

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2022 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Обґрунтування параметрів роботи приводних електродвигунів
технологічних установок

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКЗп-19
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Роман ДЖУЛАЙ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **ст.викл. каф., Е. НЄМЦЕВ**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

_____ **О. ЛЮБИМЕНКО**

Студент _____

(підпис)

_____ (підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Роману ДЖУЛАЮ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів роботи приводних
електродвигунів технологічних установок

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст.викл.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність двигуна

постійного струму: 7,35 кВт, ККД двигуна: 0,8, номінальна частота

обертання двигуна: 1200 об./хв., активний опір якорного ланцюга: 2,581

Ом, реактивний опір якорного ланцюга: 0,028 Гн, активний опір обмотки

збудження: 281,3 Ом, реактивний опір обмотки збудження: 156 Гн, момент

інерції двигуна: 0,02215 кг·м², номінальна напруга живлення: 220 В,

максимальне значення струму якоря: 150 А, величина висоти осі

обертання: 0,18 м, кількість паралельних гілок: 2.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд основ роботи двигунів постійного струму.

2. Контроль параметрів роботи двигуна постійного струму.

3. Визначення параметрів роботи двигуна постійного струму.

4. Моделювання роботи двигуна постійного струму.

5. Огляд питань охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	Е. НЄМЦЕВ, ст.викл. каф.		
Розділ 5	О. КОЛЛАРОВ, доц. каф.		
Нормоконтроль	О. ЛЮБИМЕНКО, доц. каф.		

7. Дата видачі завдання 02 травня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.05.22 – 08.05.22	
2.	Розділ 2	09.05.22 – 15.05.22	
3.	Розділ 3	16.06.22 – 22.05.22	
4.	Розділ 4	23.05.22 – 04.06.22	
5.	Розділ 5	05.06.22 – 10.06.22	
6.			

Студент _____
(підпис)

Роман ДЖУЛАЙ _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Роман ДЖУЛАЙ. Обґрунтування параметрів роботи приводних електродвигунів технологічних установок / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2022.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі розглянуто основи роботи двигунів постійного струму – визначено конструктивні особливості та параметри роботи двигунів постійного струму незалежного збудження.

У другому розділі були наведені принципи контролю параметрів роботи двигуна постійного струму та впровадження принципів теорії управління для керування двигунів і пошук шляхів підвищення надійності їх роботи.

У третьому розділі визначено параметри роботи двигуна постійного струму – виконано розрахунок основних параметрів його роботи і складена математична модель.

У четвертому розділі здійснено моделювання роботи двигуна постійного струму.

Ключові слова: електропривод, двигун постійного струму, теорія управління, керування, параметр роботи, математична модель, моделювання

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
1 ОСНОВИ РОБОТИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	8
1.1 Огляд конструктивних особливостей двигунів постійного струму	8
1.2 Огляд параметрів роботи двигунів постійного струму незалежного збудження	14
2 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	21
2.1 Впровадження принципів теорії управління для керування ДПС	21
2.2 Визначення шляхів підвищення надійності ДПС доступними заходами	24
3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	27
3.1 Розрахунок основних параметрів роботи ДПС	27
3.2 Складання математичної моделі ДПС	33
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	43
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	51
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	53
ДОДАТОК Б. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	58
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКНТРОЛЕРА	75

ВСТУП

Електричні двигуни відносять до електричних машин, що мають різноманітні можливості по досягненню широкого спектру частот обертання та крутного моменту, як при ustalених так і при перехідних режимах.

Досить важливо обрати конкретний тип двигуна для певного режиму роботи та області застосовності, що відображається у підборі характеристик електричних машин, що відповідають заданим параметрам навантаження та параметрам мережі живлення.

Розширити межі використання тих чи інших типів електричних машин можна завдяки впровадженню силових електронних пристроїв. Вони дозволяють розширити характеристики роботи двигунів для забезпечення бажаних режимів та показників.

Перетворювачі на базі силових перетворювачів являють собою електронні пристрої, які дозволяють безперервно регулювати параметри роботи двигунів. Допомогою на цьому шляху стає широка автоматизація та автоматизовані засоби управління.

Гарним чином себе зарекомендували принципи контролю параметрів двигунів за допомогою впровадження зворотного зв'язку за умови забезпечення адекватного відгуку системи за рахунок пропорційного посилення сигналів.

Двигун постійного струму з незалежним збудженням знайшли широке використання у різноманітних промислових застосуваннях. Перевагами таких електричних машин є лінійність досліджуваних характеристик, що не залежать від параметрів насичення, а частоту обертання, крутний момент та споживану потужність можна регулювати у залежності від того чи іншого застосування двигуна та приєднаних споживачів.

Мета роботи – дослідити режими та параметри роботи електропривода з двигуном постійного струму.

Завдання роботи:

- здійснити огляд конструктивних особливостей двигунів постійного струму,
- здійснити огляд параметрів роботи двигунів постійного струму незалежного збудження,
- визначити принципи контроль параметрів роботи двигуна постійного струму,
- визначити параметри роботи двигунів постійного струму,
- виконати моделювання роботи двигуна постійного струму.

Об'єкт досліджень – електропривод з двигуном постійного струму.

Предмет досліджень – параметри роботи двигуна постійного струму.

1 ОСНОВИ РОБОТИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Огляд конструктивних особливостей двигунів постійного струму

Двигуни постійного струму (ДПС) знайшли широке використання у різноманітних електроприводах завдяки своїм перевагам, основні серед яких – високе значення пускового моменту, простота експлуатації та легкість управління [1].

Основними компонентами двигуна постійного струму є елементи, що утворюють кілька магнітоелектричних ланцюгів та механічних частин – статора, якоря, колектора, струмознімачів (щіток), опорних підшипників, клемної коробки [1].

Статор являє собою конструкцію, яку утворено набором пластин з електротехнічної сталі, і з прокладеними електричними обмотками утворює електромагніт, що створює нерухоме магнітне поле навколо якоря, який поміщено в центр статора. При подаванні напруги на обмотки статора утворюється електромагніт з північним і південним полюсами зі статичним результируючим магнітним полем (рис. 1.1) [2].

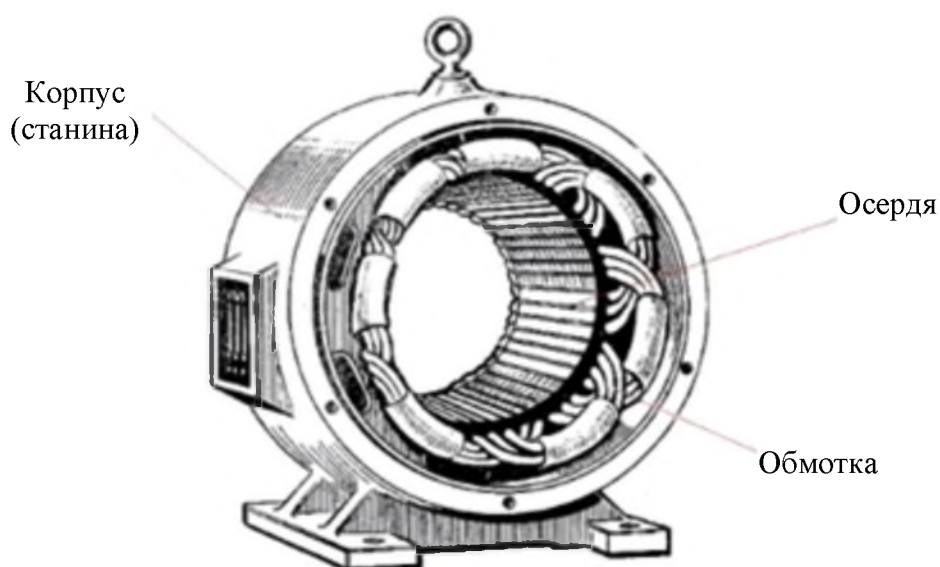


Рисунок 1.1 – Статор двигуна постійного струму

Якір також утворюється набором з пластин електротехнічної сталі, у які вкладено одна або кілька обмоток. При проходженні електричного струму через дані обмотки, навколо якоря також утворюється магнітне поле. Магнітні полюси, що при цьому утворилися, взаємодіють з полем статора і відбувається або притягування протилежних, або відштовхування подібними полюсів, що змушує якір обертатися (рис. 1.2) [2].



Рисунок 1.2 – Якір двигуна постійного струму

Колектор двигуна побудовано по принципу механічного перемикачання для комутації обмоток якоря через сегментовану мідну втулку, насаджену на вал. Постійний струм подається на сегменти колектора за допомогою струмозйомних щіток (рис. 1.3) [2].

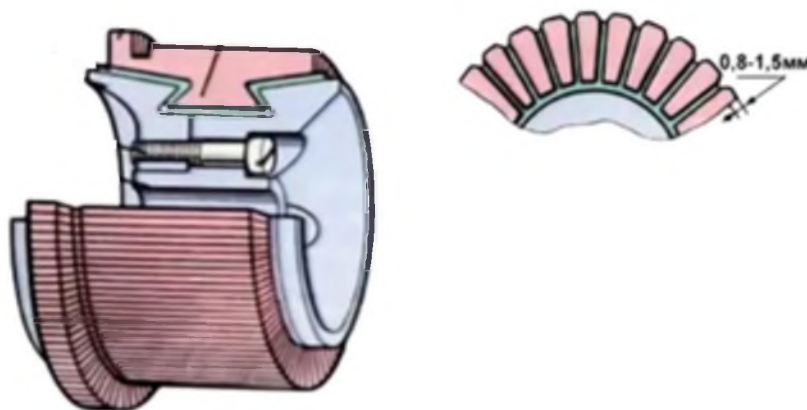


Рисунок 1.3 – Колектор двигуна постійного струму

Під час обертання двигуна щітки ковзають по сегментах колектора, механічним способом створюючи змінне магнітне поле у різних обмотках якоря – таким чином у якорі створюється магнітне поле, що обертається (рис. 1.4) [2].

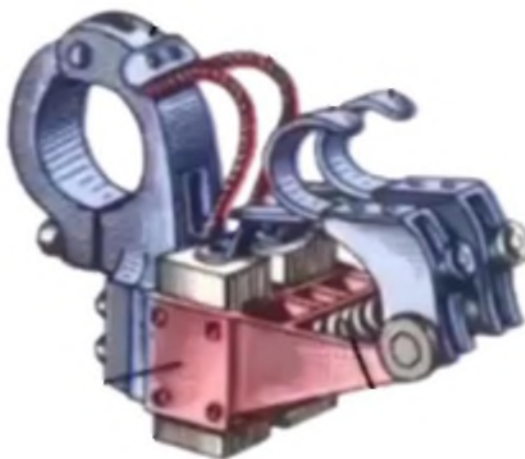


Рисунок 1.4 – Щітковий апарат двигуна постійного струму

Принцип дії ДПС засновано на тому, що в разі розміщення провідника зі струмом у полі постійного магніту, на провідник починає діяти сила, яка намагається виштовхнути даний провідник з магнітного поля. Провідники з лівого і правого боку виштовхуються у різні сторони, що призводить до обертання якоря. Величина зазначеної сили залежить від величини магнітного поля, величини струму, що протікає по провіднику та довжини провідника у магнітному полі (рис. 1.5) [3].

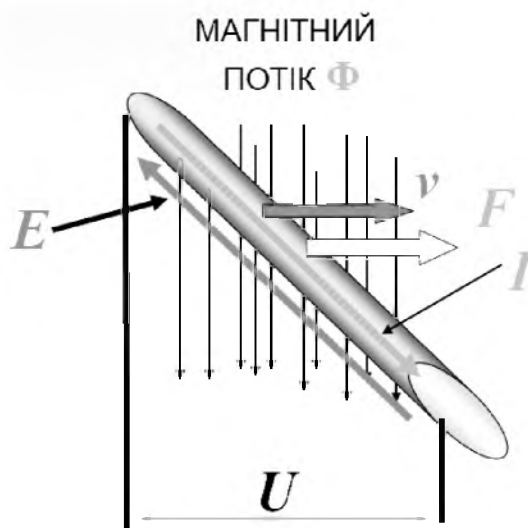


Рисунок 1.5 – До принципу дії двигуна постійного струму

У практичному змісті, при подачі напруги $U_{ст.}$ на статорні обмотки, утворюється магнітне поле статора, яке створює магнітний потік Φ від полюса N до полюса S . Щітки торкаються висновків котушки ротора під полюсом. При підключенні до щіток напруги $U_{Я}$ від зовнішнього джерела постійного струму, у обмотці якоря починає протікати струм $I_{Я}$, який протікає через по провіднику, утвореному обмоткою якоря, що знаходиться під полюсом N і виходить по провіднику, що знаходиться під полюсом S . Наявність магнітного потоку статора та струму в обмотці якоря створює на останній силу F , яку називають «Сила Лоренца». Дана сила створює крутний момент, який призводить до обертання якоря. Та частина обмотки якоря, по якій пройшов струм, віддаляється від свого положення і виводячи щітки з наявного контакту з відключенням від зовнішнього джерела. Наступна котушка за допомогою своєї щітки входить у контакт і по ній починає протікати струм I – цей процес, поки наявні зазначені чинники, є безперервним і обертання підтримується (рис. 1.6) [4].

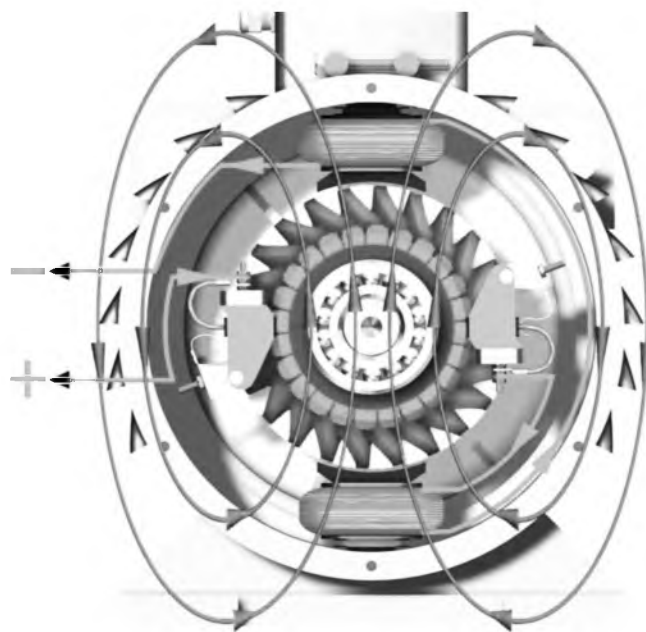


Рисунок 1.6 – Принцип дії двигуна постійного струму

Механічні та електричні параметри ДПС залежить від величини магніторушійної сили (МРС), яка пропорційна наступним параметрам [4]:

$$MPC \approx w \cdot I \quad (1.1)$$

де w – кількість витків,

I – струм у обмотці.

Необхідне значення МРС можна досягти шляхом застосування спеціальних конструкцій обмоток збудження: або застосувати велику кількість витків і незначний струм, або незначну кількість витків і значний струм. У першому випадку на статорні обмотки підводиться більше значення напруги, ніж у другому випадку, і перетин провідників у першому випадку менший ніж у другому, а отже і менше значення струму.

Двигуни постійного струму ділять на чотири групи у залежності від розташування обмоток збудження (у кожній такі параметри двигуна, як частота обертання, крутний момент та способи керується є відмінними):

– ДПС з незалежним збудженням здійснюється від окремого джерела. Сама обмотка збудження має велику кількість витків дроту малого

перетину і здатна витримувати амплітудне значення підведеної до двигуна напруги. Збудження ланцюга поля та якоря здійснюється окремими джерелами (рис. 1.7) [5],

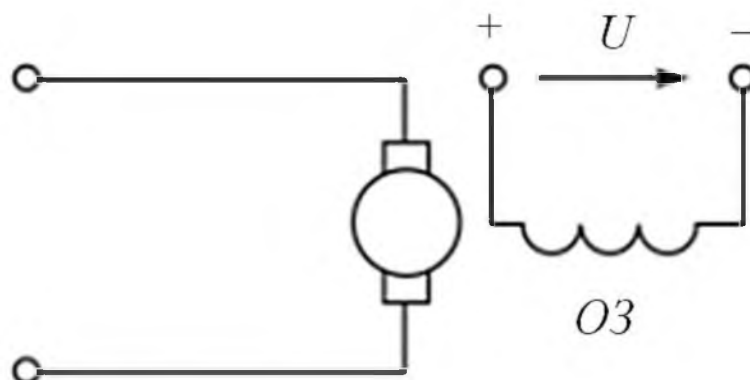


Рисунок 1.7 – Схема незалежного збудження ДПС

– ДПС паралельного збудження, у якому обмотка збудження підключається паралельно обмотці якоря і приєднані до загального джерела живлення (рис. 1.8) [5],

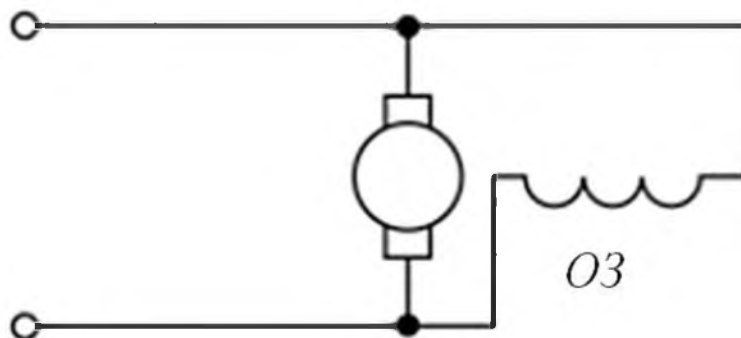


Рисунок 1.8 – Схема паралельного збудження ДПС

– ДПС послідовного збудження, у яких обмотка збудження приєднується послідовно з обмоткою якоря. Сама обмотка має незначну кількість витків, виконаних дротом великого перетину і витримує значні значення струмів (рис. 1.9) [5],

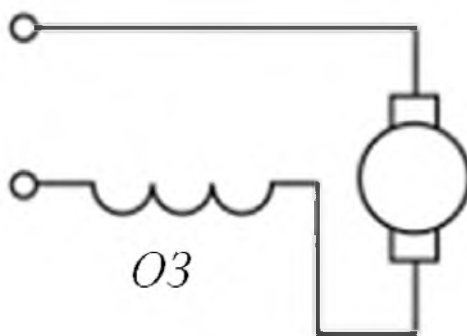


Рисунок 1.9 – Схема послідовного збудження ДПС

– ДПС мішаного збудження містить дві обмотки збудження, одна з яких ввімкнена паралельно, а інша – послідовно (рис. 1.10) [5].

