

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.Ю. Колларов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

Дипломна робота

магістра
(освітній ступінь)

на тему Розробка заходів з підвищення надійності роботи електричних приводів з використанням засобів силової електроніки

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКзм-19
(шифр групи)

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

Калугін М.Р.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент:

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

(підпис)

Нормоконтроль:

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

Любименко О. М.

Студент

(підпис)

(підпис)

(дата)

(дата)

Покровськ – 2021 р.

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Калугіну Миколі Романовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка заходів з підвищення надійності роботи
електричних приводів з використанням засобів силової електроніки

керівник роботи Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 12 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Параметри двигуна постійного
струму: потужність – 24 кВт, номінальна висока напруга – 6 кВ, напруга
живлення – 440 В, частота обертання: номінальна – 3150 об./хв.,
максимальна – 4000 об./хв., ККД – 89%, опір: обмотки якоря – 0,096 Ом,
додаткових полюсів – 0,073 Ом, збудження – 13,4 Ом, індуктивність
ланцюга якоря – 3 мГн, схема з'єднання обмоток узгоджуючого
трансформатора – «зірка». Інші параметри обрати довільно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд принципів функціонування електроприводів з двигунами постійного струму.

2. Огляд основних несправностей двигунів постійного струму, що впливають на параметри надійності.

3. Розрахунок параметрів електроприводу з двигуном постійного струму.

4. Розробка моделей із використанням напівпровідникових засобів силової електроніки.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Колларов О. Ю.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 5 жовтня 2021 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд принципів функціонування електроприводів з двигунами постійного струму.	04.10.2021 – 13.10.2021	
2.	Огляд основних несправностей двигунів постійного струму, що впливають на параметри надійності.	14.10.2021 – 23.10.2021	
3.	Розрахунок параметрів електроприводу з двигуном постійного струму.	24.10.2021 – 02.11.2021	
4.	Пошук шляхів підвищення надійності електричних приводів з двигунами постійного струму засобами силової електроніки.	03.11.2021 – 12.11.2021	
5.	Огляд засобів силових перетворювачів.	13.11.2021 – 22.11.2021	
6.	Моделювання роботи електроприводу у програмному середовищі.	23.11.2021 – 02.12.2021	
7.	Огляд питань охорони праці	03.12.2021 – 12.12.2021	

Студент

_____ Калугін М.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Колларов О. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Калугін М.Р. Розробка заходів з підвищення надійності роботи електричних приводів з використанням засобів силової електроніки / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

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

У першому розділі здійснено огляд принципів функціонування електроприводів з двигунами постійного струму – наведено загальні відомості про електричні приводи з двигунами постійного струму.

У другому розділі було виконано огляд основних несправностей двигунів постійного струму, що впливають на параметри надійності.

У третьому розділі виконано розрахунок параметрів електроприводу – двигуна постійного струму, трансформатора узгодження та напівпровідникових елементів.

У четвертому розділі здійснено пошук шляхів підвищення надійності електричних приводів з двигунами постійного струму засобами силової електроніки та виконана розробка моделей із використанням напівпровідникових засобів силової електроніки і проведено моделювання у програмному середовищі Matlab.

Ключові слова: електропривод, двигун постійного струму, параметри надійності, трансформатор, напівпровідниковий елемент, надійність, засоби силової електроніки, силові перетворювачі, моделювання

SUMMARY

Kalugin M. Development of measures to increase the reliability of electric drives using power electronics / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2021.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, list of references and appendices.

The first section reviews the principles of operation of electric drives with DC motors - provides general information about electric drives with DC motors.

In the second section, an overview of the main faults of DC motors that affect the reliability parameters was performed.

In the third section, the calculation of the parameters of the electric drive - DC motor, matching transformer and semiconductor elements.

In the fourth section, a search is made for ways to increase the reliability of electric drives with DC motors by means of power electronics and the development of models using semiconductor means of power electronics and modeling in the Matlab software environment.

