

**Колісник М.А.**

асистент

Штуць А.А.

асистент

*Вінницький національний
аграрний університет***Kolisnyk M.**

assistant

Shtuts A.

assistant

*Vinnitsya National Agrarian
University***УДК 519.688.8****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-11****МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ
ЗБУДЖЕННЯ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНИХ
МАШИН**

Дана робота присвячена розробці та аналізу математичної моделі двигуна постійного струму з різними типами збудження для вібраційних машин. Вібраційні машини відіграють важливу роль у багатьох промислових сферах, а їх робочі характеристики визначаються ефективністю та точністю роботи двигуна.

У роботі ми досліджуємо різні типи збудження для двигуна постійного струму та розвиваємо відповідні математичні моделі. Використовуючи принципи теорії керування та теорії кількісної електроніки, ми враховуємо вплив різних параметрів збудження на динаміку роботи двигуна.

Отримані результати можуть бути корисні для розробки нових гібридних систем збудження для вібраційних машин, які можуть працювати в різних режимах залежно від вимог конкретних додаткових умов. Додатково, проведено аналіз та розроблено математичну модель може служити основою для подальших досліджень у сфері оптимізації роботи вібраційних систем з використанням двигунів постійного струму.

Аналізуючи отримані результати, ми порівнюємо ефективність різних типів збудження і їх вплив на робочі характеристики вібраційних машин. Додатково, ми досліджуємо можливості зменшення споживаної потужності та підвищення точності регулювання швидкості обертання двигуна. Особлива увага приділяється аналізу стійкості системи при різних умовах роботи та зміні параметрів.

Результати наших досліджень можуть мати важливе практичне застосування у розробці та вдосконаленні вібраційних машин для промислових, технічних та наукових цілей. Вони сприяють розумінню впливу різних факторів на роботу двигуна постійного струму з різними типами збудження, що може допомогти інженерам і конструкторам покращити ефективність та надійність вібраційних систем.

Узагальнюючи, ця дослідницька робота спрямована на розробку та аналіз математичної моделі для двигуна постійного струму з різними типами збудження, з врахуванням їх впливу на робочі характеристики вібраційних машин. Вона вносить важливий вклад у розуміння та оптимізацію процесів роботи таких систем, що може мати значущий вплив на розвиток сучасної технології в області вібраційних систем та їхніх застосувань.

Ключові слова: математичне моделювання, двигун постійного струму, типи збудження, вібраційні машини, операційні характеристики, теорія керування, кількісна електроніка.

Постановка проблеми. Створення різними типами збудження для вібраційних математичної моделі двигуна постійного струму з машин може бути складним завданням, але для



вирішення задач потрібно розглянути наступні наведені загальний підходи:

1. Визначення параметрів двигуна: Визначили основні параметри двигуна, такі як опір обмотки, індуктивність, константа електромагнітного намагнічення та інші параметри.

2. Опис збудження: Вибрали тип збудження для двигуна. Це може бути постійне збудження (магнітне поле створюється постійними магнітами), відмінне від нуля струмом збудження (намагнічування відбувається за допомогою струму через обмотку) або комбінація різних видів збудження.

3. Написання системи рівнянь: Сформулювали систему диференціальних рівнянь, яка описуватиме динаміку двигуна та взаємодію з вібраційною системою. Ця система рівнянь повинна враховувати електромагнітний процес в двигуні та механічні характеристики вібраційної системи.

4. Розглянули динамічні властивості: які включають моделі параметри, що описують динамічні властивості двигуна та вібраційної системи. Це можуть бути момент інерції ротора, жорсткість та амортизація вібраційної системи тощо.

5. Врахування взаємодії: модель взаємодії між електромагнітним полем двигуна та механічними властивостями вібраційної системи. Ця взаємодія може включати вібраційний зазор, зв'язок між електричним струмом і моментом обертання тощо.

6. Розв'язання системи рівнянь: систему диференціальних рівнянь числовими методами або аналітично, якщо це можливо. Отримали рішення, яке описує динаміку двигуна та вібраційної системи відносно часу.

7. Аналіз результатів: Проаналізували отримані результати для різних типів збудження та параметрів. Оцінку вплив збудження на роботу двигуна і вібраційну систему, визначте режими стабільності та можливі резонанси.

Аналіз останніх досліджень.

Математична модель розробляється з метою дослідження електромеханічних процесів, які протікають у двигуні вібраційних машин, шляхом моделювання.

Для розроблення математичної моделі потрібно знати схему електричну принципову, після чого потрібно відповідно до неї розробити схему заміщення.

Електрична принципова схема [8] двигуна постійного струму послідовного збудження вібраційних машин зображена на рисунку 1, на якому приведені такі позначення: М – двигун постійного струму; ОДП – обмотка додаткових полюсів; QF₁ – автоматичний вимикач; СО₃ – серієсна обмотка збудження; U_m – напруга мережі; PA₁ – амперметр; PV₁ – вольтметр; I_a –

струм якоря;
A₁-A₂ – позначення обмотки якоря;
Д₁-Д₂ – позначення обмотки додаткових полюсів.