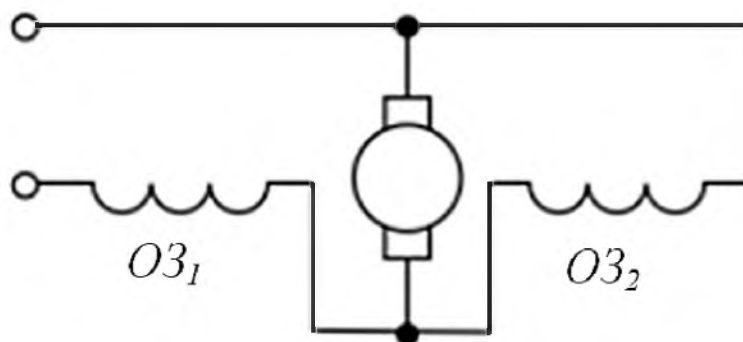


Рисунок 1.10 – Схема мішаного збудження ДПС

1.2 Огляд параметрів роботи двигунів постійного струму незалежного збудження

Оглянемо схему двигуна незалежного збудження (рис. 1.11).

Статорна обмотка двигуна живиться від окремого джерела постійної напруги $U_{зб.}$. Обмотка характеризується значенням активного опору $R_{зб.}$ і індуктивністю $L_{зб.}$, яка не впливає на роботу через застосування постійного струму ($L_{зб.}$ не враховуємо).

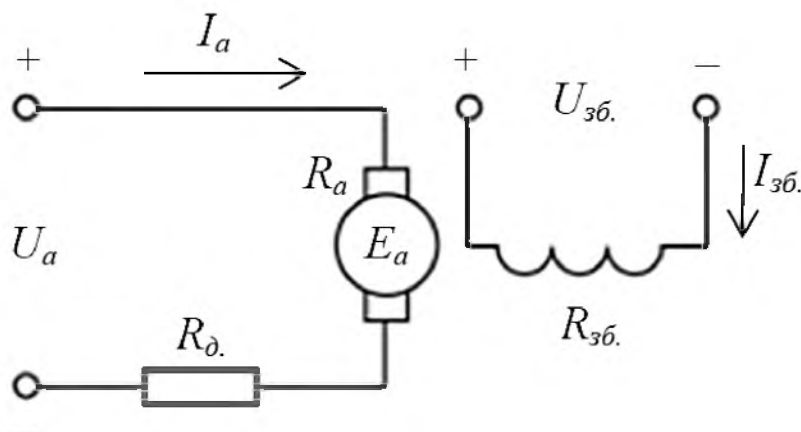


Рисунок 1.11 – Огляд струмів і напруг у ДПС з незалежним збудженням

Струм у обмотці можна розрахувати за залежністю:

$$I_{зб.} = \frac{U_{зб.}}{R_{зб.}} \quad (1.2)$$

Обмотка якоря живиться від зовнішнього джерела напругою U_a для забезпечення електричною енергією, необхідної для руху навантаження. Подача живлення до якірнього ланцюга через колектор та щітки, а напрямок струму в обмотках якоря залежить від розміщення цих обмоток відносно полюсів магнітного поля, що утворився на статорі. Перетин дротів обмоток якоря є більшим за перетин обмоток статора, що дозволяє пропускати набагато більші значення струмів. З огляду на це, опір якоря R_a є набагато меншим за опір статора $R_{зб.}$. Струм статора знаходиться на рівні 5-10% від струму якоря, а напруги зазвичай приймають однаковими [4].

Електрорушійна сила E_a визначається як різниця між напругою джерела живлення і падіння напруги у якірньому ланцюзі.

Значення струму якоря I_a можна розрахувати за формулою:

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a + R_{\partial.}} \quad (1.3)$$

Потужність, що розвивається двигуном, з одного боку залежить від значень ЕРС та струму якоря, а з іншого – від значення колової швидкості (частоти обертання) і крутного моменту на валу двигуна [4]:

$$P_{\partial.} = E_a \cdot I_a = M_{\partial.} \cdot \omega_{\partial.} \quad (1.4)$$

Розвинена двигуном потужність $P_{\partial.}$ витрачається на подолання механічного навантаження та механічні втрати. Аналогічно, спродукований крутний момент $M_{\partial.}$ витрачається на подолання моменту навантаження та електромагнітні та механічні втрати [4].

Значення ЕРС (e), що продукується у одому витку двигуна можна визначити за формулою, В [4]:

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (1.5)$$

де B – щільність потоку, Вб,

l – ефективна довжина провідника якоря, по якому протікає струм, м,

v – лінійна швидкість руху провідника відносно напрямку магнітного поля, м/с,

Значення сили (F), що діє на провідник зі струмом, можна визначити за формулою, Н [4]:

$$F = B \cdot l \cdot i \quad (1.6)$$

i – струм у провіднику, А.

Коли у роботу включаються усі провідники, замість сили переходимо до крутного моменту, а замість лінійної швидкості – до кутової швидкості, можемо записати значення загальної ЕРС, що продукується двигуном, В [4]:

$$E_a = C \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв.}} \quad (1.7)$$

де C – деяка константа, що залежить від конструктивних параметрів двигуна (кількості пар полюсів, витків і паралельних шляхів та іншого),

Φ – значення магнітного потоку, що для двигунів незалежного збудження є пропорційним до струму статора.

Крутний момент на валу двигуна, Н·м [4]:

$$M_{\text{дв.}} = C \cdot \Phi \cdot I_a \quad (1.8)$$

Рівняння для крутного моменту після перетворень набуде вигляду:

$$M_{\text{дв.}} = C \cdot \Phi \cdot \frac{U_a - E_a}{R_a + R_{\text{д.}}} = C \cdot \Phi \cdot \frac{U_a - C \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв.}}}{R_a + R_{\text{д.}}} \quad (1.9)$$

а по відношенню до кутової швидкості:

$$\omega_{\text{дв.}} = \frac{U_a}{C \cdot \Phi} - \frac{R_a - R_{\text{д.}}}{(C \cdot \Phi)^2} \cdot M_{\text{дв.}} \quad (1.10)$$

або

$$\omega_{\text{дв.}} = \frac{U_a}{C \cdot \Phi} - \frac{(R_a - R_{\text{д.}}) \cdot I_a}{C \cdot \Phi} \quad (1.11)$$

У разі, коли ми нехтуємо втратами, момент, що розвивається, у повному обсязі передається на вал і струм якоря при холостому ході дорівнює нулю, колова швидкість холостого ходу дорівнюватиме:

$$\omega_0 = \frac{U_a}{C \cdot \Phi} \quad (1.12)$$

У стаціонарному режимі роботи двигуна розвинений момент $M_{\text{дв.}}$ дорівнює моменту навантаження $M_{\text{нав.}}$. При заданому значенні моменту навантаження $M_{\text{нав.}}$ швидкість двигуна падає на величину $\Delta\omega$ [4]:

$$\Delta\omega = \frac{R_a - R_{\text{д}}}{(C \cdot \Phi)^2} \cdot M_{\text{нав.}} \quad (1.13)$$

Поточне значення швидкості обертання двигуна може бути виражена за допомогою виразу [4]:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega \quad (1.14)$$

Рівняння (1.10) має графічну інтерпретацію – залежність швидкості обертання від крутного моменту – рис. 1.12, а рівняння (1.11) – залежність швидкості обертання від струму – рис. 1.13, за умови постійності напруги живлення.

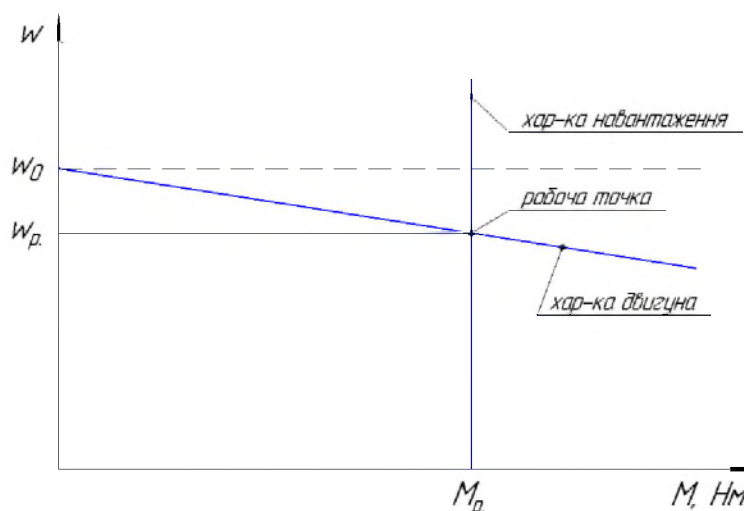


Рисунок 1.12 – Залежність швидкості обертання від крутного моменту

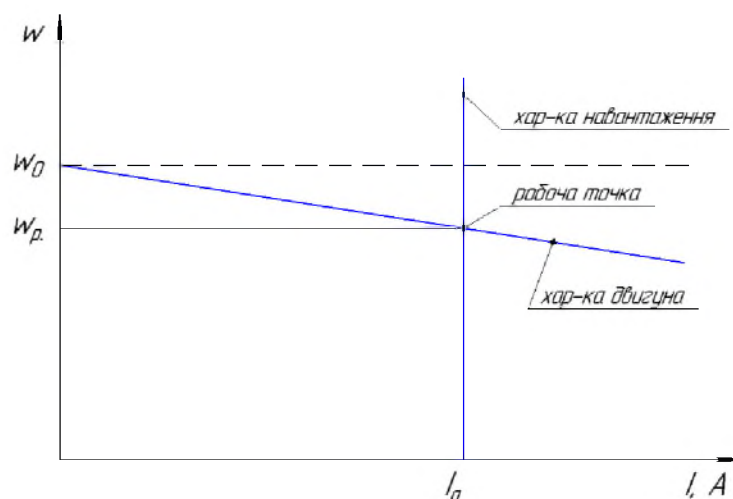


Рисунок 1.13 – Залежність швидкості обертання від струму

У потужних ДПС опір якоря досить низький і падіння швидкості обертання – незначне, що у більшості випадків дозволяє отримати постійність швидкості обертання двигуна у широкому діапазоні навантажень.

Значення пускового крутного момент можна визначити за формулою, Н·м [4]:

$$M_{\text{пуск.}} = C \cdot \Phi \cdot \frac{U_a}{R_a - R_\partial} \quad (1.15)$$

Значення пускового струму якоря можна визначити за формулою, А [4]:

$$I_{\text{пуск.}} = \frac{U_a}{R_a - R_\partial} \quad (1.16)$$

У ДПС з незалежним збудженням опір якоря досить низький, тому згідно рівняння (1.15) можна зробити висновок, що досягнення високого значення пускового моменту можна досягти в разі номінального значення напруги.

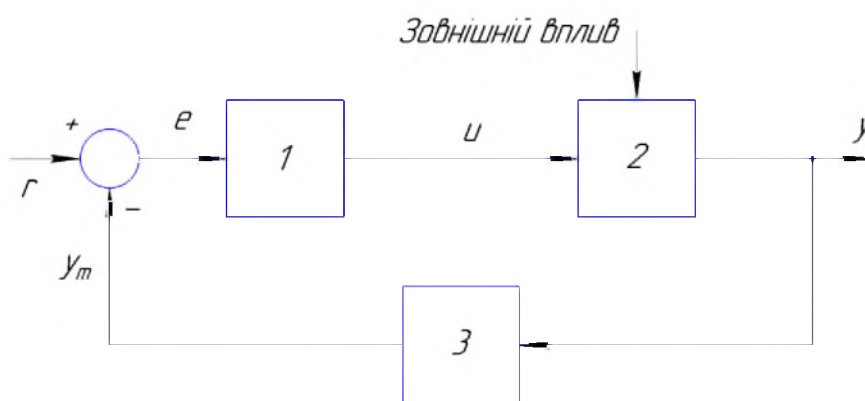
Значні струми при пуску двигуна мають шкідливий вплив на обмотки двигуна та призводять до значних електричних втрат, що викликає перегрівання обмоток, яке «накопичуючись» протягом певного періоду, призводить до ушкодження ізоляційного шару провідників та коротких замикань.

2 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Впровадження принципів теорії управління для керування ДПС

Згідно теорії управління поведінкою будь-якої динамічної системи можна керувати за допомогою зворотних зв'язків. Це дозволяє керувати параметрами роботи системи у залежності від величини керуючого сигналу, який називають опорним, може мати фіксоване або змінне значення [6].

Для реалізації даних положень необхідно розрахувати параметри контролера, який контролює значення вихідного сигналу та порівнює його з еталонним значенням. Різницю між фактичним та еталонним значенням на виході називають «помилкою». Значення «помилки» за допомогою зворотного зв'язку подається на вхід системи для отримання на виході заданого значення (рис. 2.1) [6].



1 – контролер, 2 – об'єкт керування, 3 – зворотній зв'язок

Рисунок 2.1 – Керування за допомогою зворотного зв'язку

Дану систему можна проаналізувати за допомогою перетворення Лапласа відносно прийнятих змінних [7]:

$$\begin{cases} Y(s) = P(s) \cdot U(s), \\ U(s) = C(s) \cdot E(s), \\ E(s) = R(s) - F(s) \cdot Y(s), \end{cases} \quad (2.1)$$

Розв'язуючи дані рівняння відносно $Y(s)$ через значення $R(s)$ [7]:

$$Y(s) = \frac{P(s) \cdot C(s)}{1 + F(s) \cdot P(s) \cdot C(s)} \cdot R(s) = H(s) \cdot R(s) \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) визначає передатну функцію замкненого циклу (у більшості випадків $F(s) = 1$).

За допомогою передатної функції можна здійснювати управління двигуном постійного струму, що полягає у проектуванні контролера, який дозволяє підтримувати визначений стан за постійного порівняння поточного стану із заданим еталонним значенням. Зворотний зв'язок забезпечується за допомогою датчика зв'язку.

Найбільш поширеними видами контролера є ПІ- та ПІД-контролери різноманітних конструкцій та модифікацій. У загальному випадку, ПІ-контролери виконують функції стабілізації, а ПІД-контролери використовуються для створення контурів контролю та зворотних зв'язків.

ПІ-контролер реалізує алгоритм пропорційно-інтегрального обчислення і контролює вихідний сигнал впродовж визначеного часу T і характеризується двома параметрами для налаштування: коефіцієнтом пропорційності (k_p) та інтегральним коефіцієнтом (k_i). Інтегральна функція контролера направлена на усунення відхилення вихідного сигналу для систем з незамкненим контуром та не містить інтегруючого елемента [8].

Вихідний контролера задається наступним чином [8]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

де k_p – пропорційний коефіцієнт,

$e(t)$ – похибка відхилення фактичного вихідного значення від заданого значення,

k_i – інтегральний коефіцієнт.

Даний тип контролера можна використовувати для управління магнітним потоком та струмом двигуна.