Keywords: electric drive, DC motor, reliability parameters, transformer, semiconductor element, reliability, means of power electronics, power converters, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	10
1.1 Загальні відомості про електричні приводи	10
1.2 Огляд складових частин двигунів постійного струму	15
1.3 Способи регулювання двигунів постійного струму	21
2 ОГЛЯД ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ	30
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	36
3.1 Визначення вихідних даних	36
3.2 Розрахунок параметрів двигуна постійного струму	38
3.3 Розрахунок трансформатора узгодження	40
3.4 Розрахунок силових напівпровідникових елементів	46
4 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЗАСОБІВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	49
4.1 Пошук шляхів підвищення надійності електричних приводів з двигунами постійного струму засобами силової електроніки	49
4.2 Загальні відомості про силові перетворювачі	52
4.3 Моделювання роботи електроприводу у програмному середовищі Matlab	55
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

	7
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	74
ДОДАТОК Б. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК (ВИТЯГ)	82
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	99

ВСТУП

Електроприводи ще довгі роки будуть невід'ємними елементами енергетичного парку будь-якого виробництва. У них досить тісно пов'язано комбінацію електричних, механічних та теплових процесів.

На даний час електричні приводи є найбільш затребуваними та такими, що швидко розвиваються, перетворювачами електричної енергії у механічну. Основними особливостями цих електромеханічних перетворювачів є незначні масо-габаритні показники, можливість отримати практично будь-які показники роботи шляхом ефективного регулювання, простота обслуговування, високі значення коефіцієнту корисної дії, гнучкість у топології використовуваних машини та інше.

У широкому змісті, до електроприводу можна віднести усе обладнання, що знаходиться між джерелом електричної енергії і «механічним виходом» приводу.

Прикладами електроприводів зі змінною швидкістю є приводи вентиляторних установок, насосних установок, компресори, кондиціонери, тяговий транспорт, електромобілі, генератори енергії та інше.

У якості джерела електричної енергії електроприводів можуть виступати трифазні та однофазні джерела живлення, змінного і постійного струму. Виконавчим механізмом в електроприводі машина, що обертається, або рухається поступально.

Сучасний рівень технологій, що застосовуються у електричних приводах, ґрунтується на найсучасніших знаннях та новітніх технологіях, розроблених пристроях силової та керуючої електроніки, високопотужних та високотемпературних пасивних пристроях. Цей чинник також є визначним з огляду на те, що у приводах зі змінною швидкістю характеристики живлення рідко відповідають встановленим вимогам, необхідним постає питання використання силового електронного

перетворювача, який, крім усього іншого, забезпечує інтерфейс між джерелом живлення та електроприводом.

Силові електронні перетворювачі складаються з силових пристроїв – вимикачів живлення та пов'язаних з ними чутливими керуючими електронними засобами, що виробляють та подають сигнали на виконання відповідних функцій. Однією з проблем, що при цьому виникають є необхідність боротьби з гармоніками живлення, що виникають, та накладають певні впливи на живлячу мережу та джерело(а) живлення – цю функцію виконують різноманітні активні та пасивні фільтруючі та фільтр-компенсуючі елементи.

З технічної точки зору, компоненти силової електроніки є окремим об'єктом від електроприводу, до того ж тут накладаються різноманітні теплові та механічні аспекти, але цю систему необхідно розглядати у сукупності, оскільки одні елементи мають суттєвий вплив на інші і навпаки. Ці міркування формують виправданий інтерес дослідників та інженерів до більш широкого використання та подальшого вивчення й модернізації регульованих електроприводів.

Мета роботи – розробити заходи з підвищення надійності роботи електричних приводів з використанням засобів силової електроніки.

Завдання роботи:

- здійснити огляд принципів функціонування електроприводів з двигунами постійного струму,
- здійснити огляд основних несправностей двигунів постійного струму, що впливають на параметри надійності,
- здійснити пошук шляхів підвищення надійності електричних приводів з двигунами постійного струму засобами силової електроніки.
- моделювання роботи електроприводу у програмному середовищі.

Об'єкт досліджень – електромеханічні процеси у двигунах постійного струму.

Предмет досліджень – параметри двигунів постійного струму.

1 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Загальні відомості про електричні приводи

Електроприводи застосовуються для приводу у рух технологічного механізму. Керування цим рухом необхідно для здійснення відповідних виробничих операцій у різних системах – транспортних, метало- і деревооброблюючих, текстильних виробництвах, системах провітрювання та водовідливу та інших. При цьому можна керувати окремо як поступальним, так і обертальним, так і складним рухом [1].