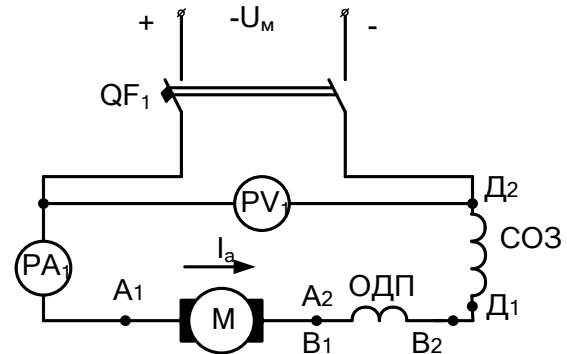


Рис. 1. Схема електрична принципова двигуна постійного струму послідовного збудження

Схема заміщення двигуна постійного струму послідовного збудження зображена на рисунку 2, на якому приведені такі позначення: R_д - додатковий опір; R_{дп} - опір додаткових полюсів; R_{ко} - опір компенсаційної обмотки; R_я - опір якоря; R_{др} - опір дроселя; L_{др} - індуктивність дроселя; L_я - індуктивність якоря; U_я - напруга якоря; E_я - електрорушійна сила якоря.

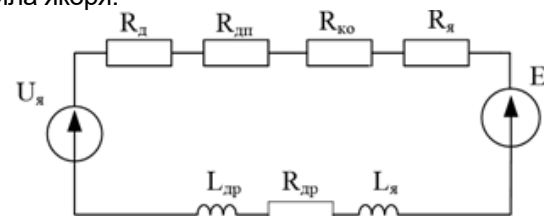


Рис. 2. Схема заміщення двигуна постійного струму послідовного збудження

Відповідно до даної схеми запишемо рівняння, які описують електромагнітні процеси, які протікають у ній.

За другим законом Кірхгофа запишемо:

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

де U – напруга якоря;

E_a – електрорушійна сила якоря;

I – струм якоря;

R_Σ – сумарний опір;

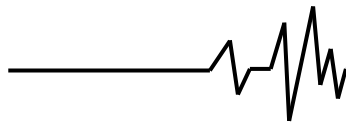
L_Σ – сумарна індуктивність;

Проведемо перетворення Лапласа, тобто

здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$ на комплексну складову p:

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \cdot I \cdot p. \quad (2)$$

Знаходимо сумарний опір двигуна:



$$R_{\Sigma} = R_{я} + R_{дп} + R_{сер}, \quad (3)$$

де $R_{я}$ – опір якоря;

$R_{сер}$ – опір серієсної обмотки;

$R_{дп}$ – опір обмотки додаткових полюсів.

Знаходимо сумарну індуктивність:

$$L_{\Sigma} = L_{др} + L_{я}, \quad (4)$$

де $L_{я}$ – індуктивність якоря;

$L_{др}$ – індуктивність дроселя.

Знаходимо електромагнітну сталу якоря:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Знаходимо струм якоря з рівняння 1.1 при подальших підстановках рівнянь 2 – 4:

$$I = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_e p + 1)} \cdot (U - E_a). \quad (6)$$

Знайдемо відносне значення магнітного потоку через формулу кривої намагнічування:

$$kf^*(I_a) = B_1 + B_2 \cdot I_a^* + B_3 \cdot I_a^{*2} + B_4 \cdot I_a^{*3} + B_5 \cdot I_a^{*4}, \quad (7)$$

де $B_1 - B_5$ – коефіцієнти апроксимації, підбираються експериментально;

I_a^* – відносне значення струму якоря.

Знаходимо відносне значення струму якоря:

$$I_a^* = \frac{i_a}{I_{a.ном}}, \quad (8)$$

де i_a – миттєве значення струму якоря;

$I_{a.ном}$ – номінальне значення струму якоря.

Запишемо номінальне значення магнітного потоку:

$$kF_{ном} = \frac{kf}{kf^*}, \quad (9)$$

де kf – миттєве значення магнітного потоку; kf^* – відносне значення магнітного потоку.

Запишемо основне рівняння руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (10)$$

де J – передаточне число редуктора;

M – момент двигуна;

M_c – момент статичного навантаження.

Проведемо перетворення Лапласа, тобто

здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$ на комплексну складову p :

$$J \cdot \omega \cdot p = M - M_c. \quad (11)$$

Виражаємо із рівняння 1.7 швидкість:

$$\omega_H = \frac{1}{Jp} (M - M_c). \quad (12)$$

Знаходимо електрорушійну силу:

$$E_a = \omega \cdot kf(i_a), \quad (13)$$

де $kf(i_a)$ – магнітний потік.

Знаходимо статичний момент двигуна:

$$M_c = I_H \cdot kf(i_a). \quad (14)$$

Система рівнянь (6), (12), (13), (14) є математичною моделлю двигуна постійного струму послідовного збудження.

Мета роботи. ета роботи полягає у розробці та дослідженні математичних моделей роботи двигуна постійного струму з різними типами збудження з метою подальшого використання цих моделей для оптимізації та покращення роботи вібраційних машин.

Виклад основного матеріалу.

Математична модель розробляється з метою дослідження електромеханічних процесів, які протікають у двигуні, шляхом комп'ютерного моделювання. Для розроблення математичної моделі потрібно знати схему електричну принципову, після чого потрібно відповідно до неї розробити схему заміщення.

Електрична принципова схема [8] двигуна постійного струму паралельного збудження зображена на рисунку 3, на якому приведені такі позначення: M – двигун постійного струму; $ОДП$ – обмотка додаткових полюсів; QF_1 – автоматичний вимикач; $ШОЗ$ – шунтова обмотка збудження; U_m – напруга мережі; $PA_1 - PA_2$ – амперметр; PV_1 – вольтметр; I_a – струм якоря; $A_1 - A_2$ – позначення обмотки якоря; $E_1 - E_2$ – позначення обмотки додаткових полюсів.