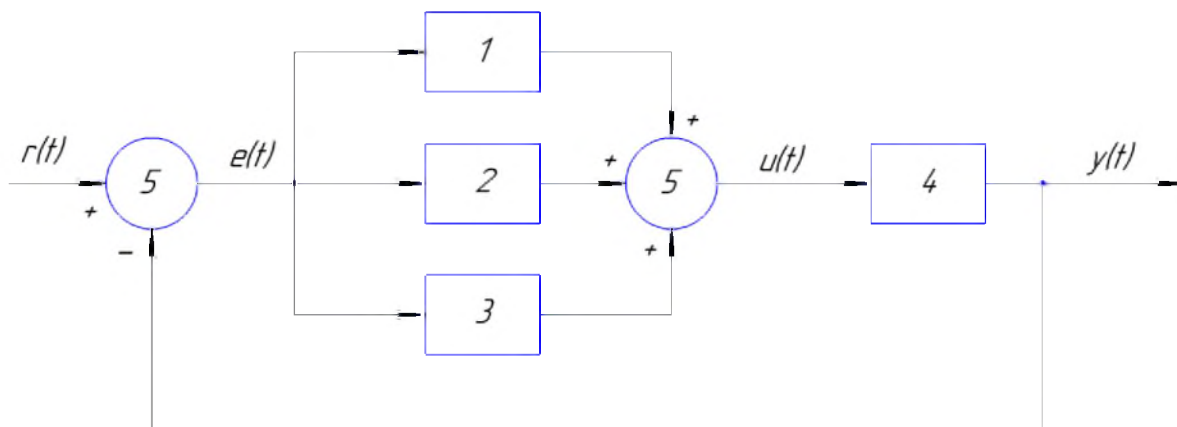
ПД-регулятор являє собою пропорційно-інтегрально-диференціальний пристрій, у якому реалізується механізмом зворотного зв'язку за допомогою контуру управління. У даному пристрої відбувається безперервне обчислення значення помилки, яка визначається як різниця між бажаним заданим і вихідними значеннями вимірюваної вихідної величини. При цьому системи постійно мінімізує значення помилки шляхом коригування змінної, яку можна схарактеризувати зваженою сумою [8]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

де k_d – диференціальний коефіцієнт.

При реалізації керування двигуном постійного струму за допомогою ПД-регулятора зусилля направлені на завдання пропускної здатності системи та визначити характерні коефіцієнти регулятора.

Швидкість відгуку системи збільшується за ступенем збільшення пропорційного посилення системи. Для двигуна з незалежним збудженням характерна лінійна характеристика насичення і можна керувати частоту обертання, крутного моменту та потужність двигуна для виконання поставлених промислових задач (рис. 2.2) [8].



1 – пропорційний блок, 2 – інтегральний блок, 3 – диференційний блок, 4 – об'єкт керування, 5 – блоки розрахунку (суматори)

Рисунок 2.2 – Структура ПД-регулятора з контуром зворотного зв'язку

2.2 Визначення шляхів підвищення надійності ДПС доступними заходами

Основними сучасними засобами підвищення надійності ДПС є їх постійна модернізація та застосування частотних перетворювачів та інші стратегій, що дозволяють збільшити енергоефективність роботи приводів.

Удосконалення конструкції двигунів стикається з необхідністю зменшення вартості їх виготовлення та експлуатації. Покращення конструкції двигунів та методів їх керування, удосконалені методів експлуатації та технічного обслуговування дозволяють зменшити споживання енергії [9].

Стабільна, безпечна та ефективна робота ДПС є важливою вимогою на шляху підтримання заданої продуктивності систем. Вихід двигуна з ладу призводить до аварійних ситуацій та подальшого коштовного ремонту.

Електродвигуни завдяки своїй конструкції є досить надійними, навіть завдяки лише періодичному візуальному огляду, «елементарному» технічному обслуговуванню та змащуванню. Сьогодення вимагає забезпечення надійної роботи двигунів для безперервного функціонування технологічних процесів [9].

Основними вимогами до конструкції та експлуатації електродвигунів є: низька маса та інерційність елементів, що обертаються; механічна міцність; висока надійність; низькі рівні шуму та вібрацій; висока енергоефективність; низька вартість виготовлення та експлуатації; можливість здійснення комутацій у широкому діапазоні частот обертання; гнучкість застосування у різні системах; відповідність стандартам використання [9].

Закласти зменшення втрат при роботі двигунів можна ще на стадії проектування, серед яких можна виділити [9]:

- магнітні втрати в металевих конструкціях,
- втрати на продукування вихрових струмів,
- електричні втрати струму в обмотках,
- механічні втрати у підшипниках та системі охолодження,
- магнітні втрати у повітряному зазорі при перевантаженні двигуна.

Іншим важливим чинником безперебійної роботи двигуна є забезпечення належної ізоляції у окремих його елементах при різноманітних експлуатаційних режимах.

Несправності електродвигунів можуть бути спричинені різноманітними експлуатаційними обставинами – стан системи живлення та керування, зовнішні механічні впливи, зміна стану навколишнього середовища та інші.

Для недопущення та усунення несправностей застосовуються різноманітні технології, які застосовуються і при зупиненому і працюючому двигуні. Ці методи та системи здатні стежити та визначати різноманітні дефекти у двигунах: зміна опору обмоток, механічна

несправність статора та/або якоря, наявність статичного та/або динамічного ексцентриситетів, поточний стан ізоляції.

На шляху до підвищення надійності роботи двигунів з'явилися специфічні «помічники» – засоби силової електроніки. Ці пристрої здатні до обробки, фільтрації та зміни сигналів живлення та керування для досягнення високого ступеня ефективності роботи двигунів.

При появі або виявленні аварійних станів двигунів силові комутаційні пристрої дозволяють здійснити керування або, навіть, вимкнути електропривод. За допомогою даних засобів можна здійснювати безперервний контроль та тепловий захист двигуна. Параметром контролю може бути будь-який параметр роботи двигуна – здійснюється захист від різкої зміни даного параметра [9].

Засоби силової електроніки дозволяють реалізувати вимогу плавності розгону та зупинки двигуна, а за необхідності – гальмування, що дозволяє уникати перевантажень у комутаційних режимах. Паралельно виключається поява резонансних частот, що викликають додаткові навантаження у механізмах приводів, що дозволяє збільшити міжремонтний цикл роботи двигунів та подовжити терміни їх служби.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Розрахунок основних параметрів роботи ДПС

Вибір основних розмірів та розрахунок параметрів якоря здійснюємо за методою [10].

Діаметр якоря визначимо за формулою [10]:

$$D = h - 0.004 \quad (3.1)$$

де h – величина висоти осі обертання, $h = 0,180$ м

$$D = 0,18 - 0,004 = 0,176 \text{ м}$$

Згідно початкових даних складемо таблицю 3.1, що поєднує значення лінійного навантаження (A , А/м), індукції у повітряному зазорі (B_δ , Тл) та коефіцієнт полюсного перекриття (α_δ).

Таблиця 3.1 – До розрахунку ДПС

Параметр	A , А/м	B_δ , Тл	α_δ	ℓ_δ , м	λ
Мінімальне значення	14000	0,50	0,55	0,352	2,003
Середнє значення	17000	0,55	0,60	0,242	1,374
Максимальне значення	20000	0,60	0,65	0,174	0,988

Розрахункове значення електромагнітної потужності ДПС визначимо за формулою [10]:

$$P_{p.} = P_n \cdot \frac{1 + \eta}{2 \cdot \eta} \quad (3.2)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, $P_n = 7,35$ кВт,
 η – попереднє значення коефіцієнта корисної дії ДПС, $\eta = 0,8$.

$$P_p = 7350 \cdot \frac{1+0,8}{2 \cdot 0,8} = 8268,75 \text{ Вт.}$$

Довжину повітряного зазору визначимо за формулою, мм [10]:

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot P_p}{A \cdot B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot D^2 \cdot n_n} \quad (3.3)$$

Розрахунки за формулою (3.3) здійснюємо для різних значень A , B_δ і α_δ і результати заносимо до табл. 3.1.

Відношення основних розмірів ДПС розрахуємо за формулою [10]:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D} \quad (3.4)$$

Розрахунки за формулою (3.4) здійснюємо для різних значень A , B_δ і α_δ і результати заносимо до табл. 3.1.

Обираємо третій варіант, для якого значення λ наближається до «1», що забезпечує збалансованість виробничих, технологічних і експлуатаційних витрат: $A = 20000$ А/м, $B_\delta = 0,60$ Тл, $\alpha_\delta = 0,65$, $\ell_\delta = 0,174$ м.

Струм якоря розрахуємо за формулою [10]:

$$I_\alpha = \frac{P_n}{\eta \cdot U_n} \cdot (1 - k_{c3}) \quad (3.5)$$

де k_{c3} – коефіцієнт струмозбудження $k_{c3} = 0,04$,

$$I_{\text{я}} = \frac{7350}{0,8 \cdot 220} \cdot (1 - 0,04) = 40 \text{ A}$$

Значення струму у паралельних гілках розрахуємо за формулою [10]:

$$I_a = \frac{I}{2a} \quad (3.6)$$

де $2a$ – кількість паралельних гілок, $2a = 2$.

$$I_a = \frac{40}{2} = 20 \text{ A}$$

У якості типу виконання обмотки вибираємо «просту хвильову».

Для визначення намотувальних даних розраховуємо число зубців за формулами [10]:

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}}, \\ Z_{\max} &= \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

де $t_{1\max}$ – максимальне значення колекторного поділу, $t_{1\max} = 20$ мм,

$t_{1\min}$ – мінімальне значення колекторного поділу, $t_{1\min} = 10$ мм,

$$Z_{\min} = \frac{\pi \cdot 176 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 27,632,$$

$$Z_{\max} = \frac{\pi \cdot 176 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 55,264.$$

Приймаємо значення числа зубців $Z = 30$.

Значення зубцевого поділу розрахуємо за формулою [10]:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot 176 \cdot 10^{-3}}{30} = 18,44 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \quad (3.8)$$

Попередню кількість ефективних провідників розрахуємо за формулою [10]:

$$N = \frac{A \cdot \pi \cdot D \cdot 2 \cdot a}{I} = \frac{20000 \cdot 3,14 \cdot 0,176 \cdot 2}{40} = 552,64 \quad (3.9)$$

Приймаємо кількість ефективних провідників на рівні $N = 553$.

Число ефективних провідників у пазу розрахуємо за формулою [10]:

$$N_{ef.} = \frac{N}{Z} = \frac{553}{30} = 18,43 \quad (3.10)$$

Приймаємо число ефективних провідників у пазу на рівні $N_{ef.} = 19$.

Уточнюємо кількість ефективних провідників з формули (3.10):

$$N = N_{ef.} \cdot Z = 19 \cdot 30 = 570 \text{ А} \quad (3.11)$$

Діаметр колектора розрахуємо за формулою [10]:

$$D_{кол.} = (0,65 \div 0,8) \cdot D = (0,65 \div 0,8) \cdot 0,176 = 0,1144 \div 0,1408 \text{ м.} \quad (3.12)$$

Приймаємо значення діаметра колектора $D_{кол.} = 0,12 \text{ м.}$

Число колекторних пластин розрахуємо за формулою [10]:

$$K = u_n \cdot Z, \quad (3.13)$$

де u_n – число елементарних пазів у реальних пазах, $u_n = 3$.

$$K = 3 \cdot 30 = 90 \text{ м.}$$

Число витків у секції розрахуємо за формулою [10]:

$$w_{сек.} = \frac{N}{2 \cdot K} = \frac{570}{2 \cdot 90} = 3,17 \quad (3.14)$$

Приймаємо значення число витків у секції $w_{сек.} = 3$.

Напругу між колекторними пластинами розрахуємо за формулою [10]:

$$U_{кол.} = \frac{2p \cdot U_n}{K} \quad (3.15)$$

де $2p$ – число пар полюсів, $2p = 4$.

$$U_{кол.} = \frac{2p \cdot U_n}{K} = \frac{4 \cdot 220}{90} = 9,78 \text{ В}$$

Колекторний поділ розрахуємо за формулою [10]:

$$t_{кол.} = \frac{\pi \cdot D}{K} = \frac{3,14 \cdot 0,176}{90} = 6,14 \cdot 10^{-3} \quad (3.16)$$

Уточнену кількість провідників розрахуємо за формулою [10]:

$$N = 2 \cdot u_n \cdot w_{сек.} \cdot Z = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 30 = 540 \quad (3.17)$$

Число витків в обмотці якоря розрахуємо за формулою [10]:

$$w_{я} = \frac{N}{2} = \frac{540}{2} = 270 \quad (3.18)$$

Перший частковий крок розрахуємо за формулою [10]:

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon, \quad (3.19)$$

де ε – коефіцієнт подовження кроку обмотки, $\varepsilon = 3/4$.

$$y_1 = \frac{90}{4} - \frac{3}{4} = \frac{87}{4}.$$

Перший частковий крок по реальним пазам розрахуємо за формулою [10]:

$$y_{1П} = \frac{y_1}{u_n} = \frac{87}{4 \cdot 3} = \frac{87}{12}. \quad (3.20)$$

Крок по колектору розрахуємо за формулою [10]:

$$y_K = \frac{K+1}{p} = \frac{90+1}{2} = \frac{91}{2}. \quad (3.21)$$

Другий частковий крок розрахуємо за формулою [10]:

$$y_2 = y_K - y_1 = \frac{91}{2} - \frac{87}{4} = \frac{95}{4}. \quad (3.22)$$

Другий частковий крок за реальними пазами розрахуємо за формулою [10]:

$$y_{2П} = \frac{y_2}{u_n} = \frac{95}{4 \cdot 3} = \frac{95}{12}. \quad (3.23)$$

Уточнене значення лінійного навантаження розрахуємо за формулою [10]:

$$A = \frac{N \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{540 \cdot 20}{3,14 \cdot 0,176} = 19543 \text{ А/м} \quad (3.24)$$

Уточнюємо довжину повітряного зазору за формулою [10]:

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot P_p}{\alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_H} = \frac{6,1 \cdot 8268,75}{0,65 \cdot 19543 \cdot 0,60 \cdot 0,176^2 \cdot 1200} = 0,178 \text{ м} \quad (3.25)$$

3.2 Складання математичної моделі ДПС

У більшості технологічних процесів досить часто виникає необхідність регулювання частоти обертання або зміна крутного моменту на валу приводного двигуна.

Сучасні приводи мають на меті виконання двох завдань: аналіз стану і формування завдань регулювання для досягнення поставлених цілей. Під час аналізу необхідно визначити стійкість роботи приводу та здійснити

відповідність параметрів у різних режимах. При регулюванні необхідно розв'язати функціональні завдання.

Дані завдання можна вирішити за допомогою математичних методів та комп'ютерних програм, попередньо здійснивши теоретичний і функціональний синтез та аналітичне конструювання системи приводу. Для цього необхідно здійснити вибір конкретних елементів системи з урахуванням їх фізичної природи та узгодження статичних і енергетичних характеристик суміжних елементів та зв'язків між ними [11].

Остаточна структура системи приймається на підставі досягнення встановлених параметрів точності, якості і надійності роботи. На цьому шляху обов'язковими є параметрична оптимізація – розрахунок настроюваних параметрів та методів коригування [11].

Подальше моделювання спроектованої системи приводу з використанням програмних засобів дозволяє дослідити різноманітність структур та параметрів та прискорити вирішення поставлених задач оптимізації.

Складемо математичну модель двигуна постійного струму незалежного збудження з використання аналітичних та формульних залежностей, наведених у розділі 2 (рис. 1.11) [12]:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + E \\ E = c\Phi\omega \\ M = c\Phi i_{\text{я}} \\ M - Mc = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (3.26)$$

де $R_{\text{я}}$ – опір якірного ланцюга, Ом,

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

Φ – магнітний потік обмотки збудження, Вб,

ω – кутова швидкість обертання валу двигуна, рад./с.,

M – крутний момент, що розвивається двигуном, Н·м,

M_c – момент опору від робочого механізму Н·м,

J – момент інерції частин двигуна, що обертаються,

E – проти ЕРС якоря, В,

При розрахунку двигуна постійного струму значення $c\Phi$ замінюють на коефіцієнт, який визначає конструктивний вплив на номінальний режим роботи двигуна [12]:

$$k = c\Phi = \frac{U_{ян} - I_{ян} R_{я}}{\omega_n} \quad (3.27)$$

Розрахуємо номінальну швидкість двигуна за формулою [12]:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 1200}{30} = 125,6 \text{ рад/с}, \quad (3.28)$$

тоді

$$k = \frac{U_{я} - I_{я} R_{я}}{\omega_n} = \frac{220 - 40 \cdot 2,581}{125,6} = 0,930. \quad (3.29)$$

Аналіз рівнянь (3.26) дозволяє виокремити рівняння якорного ланцюга [12]:

$$\begin{aligned} U_{я} - E &= i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} \\ \frac{L_{я}}{R_{я}} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} &= \frac{U_{я} - E}{R_{я}} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Рівняння (3.30) являє собою диференціальне рівняння 1-го порядку для якого напруга якоря ($U_{я}$) є вхідним сигналом, а струм якоря ($i_{я}$) є вихідним сигналом.

