш м'яку механічну характеристику роботи, що супроводжується різкою зміною його кутової швидкості при зміні навантаження:

$$\alpha = \text{arctg} \frac{R_{Я} + R_{II}}{k_M k_e \Phi^2} = \text{arctg} k_2 (R_{Я} + R_{II}),$$

де $k_2 = 1/k_M k_e \Phi^2 = \text{const}$ - постійний коефіцієнт.

Даний спосіб доволі простий і забезпечує плавне регулювання кутової швидкості у широкому діапазоні (тільки у сторону меншої від номінальної), але має ряд істотних недоліків, які обмежують його використання. До цих недоліків можна віднести:

1. При малих навантаженнях кутову швидкість можна регулювати у дуже вузькому діапазоні;



Мал. 4.3 - Механічні характеристики шунтового двигуна при зміні величини додаткового опору у колі якоря

2. При великих значеннях величини додаткового опору - R_{II} робота двигуна дуже нестійка, внаслідок переходу двигуна на м'яку характеристику, коли при зміні навантаження різко змінюється його кутова швидкість;

3. На нагрівання реостату витрачається багато електроенергії $\Delta P = kI_{Я}^2 R_{II}$;

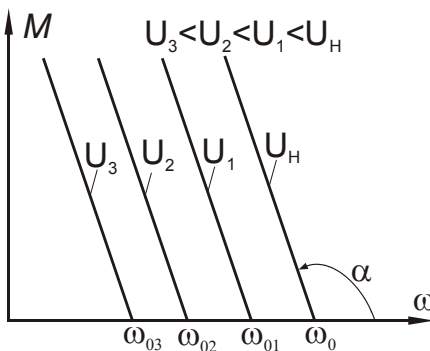
4. Оскільки реостат повинен

працювати при високій по-тужності, то він має великі габаритні розміри та вартість;

5. Зниження кутової швидкості супроводжується зниженням по-тужності, оскільки $P = M\omega$.

Зміна величини напруги, що підводиться до затискачів двигуна. Регулювання кутової швидкості шунтового двигуна шляхом зміни величини напруги, що підводиться до затискачів двигуна застосовується лише при $I_3 = const$, а отже при роздільному живленні обмотки якоря та обмотки збудження.

Швидкість ідеального холостого ходу ω_0 прямо пропорційна напрузі живлення, а кут нахилу механічних характеристик α від напруги не залежить, тому при зменшенні напруги живлення, механічні характеристики не змінюють кута нахилу α , а зміщуються у сторону менших швидкостей, залишаючись паралельними одна одній (див мал. 4.4). Для здійснення цього способу регулювання необхідно коло якоря двигуна підключити до джерела із регульованою напругою. Для керування двигунами малої та середньої потужності можна використовувати регульований випрямляч, у якому напруга постійного струму змінюється за допомогою автотрансформатора. Для керування двигунами великої потужності доцільно використовувати генератор постійного струму незалежного збудження, привід якого здійснюється трифазним двигуном змінного струму.



Мал. 4.4 - Механічні характеристики шунтового двигуна при зміні величини напруги, що підводиться до затискачів якоря двигуна

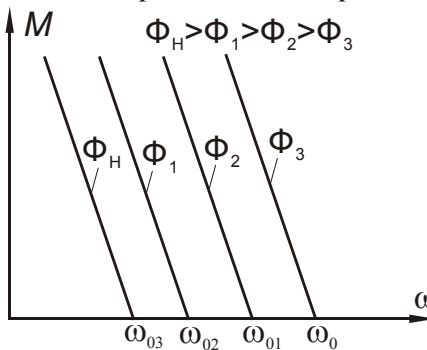
Така система живлення називається системою “генератор-двигун”, величина вихідної напруги у ній регулюється за допомогою зміни струму збудження генератора постійного струму.

Зміна напруги у колі якоря дозволяє регулювати кутову швидкість вниз від номінальної, оскільки напруга вище від номінальної неприпустима. Даний метод забезпечує плавне та економічне регулювання у широкому діапазоні $n_{max}/n_{min} \geq 25$. У даному випадку найбільша ку-

това швидкість обмежується умовами комутації, а найменша - умовами охолодження двигуна. Ще однією перевагою даного способу регулювання є те, що він дозволяє безреостатний запуск двигуна при пониженій напрузі.

Зміна основного магнітного потоку обмотки збудження.
 Даний спосіб регулювання у двигуні паралельного збудження здійснюється за допомогою реостату R_p у колі обмотки збудження (див. мал. 1). При зменшенні опору цього реостату зростає струм збудження та магнітний потік обмотки збудження, що, відповідно до формули (4), призводить до зменшення кутової швидкості. При збільшенні опору R_p кутова швидкість зростатиме. Залежність кутової швидкості від струму збудження називається *регульовальною характеристикою* двигуна $n = f(I_3)$ при $I = const$ та $U = const$.

З формули (4) випливає, що із зменшенням магнітного потоку Φ кутова швидкість зростає за гіперболічною залежністю. Даний метод дозволяє регулювання кутової швидкості тільки у сторону вгору від номінальної (див. мал. 4.5). При повністю введеному реостаті R_p через обмотку збудження проходить мінімальний струм і двигун розвиватиме максимальну кутову швидкість. При обриві обмотки збудження під навантаженням двигун зупиниться внаслідок малого обертового моменту двигуна (за рахунок струму у якорі та магнітного потоку залишкового магнетизму полюсів), якщо ж обрив станеться при холостому ході двигуна - то він піде



Мал. 4.5 - Механічні характеристики шунтового двигуна при зміні величини основного магнітного потоку

“врознос”. Сучасні шунтові двигуни дозволяють регулювання кутової швидкості даним методом у діапазоні $n_{max}/n_{min} \geq 2 \dots 5$. Надмірне збільшення кутової швидкості небажане (внаслідок іскріння колектора та перегрівання підшипників), тому межі регулювання розширюють за рахунок зниження номінальної кутової швидкості, але це пов’язано із зростанням розмірів, ваги та вартості двигунів.