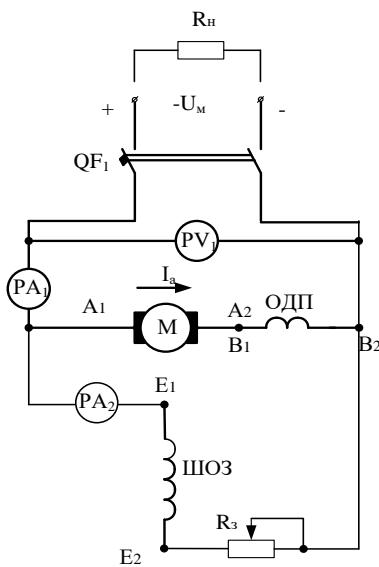
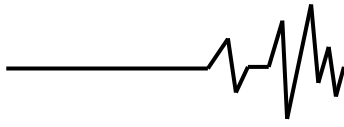


Рис. 3. Схема електрична принципова двигуна постійного струму паралельного збудження

Схема заміщення двигуна постійного струму послідовного збудження зображена на рисунку 4, на якому приведені такі позначення: R_d - додатковий опір; $R_{дп}$ - опір додаткових полюсів; $R_{ко}$ - опір компенсаційної обмотки; $R_я$ - опір якоря; $U_я$ - напруга якоря; E - електрорушійна сила якоря.

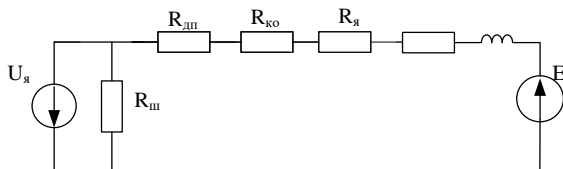


Рис. 4. Схема заміщення двигуна постійного струму паралельного збудження

Відповідно до даної схеми запишемо рівняння, які описують електромагнітні процеси, які протікають у ній.

За другим законом Кірхгофа запишемо:

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt}, \quad (15)$$

де U - напруга якоря;

E_a - електрорушійна сила якоря;

I - струм якоря;

R_{Σ} - сумарний опір;

L_{Σ} - сумарна індуктивність;

Проведемо перетворення Лапласа,

тобто здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$ на комплексну

складову p :

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_a \cdot I \cdot p. \quad (16)$$

Знаходимо сумарний опір двигуна:

$$R_{\Sigma} = R_я + R_{дп} + R_{ш}, \quad (17)$$

де $R_я$ - опір якоря;

$R_{сер}$ - опір серієсної обмотки;

$R_{дп}$ - опір обмотки додаткових полюсів.

Знаходимо електромагнітну сталу якоря:

$$T_c = \frac{L_a}{R_{\Sigma}}. \quad (18)$$

Знаходимо струм якоря з рівняння 1 при подальших підстановках рівнянь 2 - 4:

$$I = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_c p + 1)} \cdot (U - E_a). \quad (19)$$

Запишемо номінальне значення магнітного потоку:

$$kF_{ном} = \frac{U - IR_я}{\omega}, \quad (20)$$

Запишемо основне рівняння руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (21)$$

де J - передаточне число редуктора;

M - момент двигуна;

M_c - момент статичного навантаження.

Проведемо перетворення Лапласа,

тобто здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$ на комплексну

складову p :

$$J \cdot \omega \cdot p = M - M_c. \quad (22)$$

Виражаємо із рівняння 7 швидкість:

$$\omega_H = \frac{1}{Jp} (M - M_c). \quad (23)$$

Знаходимо електрорушійну силу:

$$E_a = \omega \cdot kF_{ном}, \quad (24)$$

де $kf(i_a)$ - магнітний потік.

Знаходимо статичний момент двигуна:

$$M_c = I_H \cdot kF_{ном}. \quad (25)$$

Система рівнянь (19), (23), (24), (25) є математичною моделлю двигуна постійного струму послідовного збудження.

Структурна схема, яка описує математичну модель двигуна постійного струму послідовного збудження, зображена на рисунку 5:

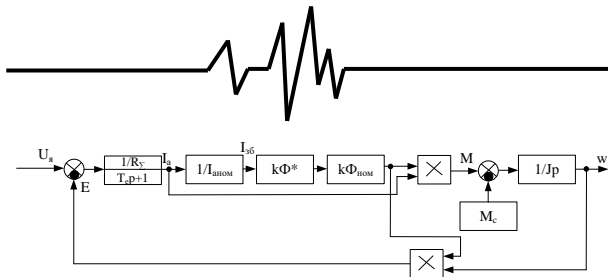


Рис. 5. Структурна схема двигуна постійного струму послідовного збудження

На вхід даної структурної схеми подається напруга якоря $U_{я}$. Далі від неї віднімаємо E і шляхом множення на сумарний опір

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_p + 1)}$$

знаходимо миттєве значення струму якоря I_a . Для того щоб знайти струм збудження $I_{об}$, ми ділимо миттєве значення струму якоря I_a на номінальний струм якоря. Далі для того щоб знайти миттєве значення магнітного потоку $k\Phi$, множимо відносно значення магнітного потоку $k\Phi^*$ на номінальний магнітний потік $k\Phi_{ном}$ і таким чином знаходимо миттєве значення моменту. Далі відповідно до рівняння (12) різницю миттєвого значення моменту і моменту статичного, множимо на обернене значення передаточного числа редуктора. На виході даної структурної схеми будемо мати номінальну швидкість обертання двигуна ω .