Переходячи до операторної форми запису отримаємо наступні вирази [13]:

$$\begin{aligned}\frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} p i_{\text{я}} + i_{\text{я}} &= \frac{U_{\text{я}} - E}{R_{\text{я}}} \\ \left(\frac{L}{R} p + 1\right) \cdot i_{\text{я}} &= \frac{U_{\text{я}} - E}{R_{\text{я}}}\end{aligned}\quad (3.31)$$

де $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ – електромеханічна постійна часу якірного ланцюга, с:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,028}{2,581} = 0,0110 \text{ с.} \quad (3.32)$$

Елементарному збільшенню напруги у обмотці якоря ($\Delta U_{\text{я}}$) відповідає елементарне збільшення струму ($\Delta i_{\text{я}}$) і при постійності значення ЕРС отримаємо диференційне рівняння в операторній формі [13]:

$$\Delta i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} \cdot (T_{\text{я}} p + 1) i_{\text{я}} = \Delta U_{\text{я}} \quad (3.33)$$

Передавальна функція якірного ланцюга (аперіодична ланка 1-го порядку) набуде вигляду:

$$W_{\text{я}}(p) = \frac{\Delta i_{\text{я}}}{\Delta U_{\text{я}}} = \frac{1}{R_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{T_{\text{я}} p + 1}. \quad (3.34)$$

Рівняння (3.26) можна скоротити до вигляду:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} \cdot (T_{\text{я}} p + 1) + k\omega, \\ I_{\text{я}} \cdot k - M_{\text{он.}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{cases} \quad (3.35)$$

Вхідним параметром також виступає напруга якоря ($U_{\text{я}}$, В), а вихідними параметрами – колова швидкість обертання (ω , рад./с.), крутний момент опору ($M_{\text{он.}}$, Н·м), проміжною величиною виступає струм якоря ($i_{\text{я}}$, А). Розв'яжемо систему рівнянь (3.35) відносно ω залежно від величин $U_{\text{я}}$ та $M_{\text{он.}}$.

Після перетворень рівнянь (3.35) отримаємо:

– параметричне рівняння для напруги якоря:

$$U_{\text{я}} = \omega \cdot (p^2 \cdot T_{\text{я}} \cdot \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k} + p \cdot \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k} + k) + M_{\text{он.}} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{k} (T_{\text{я}} p + 1) \quad (3.36)$$

– параметричне рівняння для колової швидкості обертання:

$$\omega = U_{\text{я}} \cdot \frac{\frac{1}{k}}{p^2 \cdot T_{\text{я}} \cdot \frac{JR_{\text{я}}}{k^2} + p \cdot \frac{JR_{\text{я}}}{k^2} + 1} - M_{\text{он.}} \cdot \frac{\frac{R_{\text{я}}}{k^2} \cdot (T_{\text{я}} \cdot p + 1)}{p^2 \cdot T_{\text{я}} \cdot \frac{JR_{\text{я}}}{k^2} + p \cdot \frac{JR_{\text{я}}}{k^2} + 1} \quad (3.37)$$

У рівнянні (3.37) перше складове рівняння визначає вплив напруги якоря, а друге – вплив моменту навантаження.

де $T_{\text{ем}}$ – електромеханічна постійна часу, с.

$$T_{\text{м}} = \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k^2} = \frac{0,02215 \cdot 2,581}{0,930^2} = 0,0661 \text{ с.} \quad (3.38)$$

Коефіцієнт передачі двигуна розраховується:

$$k_{\text{н\o}} = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,93} = 1,075. \quad (3.39)$$

Остаточний вигляд передавальної функції набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \omega &= U_{я} \cdot \frac{k_{нд}}{p^2 \cdot T_{я} \cdot T_{м} + p \cdot T_{м} + 1} - M_{он.} \cdot \frac{R_{я} \cdot k_{нд}^2 \cdot (T_{я} \cdot p + 1)}{p^2 \cdot T_{я} \cdot T_{м} + p \cdot T_{м} + 1} = \\ &= U_{я} \cdot \frac{1,075}{0,0007271p^2 + 0,0661p + 1} - M_{он.} \cdot \frac{2,983 \cdot (0,011p + 1)}{0,0007271p^2 + 0,0661p + 1}. \end{aligned} \quad (3.40)$$

На основі формули (3.40) складемо структурну схему, яку зображено на рис. 3.1. Вона представлена послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку та інтегруючої ланки, які «закільцевані» негативним зворотним зв'язком.

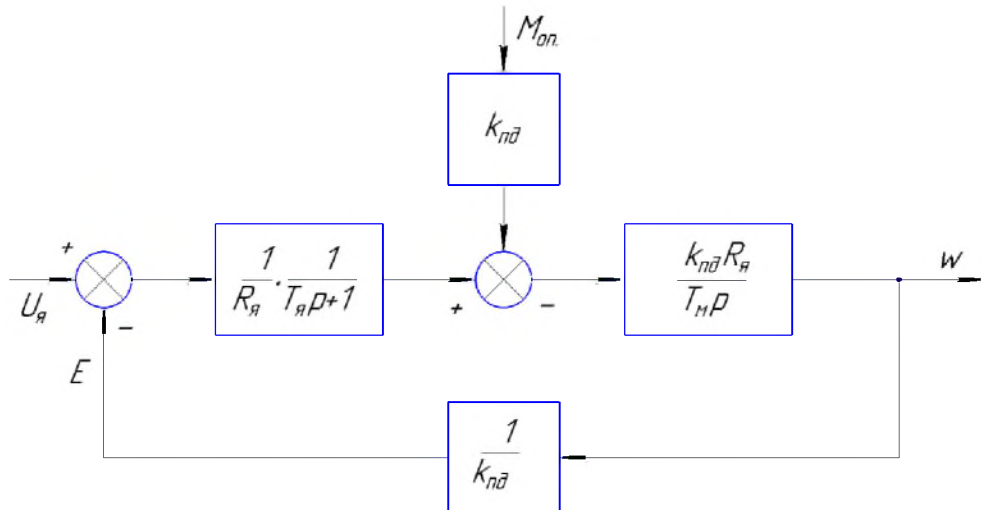


Рисунок 3.1 – Структурна схема передавальної функції

Передатна функція двигуна постійного струму є ланкою 2-го порядку, ступінь коливання якої розрахуємо за формулою [13]:

$$\xi_{\partial} = \frac{T_{м}}{2 \cdot \sqrt{T_{я} \cdot T_{м}}} = \frac{0,0661}{2 \cdot \sqrt{0,011 \cdot 0,0661}} = 1,226 \quad (3.41)$$

Для здійснення перетворення і регулювання напруги живлення якірного ланцюга застосуємо тиристорний перетворювач (рис. 3.2) [14].

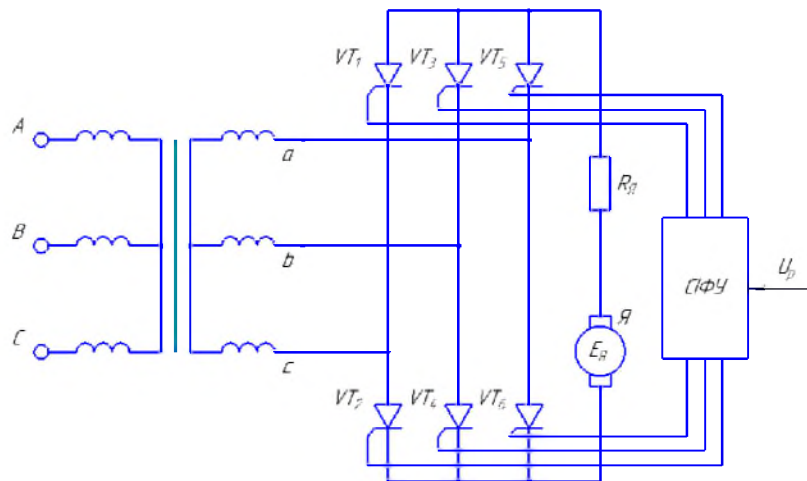


Рисунок 3.2 – Силова схема «трансформатор – випрямний міст – ДПС»

Керуючою вхідною величиною для тиристорного перетворювача є вихідна напруга регулятора (U_p , В), а вихідним – силова напруга ($U_{mn} = U_a$, В). На виході з тиристорного перетворювача отримаємо напругу, форму якої представлено на рис. 3.3 [15].

- при $U_p = 0$, $\alpha = \pi$, $U_{mn} = 0$,
- при $U_p = U_{cx\ max}$, $\alpha = 0$, $U_{mn} = U_{max}$,
- при $U_p = U_{cx\ max}/2$, $\alpha = \pi/2$, $U_{mn} = U_{max}/2$.

У відповідності до зміни напруги мережі, система імпульсного фазового управління (СІФУ) синхронно подає відповідні імпульси на тиристори, що призводить до проходження лише частини синусоїдної напруги у залежності від кута відкриття тиристорів.

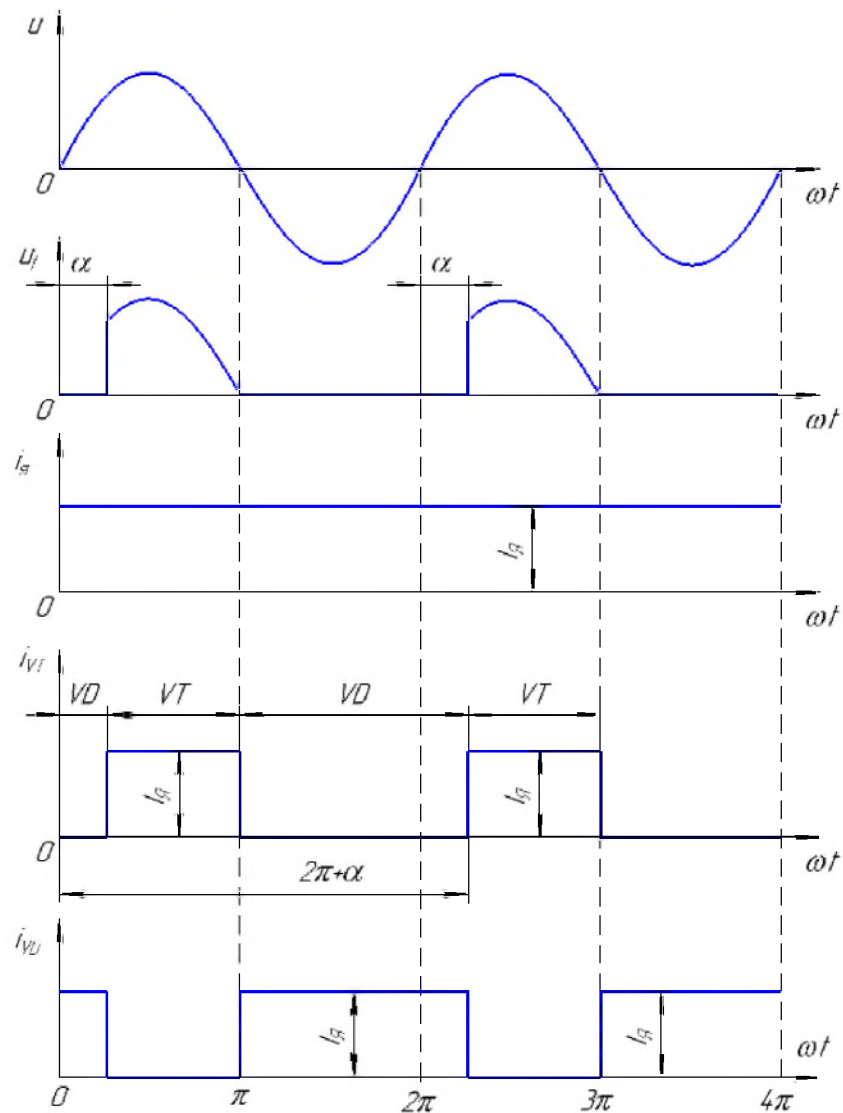


Рисунок 3.3 – Вигляд хвилі напруги на виході з тиристорного перетворювача

Комутаційні процеси у тиристорах визначають низьку інерційність тиристорного перетворювача. Крім того, спостерігається фактор запізнення, який обумовлено дискретним характером роботи перетворювача. Це пояснюється тим, що відкривання тиристора призводить до зміни робочого значення напруги U_p , а відповідна зміна напруги для відкритті тиристорів відбувається лише у наступній напівхвилі напруги. Загалом, значення запізнювань коливається від 0 до 180° , у розрахунку на значення частоти час затримки знаходиться на рівні $0,5f$ у залежності від числа фаз [15].

За допомогою стандартних методів апроксимації графічних залежностей можна отримати передатну функцію тиристорного перетворювача [15]:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{\mu}p + 1} \quad (3.42)$$

де $k_{ТП}$ – коефіцієнт перетворення, який можна розрахувати за формулою [15]:

$$k_{ТП} = \frac{U_{ТП}}{U_p} = \frac{U_{я}}{U_{нр.}} = \frac{220}{5} = 44 \quad (3.43)$$

T_{μ} – постійна часу тиристорного перетворювача, приймаємо $T_{\mu} = 0,01$ с.

$$W_{ТП}(p) = \frac{44}{0,01p + 1}$$

Для перетворення струму якоря $i_{я}$ у пропорційне значення напруги $U_{нр.}$ для подачі сигналу на регулятор використовується спеціальний пристрій – датчик перетворення (струму). Параметри даного пристрою розраховуються виходячи з наявної елементної бази (операційних підсилювачів, мікропроцесорів, транзисторів та іншого), тобто на напругу 5 В, що дає значення коефіцієнта передачі [16]:

$$k_{нр} = \frac{U_{нр}}{I_{я\max}} = \frac{5}{150} = 0,03333 \quad (3.44)$$

Для контролю частоти обертання двигуна використовуються тахогенератори – датчики колової швидкості обертання. Дані датчики встановлюються на торці вала двигуна і перетворюють механічне обертання вала у електричний сигнал (напругу). При цьому між значенням частоти обертання двигуна і вихідною напругою тахогенератора встановлюється пряма залежність. Коефіцієнт перетворення тахогенератора дорівнюватиме [16]:

$$k_{mz} = \frac{U_{np.}}{\omega_n} = \frac{5}{125,6} = 0,0398 \quad (3.45)$$

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Для здійснення глибокого дослідження роботи двигуна постійного струму доцільним є використання спеціальних програм моделювання, яке враховує наявні зв'язки у досліджуваній системі.

Для здійснення моделювання необхідно мати вихідні дані, що характеризують тип двигуна, його технічні параметри, режим навантаження та наявні зовнішні впливи.

У роботі пропонується застосування програмного забезпечення Matlab, яке дозволяє здійснювати експериментальні дослідження системи двигуна постійного струму та покращувати її роботу. Дане програмне забезпечення містить різноманітні підпрограмні комплекси, які дозволяють налаштовувати, програмувати та тестувати складені моделі, що є відображенням реальних систем [17].

Модель може одночасно розглядати та ідентифікувати електричну і механічну частину двигуна постійного струму, враховуються зовнішні збурення, аналіз структури, використовувати безперервну або дискретну функцію часу з візуалізацією результатів моделювання.

У загальному випадку система «живлення-тиристорний перетворювач-двигун-навантаження» розглядаються як «чотириполюсник», для якого відомі входні та вихідні величини. Аналіз цих даних та варіація структури моделі налаштовуються таким чином, щоб краще відповідати бажаним результатам, що і реалізується стандартними інструментами у Matlab. Аналіз поведінки моделі може бути здійснений у реальному часі, а структура моделі повинна бути тотожною моделі процесу для досягнення відповідності та точності [18].

Для створення комп'ютерної моделі керованого приводу із замкненим циклом необхідним є ідентифікація процесів, що протікають, та складення алгоритму роботи контуру зворотного зв'язку.

Панель інструментів програми Matlab містить блоки, які дозволяють створити модель, що найкращим чином реалізує модель на інтуїтивному рівні. Робота по створенню моделі містить наступні етапи [19]:

- зчитування параметрів, що притаманні для того чи іншого елемента,
- обчислення показників роботи моделі та оцінка її роботи,
- опис динаміки роботи системи,
- удосконалення моделі для досягнення встановлених значень характерних параметрів.

Замкнутий цикл найкращим способом дозволяє керувати параметром двигуна, визначати оптимальні значення вихідних даних, здійснювати аналіз даних, модернізувати саму модель.

На рис. 4.1 наведено складену модель керування двигуном постійного струму [20].

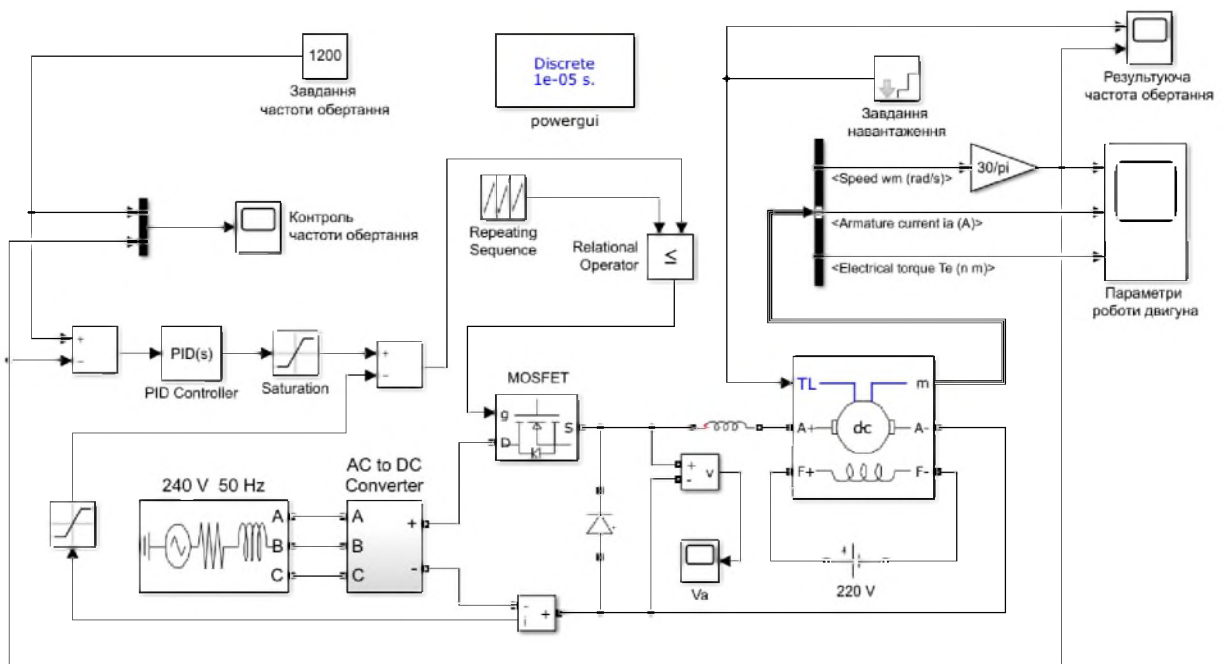


Рисунок 4.1 – Складена модель керування двигуном постійного струму

Живлення системи здійснюється від трифазного джерела живлення «Three-Phase Source», параметри якого наведено на рис. 4.2 [20].