Як правило, вихідна ланка приводу має механічне навантаження зовні споживача, а у якості приводних двигунів можуть виступати двигуни постійного струму, асинхронні двигуни, турбіни або двигуни внутрішнього згорання. Найбільш розповсюдженими є приводи з електричними двигунами через те, що існує багато переваг такої кооперації [1]:

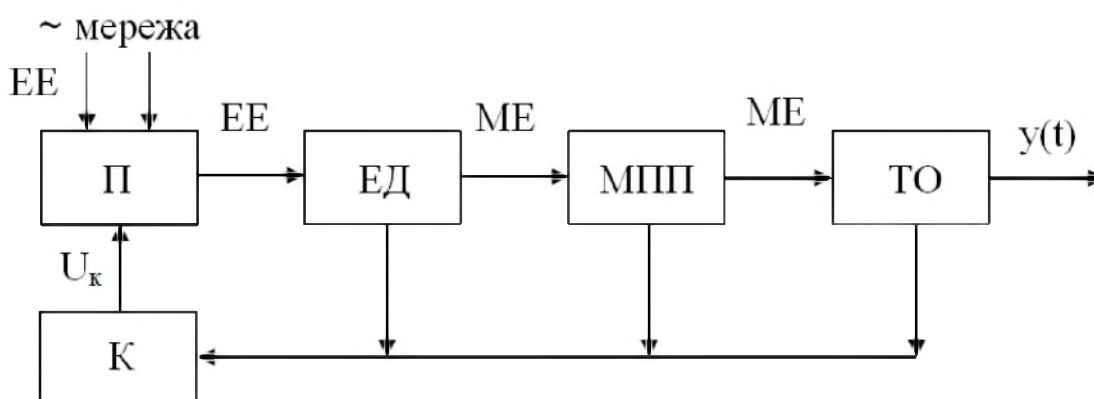
- простота пуску і зупинки,
- можливість забезпечення широкого діапазону частот обертання та крутного моменту,
- забезпечення гнучкості управління.
- відносна безпека для навколишнього середовища,
- можливість отримання високих значень ефективності (значень коефіцієнта корисної дії).

Вибір типу електричного двигуна у приводі залежить від багатьох супутніх факторів, серед яких можна відзначити [2]:

- режим роботи приводу – значення номінальної частоти обертання, необхідного значення крутного моменту, необхідність у регулюванні параметрів у визначеному діапазоні, тип струму живлення, необхідність досягнення визначених показників економічності,

- наявність частих перехідних режимів роботи – реверс, робота у режимах частих прискорень та гальмувань, важкі умови запуску,
- наявне джерело живлення – тип струму та потужність джерела, максимальне значення величини напруги, чутливість до продукування коливальних спотворень струму (гармонік),
- інше – необхідні параметри надійності, частота технічного обслуговування, необхідність супутніх витрат, запланований термін служби, вимоги до масо-габаритних показників, ступінь впливу на навколишнє середовище.

Сучасні системи електричних приводів мають різну кількість функціональних блоків, що відповідають за виконання тих чи інших функцій (рис. 1.1) [2].



ЕЕ – електрична енергія, МЕ – механічна енергія, П – перетворювач, ЕД – електричний двигун, МПП – механічний передавальний пристрій, ТО – технологічний об’єкт, К – контролер

Рисунок 1.1 – Функціональна схема сучасних електричних приводів

Джерело живлення забезпечує привід енергією шляхом подачі напруги відповідного типу струму та відповідної величини.

Перетворювач є посередником між джерелом живлення та двигуном для забезпечення останнього регульованою напругою та струмом визначеної частоти. Його якості широко використовуються під час пусків,

пригальмовувань, зупинок та реверсі шляхом регулювання величини і частоти напруги та струму. У якості перетворювача може виступати різне коло приладів у залежності від типу та призначення електроприводу: керований випрямляч, інвертор, перетворювач струму, циклоконвертор та інші [2].

Функції контролера полягають моніторингу системних змінних, порівняння із заданими значеннями і вироблені вихідного сигналу на керування для досягнення заданих параметрів.

Вибір електричного двигуна полягає у знаходженні відповідності значення потужності рівню навантаження, прикладеного до технологічного об'єкта під час максимального навантаження за умови підбору за типом струму живлення [3].

Навантаження, прикладене до технологічного об'єкта через механічний передавальний пристрій, передається на вал двигуна і виражається у вигляді крутного моменту навантаження.

Виділяють два моменти навантаження – активний і пасивний.

Активний момент безпосередньо приводить двигун у рух і не змінює свій знак при зміні напрямку обертання валу та викликаються зовнішніми силами (тяжіння, інерції, натягом, пружністю та інше).

Складовими моменту навантаження є наступні компоненти [4]:

- крутний момент тертя $M_{тер.}$,

- крутний момент обертання $M_{об.}$,

- крутний момент, що виконує корисну роботу $M_{кор.}$ і залежить від типу навантаження. Даний крутний момент може бути постійним або змінним у часі, залежати або не залежати від частоти обертання, та змінюватися у залежності від режиму навантаження.