Структурна схема, яка описує математичну модель двигуна постійного струму паралельного збудження, зображена на рисунку 6:

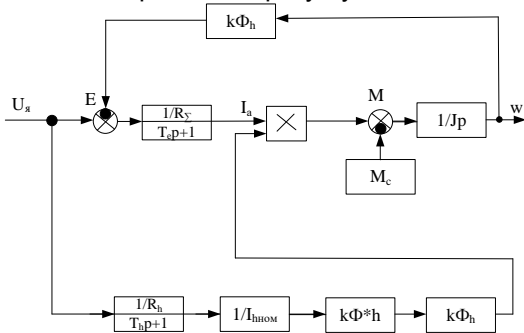


Рис. 6. Структурна схема двигуна постійного струму паралельного збудження

На вхід даної структурної схеми подається напруга якоря $U_{я}$. Далі від неї віднімаємо E і шляхом множення на сумарний опір

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_p + 1)}$$

знаходимо значення струму якоря I_a . Далі для того щоб знайти значення моменту, струм якоря I_a множимо на номінальний магнітний потік $k\Phi_{ном}$ і таким чином знаходимо значення моменту. Далі різницю миттєвого значення моменту і моменту статичного, множимо на обернене значення передаточного числа редуктора. На виході даної структурної схеми

будемо мати номінальну швидкість обертання двигуна ω .

Електрична принципова схема [8] двигуна постійного струму незалежного збудження зображена на рисунку 7, на якому приведені такі позначення: M – двигун постійного струму; $ОДП$ – обмотка додаткових полюсів; QF_1 – автоматичний вимикач; $НОЗ$ – незалежна обмотка збудження; U_m – напруга мережі; $PA_1 - PA_2$ – амперметр; PV_1 – вольтметр; I_a – струм якоря; $A_1 - A_2$ – позначення обмотки якоря; $E_1 - E_2$ – позначення обмотки додаткових полюсів.

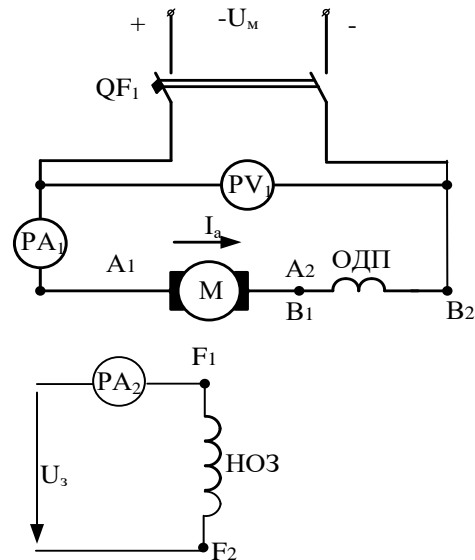


Рис. 7. Схема електрична принципова двигуна постійного струму паралельного збудження

Схема заміщення двигуна постійного струму незалежного збудження зображена на рисунку 8:

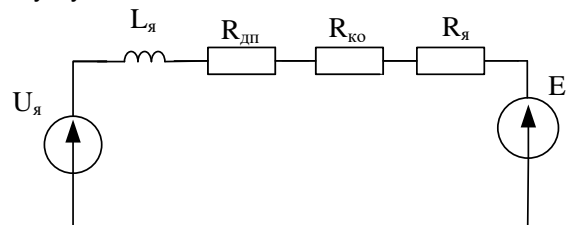


Рис. 8. Схема електрична принципова двигуна постійного струму паралельного збудження

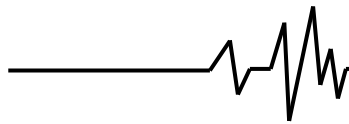
Відповідно до даної схеми запишемо рівняння, які описують електромагнітні процеси, які протікають у ній.

За другим законом Кірхгофа запишемо:

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt}, \quad (26)$$

де U – напруга якоря;

E_a – електрорушійна сила якоря;



I – струм якоря;

R_{Σ} – сумарний опір;

L_{Σ} – сумарна індуктивність;

Проведемо перетворення Лапласа, тобто

здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$ на комплексну складову p :

$$U = E_a + IR_{\Sigma} + L_a \cdot I \cdot p. \quad (27)$$

Знаходимо сумарний опір двигуна:

$$R_{\Sigma} = R_{я} + R_{дп} + R_{ко}, \quad (28)$$

де $R_{я}$ – опір якоря;

$R_{сер}$ – опір серієсної обмотки;

$R_{дп}$ – опір обмотки додаткових полюсів.

Знаходимо електромагнітну сталу якоря:

$$T_c = \frac{L_a}{R_{\Sigma}}. \quad (29)$$

Знаходимо струм якоря з рівняння 1 при подальших підстановках рівнянь 2 – 4:

$$I = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_c p + 1)} \cdot (U - E_a). \quad (30)$$

Запишемо номінальне значення магнітного потоку:

$$kF_{ном} = \frac{U - IR_{я}}{\omega}, \quad (31)$$

Запишемо основне рівняння руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (32)$$

де J – передаточне число редуктора;

M – момент двигуна;

M_c – момент статичного навантаження.

Проведемо перетворення Лапласа, тобто

здійснимо заміну $\frac{d\omega}{dt}$

на комплексну складову p :

$$J \cdot \omega \cdot p = M - M_c. \quad (33)$$

Виражаємо із рівняння 7 швидкість:

$$\omega_n = \frac{1}{Jp} (M - M_c). \quad (34)$$

Знаходимо електрорушійну силу:

$$E_a = \omega \cdot kF_{ном}, \quad (35)$$

де $kf(i_a)$ – магнітний потік.