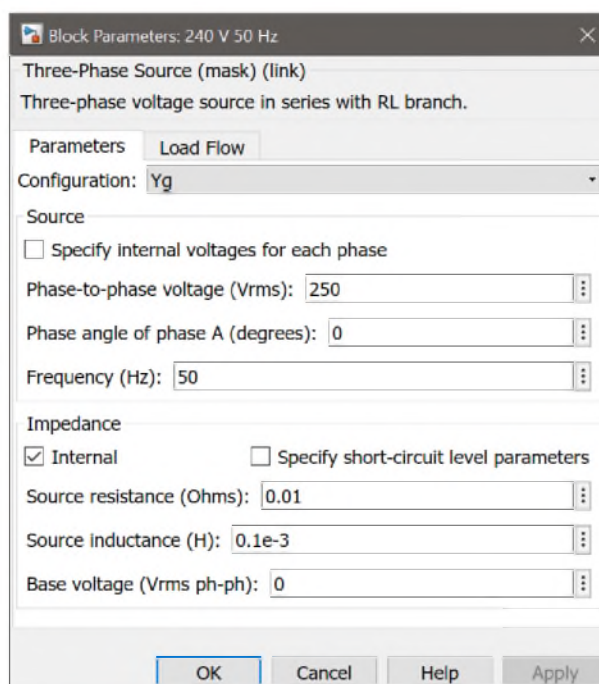


Рисунок 4.2 – Параметри блока «Three-Phase Source»

З огляду на те, що ДПС живиться постійним струмом, у схемі реалізується випрямлення змінного струму за допомогою блока «AC to DC Converter», що містить випрамний міст та обмежувач напруги, а склад якого наведено на рис. 4.3 [20].

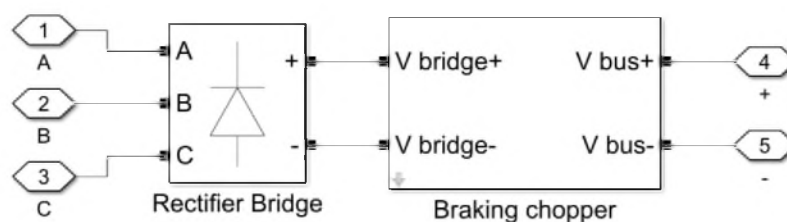


Рисунок 4.3 – Склад блока «AC to DC Converter»

Керування двигуном здійснюється за допомогою блока «Mosfet», що реалізує метал-оксид-напівпровідниковий польовий транзистор і діод, підключені паралельно з послідовним ланцюжком RC-фільтра, і параметри якого наведено на рис. 4.4 [20].

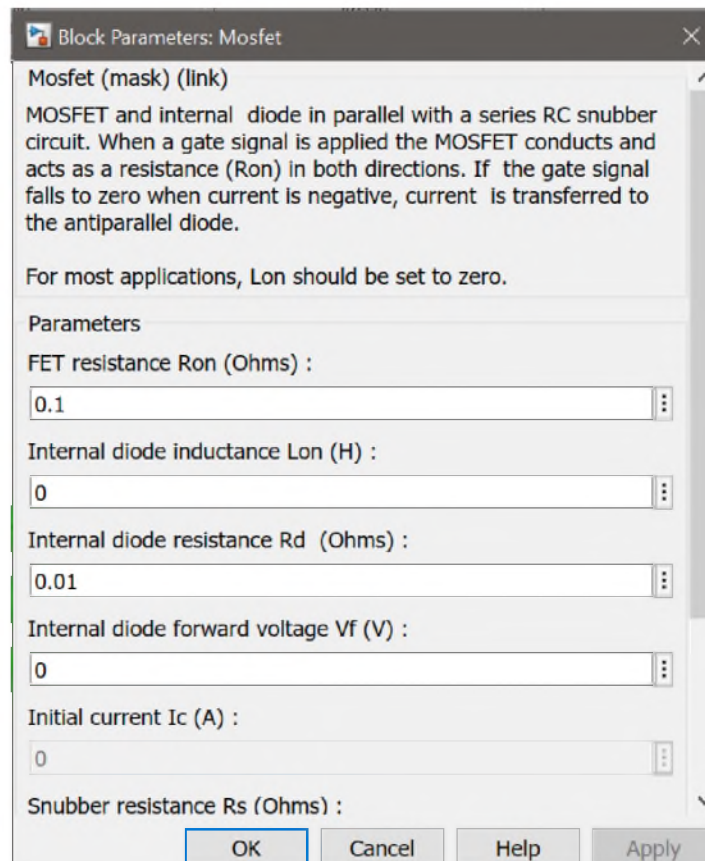


Рисунок 4.4 – Склад блока «Mosfet»

Подача керуючого сигналу здійснюється з блока «Repeating Sequence», параметри якого наведено на рис. 4.5 [20].

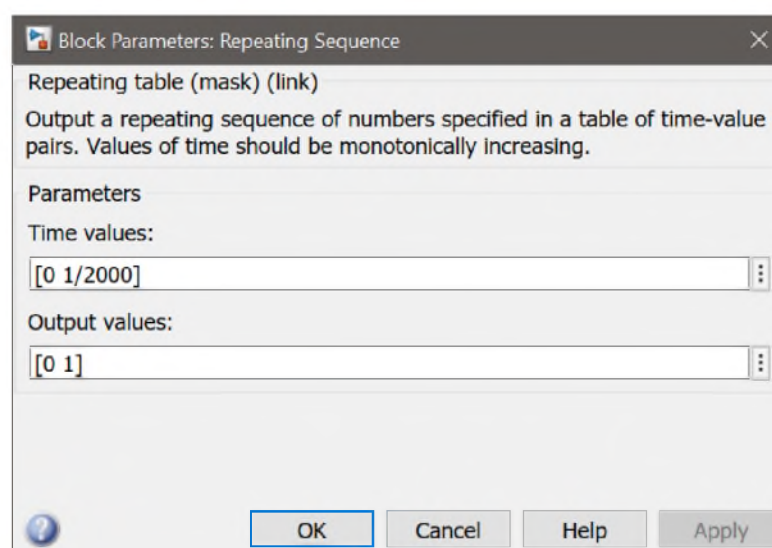


Рисунок 4.4 – Параметри блока «Repeating Sequence»

У блоці «Relational Operator» реалізується принцип порівняння заданої частоти обертання двигуна після ПІД-регулятора зі значенням керуючого сигналу від блока «Repeating Sequence». А результуючий сигнал подається у якості сигналу керування на блок «Mosfet» [20].

Завдання навантаження ДПС реалізується за допомогою блоку «Timer», параметри якого наведено на рис. 4.5 [20].

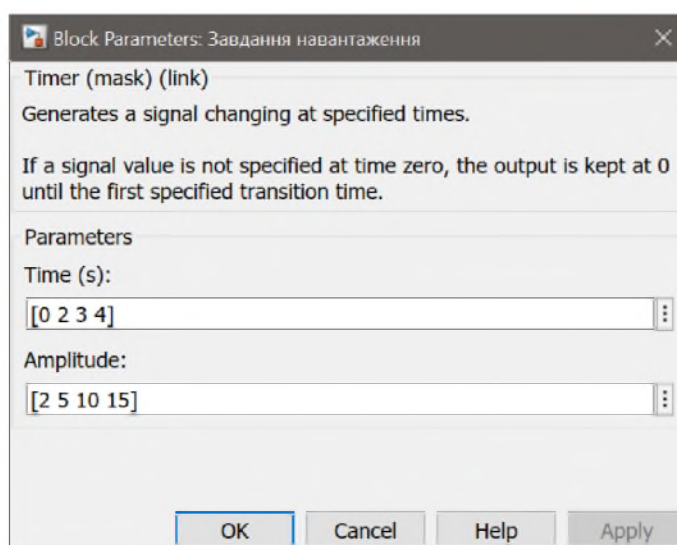


Рисунок 4.5 – Завдання навантаження ДПС

Реалізація зворотного зв'язку була реалізована на основі контролю частоти обертання. Зворотний зв'язок за частотою обертання реалізовано з використанням ПІД-регулятора – блок «PID Controller», параметри якого наведено на рис. 4.6 [20].

Результатом моделювання будуть графічні залежності, що наочно ілюструють параметри окремих блоків схеми.

На рис. 4.7 наведено процес набуття двигуном заданої частоти обертання ДПС.

На рис. 4.8 наведено два суміщені графіки, що ілюструють зміну частоти обертання двигуна під час «накладання» зовнішнього навантаження.

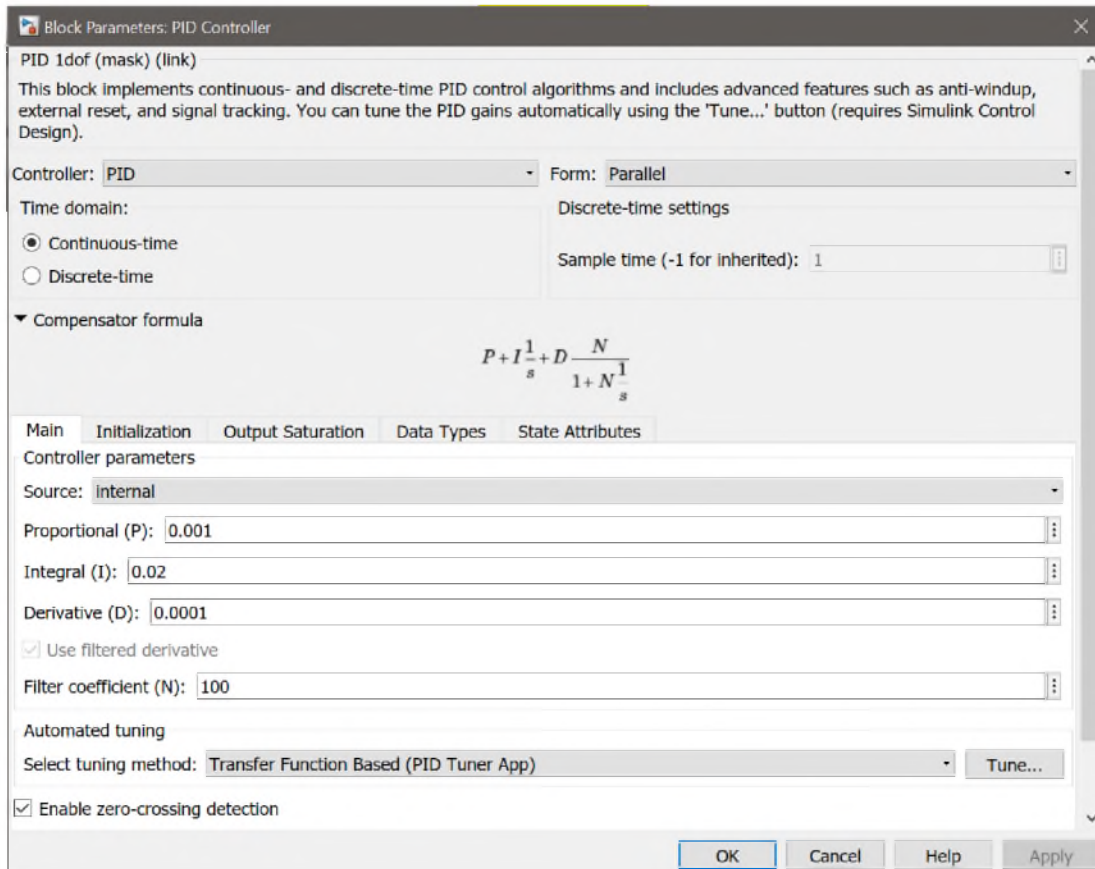


Рисунок 4.6 – Параметри ПД-регулятора

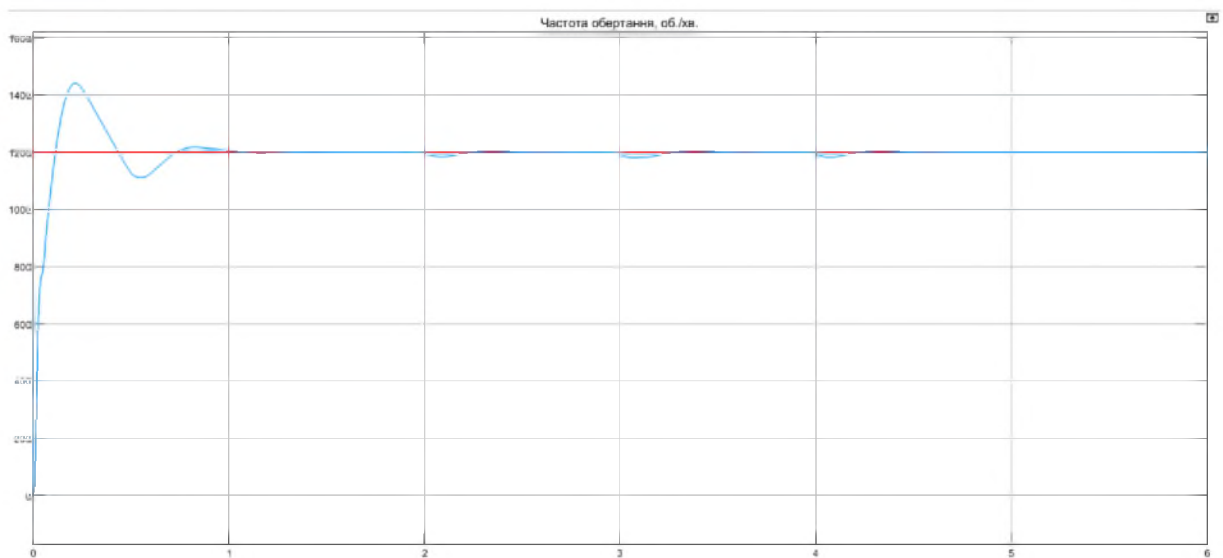


Рисунок 4.7 – Набуття двигуном заданої частоти обертання

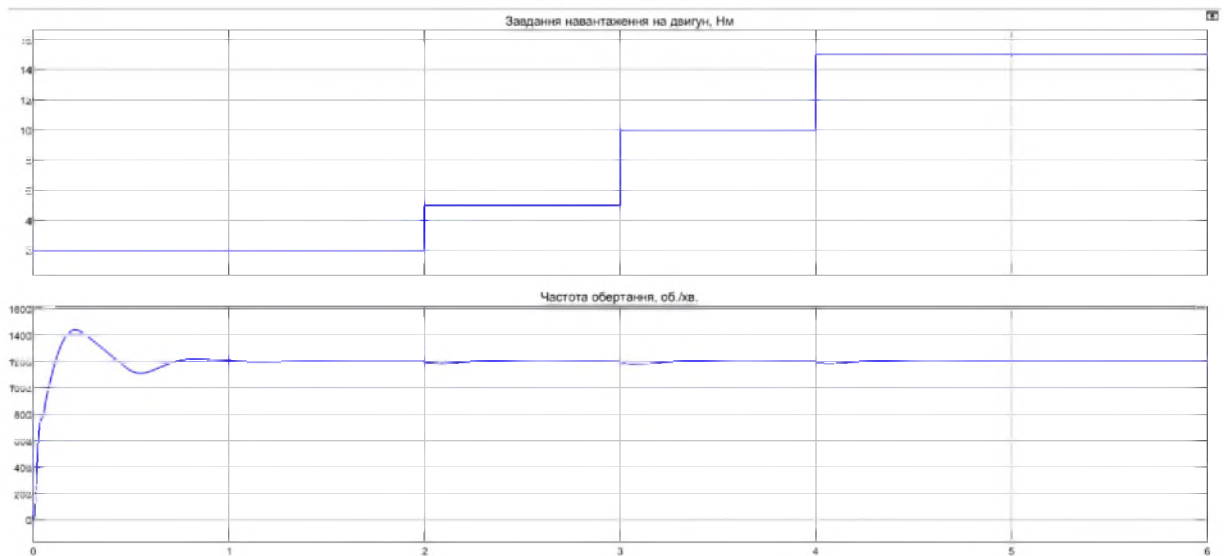


Рисунок 4.8 – Зміна частоти обертання двигуна під час «накладання» зовнішнього навантаження

На рис. 4.9 представлено зміну параметрів роботи двигуна у процесі пуску.