Розглядуваний метод ре-

гулювання доволі простий та економічний, оскільки у двигунах паралельного збудження струм $I_3 = (0,01 \dots 0,07)I_{Я}$, а тому втрати у регулювальному реостаті невеликі. При використанні повзункового реостата регулювання виходить плавним із збереженням потужності постійною, оскільки при зменшенні магнітного потоку зростає кутова швидкість, але водночас зменшується обертовий момент і навпаки.

Режими роботи двигунів постійного струму паралельного збудження. Приведеним вище режимом не вичерпуються всі можливості даного двигуна, значний інтерес становлять можливості переведення двигуна на роботу у гальмівних режимах, що дозволяють швидко загальмовувати робочу машину. З великого числа можливих способів гальмування електродвигунів розглянемо три, що становлять найбільший інтерес для сільського господарства.

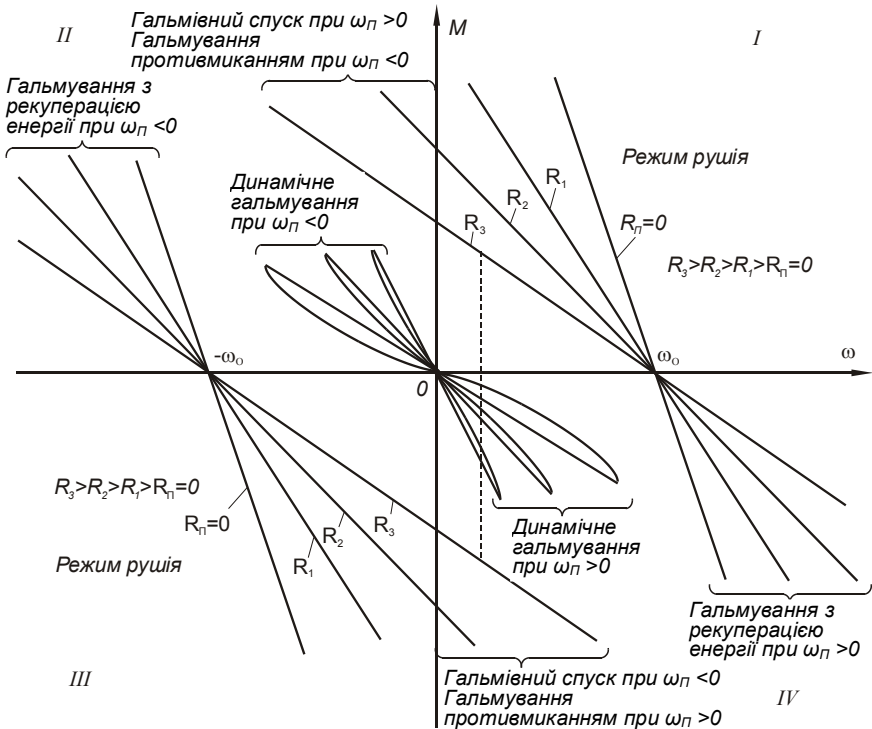
Гальмування з рекуперацією енергії полягає у тому, що двигун у період гальмування переводиться у режим генератора, який виробляє електричну енергію і подає її у мережу. Для цього необхідно навести в обмотках якоря зворотну електрорушійну силу більшої величини ніж прикладена до його затискачів напруга мережі, тоді внаслідок того, що $E > U$, струм якоря $I_{Я} = (U - E)/(R_{Я} + R_{П}) < 0$ прийме від'ємне значення, а це означає перехід двигуна на роботу у режим генератора. Момент двигуна при цьому змінює свій напрям на протилежний. Збільшити зворотну ЕРС E відповідно до (1) можна або збільшивши магнітний потік, або збільшивши за допомогою сторонньої сили кутову швидкість якоря вище ω_0 . Перший метод гальмування використовується при гальмуванні деяких металорізальних станків, другий використовується для пригальмовування електропоїздів на схилах.

Механічні характеристики гальмівного режиму із рекуперацією енергії розміщуються у IV квадранті (див. мал. 4.6), являючись природнім продовженням характеристик рушійного режиму для прямого (умовно) попереднього обертання ($\omega_{П} > 0$), що розміщені у I квадранті. Механічні характеристики гальмівного режиму із рекуперацією енергії при зворотному (умовно) обертанні ($\omega_{П} < 0$) розміщуються у II квадранті, являючись природнім продовженням характеристик рушійного режиму, які знаходяться у III квадранті.

Гальмування противмиканням відбувається за умов, коли обмотки двигуна включені для обертання в одному напрямку, але якір із деяких причин обертається у протилежному напрямку. При цьому можливі два варіанти гальмування:

- гальмівний спуск;
- гальмування зміною полярності якоря на ходу двигуна.