Механічне навантаження визначає частоту обертання та крутний момент. Крутний момент на валу залежить від частоти обертання і може бути розрахований за формулою [4]:

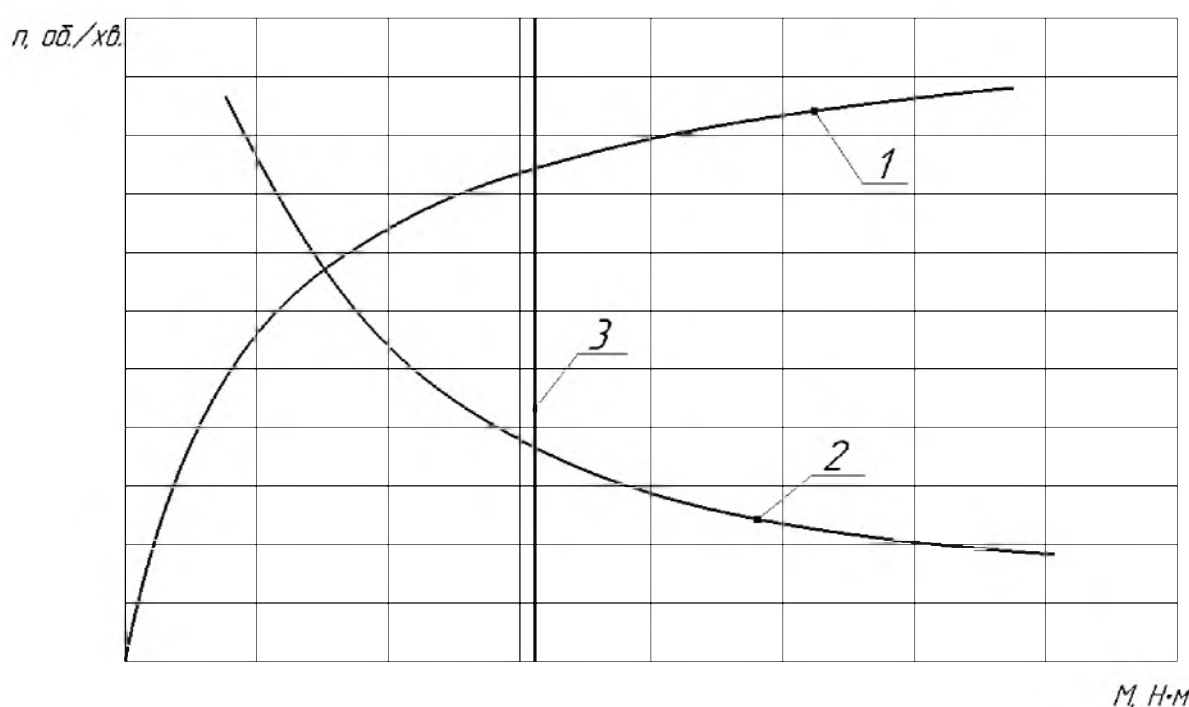
$$M_{\epsilon} = M_n \cdot \left(\frac{n}{n_n} \right)^k \quad (1.1)$$

де M_n – крутний момент від навантаження, Н·м,

n_n – номінальна частота обертання, об./хв.,

n – поточна частота обертання, об./хв.,

k – коефіцієнт, що визначає область застосування приводу та зв'язок між зміною крутного моменту і частоти обертання (рис. 1.2).



1 – крутний момент пропорційний квадрату частоти обертання,
 2 – крутний момент є зворотним до частоти обертання, 3 – крутний момент не залежить від частоти обертання

Рисунок 1.2 – Механічні характеристики навантажень

У разі, коли крутний момент не залежить від швидкості, коефіцієнт $k = 0$ і $M_{\epsilon} = M_n$. Прикладами цих механізмів є підйомні машини, об'ємні насоси.

У разі лінійної залежності крутного моменту від частоти обертання – $k = 1$. Прикладами таких механізмів можна визначити генератори, двигуни постійного струму з фіксованим навантаженням.

У разі, коли крутний момент є пропорційним квадрату частоти обертання – $k = 2$. Прикладами таких навантажень є вентилятори та відцентрові насоси.

У разі, коли крутний момент є обернено пропорційним частоті обертання – $k = -1$. Прикладами оброблювані станки, транспортні машини.