Знаходимо статичний момент двигуна:

$$M_c = I_n \cdot kF_{ном}. \quad (36)$$

Система рівнянь (30), (34), (35), (36) є математичною моделлю двигуна постійного струму послідовного збудження.

Структурна схема, яка описує математичну модель двигуна постійного струму незалежного збудження, зображена на рисунку 9:

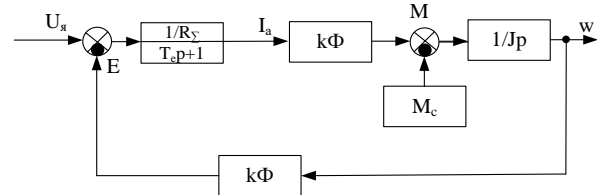


Рис. 9. Схема електрична принципова двигуна постійного струму паралельного збудження

На вхід даної структурної схеми подається напруга якоря $U_{я}$. Далі від неї віднімаємо E і шляхом множення на сумарний опір

$\frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{1}{(T_c p + 1)}$ знаходимо значення струму якоря I_a . Далі для того щоб знайти значення моменту, струм якоря I_a множимо на номінальний магнітний потік $k\Phi_{ном}$ і таким чином знаходимо значення моменту.

Далі різницю миттєвого значення моменту і моменту статичного, множимо на обернене значення передаточного числа редуктора. На виході даної структурної схеми будемо мати номінальну швидкість обертання двигуна ω .

Для того щоб виконати поставлені задачі потрібно виконати такі умови:

1. Ознайомитись з конструкцією досліджуваного двигуна, записати його номінальні характеристики.

Номінальні величини двигуна і генератора зображені у таблицях 1 і 2.

Таблиця 1. Параметри двигуна постійного струму паралельного збудження: ПБСТ-42У4;

Параметри	Значення
Номінальна потужність, $P_{ном}$, кВт	2,7
Номінальна напруга, $U_{ном}$, В	220
Номінальна швидкість обертання, $n_{ном}$, об/хв	3600
Номінальний струм якоря, $I_{ном}$, А	17,5
Коефіцієнт корисної дії, $\eta_{ном}$, %	0,7
Момент інерції двигуна, J	1
Номінальний струм збудження, $I_{з,ном}$, А	0,27



Таблиця 2. Параметри генератора постійного струму ГАБ-2-Т/230-М1:

Параметри	Значення
Номінальна потужність, P _{ном} , кВт	2
Номінальна напруга, U _{ном} , В	230
Номінальна швидкість обертання, n _{ном} , об/хв	3000
Номінальний струм якоря, I _{ном} , А	6,3

Схема дослідної установки зображена на рисунку 10.

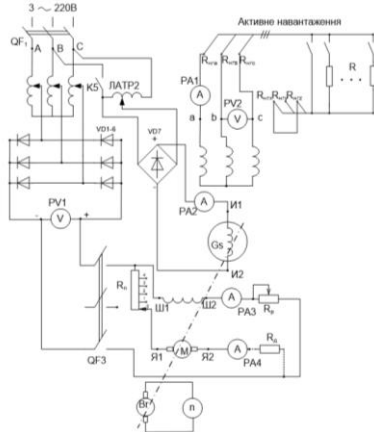


Рис. 10. Схема дослідної установки дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження

Дослідним шляхом одержуємо робочі характеристики двигуна:

- А) при U=U_{ном}; I_в=I_{вном}; R_д=0
- Б) при U=U_{ном}; I_в=I_{вмін}; R_д=0
- В) при U=U_{ном}; I_в=I_{вном}; R_д=пост.

Виходячи з експериментальних даних проведено відповідні розрахунки для побудови робочих та механічних характеристик двигуна.

Дослід №1

Розрахунок для другої точки. Решта розрахунків для даного досліді проводиться

Таблиця 3. Результати розрахунку дослід №1

№	Дослідна величина						Розрахункова величина						Прим.
	U,В	I _a ,А	I _з ,А	U _г ,В	I _г ,А	n,об/хв	P ₁ ,Вт	P _г ,Вт	η,в.о.	P ₂ ,Вт	ω,рад/с	M,Нм	
1	220	4,5	0,27	220	1,1	3400	1049	418	0,63	660	314	0,83	U=U _{ном} ; I _з =I _{з.ном} ; R _д =0
2	220	6,5	0,27	200	2,1	3400	1489	726	0,69	1027	314	3,27	
3	220	7,5	0,27	180	3	3400	1709	934	0,73	1247	314	3,97	
4	220	8	0,27	145	4	3400	1819	1003	0,74	1346	314	4,28	
5	220	8,2	0,27	140	4,9	3400	1863	1186	0,79	1495	314	4,76	
6	220	8,7	0,27	125	5,7	3400	1973	1233	0,79	1558	314	4,96	

Дослід №2

Розрахунок для другої точки. Решта розрахунків для даного досліді проводиться аналогічно, тому їх результати будуть приведені в таблиці. нижче.

аналогічно, тому їх результати будуть приведені в таблиці. нижче.