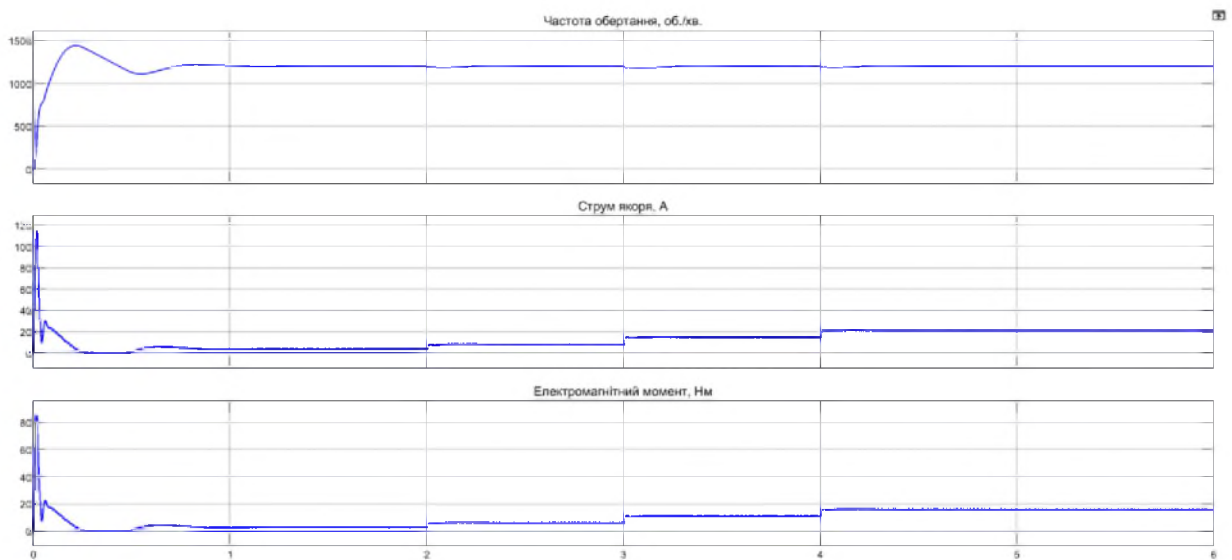


Рисунок 4.9 – Зміна параметрів роботи двигуна у процесі пуску

Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити висновок про адекватність складеної моделі та доцільність використання ПД-контролера для реалізації функції зворотного зв'язку.

ВИСНОВКИ

У роботі були досліджені параметри роботи електроприводу з двигуном постійного струму.

Зазначена мета була реалізована шляхом проведення імітаційного моделювання у спеціальному програмному середовищі завдяки створеній комп'ютерній моделі за заданими параметрами з використанням стандартних блоків програмного забезпечення Matlab.

Результати моделювання показали адекватність створеної моделі і можливість її застосування для серійних двигунів постійного струму через високу реальність протікання процесів.

Складена модель дозволяє визначати та передбачати поведінку системи на основі ідентифікації закономірностей змін електромеханічних параметрів, які характеризують стан двигуна. Комп'ютерна модель володіє простотою структури будови, якщо її порівнювати з фізичною або математичною, натомість вимагає здійснення попередніх розрахунків та знання «початкових умов».

Застосовані засоби силової електроніки на базі напівпровідникових елементів дозволяють з високим ступенем точності здійснювати керувати режимом роботи двигуна постійного струму – досягати за допомогою системи зворотного зв'язку регулювати частоту обертання у широких межах.

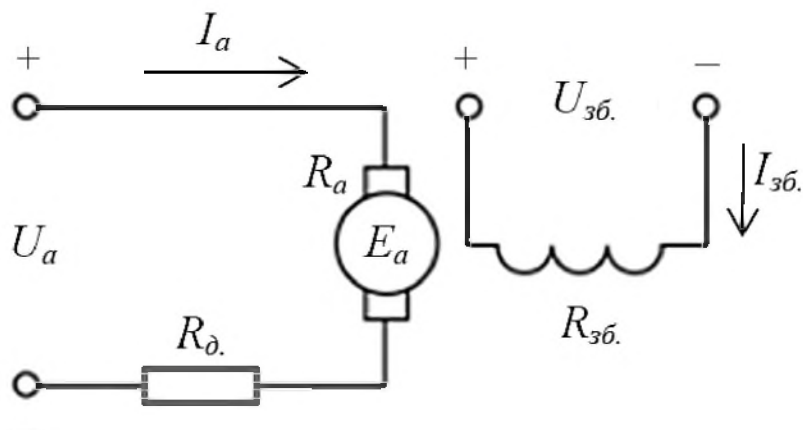
Контроль параметрів роботи двигуна дозволяє заздалегідь визначити та не допустити розвиток аварійних ситуацій, що можуть бути викликані різноманітними чинниками – наявністю коротких замикань, коливанням значення напруги, зміна теплових показників роботи, короточасних або довготривалих перевантажень, наявністю резонансних коливань та інше.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

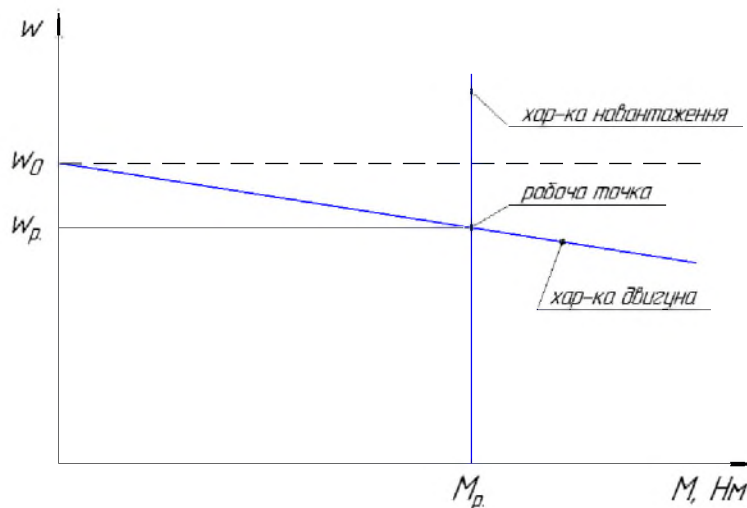
1. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cutt.ly/7HQm27K>
3. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
4. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока. М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cutt.ly/dHQWQXV>
6. Аносов В.Н., Наумов В.В., Котин Д.А. Теория автоматического управления. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2016. – 68 с.
7. Тютюнник А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування: навчальний посібник / А. Г. Тютюнник. – Житомир: ЖІТІ, 1998. – 512 с.
8. Лукас В.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Недра, 1990. – 416 с.
9. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 336 с.
10. Вольдек А.И. Электрические машины. М.-Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
11. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода. М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 60 с.
12. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
13. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы: учеб. пособие для вузов / И.В. Мирошник. – СПб: ПИТЕР, 2006. – 272 с.

14. Абрамович М.И., Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И. Абрамович, В.М. Бабайлов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432с.
15. Тиристоры: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272с.
16. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
17. Bide Motor Modelling And Control – A Matlab /Simulink Implementation. Work By Stefan Baldiwnson May. 2005. Bide Motor Modelling And Control.
18. Семёнов А.С. Программа MATLAB. – М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 40 с.
19. Bolgov I., Bolgova V. Detailed simulation model of the two-phase brushless DC motor designed for VFD integration // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – № 57.
20. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Учебное пособие. - М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
21. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий. – М.: ИРПО; Изд. Центр «Академия», 2000.
22. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

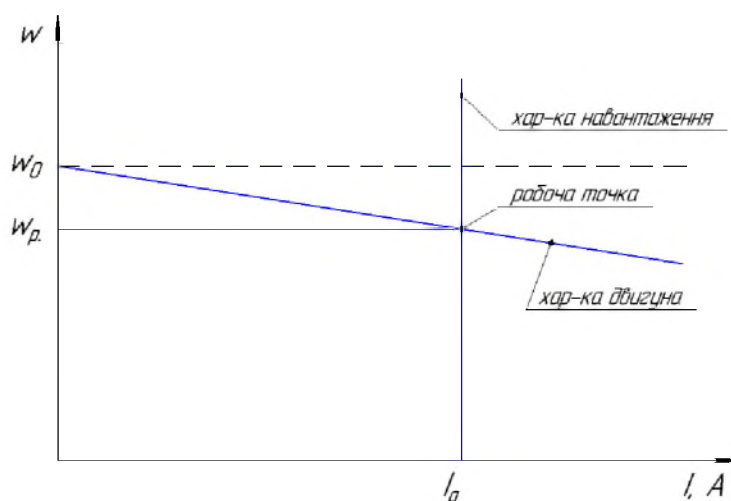
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



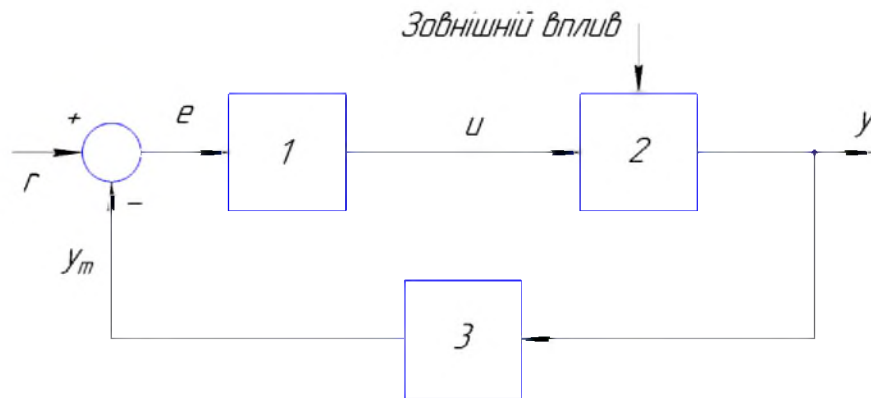
Огляд струмів і напруг у ДПС з незалежним збудженням



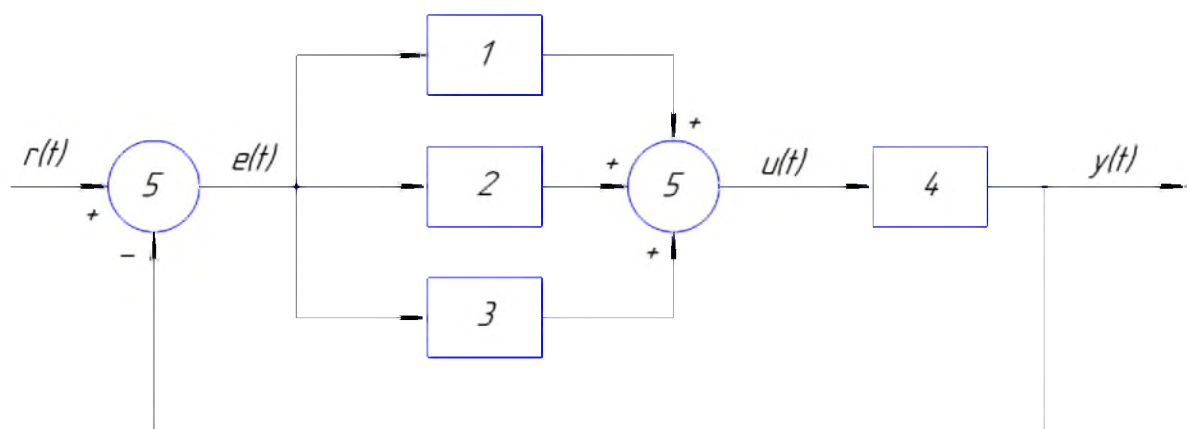
Залежність швидкості обертання від крутного моменту



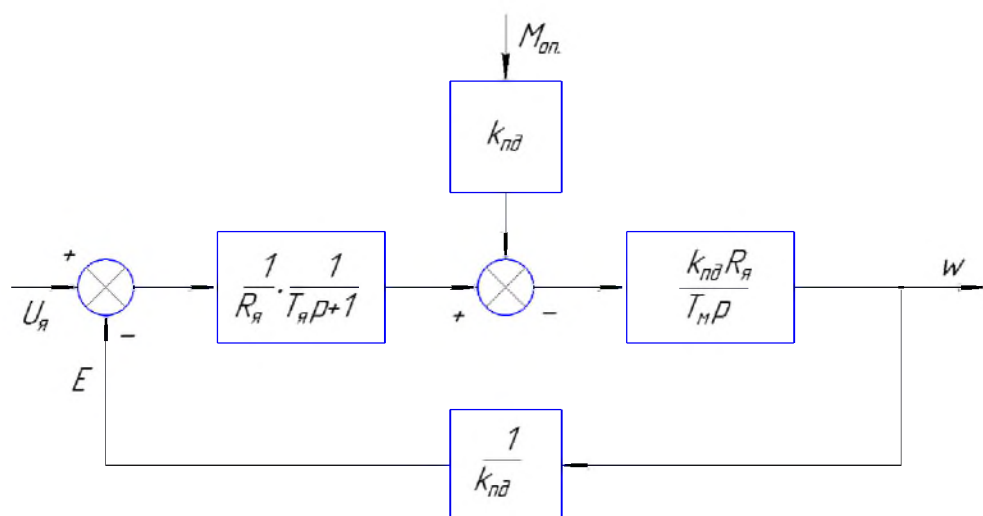
Залежність швидкості обертання від струму



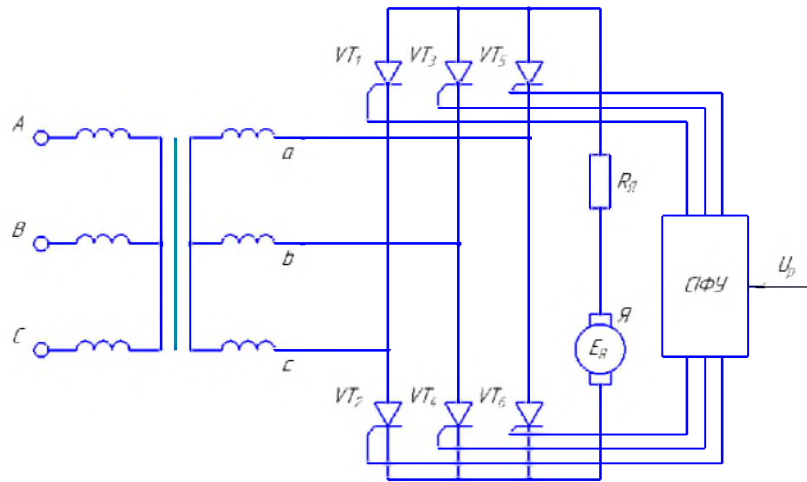
1 – контролер, 2 – об'єкт керування, 3 – зворотній зв'язок
Керування за допомогою зворотного зв'язку



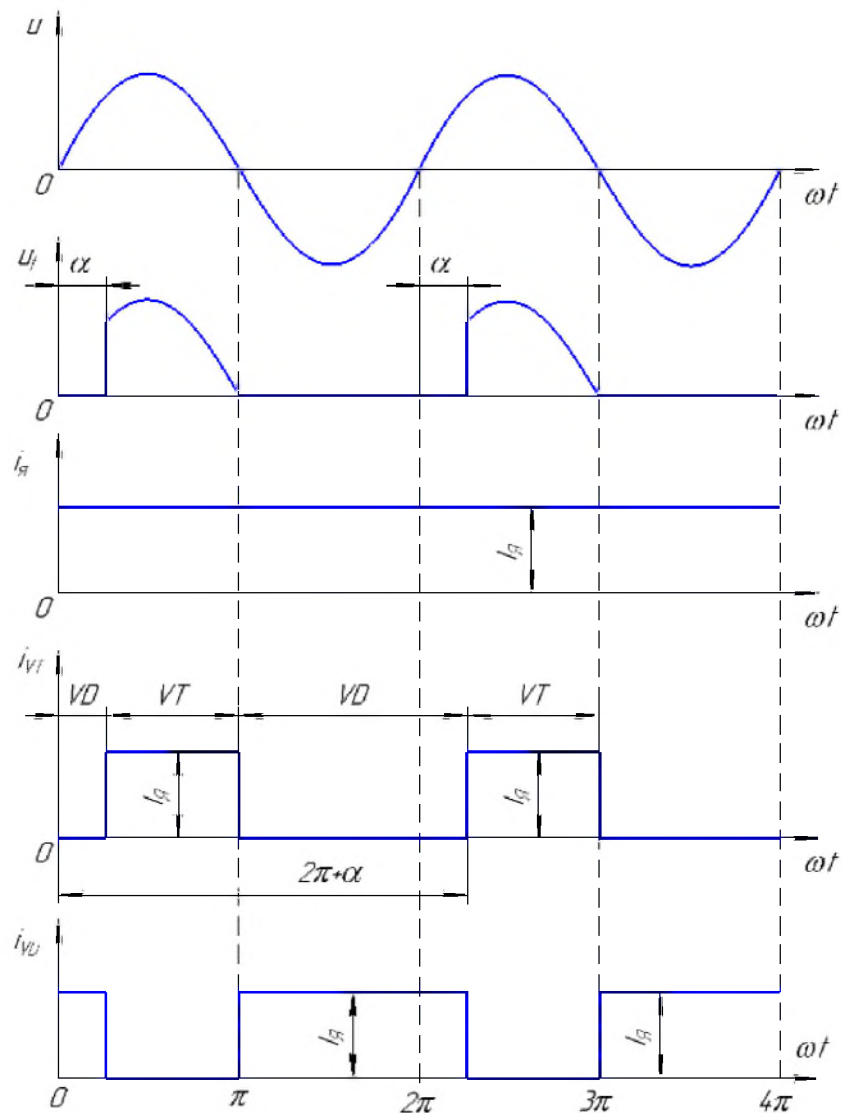
1 – пропорційний блок, 2 – інтегральний блок, 3 – диференційний блок,
4 – об'єкт керування, 5 – блоки розрахунку (суматори)
Структура ПІД-регулятора з контуром зворотного зв'язку