Рівняння руху електропривода для поступального руху можна визначити за залежністю [2]:

$$\pm F \mp F_{on} = \pm m \frac{dv}{dt} \quad (1.2)$$

де F_{on} – статичний опір, Н,

m – маса переміщуваного вантажу, кг,

v – лінійна швидкість, м/с

Рівняння руху електропривода для обертального руху можна визначити за залежністю [2]:

$$\pm M \mp M_{on} = \pm J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.3)$$

де M_{on} – статичний момент опору, Н·м,

J – момент інерції тіл, що обертаються, кг·м²,

ω – кутова швидкість обертання, рад/с.

Знаки у формулах (1.2) і (1.3) залежать від режиму роботи приводного двигуна і характеру моментів опорів [2]:

– якщо $F > F_{on}$, $M > M_{on}$, $d\omega/dt > 0$ – наявний розгін (прискорення) приводу, електрична енергія перетворюється в механічну,

- якщо $F > F_{on}$, $M > M_{on}$, $d\omega/dt < 0$ – наявне уповільнення (гальмування) приводу,
- якщо $F = F_{on}$, $M = M_{on}$ – привід працює у сталому режимі.

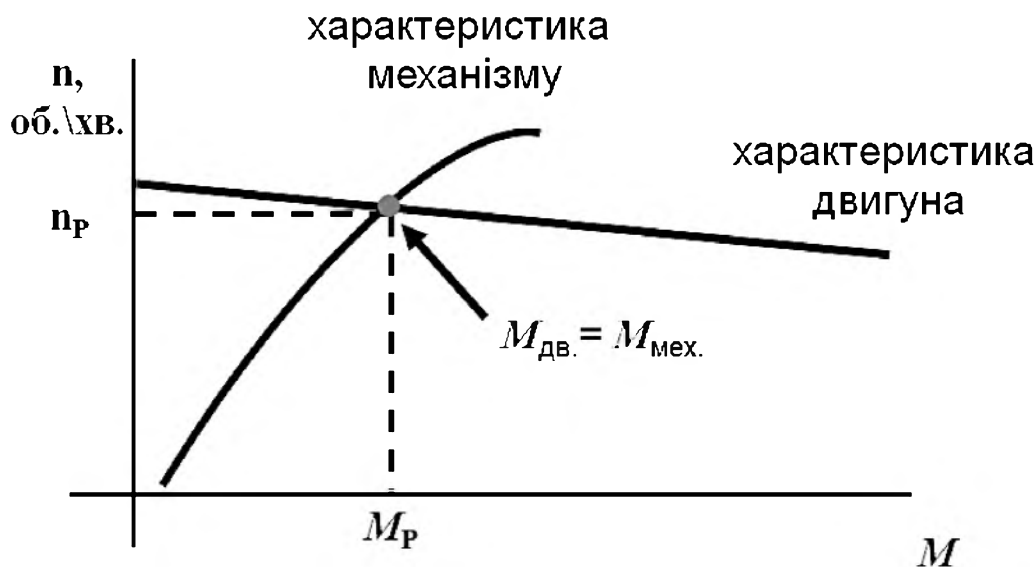


Рисунок 1.3 – Встановлення робочого режиму

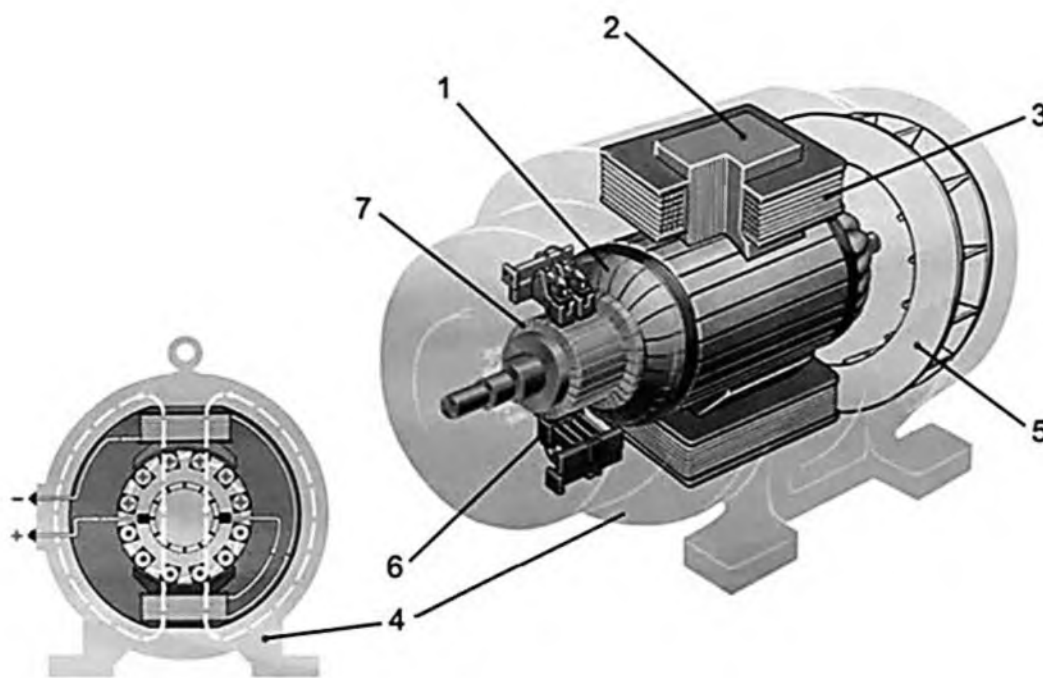
1.2 Огляд складових частин двигунів постійного струму