Гальмівний спуск здійснюється у приводах підймальних механізмів, коли двигун включений на підйом вантажу, але вантаж настільки великий, що момент, який він створює, заставляє привід обертатись в сторону опускання вантажу. Механічні характеристики цього режиму являють собою продовження характеристик рушійного режиму I квадранту у II квадранті (при $\omega_{\Pi} > 0$), а при попередньому зворотному обертанні (при $\omega_{\Pi} < 0$) вони є продовженням механічних характеристик рушійного режиму III квадранту у IV квадранті. Оскільки якір двигуна у даному випадку

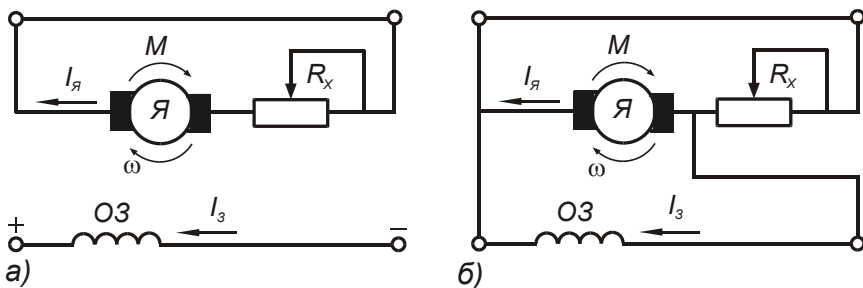


Мал. 4.6 - Гальмівна діаграма двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового)

обертається у протилежну порівняно із нормальним рушійним режимом сторону, то напрям ЕРС E , що індукується в обмотках якоря, збігатиметься із напрямом напруги мережі. Внаслідок цього сила струму у якорі $I_{\text{я}} = (U - E)/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})$ при гальмівному спуску буде значно більшою ніж у рушійному режимі, і тому як для обмеження струму, так і для отримання щоразу потрібного моменту у коло якоря обов'язково вводять додатковий регульований опір $R_{\text{п}}$.

Гальмування зміною полярності якоря на ходу двигуна – найхарактерніший режим противмикання. При переключенні обмотки якоря у ній змінюється напрям протікання струму, а оскільки напрям магнітного потоку обмотки збудження лишається незмінним, то обертовий момент на якорі змінить свій напрям і буде направленим проти обертання ротора, а отже гальмуватиме його. У даному випадку напрям ЕРС E , що індукується в обмотках якоря, збігатиметься із напрямом напруги мережі, тому на час гальмування у коло якоря необхідно вмикати додатковий опір, який обмежуватиме струм, у протилежному випадку можуть виникати стрибки струму до $(20-40)I_{\text{н}}$ і відповідно - моменту. Механічні характеристики при даному режимі гальмування знаходяться у IV квадранті у випадку зміни полярності якоря на ходу двигуна при прямому попередньому обертанні (при $\omega_{\text{п}} > 0$), і у II квадранті при попередньому зворотному обертанні (при $\omega_{\text{п}} < 0$). Якщо при кутовій швидкості, що близька до нуля, двигун не відключити від мережі, то він перейде у рушійний режим зворотного обертання (III квадрант).

Динамічне гальмування. Якщо обмотки якоря працюючого шунтового двигуна відключити від мережі і замкнути на зовнішній опір $R_{\text{х}}$ (див. мал. 4.7), то продовжуючи обертатись за інерцією, він посилатиме струм як у коло обмотки збудження так і через опір $R_{\text{х}}$ внаслідок того, що у його обмотках індукуватиметься ЕРС E , величина якої у момент вимикання двигуна близька до величини напруги мережі. При зупинці двигуна ЕРС $E = 0$. Чим менший опір $R_{\text{х}}$, тим більший струм протікає в обмотках якоря і тим сильніша його гальмівна дія. Динамічне гальмування може відбуватись як при незалежному збудженні (мал. 4.7, а), так і при самозбудженні (мал. 4.7, б).

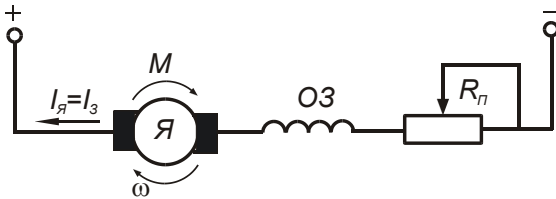


Мал. 4.7 - Електричні схеми динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового): а) – при незалежному збудженні; б) – при самозбудженні;

Механічні характеристики режиму динамічного гальмування шунтового двигуна (див. мал. 4.6) при незалежному збудженні являють собою прямі, що проходять через початок координат і розміщуються у IV квадранті при прямому попередньому обертанні (при $\omega_{\text{п}} > 0$), і у II квадранті при попередньому зворотному обертанні (при $\omega_{\text{п}} < 0$). При самозбудженні внаслідок поступового зниження кутової швидкості у процесі гальмування проходить зниження магнітного потоку $\Phi = \text{var}$. Тому механічні характеристики мають криволінійний характер. Для плавного гальмування силу струму протягом усього періоду зупинки необхідно підтримувати постійною шляхом поступового виведення опору R_x . У малопотужних двигунах обмотка якоря має відносно великий опір, тому для швидкої зупинки допускається замикання обмотки якоря накоротко ($R_x = 0$).