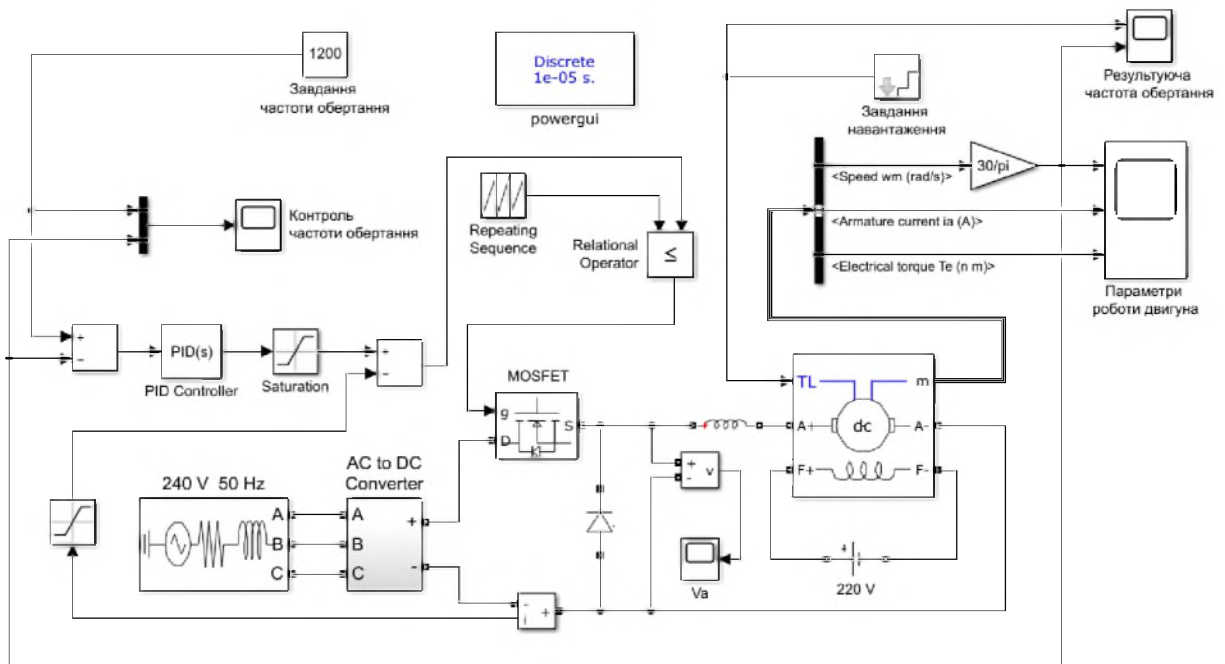
Структурна схема передавальної функції



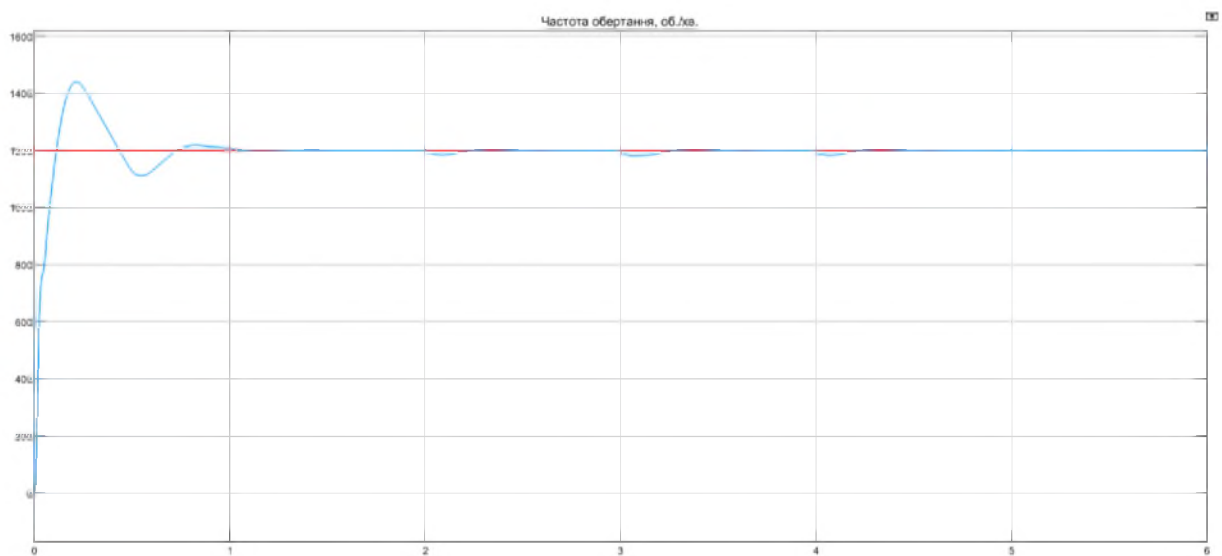
Силовая схема «трансформатор – випрямний міст – ДПС»



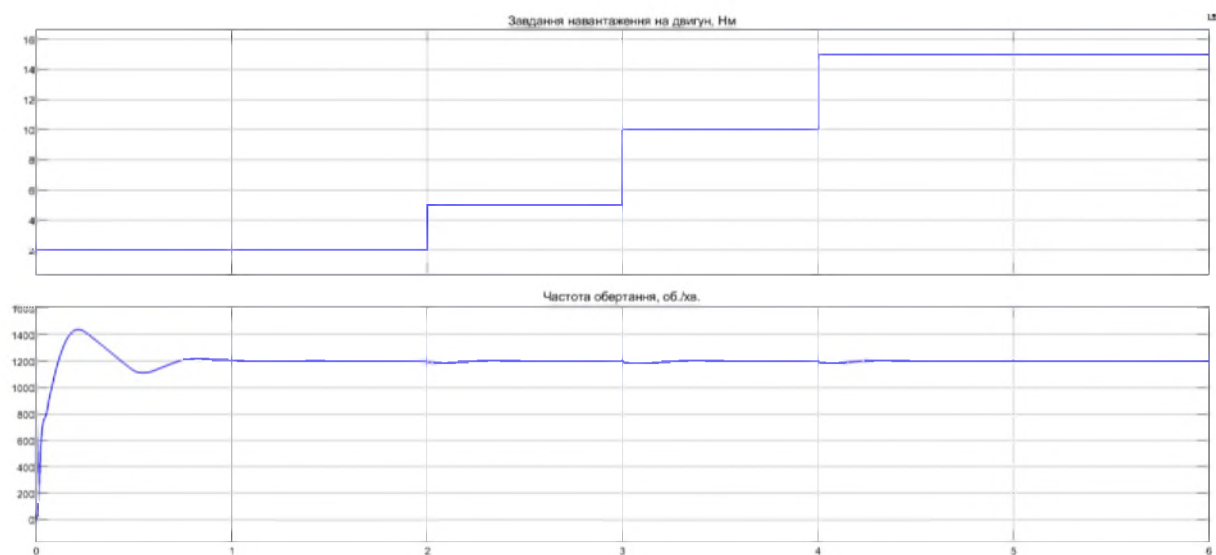
Вигляд хвилі напруги на виході з тиристорного перетворювача



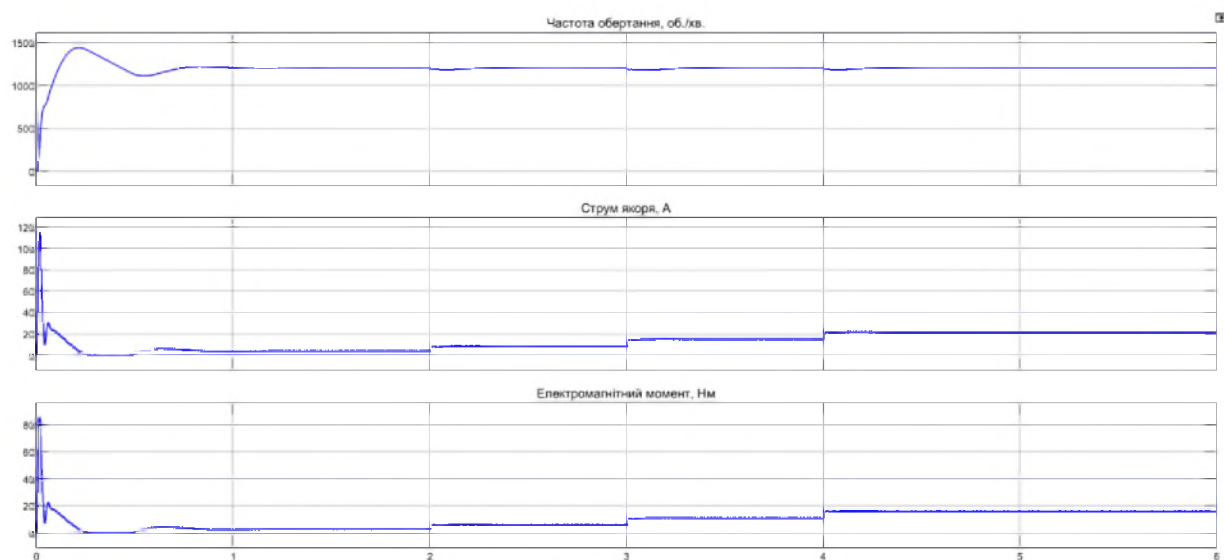
Складена модель керування двигуном постійного струму



Набуття двигуном заданої частоти обертання



Зміна частоти обертання двигуна під час «накладання» зовнішнього навантаження



Зміна параметрів роботи двигуна у процесі пуску

ДОДАТОК Б. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК (ВИТЯГ)

5.1. Обов'язки працівників

5.1.1. Обслуговування діючих електроустановок, проведення в них оперативних перемикань, організацію та виконання ремонтних, монтажних чи налагоджувальних робіт і випробувань повинні здійснювати спеціально підготовлені та атестовані електротехнічні працівники.

У споживачів, як правило, має бути створена електротехнічна служба (відділ, група), укомплектована необхідною кількістю електротехнічного персоналу, залежно від класу напруги живлення, складності та обсягу обслуговуваних електроустановок.

У разі відсутності атестованого обслуговуючого персоналу допускається визначити спеціалізовану організацію, відповідальну за технічну експлуатацію та обслуговування електроустановок споживача. Ця організація згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 15.10.2003 N 1631 "Про затвердження Порядку видачі дозволів Державним комітетом з нагляду за охороною праці та його територіальними органами" повинна мати відповідний дозвіл на проведення робіт в електроустановках. У цьому разі відповідальність за технічно грамотну та безпечну експлуатацію електрогосподарства споживача повинна визначатись договором, укладеним між споживачем і цією організацією.

За відсутності такого обслуговування експлуатація електроустановок забороняється.

5.1.2. Власник електроустановки повинен забезпечити організацію:

- експлуатації електроустановок (електротехнічного та електротехнологічного обладнання) згідно з вимогами цих Правил, інших чинних НД та Правил користування електричною енергією, затверджених постановою НКРЕ від 31.07.96 N 28, зареєстрованих у Міністерстві

юстиції України 02.08.96 за N 417/1442 (у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 N 910, зареєстрованої у Міністерстві юстиції України 18.11.2005 за N 1399/11679);

- надійної роботи електроустановок і безпечного їх обслуговування;
- виконання заходів із запобігання використанню технологій і методів роботи, що негативно впливають на навколишнє природне середовище;
- дотримання встановлених режимів споживання електричної енергії та потужності;
- виконання приписів органів державного нагляду.

5.1.3. Для безпосереднього виконання функцій щодо організації експлуатації електроустановок керівник (роботодавець) повинен призначити особу, відповідальну за електрогосподарство споживача (далі - особа, відповідальна за електрогосподарство), та особу, яка буде її замінювати у разі відсутності.

Особу, відповідальну за електрогосподарство, та особу, яка буде її замінювати, призначають з числа спеціалістів, кваліфікація яких відповідає вимогам Правил та які пройшли навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці.

Після успішної перевірки знань з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці та присвоєння цим особам IV групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою до 1000 В та V групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою понад 1000 В ці особи наказом споживача допускаються до виконання своїх обов'язків.

За наявності в споживача посади головного енергетика обов'язки особи, відповідальної за електрогосподарство, як правило, покладаються на нього. Допускається виконання обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, та/або її заступника, за сумісництвом.

Організація вищого рівня споживача може призначати особу, відповідальну за електрогосподарство, для своїх структурних підрозділів.

5.1.4. Споживачі, у яких електрогосподарство включає тільки ввідно-розподільний пристрій, освітлювальні установки, прилади побутового призначення напругою до 220 В, особу, відповідальну за електрогосподарство, можуть не призначати.

Відповідальність за технічно грамотне та безпечне користування електроустановкою за письмовою згодою територіального підрозділу Держенергонагляду покладається на керівника споживача. Ця особа повинна пройти навчання в СНЗ за 8-годинною програмою. Надалі вона проходить інструктаж в енергопостачальній організації з питань технічної та безпечної експлуатації електроустановок в обсязі знань, що відповідає II групі з електробезпеки, про що робиться запис у журналі інструктажу споживачів і в договорі про користування електроенергією.

За умови відсутності змін в умовах виробництва та складі електрообладнання періодичність проведення інструктажів встановлюється один раз на два роки.

Якщо під час здійснення енергетичного нагляду будуть виявлені порушення умов експлуатації та умов електроспоживання, то постачання електроенергії повинно бути припинене або обмежене в установленому порядку до призначення на цьому об'єкті особи, відповідальної за електрогосподарство, або електроустановку необхідно передати на обслуговування спеціалізованій організації.

5.1.5. Експлуатація електроустановок з напругою понад 1000 В, власниками яких є населення, дозволяється у разі, якщо споживач має V групу з електробезпеки або оформив договір про надання послуг щодо обслуговування електроустановок зі спеціалізованою організацією або з фізичною особою.

5.1.6. Особа, відповідальна за електрогосподарство (спеціалізована організація), повинна забезпечити:

1) розроблення і проведення організаційних і технічних заходів, що включають:

- утримання електроустановок у робочому стані та їх експлуатацію згідно з вимогами цих Правил, ПУЕ, ПБЕЕ, інструкцій та інших НД;
- дотримання заданих електропередавальною (електропостачальною) організацією режимів електроспоживання і договірних умов споживання електричної енергії та потужності;
- виконання заходів з підготовки електроустановок підприємства до роботи в осінньо-зимовий період;
- раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів;
- оптимальне споживання реактивної потужності та економічні режими роботи компенсуючих пристроїв;
- упровадження автоматизованих систем і приладів вимірювання та обліку електричної енергії;
- своєчасний і якісний ремонт електроустановок;
- зменшення аварійності та травматизму;
- забезпечення промислової безпеки;
- підвищення надійності роботи електроустановок;
- навчання і перевірку знань цих Правил, ПБЕЕ, ПУЕ, ПБЕ, Правил пожежної безпеки в Україні, виробничих (посадових і експлуатаційних) інструкцій та інструкцій з охорони праці для електротехнічного (електротехнологічного) персоналу;
- охорону навколишнього природного середовища (у залежності від покладених функцій);

2) удосконалення мережі електропостачання споживача з виділенням на резервні зовнішні живильні лінії навантажень струмоприймачів екологічної та аварійної броні;

3) розроблення комплексу заходів, спрямованих на запобігання травматизму, зниженню рівня промислової безпеки, загибелі тварин, пошкодженню обладнання, можливим негативним екологічним та іншим

наслідкам у разі припинення або обмеження електропостачання, здійсненого у встановленому порядку;

4) розслідування технологічних порушень в роботі електроустановок та оперативне повідомлення про них територіальному підрозділу Держенергонагляду;

5) розроблення та дотримання норм витрати палива, електричної енергії, їх своєчасний перегляд під час удосконалення технології виробництва та впровадження нової техніки;

6) проведення діагностування технічного стану електроустановок;

7) проведення вимірів споживання електричної енергії та потужності в установлений електропередавальною організацією характерний режимний день літнього та зимового періодів і подання в установлені терміни добових режимних графіків до електропередавальної організації та територіального підрозділу Держенергонагляду;

8) систематичний контроль за графіком навантаження споживача; розроблення постійно діючих заходів з регулювання добового графіка електричного навантаження, зниження граничних величин споживання електричної потужності в години максимуму навантаження мережі електропередавальної організації;

9) виконання графіка обмеження споживання електричної енергії, потужності та аварійного відключення споживачів; розробку заходів щодо зниження споживання електричної енергії та потужності для забезпечення встановлених режимів електроспоживання у відповідності до доведених графіків обмеження;

10) ведення обліку (у спеціальному журналі) щодобового споживання електричної енергії і навантаження в години контролю максимуму електричної потужності та надання інформації електропередавальній організації і відповідному територіальному підрозділу Держенергонагляду (на їх вимогу);

11) розроблення із залученням технологічних та інших підрозділів, а також спеціалізованих інститутів і проектних організацій перспективних планів зниження енергоємності продукції, яка випускається, упровадження енергозберігаючих технологій, теплоутилізаційних установок, використання вторинних паливно-енергетичних ресурсів, запровадження прогресивних форм економічного стимулювання;

12) облік та аналіз аварій і нещасних випадків, а також ужиття заходів з усунення причин їх виникнення;

13) розроблення виробничих інструкцій та інструкцій з охорони праці і пожежної безпеки для працівників енергетичної служби;

14) надання інформації на вимогу Держенергонагляду у відповідності до нормативно-правових актів;

15) ведення документації з електрогосподарства згідно з вимогами нормативно-правових актів;

16) розроблення інструкцій про порядок дій обслуговуючого персоналу у разі виникнення аварійних та надзвичайних ситуацій, пожеж;

17) додержання вимог санітарних норм і правил щодо умов праці на робочих місцях обслуговуючого персоналу згідно з підрозділом 5.7 цих Правил.