Через те, що більшість електричних джерел живлення продукують змінний струм, застосування двигунів постійного струму повинно бути доцільним і обґрунтованим. Їх використання вимагає застосування спеціального обладнання для перетворення змінного струму в постійний. Перевагою двигунів постійного струму є досить «вигідні» характеристики залежності між частотою обертання та крутним моментом у порівнянні з асинхронними двигунами [4].

Двигуни постійного струму відрізняються типом збудності – з незалежним, паралельним та послідовним збудженням, а визначається він для конкретного виду навантаження.

Недоліком двигунів постійного струму є складність їхньої конструкції та наявність колектора, у якому виникає іскріння, що знижує надійність цих електричних машин та обмежує область їх застосування [4].

Конструктивно двигун постійного струму (ДПС) складається з нерухомої та рухомої частин. На нерухомій частині закріплено полюси для збудження магнітного потоку. Полюси виготовлено з листової електротехнічної сталі, на які намотано обмотки збудження. Станина машини дозволяє замкнути магнітний потік Φ . Між основними полюсами встановлено додаткові полюси, на яких розташовують обмотки, що з'єднуються послідовно з обмоткою(ми) якоря. Якір складається із зубчатого осердя та прокладених у них обмотках і підключених до колектора, розташованого на валу. Для «зняття» струму з колектора використовують щітки, які встановлено у щіткотримачах і притискаються пружинами (рис. 1.4) [5].



1 – якір, 2 – осердя полюса, 3 – обмотка полюса, 4 – статор, 5 – вентилятор,
6 – щітки, 7 – колектор

Рисунок 1.4 – Конструкція двигуна постійного струму

Робота двигуна постійного струму заснована на законі, при якому провідник зі струмом, розміщений у магнітному полі, починає рухатися, а напрямок сили визначається за «правилом лівої руки» (рис. 1.5) [4].

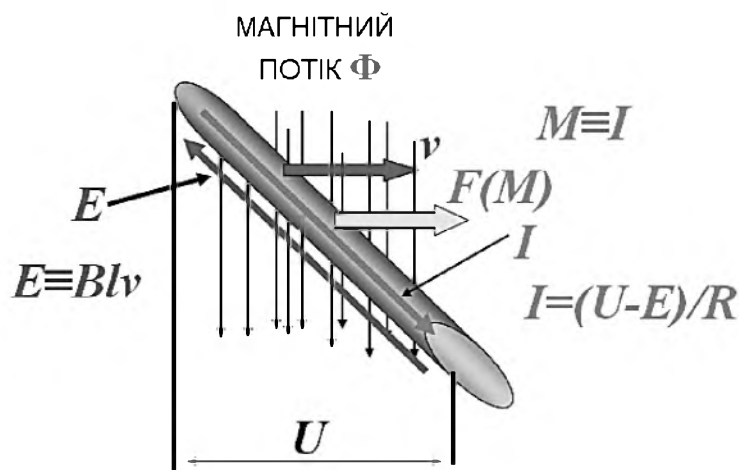


Рисунок 1.5 – Сутність електро механічного перетворення у ДПС

Магнітне поле створюється струмом, що протікає по статорним обмоткам, і це поле впливає на рухомі заряди у провіднику. Величина магнітного поля зменшується зі збільшенням відстані від дроту та збільшується зі збільшенням сили струму. Струм, що протікає по провіднику, генерує векторне поле, яке можна розглядати як суму нескінченно малих внесків від усіх нескінченно малих відрізків провідника, по якому протікає струм. Кожен такий елемент індукує магнітне поле в будь-якій точці навколишнього простору [4].