Двигун постійного струму послідовного збудження (серієсний двигун). У даному двигуні обмотка збудження включена послідовно до обмотки якоря (див. мал. 4.8), при цьому оскільки через обмотку збудження даного двигуна протікає струм навантаження, то її виготовляють із відносно невеликої кількості витків проводу великого перетину. Оскільки опір обмоток серієсного двигуна невеликий, то для обмеження пускового струму послідовно до обмотки якоря вводять пусковий реостат $R_{\text{п}}$. Максимальне значення цього опору вибирають за умови щоб початковий пусковий момент був рівним $(2-2,5)M_{\text{н}}$, при розгоні двигуна реостат виводять. Залежність магнітного потоку від сили струму $\Phi(I)$ має

нелінійний характер і її важко виразити аналітично, тому складно привести точний аналітичний вираз механічної характеристики даного двигуна, але для навантаження меншого за 75% від номінального, поки магнітопровід ненасичений, можна вважати, що магнітний потік серієсного двигуна зростає пропорційно до струму якоря $\Phi = k_M I_{Я}$, але оскільки у даному двигуні, $I_{Я} = I_3$ то:



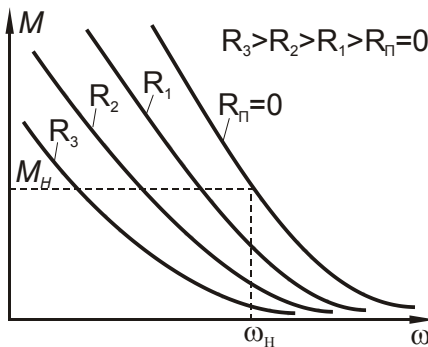
$$M = k_1 I_{Я}^2 = k_2 \Phi^2 .$$

Отже, обертовий момент серієсного двигуна пропорційний квадрату струму якоря. Якщо у вираз механічної характеристики двигунів постійного струму підставити замість магнітного потоку його значення із наведеної вище формули $\Phi = \sqrt{Mk_3}$ і виконати перетворення, то рівняння механічної характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження набуде вигляду:

Мал. 4.8 - Електрична схема двигуна постійного струму послідовного збудження (серієсного двигуна)

Вона має гіперболічний характер із великою крутизною в області малих значень моменту, а в області високих значень моменту, внаслідок насичення магнітної системи двигуна, магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється і залежність близька до лінійної (див. мал. 4.9). Двигуни серієсного типу мають м'яку механічну характеристику і тому при значному зростанні навантаження різко сповільнюються. При цьому інерційні маси приводу віддають на вал двигуна запасену кінетичну енергію, що обмежує кидки струму та потужності, яку споживає двигун із мережі.

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{Mk_3}} - \frac{(R_{Я} + R_{П})}{k_4} .$$



Мал. 4.9 - Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

Двигуни серієсного типу мають м'яку механічну характеристику і тому при значному зростанні навантаження різко сповільнюються. При цьому інерційні маси приводу віддають на вал двигуна запасену кінетичну енергію, що обмежує кидки струму та потужності, яку споживає двигун із мережі.

При малих навантаженнях двигун автоматично збільшує кутову швидкість, забезпечуючи високу продуктивність виконавчого механізму. Але при різкому зниженні навантаження кутова швидкість двигуна різко зростає і двигун іде “вразнос” (при $M \rightarrow 0 \Rightarrow I_{\text{я}} \rightarrow 0 \Rightarrow \Phi \rightarrow 0 \Rightarrow \omega \rightarrow \infty$). Тому його рекомендується включати при навантаженні $M_0 \geq 0,25M_H$, окрім того забороняється з'єднувати серієсний двигун із робочою машиною за допомогою пасової передачі, оскільки при її обриві або при зіскакуванні паса двигун перейде у холостий режим і піде “вразнос”.

Властивість даного двигуна розвивати великий обертовий момент (оскільки двигун має велику перевантажувальну здатність

$$\mu_K = \frac{M_{\text{max}}}{M_H} = (2,5 \div 3) \text{) сприяє його широкому використанню у}$$

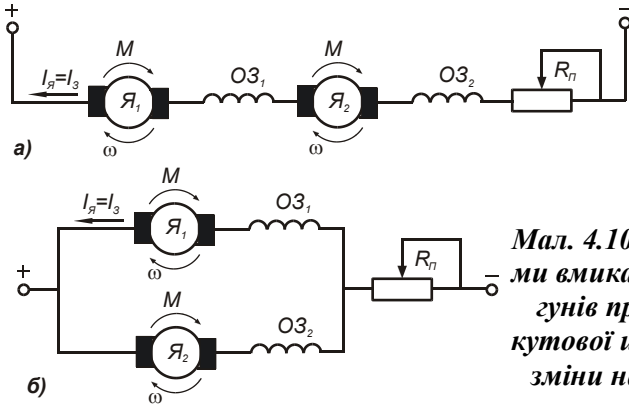
вантажопідіймальних пристроях, у важких металорізальних станках із великими інерційними масами, а також у якості тягових двигунів на транспорті та в інших випадках, коли при роботі машин є часті перевантаження, а рівномірність роботи не має великого значення.

Регулювання кутової швидкості двигунів постійного струму послідовного збудження. З виразу електромеханічної характеристики двигунів постійного струму слідує, що всі способи регулювання кутової швидкості шунтового двигуна можуть бути використані й у серієсному двигуні.

Введення додаткового опору у коло якоря. Даний спосіб регулювання кутової швидкості серієсного двигуна здійснюється так само як і у шунтовому двигуні, та має такі ж переваги та недоліки. Механічні характеристики серієсного двигуна при зміні величини додаткового опору у колі його якоря приведені на мал. 9.

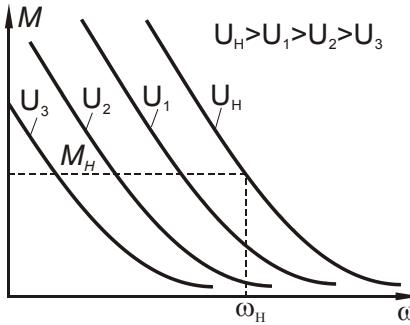
Зміна величини напруги, що підводиться до затискачів якоря двигуна. Для регулювання кутової швидкості серієсних двигунів малої та середньої потужності можна також використовувати регульований випрямляч, у якому напруга постійного струму змінюється за допомогою автотрансформатора, а для керування двигунами великої потужності доцільно використовувати систему “генератор - двигун”.