Знаходимо потужність двигуна:

$$P_1 = U \cdot (I_a + I_z), \quad (37)$$

$$P_1 = 220 \cdot (6.5 + 0.27) = 1489.4 \text{ (кВт)}.$$

Знаходимо потужність генератора:

$$P_g = \sqrt{3} \cdot U_g \cdot I_g, \quad (38)$$

$$P_g = \sqrt{3} \cdot 200 \cdot 2.1 = 736.6 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_g}{P_1}}, \quad (38)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{736.6}{1489.4}} = 0.69,$$

Знаходимо потужність P₂:

$$P_2 = \eta \cdot P_1, \quad (39)$$

$$P_2 = 0.69 \cdot 1489.4 = 1027 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо швидкість:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (40)$$

$$\omega = \frac{3.14 \cdot 3400}{30} = 314 \text{ (рад/с)}.$$

Знаходимо момент:

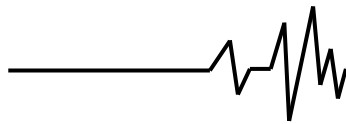
$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \quad (41)$$

$$M_2 = \frac{1027}{314} = 3.27 \text{ (Н·м)}$$

Результати розрахунків досліді №1 занесені у таблицю 3.

Знаходимо потужність двигуна:

$$P_1 = U \cdot (I_a + I_z), \quad (42)$$



$$P_1 = 220 \cdot (6.1 + 0.25) = 1397 \text{ (кВт)}.$$

Знаходимо потужність генератора:

$$P_r = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_r, \quad (43)$$

$$P_r = \sqrt{3} \cdot 195 \cdot 2 = 674 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_r}{P_1}}, \quad (44)$$

$$P_2 = \eta \cdot P_1, \quad (45)$$

$$P_2 = 0.69 \cdot 1397 = 963 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо швидкість:

$$\eta = \sqrt{\frac{674}{1397}} = 0.69,$$

Знаходимо потужність P_2 :

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (46)$$

$$\omega = \frac{3.14 \cdot 3950}{30} = 396 \text{ (рад/с)}.$$

Знаходимо момент:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \quad (47)$$

$$M_2 = \frac{963}{339} = 2.43 \text{ (Н·м)}$$

Результати розрахунку занесемо до таблиці 4.

Таблиця 4. Результати експерименту і розрахунку досліду №2

№	U, В	I _a , А	I _з , А	U _r , В	I _r , А	n, об/х в	P ₁ , В Т	P _r , В Т	η, в.о	P ₂ , В Т	ω, рад/ с	M, Н* м	Прим.
1	220	4,8	0,25	218	1,05	3600	1111	396	0,57	633	396	1,59	U=U _{ном} ; I _з =I _{з.мін} ; R _δ =0
2	220	6,1	0,25	195	2	3600	1397	674	0,69	963	396	2,43	
3	220	6,9	0,25	170	2,8	3600	1573	823	0,72	1132	396	2,85	
4	220	7	0,25	150	3,2	3600	1595	830	0,72	1150	396	2,9	
5	220	6,8	0,25	130	3,6	3600	1551	810	0,72	1119	396	2,8	
6	220	6,5	0,25	115	3,8	3600	1485	756	0,71	1054	396	2,66	

Дослід №3

Проведемо розрахунки для другої точки. Решта розрахунків для даного досліді проводиться аналогічно, тому їх результати будуть приведені в таблиці. нижче.

Знаходимо потужність двигуна:

$$P_1 = U \cdot (I_a + I_z), \quad (48)$$

$$P_1 = 220 \cdot (6 + 0.29) = 1383 \text{ (кВт)}.$$

Знаходимо потужність генератора:

$$P_r = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_r \quad (49)$$

$$P_r = \sqrt{3} \cdot 180 \cdot 2 = 622 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_r}{P_1}}, \quad (50)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{622}{1383}} = 0.67,$$

Знаходимо потужність P_2 :

$$P_2 = \eta \cdot P_1, \quad (51)$$

$$P_2 = 0.67 \cdot 1383 = 926 \text{ (Вт)}.$$

Знаходимо швидкість:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (52)$$

$$\omega = \frac{3.14 \cdot 2800}{30} = 293 \text{ (рад/с)}.$$

Знаходимо момент:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \quad (53)$$

$$M_2 = \frac{926}{293} = 3.16 \text{ (Н·м)}$$

Результати розрахунку занесемо до таблиці 5.



Таблиця 5. Результати експерименту і розрахунку досліду №3

№	U,В	Ia,A	Iз,A	Uг,В	Iг,A	n,об/хв	P1,Вт	Pг,Вт	η,в.о.	P2,Вт	ω,рад/с	M,Н*м	Прим.
1	220	4,2	0,29	200	1	3000	987	380	0,62	606	314	1,92	U=Un; Iз=Iз.; Rδ=const
2	220	6	0,29	180	2	2800	1383	622	0,67	926	293	3,16	
3	220	7	0,29	160	2,6	2750	1603	719	0,669	1120	286	3,91	
4	220	7,2	0,29	150	3,3	2680	1647	856	0,72	1185	278	4,26	
5	220	7,5	0,29	135	3,6	2650	1713	840	0,7	1199	275	4,36	
6	220	7,3	0,29	120	4	2630	1669	830	0,7	1168	273	4,27	

За даними досліду №1 в одних координатних осях побудувати робочі характеристики двигуна n, Ia, P1, M2, η=f(P2).

За результатами отриманими в результаті розрахунків і експериментів побудуємо робочі характеристики двигуна n, Ia, P1, M2, η = f(P2) в одних координатних осях.