У якорі під час його обертання «наводиться» електрорушійна сила (ЕРС), значення якої можна визначити за залежністю [4]:

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (1.4)$$

де B – індукція магнітного поля, Тл,

l – активна довжина провідника, м,

v – лінійна швидкість руху провідника, м/с.

Якщо розповсюдити цю залежність на всі провідники якоря, то можна записати залежність [4]:

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{a} N \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} = c_E \cdot \Phi \cdot n \quad (1.5)$$

де p – число пар полюсів,

a – число пар паралельних гілок обмотки якоря,

N – число активних провідників обмотки якоря,

Φ – магнітний потік одного полюса,

c_E – постійний коефіцієнт для даної машини,

n – частота обертання якоря, об/хв.

Кожен з активних провідників обмотки якоря, який у даний момент знаходиться між полюсами, відчуває вплив деякої сили, безпосередньо прикладеної до зубців якоря і яка визначається за формулою [4]:

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

Сукупність цих сил створює електромагнітний обертальний момент, який обертає якор [4]:

$$M_{\text{об.}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = C \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (1.7)$$

де $C = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N$ – постійна для даної машини величина.

Збудження головного магнітного поля у ДПС можна здійснити за допомогою електромагнітів або постійних магнітів. Від вибору способу збудження будуть залежати вигляд та властивості робочих характеристик двигунів під час їхньої роботи. З'єднання ланцюгів статора і якоря може бути паралельним (рис. 1.6 б), послідовним (рис. 1.6 в), змішаним, або ці ланцюги незалежні один від одного незалежним (рис. 1.6 а) [4].

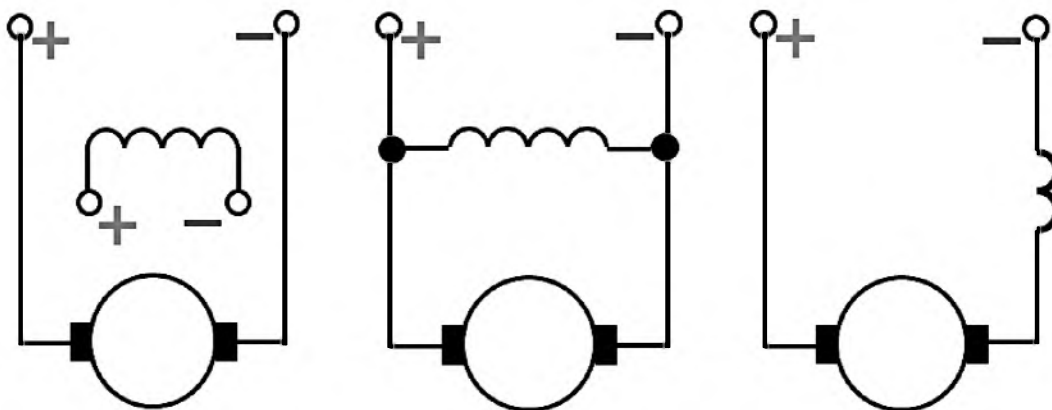


Рисунок 1.6 – Способи збудження ДПС у залежності від з'єднання обмоток

У ДПС з незалежним збудженням обмотка збудження підключається до незалежного джерела електричної енергії, завдяки чому струм у ній не залежить від напруги на затискачах якоря. У ДПС з паралельним збудженням ланцюг обмотки збудження з'єднується паралельно з ланцюгом якоря, при цьому струм збудження на багато менший за значення струму якоря. Для таких двигунів характерна сталість головного магнітного потоку та не дуже велика залежність від умов навантаження. У ДПС з послідовним збудженням струм якоря дорівнює струму обмотки збудження і значення струму досить велике. Для цих двигунів характерна зміна головного магнітного потоку при змінах навантаження машини у широких межах. У ДПС зі змішаним збудженням на кожному полюсі розташовано дві обмотки – одну з цих обмоток підключають паралельно обмотці якоря, а другу обмотка – послідовно. Такі двигуни за своїми характеристиками можуть у певний час набувати рис двигунів послідовного збудження, а у інший – послідовного збудження [6].