При спільній роботі декількох однотипних двигунів на один вал кутову швидкість регулюють зміною схеми їх взаємного вклю-



Мал. 4.10 - Електричні схеми вмикання серієсних двигунів при регулюванні їх кутової швидкості шляхом зміни напруги живлення

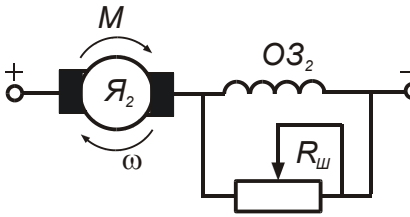
чення (див. мал. 4.10). При послідовному включенні двигунів (див. мал. 4.10 а) напруга на затискачах кожного із них буде вдвічі меншою ніж при паралельному їх вмиканні (див. мал. 4.10 б), внаслідок чого кутова швидкість двигунів зменшується також приблизно вдвічі. Даний метод регулювання кутової швидкості серієсного двигуна значно економічніший від реостатного і використовується в електропотягах, трамваях, ножицях для різання металу та деяких типах електрокарів. При зменшенні величини напруги, що підводиться до затискачів двигуна, його механічні характеристики зміщуються в сторону зменшення кутової швидкості, практично не змінюючи свого нахилу (див. мал. 4.11).



Мал. 4.11 - Механічні характеристики серієсного двигуна при регулюванні його кутової швидкості шляхом зміни напруги живлення

Зміна основного магнітного потоку обмотки збудження. Даний спосіб регулювання у двигуні послідовного збудження можна здійснити двома способами: шунтуванням обмотки збудження за допомогою реостату $R_{ш}$ та секціонуванням обмотки збудження.

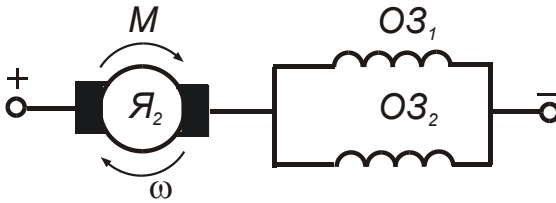
Включення реостату $R_{ш}$ та збільшення його опору (див. мал. 4.12) призводить до зменшення струму збудження $I_3 = I_я - I_{ш}$, а отже до зменшення магнітного потоку та, відповідно, до зростання кутової швидкості.



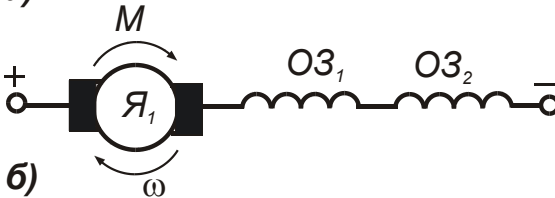
Мал. 4.12 - Електричні схеми вмикання серієсних двигунів при регулюванні їх кутової швидкості шляхом шунтування обмотки збудження

зменшення кутової швидкості. Даний метод регулювання, хоча забезпечує глибоке регулювання кутової швидкості, але він мало-економічний і використовується дуже рідко.

При секціонуванні обмотки збудження, її розбивають на декілька секцій і регулюють кутову швидкість зміною схеми їх взаємного вмикання (див. мал. 4.13). Перемикання секцій обмотки збудження із паралельного з'єднання (мал. 4.13 а) на послідовне (мал. 4.13 б) при постійному струмі у якорі, призводить до збільшення числа ампер-витків цієї обмотки, а отже до зростання магнітного потоку та відповідного



а)



б)

Мал. 4.13 – Електричні схеми вмикання серієсних двигунів при регулюванні їх кутової швидкості шляхом секціонування обмотки збудження

Режими роботи двигунів постійного струму послідовного збудження. Приведеним вище режимом не вичерпуються всі можливості даного двигуна, він, як і шунтовий двигун, може працювати у гальмівних режимах, що дозволяють швидко загальмовувати робочу машину. Гальмування з рекуперацією енергії для даного двигуна неможливе, оскільки неможливо збільшити його зворотну ЕРС E вище від напруги мережі ні шляхом збільшення магнітного потоку, оскільки він залежить від струму якоря, а отже, від навантаження, ні шляхом збільшення кутової швидкості вище

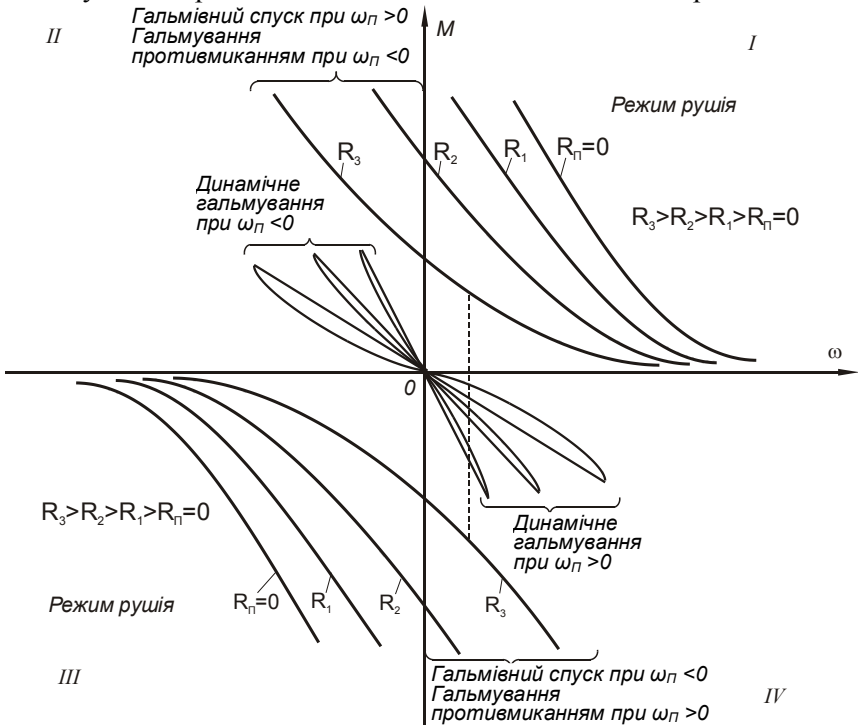
швидкості ідеального холостого ходу ω_0 , оскільки у даного двигуна $\omega_0 \rightarrow \infty$.