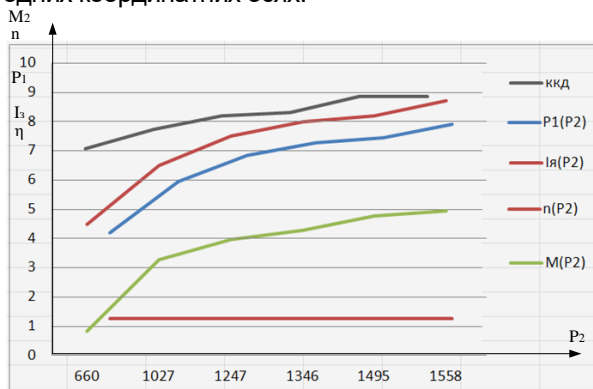


Рис. 11. Робочі характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням

1. За даними дослідів №1, №2, зв побудувати в одних координатних осях механічні характеристики n=f(M).

За результатами отриманими в результаті розрахунків і експериментів в дослідях №1, №2, №3 побудуємо механічні характеристики двигуна n = f(M) в одних координатних осях:

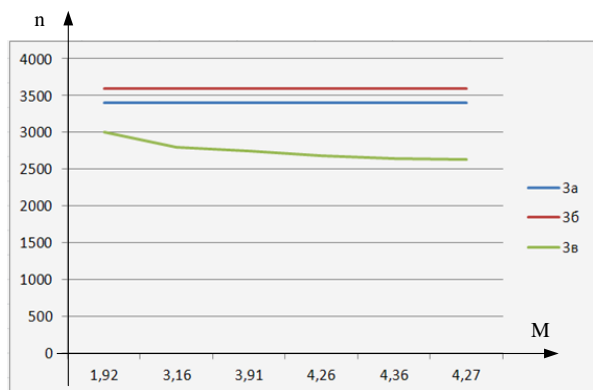


Рис. 12. Механічні характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням

2. Дослідним шляхом зняти регульовальну характеристику двигуна w=f(Iв) в режимі холостого ходу (Mc=0).

Результати розрахунку регульовальної характеристик занесені у таблицю 6.

Таблиця 6. Результатами регульовальної характеристики двигуна.

Показник	Значення у експериментальній точці						Примітка
	1	2	3	4	5	6	
Iз, А	0,3	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	Mc = 0
Ia, А	1,8	2	2,1	2,2	2,3	2,4	
n, об/хв	3400	3400	3440	3450	3530	3600	
ω, рад/с	355	355	360	361	369	376	

3. За даними досліду 6 побудувати регульовальну характеристику ω=f(Iв).

Проведемо розрахунки для другої точки. Решта розрахунків для даного досліду

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

проводиться аналогічно

Побудуємо регульовальну характеристику двигуна постійного струму з паралельним збудженням, яка зображена на рисунку 13:

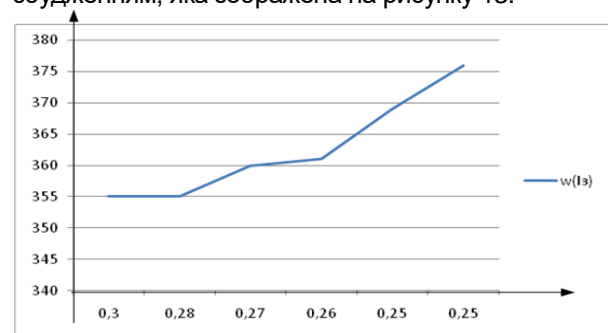


Рис. 13. Регульовальна характеристика двигуна постійного струму з паралельним збудженням

Висновки:

Проведення досліджень електромагнітних властивостей електромеханічних систем є актуальною та важливою задачею в сучасній науці та технологічній сфері. У даній роботі було здійснено значний обсяг дослідницької роботи, спрямованої на розробку та дослідження програмних та апаратних засобів для аналізу



електромагнітних явищ у електромеханічних системах вібраційних машин.

Основними дослідженнями роботи є розробка математичних моделей двигунів постійного струму з різними типами збудження: послідовним, паралельним і незалежним. Ці моделі не лише були виведені, але й піддані розрахункам, що дозволило отримати важливі параметри та характеристики цих двигунів і генераторів. Такий підхід є важливим етапом у розробці нових електромеханічних систем та дозволяє виявити особливості їхньої роботи.

Окрім того, було розроблено схеми заміщення та структурні схеми досліджуваних електромеханічних систем. Ці схеми відображають внутрішню структуру та взаємозв'язки компонентів системи, що є важливим для подальшого аналізу та оптимізації їхньої роботи. Отримані характеристики цього двигуна є важливими даними для порівняння з результатами модельних розрахунків та досліджень. Це дозволяє ефективно організувати та провести дослідження з електромагнітних властивостей різних типів двигунів, що є важливим для навчання та практичного застосування.

У цілому, дана робота розширює розуміння процесів в електромеханічних системах, надаючи засоби моделювання, аналізу та дослідження. Результати досліджень можуть бути використані при розробці нових технологій у сфері електромеханіки та автоматизації. Важливість роботи полягає в практичному застосуванні отриманих знань для вдосконалення реальних систем та прискорення їхнього розвитку.

Список використаних джерел

1. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А. Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навч. посіб. Вінниця: ТОВ "ТВОРИ". 2020. 332 с.
2. Матвійчук В. А. Рубаненко О. Є. Гунько І.О. Діагностування електрообладнання. Вінниця: ВНАУ. 2020. 138 С.
3. Возняк О.М. Штуць А.А. Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика частина 1. Вінниця: ТОВ "ТВОРИ". 2021. 280 С.
4. Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабенко І. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2010. 88 с.
5. Васильченко Г. І., Дорошенко І. І., Клименко О. М. Моделювання та дослідження режимів роботи різновидних двигунів постійного струму. Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електротехніка і Електромеханіка. 2007. №1. 104-114 с.
6. Єфіменко А. В., Тесленко І. О. Математичне моделювання та дослідження

систем електроприводу рухомих об'єктів. *Електроніка та зв'язок*. 2010. №1. 135-148 с.