5.1.7. Працівник, який виявив порушення цих Правил або помітив несправність електроустановки, колективного або індивідуального засобу захисту, зобов'язаний повідомити про це свого безпосереднього керівника, а за його відсутності - керівника вищого рівня.

У тих випадках, коли несправність в електроустановці становить явну небезпеку для людей чи для самої установки, а усунути цю несправність може працівник, який її виявив, він повинен зробити це негайно за умови дотримання вимог правил безпеки, а потім повідомити про цей випадок безпосереднього керівника.

5.1.8. Керівники споживачів повинні забезпечити безперешкодний доступ на свої об'єкти посадових осіб органів державного нагляду та

контролю, надання їм інформації і документів, необхідних для здійснення ними своїх повноважень та виконання виданих цими органами приписів у зазначені терміни.

5.1.9. Контроль і нагляд за виконанням вимог цих Правил, відповідно до своїх обов'язків, здійснюють спеціалісти енергослужби, служби охорони праці споживача та організацій вищого рівня.

5.1.10. Державний нагляд за виконанням вимог цих Правил відповідно до Закону України "Про електроенергетику" та Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 07.08.96 N 929, із змінами та доповненнями, здійснюють Держенергонагляд, а також відповідно до своїх функціональних обов'язків інші вповноважені організації.

5.2. Вимоги до працівників і їх підготовка

5.2.1. Обслуговування електроустановок споживачів, у тому числі виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і оперативних перемикачів в електроустановках, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнічні працівники, а саме: керівники і фахівці, оперативні, виробничі та оперативно-виробничі працівники.

5.2.2. Обслуговування установок електротехнологічних процесів (електрозварювання, електролізу, електротермії тощо) вантажопідіймальних механізмів, ручних електричних машин, переносних та пересувних струмоприймачів, складного енергонасиченого виробничо-технологічного обладнання, під час роботи якого необхідно постійно проводити технічний нагляд, зміну, коригування ведення технологічних режимів за допомогою штатних засобів регулювання електроапаратури, електроприводів, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнологічні працівники, які мають навички та знання для безпечного виконання робіт з технічного обслуговування закріпленої за ними установки.

5.2.3. Перелік посад та професій електротехнічних та електротехнологічних працівників, яким необхідно мати відповідну групу з електробезпеки, затверджує роботодавець.

5.2.4. Електротехнологічні працівники виробничих цехів і дільниць, які здійснюють експлуатацію електротехнологічних установок, повинні мати групу з електробезпеки II і вище.

Керівники структурних підрозділів, яким безпосередньо підпорядковані електротехнологічні працівники, повинні мати групу з електробезпеки не нижчу, ніж у підлеглих працівників. Вони повинні здійснювати технічне керівництво цими працівниками і контроль за їхньою роботою.

5.2.5. Працівники, які обслуговують електроустановки споживачів або технологічні процеси, які базуються на використанні електричної енергії, повинні мати вік понад 18 років.

При прийнятті на роботу, а також періодично стан здоров'я працівників повинен засвідчуватися медичним оглядом.

5.2.6. Роботодавець відповідно до ГНД 34.12.102-2004 та ДНАОП 0.00-4.12-05 з урахуванням місцевих умов та складу енергетичного обладнання повинен затвердити положення про навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці та про перевірку знань з цих питань.

Навчання з технічної експлуатації електроустановок включає такі форми роботи з працівниками, що обслуговують електричні установки: проведення самого навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки, перевірку знань з цих питань, а також інструктажі, стажування, дублювання, проведення аварійних тренувань та допуск до роботи.

5.2.7. Для виконання роботи в електроустановках, розміщених у вибухонебезпечних або пожежонебезпечних зонах, працівник повинен пройти спеціальне навчання за програмою пожежно-технічного мінімуму

відповідно до НАПБ Б.02.005-2003. Порядок організації навчання визначається НАПБ Б 06.001-2003.

5.2.8. Електротехнічні та електротехнологічні працівники повинні проходити інструктажі. Залежно від характеру і часу проведення інструктажі поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий.

За результатами проведеного інструктажу особа, яка інструктує (шляхом опитування), повинна переконатись, що працівник засвоїв питання, з яких проводився інструктаж.

Проведення інструктажів можна здійснювати разом з інструктажами з охорони праці і фіксувати у відповідному журналі.

Відповідальність за організацію та проведення інструктажів, усіх форм навчання та перевірки знань з питань технології робіт, пожежної безпеки та охорони праці покладається на роботодавця.

5.2.9. У процесі трудової діяльності працівники проходять такі види навчання з питань технічної експлуатації електроустановок:

- професійне навчання кадрів на виробництві, яке проводиться відповідно до Положення про професійне навчання кадрів на виробництві, затвердженого спільним наказом Міністерства праці та соціальної політики України і Міністерства освіти і науки України від 26.03.2001 N 127/151, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 06.04.2001 за N 315/5506;
- періодичне навчання в СНЗ;
- щорічне навчання на виробництві.

5.2.10. У кожного споживача для персоналу, який забезпечує виробничі процеси в електроенергетиці, повинні бути затверджені керівництвом план-графіки на проведення щорічного навчання на виробництві та періодичного навчання в СНЗ.

5.2.11. Особи, відповідальні за електрогосподарство, проходять не рідше одного разу на три роки періодичне навчання з питань технічної експлуатації електроустановок.

5.2.12. Щорічне навчання на виробництві проходять електротехнічні та електротехнологічні працівники, які зайняті на роботах з підвищеною небезпекою або там, де є потреба в професійному доборі. Списки цих працівників щорічно складаються та затверджуються роботодавцем.

5.2.13. Після закінчення навчання з питань технічної експлуатації електроустановок працівник повинен пройти перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки (далі - перевірка знань з технології робіт).

Результати перевірки знань з технології робіт заносяться в журнал установленої форми та підписуються всіма членами комісії. Якщо перевірка знань декількох працівників проводилась в один день і склад комісії не змінювався, то члени комісії можуть підписатися один раз після закінчення роботи комісії. При цьому необхідно вказати словами загальну кількість осіб, у яких перевірено знання з технології робіт.

5.2.14. Новопризначені працівники, що прийняті на роботу, пов'язану з обслуговуванням електроустановок, або при перерві в роботі понад один рік, проходять первинну перевірку знань.

Первинна перевірка знань працівників повинна проводитись у терміни, установлені програмами і планами їх підготовки.

Допускається при проведенні перевірки знань використання контрольно-навчальних засобів на базі персональних електронно-обчислювальних машин для всіх видів перевірок, з наступним усним опитуванням, окрім первинної. У цьому разі запис у журналі перевірки знань не відміняється.

5.2.15. Допускається не проводити перевірку знань з технології робіт у працівника, якого прийнято на роботу за сумісництвом з метою покладення на нього обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, при одночасному виконанні таких умов:

- якщо з моменту перевірки знань у комісії за основним місцем роботи минуло не більше одного року;
- енергоємність електроустановок, їх складність в організації експлуатації електрогосподарства за сумісництвом не вища, ніж за місцем основної роботи.

5.2.16. У разі переходу на інше підприємство чи переведення на іншу роботу (посаду) у межах одного підприємства або у зв'язку з перервою в роботі особі з електротехнічних працівників, яка успішно пройшла перевірку знань, рішенням комісії може бути підтверджена та група з електробезпеки, яку вона мала до переходу або перерви в роботі.

5.2.17. Періодичність навчання та періодичної перевірки знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці (далі - перевірка знань) з присвоєнням відповідної групи з електробезпеки проводиться в такі терміни:

- первинне навчання та перевірка знань усіх працівників до початку виконання роботи;
- для працівників, які безпосередньо організовують та проводять роботи з оперативного обслуговування діючих електроустановок чи виконують у них налагоджувальні, електромонтажні, ремонтні, профілактичні випробування або експлуатують електроустановки у вибухонебезпечних, пожежонебезпечних зонах, - один раз на рік;
- для адміністративно-технічних працівників, які не належать до попередньої групи, а також для працівників з охорони праці, допущених до інспектування електроустановок, - один раз на три роки.

Перевірка знань з питань правил пожежної безпеки в працівників, які обслуговують електроустановки у вибухонебезпечних і

пожежонебезпечних зонах, здійснюється один раз на рік, в інших випадках - один раз на три роки.

Забороняється допуск до роботи працівників, які не пройшли навчання та перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки, охорони праці, а також у разі закінчення терміну дії попередніх періодичних перевірок знань. Комісією з перевірок знань працівникові може бути присвоєна група з електробезпеки, яку він мав до перерви в роботі.

5.2.18. Позачергову перевірку знань працівнику здійснюють незалежно від терміну проведення попередньої перевірки знань у разі:

- уведення в дію нової редакції або перероблених правил;
- переведення працівника на іншу роботу або призначення на іншу посаду, що потребує додаткових знань;
- при перерві в роботі на даній посаді понад шість місяців;
- незадовільної оцінки знань працівника - у терміни, визначені комісією з перевірки знань, але не раніше ніж через два тижні;
- вимог органів Держенергонагляду та Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду (далі - Держгірпромнагляд).

5.2.19. Для проведення перевірки знань електротехнічного та електротехнологічного персоналу керівник споживача повинен своїм наказом призначити комісію з перевірки знань.

Головою комісії призначається керівник споживача або його заступник, до службових обов'язків яких входить організація роботи з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці.

До складу комісії споживача з перевірки знань входять спеціалісти служби охорони праці, представники юридичних, виробничих, технічних служб, представник профспілки або вповноважена найманими працівниками особа з питань охорони праці.

Комісія вважається правочинною, якщо до її складу входять не менше трьох осіб.

У разі потреби створюються комісії в окремих структурних підрозділах, їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

5.2.20. Перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці проводять:

1) в особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (головного енергетика), його заступника - комісія за участю керівника споживача (його заступника) або комісія організації вищого рівня, інспектора Держенергонагляду, Держгірпромнагляду;

2) в осіб, відповідальних за електрогосподарство структурних виробничих підрозділів, - комісія за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача. Склад комісії затверджує керівник споживача;

3) у решти працівників - комісія споживача або його підрозділів, склад яких визначає та затверджує керівник споживача, за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (підрозділу). До складу вказаних комісій, як правило, повинен уходити безпосередній керівник того працівника, чиї знання перевіряє комісія.

Члени комісій структурних підрозділів повинні пройти перевірку знань правил в центральній комісії споживача.

5.2.21. Споживачі, чисельність яких не дає змоги створити комісію з перевірки знань з питань технології робіт, перевірку знань проходять у комісії територіальних підрозділів Держенергонагляду.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організацій вищого рівня.

Комісії для перевірки знань з питань технології робіт можуть також створюватись при СНЗ. Вони призначаються наказом (розпорядженням)

керівника СНЗ за погодженням з відповідним територіальним підрозділом Держенергонагляду. Члени комісії повинні пройти перевірку знань в територіальному підрозділі Держенергонагляду. Головою комісії призначається старший державний інспектор з енергетичного нагляду.

5.2.22. Дозволяється проводити окремо перевірку знань, крім випадку, зазначеного в підпункті 1 пункту 5.2.20:

- з питань технічної експлуатації електроустановок, правил та інструкцій з пожежної безпеки за участю інспектора Держенергонагляду;
- з питань охорони праці та інших нормативних актів з охорони праці за участю інспектора Держгірпромнагляду.

У цьому випадку роблять окремі записи в журналі перевірки знань.

Право оперативних переговорів та оперативних перемикань надається особі, відповідальній за оперативну роботу споживача, при проведенні перевірки знань у комісії з перевірки знань за участю інспектора Держенергонагляду. Представник диспетчерської служби структурного підрозділу електропередавальної організації може брати участь у роботі цієї комісії.

5.2.23. Перевірка знань кожного працівника здійснюється індивідуально. Результати перевірки оформляються протоколом та записуються у журнал установленної форми. Записи оформляються окремо з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці за підписом усіх членів комісії.

Керівники споживачів наприкінці року повинні подавати до інспекції Держенергонагляду графік перевірки знань електротехнічних працівників на наступний рік.

Про дату перевірки знань представники інспекцій повинні бути повідомлені споживачем не пізніше ніж за 20 днів до її початку.

5.2.24. Споживачі, які не мають можливості проводити навчання безпосередньо у себе та створити комісію з перевірки знань з технології робіт, проходять навчання в навчальних закладах та установах, які

отримали відповідне рішення Держенергонагляду на проведення навчання з питань технології робіт. Перевірка знань з технології робіт таких посадових осіб проводиться комісією, створеною Держенергонаглядом.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організації вищого рівня.

Перевірка знань осіб, відповідальних за електрогосподарство споживачів, незалежно від форм власності та відомчої підпорядкованості, допускається в комісії підприємств вищого рівня або засновників.

5.2.25. Після успішної перевірки знань працівник допускається до стажування тривалістю 2 - 15 змін і дублювання на робочому місці у відповідності до вимог ГНД 34.12.102-2004.

Допуск оформлюється наказом або розпорядженням керівника споживача (структурного підрозділу) з визначенням тривалості стажувань та призначенням працівника, відповідального за стажування.

5.2.26. Стажування проводиться під час спеціальної підготовки та під час підготовки на нову посаду. У процесі стажування працівник повинен:

- закріпити знання щодо правил технічної експлуатації електрообладнання, правил безпечної експлуатації технологічного обладнання та пожежної безпеки, технологічних і посадових інструкцій, інструкцій з охорони праці;
- оволодіти навичками орієнтування у виробничих ситуаціях у нормальних і аварійних умовах;
- засвоїти в конкретних умовах технологічні процеси та методи безаварійного керування обладнанням з метою забезпечення вимог технічної експлуатації, безпеки праці та економічної експлуатації устаткування, що обслуговується.

5.2.27. Керівник споживача або структурного підрозділу може звільняти від стажування працівника, що має стаж за фахом не менше трьох років, що переходить з одного робочого місця на інше, де характер його роботи і тип устаткування, на якому він працюватиме, не змінюються.

Тривалість стажування працівника встановлюється індивідуально в залежності від його рівня професійної освіти, досвіду роботи, професії (посади).

Після закінчення стажування і перевірки знань ремонтні працівники допускаються до самостійної роботи, а оперативні - до дублювання.

Тривалість дублювання на робочому місці встановлюється рішенням комісії з перевірки знань і залежить від кваліфікації працівника та складності обладнання, яке він обслуговуватиме, але не менше шести змін.

5.2.28. Під час дублювання особа, що навчається, може робити оперативні перемикання або інші роботи в електроустановці тільки з дозволу і під наглядом відповідального працівника, який її навчає.

Відповідальним за правильність дій дублера і дотримання ним нормативних документів та інструкцій є як працівник, який навчає, так і сам дублер.

5.2.29. На підприємстві під керівництвом особи, відповідальної за електрогосподарство, електротехнічні працівники повинні проходити протиаварійні тренування на робочих місцях і відпрацьовувати способи та прийоми запобігання порушенням у роботі обладнання та швидкої ліквідації несправностей і аварій.

5.2.30. Керівники спеціалізованих організацій, персонал яких виконує технічне обслуговування і експлуатацію електроустановок споживачів чи проводить у них монтажні, налагоджувальні, ремонтні роботи, випробовування і профілактичні вимірювання за договором, повинні проходити перевірку знань відповідно до вимог цих Правил.

5.2.31. Навчання та перевірка знань працівників навчальних закладів, які організовують та проводять навчання з використанням електричного

обладнання, здійснюється згідно з вимогами цих Правил та нормативних документів, діючих у відповідній галузі.

5.2.32. Відповідальними за своєчасну перевірку знань в електротехнічних та електротехнологічних працівників є керівники підрозділів споживача, у підпорядкуванні яких перебувають ці працівники.

ДОДАТОК В.
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____