Гальмування противмиканням можна здійснити двоюко, як і для шунтового двигуна:

- гальмівний спуск;
- зміною полярності обмотки якоря чи обмотки збудження на ходу двигуна.

На відміну від шунтових двигунів, у серієсних можна змінювати полярність не тільки якоря, але й обмотки збудження (оскільки вона має невелику кількість витків).

Механічні характеристики режиму гальмівного спуску являють собою продовження характеристик рушійних режимів із квадрантів I і III у квадранти II і IV - відповідно (див. мал. 4.14). Гальмування противмиканням за методом зміни полярності обмо-

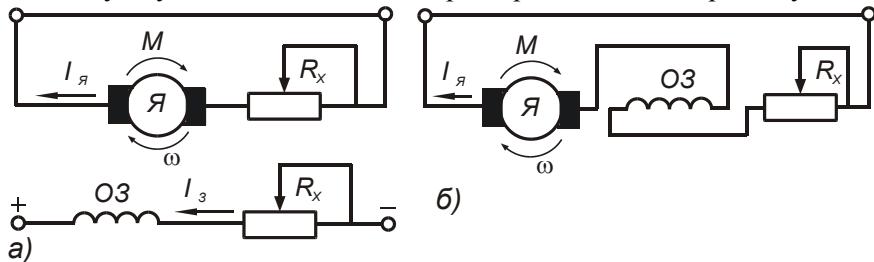


Мал. 4.14 - Гальмівна діаграма двигуна постійного струму послідовного збудження (серієсного)

ток на ходу двигуна отримуються в результаті перевodu двигуна із механічних характеристик рушійного режиму у I квадранті на механічні характеристики гальмування противмиканням у IV квадранті при попередньому прямому обертанні (при $\omega_{\Pi} > 0$) і з механічних характеристик рушійного режиму у III квадранті на механічні характеристики гальмування противмиканням у II квадранті при попередньому зворотному обертанні (при $\omega_{\Pi} < 0$). Для нормалізації роботи двигуна та приводу у гальмівних режимах противмикання, а також для обмеження струму та величини гальмівного моменту, у коло якоря обов'язково вводять регульований опір.

Динамічне гальмування. Для перевodu серісного двигуна у режим динамічного гальмування, його обмотки якоря та збудження відключають від мережі і замикають на опір R_x . Динамічне гальмування може відбуватись як при незалежному збудженні (мал. 4.15, а), так і при самозбудженні (мал. 4.15, б). Щоб запобігти розмагнічуванню, при гальмуванні із самозбудженням необхідно змінити полярність якоря або обмотки збудження.

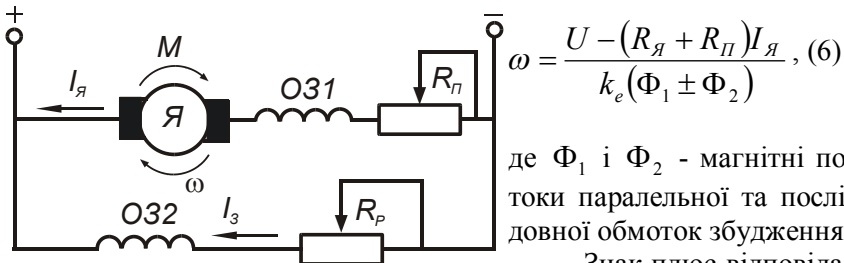
Механічні характеристики режиму динамічного гальмування серісного двигуна при самозбудженні (див. мал. 4.14) мають криволінійну форму і розміщені у IV квадранті при прямому попередньому обертанні (при $\omega_{\Pi} > 0$), і у II квадранті при попередньому зворотному обертанні (при $\omega_{\Pi} < 0$). Вони перетинають осі координат у нульовій точці. При інтенсивному самозбудженні та малому опорі кола якоря може виникати великий гальмівний момент, який є небезпечним для приводу. Тому на практиці частіше використовують динамічне гальмування серісного двигуна при незалежному збудженні. Механічні характеристики цього режиму ди-



Мал. 4.15 - Електричні схеми динамічного гальмування двигуна постійного струму послідовного збудження (серісного): а) – при незалежному збудженні; б) – при самозбудженні

намічного гальмування являють собою прямі, що проходять через початок координат, аналогічно до того, як це було у відповідному режимі гальмування шунтового двигуна, при цьому вони тим жорсткіші, а гальмування швидше чим менший опір кола якоря.