7. Лукашенко О. С., Петров С. В, Федотов Ю. І. "Моделювання та дослідження характеристик двигуна з постійними магнітами." *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. №3. 95-109 с.

8. Литвиненко В. В., Башлаков О. С., Гайдук В. П. Дослідження та моделювання асинхронних двигунів у системах електроприводу. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. №4. 27-41 с.

9. Шабанов О. М., Комаров В. В. Дослідження характеристик електродвигунів постійного струму з різними типами збудження. *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. №1. 96-113 с.

10. Копійка О. В., Бойченко О. І. Моделювання та дослідження електромеханічних процесів у вібраційних машинах. Наукові вісті НТУУ "КПІ". *Електромеханіка, електротехніка, електротехнологія*. 2018. №3. 103-116 с.

References

1. Stadnik M.I., Vydmysh A.A., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. (2020). Kolisnyk M.A. Intelligent Systems in Power Engineering. Theory and Practice: Study Guide. Vinnytsia: TOV "TVORY". 332 p. [in Ukrainian]
2. Matviichuk V. A., Rubanenko O. Ye., Hunko I.O. (2020). Diagnostics of Electrical Equipment. Vinnytsia: VNAU. 138 p. [in Ukrainian]
3. Vozniak O.M., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. (2021). Modern Electric Drive Systems. Theory and Practice Part 1. Vinnytsia: TOV "TVORY". 280 p. [in Ukrainian]
4. Hrabko V. V., Rozvodiuk M. P., Hrabenko I. V. (2010). Experimental Research of Electric Machines. Part I. Direct Current Machines: Educational Manual. Vinnytsia: VNTU. 88 p. [in Ukrainian]
5. Vasilchenko G. I., Doroshenko I. I., Klymenko O. M. (2007). Modeling and Study of Operating Modes of Various Types of Direct Current Motors. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electrical Engineering and Electromechanics*. №1. 104-114 c. [in Ukrainian]
6. Yefimenko A. V., Teslenko I. O. (2010). Mathematical Modeling and Research of Motion Control Systems. *Electronics and Communications*. №1. 135-148 c. [in Ukrainian]
7. Lukashenko O. S., Petrov S. V., Fedotov Yu. I. (2015). Modeling and Investigation of Characteristics of Permanent Magnet Motors. *Electrotechnics and Electromechanics*. №3. 95-109 c. [in Ukrainian]
8. Lytvynenko V. V., Bashlakov O. S., Hayduk V. P. (2016). Research and Modeling of Asynchronous Motors in Electric Drive Systems.



Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies. №4. 27-41 c. [in Ukrainian]

9. Shabanov O. M., Komarov V. V. (2017). Investigation of Characteristics of Permanent Magnet DC Motors with Different Types of Excitation. *Electrotechnics and Power Engineering*. №1. 96-113 c. [in Ukrainian]

Kopiika O. V., Boichenko O. I. (2018). Modeling and Investigation of Electromechanical Processes in Vibration Machines. Scientific Reports of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". *Electromechanics, Electrical Engineering, Electrotechnology*. №3. 103-116 c. [in Ukrainian]

MATHEMATICAL MODELING OF DIRECT CURRENT MOTOR OPERATION WITH DIFFERENT EXCITATION TYPES FOR VIBRATIONAL MACHINES

This work is dedicated to the development and analysis of a mathematical model for a direct current motor with various types of excitation for vibrational machines. Vibrational machines play a crucial role in many industrial sectors, and their operational characteristics are determined by the efficiency and accuracy of motor performance.

In this study, we investigate different types of excitation for direct current motors and develop corresponding mathematical models. Employing principles from control theory and quantitative electronics, we account for the influence of different excitation parameters on the motor's dynamic behavior.

The obtained results could be valuable for the development of new hybrid excitation systems for

vibrational machines, capable of operating in diverse modes depending on specific additional conditions. Additionally, the analysis and development of the mathematical model can serve as a foundation for further research in optimizing the operation of vibrational systems using direct current motors.

Analyzing the results, we compare the efficiency of various excitation types and their impact on the operational characteristics of vibrational machines. Moreover, we explore possibilities for reducing power consumption and enhancing speed regulation accuracy. Special attention is devoted to analyzing system stability under different operating conditions and parameter variations.

The findings of our research hold important practical applications in the design and improvement of vibrational machines for industrial, technical, and scientific purposes. They contribute to understanding the influence of different factors on the performance of direct current motors with various excitation types, which can aid engineers and designers in enhancing the efficiency and reliability of vibrational systems.

In conclusion, this research is aimed at developing and analyzing a mathematical model for a direct current motor with various excitation types, considering their impact on the operational characteristics of vibrational machines. It makes a significant contribution to understanding and optimizing the processes of such systems, potentially exerting a substantial influence on the advancement of modern technology in the field of vibrational systems and their applications.

Key words: *mathematical modeling, direct current motor, excitation types, vibrational machines, operational characteristics, control theory, quantitative electronics*

Відомості про авторів

Штуть Андрій Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com).

Колісник Микола Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com).

Shtuts Andrii – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com).

Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com).