Двигун постійного струму змішаного збудження (компаундний). Двигун змішаного збудження має дві обмотки збудження: послідовну ОЗ1 та паралельну ОЗ2 (див. мал. 4.16.). Формула електромеханічної характеристики має вигляд:



Мал. 4.16 - Електрична схема двигуна постійного струму змішаного збудження (компаундного)

де Φ_1 і Φ_2 - магнітні потоки паралельної та послідовної обмоток збудження.

Знак плюс відповідає узгодженому включенню обмоток збудження (коли їх магнітні потоки напру-

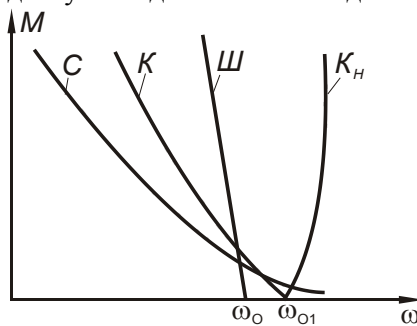
влені в одному напрямку). У цьому випадку із збільшенням навантаження загальний магнітний потік зростає (за рахунок магнітного потоку послідовної обмотки збудження Φ_1), що призводить до зменшення кутової швидкості двигуна. При зустрічному включенні обмоток (коли їх магнітні потоки напрувлені назустріч один одному) магнітний потік Φ_1 із збільшенням навантаження розмагнічує двигун, зменшуючи її сумарний магнітний потік (знак мінус у формулі (6)), що призводить до зростання кутової швидкості. Робота двигуна при цьому стає нестійкою, оскільки із зростанням навантаження кутова швидкість необмежено зростає. Однак при невеликій кількості витків послідовної обмотки, із зростанням навантаження кутова швидкість не зростає і в усьому діапазоні навантаження залишається незмінною.

Виходячи із загального рівняння електромеханічної характеристики двигунів постійного струму, механічна характеристика компаундного двигуна має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k_e(\Phi_2 \pm \Phi_1)} - M \frac{(R_Я + R_П)}{k_M k_e (\Phi_2 \pm \Phi_1)^2}.$$

Оскільки невідома аналітична залежність магнітного потоку від струму якоря, то побудувати механічну характеристику компаундного двигуна за наведеним виразом неможливо. Паралельна обмотка ОЗ2 забезпечує мінімальний магнітний потік, який при зміні навантаження не змінюється і не допускає двигун до розносу. Даний двигун має м'яку механічну характеристику (див. мал. 4.17), великий пусковий момент та велику переважувальну здатність $\mu_k = 2,2 \dots 2,7$, але без небезпечної властивості йти "вразнос". Механічні характеристики компаундного двигуна (крива К на мал. 3.17) займають проміжне положення між характеристиками шунтового (крива Ш на мал. 4.17) та серієсного (крива С на мал. 4.17) двигунів. На мал. 4.17 приведена також механічна характеристика компаундного двигуна при неузгодженому включенні обмоток та великій кількості витків послідовної обмотки (крива K_H).

Кутову швидкість компаундного двигуна можна регулювати такими ж способами, як і шунтового та серієсного. Щоб змінити напрям обертання двигуна, змінюють напрям протікання струму у колі якоря чи в паралельній обмотці збудження. Компаундні двигуни можуть працювати у тих же гальмівних режимах, що і шунтові двигуни. Однак наявність двох обмоток збудження робить двигун



Мал. 4.17 - Механічні характеристики двигунів постійного струму

змішаного збудження дорожчим від шунтових і серієсних двигунів, що дещо обмежує його застосування. Двигуни змішаного збудження застосовують звичайно там, де вимагаються значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, стійка робота і допустиме лиш незначне зменшення кутової швидкості при збільшенні навантаження (прокатні стани, підймальні механізми, насоси, компресори).

ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ, АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ:

1. Ознайомитись із лабораторним стендом та записати в табл. 4.1 паспортні дані досліджуваного електродвигуна.

Таблиця 4.1

Паспортні дані досліджуваного електродвигуна

Тип двигуна	P_H	U_H	I_H	ККД	n_H	Режим роботи	Клас ізоляції	Вага
	кВт	В	А	%	об/хв			Кг

- Зібрати електричну схему стенду (мал. 4.18).
- При заданому навантаженні зняти регульовану характеристику двигуна шляхом регулювання:
 - струму збудження I_3 при напрузі, рівній номінальній ($U = U_H$). Запустити двигун вхолосту. Результати записати у табл. 4.2. За отриманими результатами побудувати залежність $n = f(I_3)$;

Таблиця 4.2

Протокол дослідження регульовальної характеристики електродвигуна при регулюванні струму збудження

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	А										
I_3	А										
n	об/хв										

- напруги на якорі U при струмі збудження, рівному номінальному ($I_3 = I_{3H}$). Результати записати у табл. 4.3. За отриманими результатами побудувати залежність $n = f(U)$.

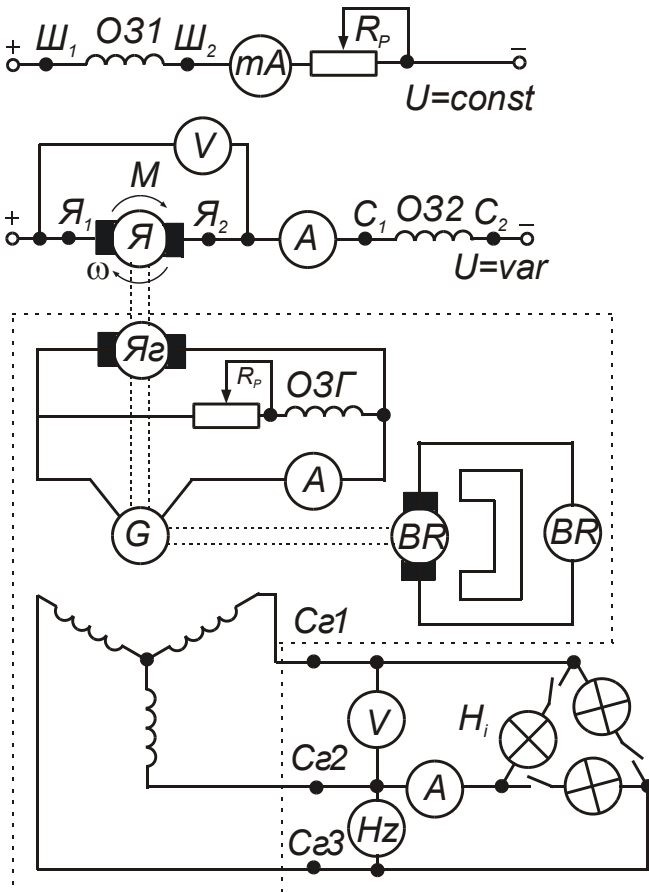
Таблиця 4.3

Протокол дослідження регульовальної характеристики електродвигуна при регулюванні напруги

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	А										
U	В										
n	об/хв										

- Дослідити швидкісну характеристику при узгодженому включенні обмоток збудження двигуна і постійних напрузі якоря ($U = U_H$) та струмі збудження ($I = I_3$). Навантаження двигуна змінювати шляхом зміни навантаження (кількості під'єднаних електролампочок) механічно з'єданого із ним синхронного генератора. Результати дослідів записати у табл. 4.4. За отриманими результатами побудувати залежність $n = f(P)$.
- Дослідити швидкісну характеристику двигуна при зустрічному включенні його обмоток збудження, аналогічно до п. 4 із записом результатів у таблицю 4.5 і побудовою залежності $n = f(P)$ на

одному із п. 4 малюнку.



Мал. 4.18 – Електрична схема лабораторного стенду (обведене пунктирною лінією – зібране на стенді)

Таблиця 4.4

Протокол дослідження швидкісної характеристики електродвигуна при узгодженому включенні обмоток

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	А									
n	об/хв									
P	кВт									

**Протокол дослідження швидкісної характеристики
електродвигуна при не узгодженому включенні обмоток**

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>I</i>	А										
<i>n</i>	об/хв										
<i>P</i>	кВт										

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ:

1. Що таке електромеханічна характеристика двигуна постійного струму і які величини до неї входять?
2. Що таке перевантажувальна здатність та жорсткість механічної характеристики електродвигуна?
3. Які особливості роботи двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового)?
4. Якими способами можна регулювати кутову швидкість двигуна постійного струму паралельного збудження (шунтового), в чому їх переваги та недоліки?
5. У яких гальмівних режимах може працювати двигун постійного струму паралельного збудження (шунтовий), і як його перевести у ці режими?
6. Які особливості роботи двигуна постійного струму послідовного збудження (серієсного)?
7. Якими способами можна регулювати кутову швидкість двигуна постійного струму послідовного збудження (серієсного), в чому їх переваги та недоліки?
8. У яких гальмівних режимах може працювати двигун постійного струму послідовного збудження (серієсний), і як його перевести у ці режими?
9. Які особливості роботи двигуна постійного струму змішаного збудження (компаундного)?
10. Якими способами можна регулювати кутову швидкість двигуна постійного струму змішаного збудження (компаундного), в чому їх переваги та недоліки?
11. У яких гальмівних режимах може працювати двигун постійного струму змішаного збудження (компаундний), і як його перевести у ці режими?
12. Що таке узгоджене чи неузгоджене включення обмоток компаундного двигуна і як це можна виявити при запуску двигуна?

ПРОГРАМА ПОЗААУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ
ПІДГОТОВКИ:

№ з/п	Вид підготовки	Час, год
1	За рекомендованою літературою вивчити будову та принцип роботи електродвигунів постійного струму	2
2	Вивчити можливі методи регулювання кутової швидкості двигунів постійного струму, їх переваги та недоліки, а також можливі гальмівні режими цих двигунів	2
3	Підготувати робочий зошит для виконання лабораторної роботи, у який записати: - назву та мету роботи; - короткі теоретичні пояснення (конспективно) із необхідними для розрахунків формулами; - порядок проведення експерименту; - таблиці 4.1 – 4.5; - електричну схему лабораторного стенда (мал. 4.18)	1

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Практикум з електропривода / В. С. Олійник, О. С. Марченко, Е. Л. Жулай та ін. - К.: Урожай, 1995. - 192 с. (С. 16 - 28);
2. Електропривод / О. С. Марченко, Ю. М. Лавриненко, П. І. Савченко, Е. Л. Жулай. - К.: Урожай, 1995. – 208 с. (С. 11 - 36);
3. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. - М.: Высшая школа, 1985. – 192 с. (С. 77-101);
4. Мякишев Н. Ф. Электропривод, электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных и установок. - М.: Агропромиздат, 1986. – 176 с. (С. 18 – 26, 41-43).

Навчальне видання

Ярошенко Леонід Вікторович

Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів спеціальності: 6.091902 – “механізація сільського господарства”: В 5 ч. – Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2002. - Ч. 2.: Двигуни постійного струму. – 26 с.

Підписано до друку

Умовн. друк. арк. Формат А5 (148,5 x 210 мм).

Наклад 200 прим.

Зам. №

Обчислювальний центр
Вінницького державного аграрного університету
21008, Вінницький р-н, с. Агрономічне, вул. Сонячна, 3.