Рівняння напруги для ланцюга якоря має вигляд [4]:

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}) \quad (1.8)$$

$R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, Ом,

$R_{яД}$ – додатковий опір у ланцюзі якоря, Ом,

$I_{я}$ – струм у обмотці якоря, А,

Рівняння електромеханічної характеристики ДПС з незалежним збудженням має вигляд [4]:

$$n(I_{я}) = n_0 - \Delta n \quad (1.8)$$

де n_0 – номінальна частота обертання двигуна, об./хв. [4]:

$$n_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{U}{C\Phi} \quad (1.9)$$

де Δn – зміна частоти обертання двигуна під дією навантаження для струму якоря, об./хв. [4]:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I_{я} \cdot (R_{я} + R_{яД})}{C\Phi} \quad (1.10)$$

тоді

$$\omega(I_{я}) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\frac{U}{C\Phi} - \frac{I_{я} \cdot (R_{я} + R_{яД})}{C\Phi} \right] \quad (1.11)$$

Рівняння механічної характеристики ДПС з незалежним збудженням має вигляд [4]:

$$n(M) = n_0 - \Delta n \quad (1.12)$$

де Δn – зміна частоти обертання двигуна під дією навантаження для моменту, об./хв.:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{M(R_a + R_{aД})}{(C\Phi)^2} \quad (1.13)$$

тоді

$$\omega(M) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\frac{U}{C\Phi} - \frac{M \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{яд}})}{(C\Phi)^2} \right] \quad (1.14)$$

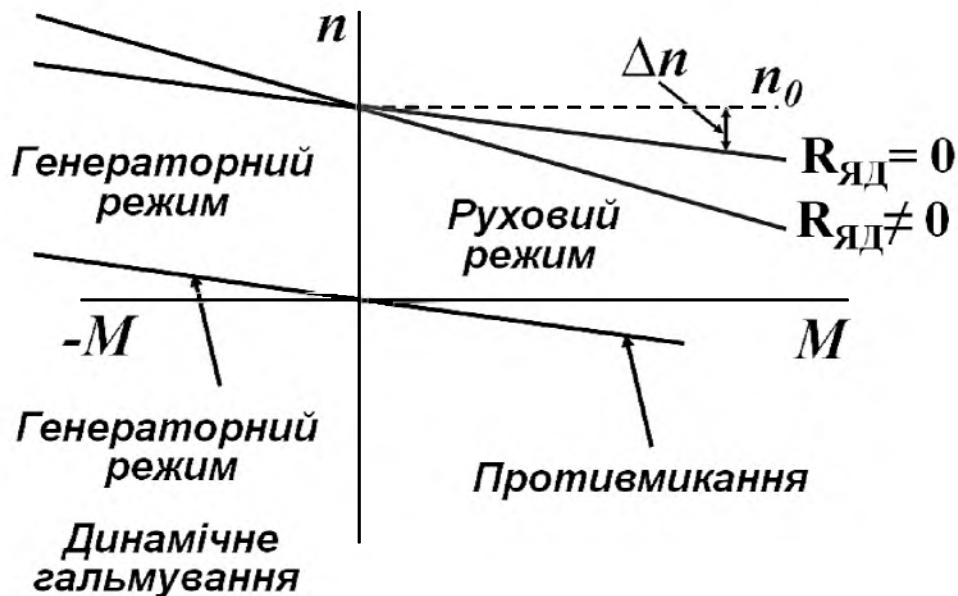


Рисунок 1.7 – Характеристики ДПС незалежного збудження

1.3 Способи регулювання двигунів постійного струму

Регулювання параметрів роботи двигунів постійного струму можуть бути отримані шляхом [7]:

- регулювання магнітного потоку,
- введенням опорів у ланцюг якоря.

При регулюванні магнітного потоку у той чи інший бік відповідно змінюється частота його обертання. Зміну величини магнітного потоку можна досягти кількома способами [7]:

- шляхом шунтування частину струму у послідовній обмотці збудження, що послаблює поле та збільшуючи частоту обертання,
- шляхом введення додаткового опору паралельно обмотці якоря – це рівноцінно шунтуванню частини якірного струму, що у свою чергу

призводить до збільшення потоку, а частота обертання двигуна зменшується.

- зміна числа витків обмотки збудження шляхом перемикавання, що дозволяє отримати частоту обертання більшу за номінальне значення,

- перемикавання між статорними котушками та котушками збудження, що дозволяє отримати ряд частот обертання якоря.

- введення опору безпосередньо у ланцюг живлення двигуна, що зменшує значення напруги на якорі, що призводить до зниження частоти обертання.

- зміна величини живлячої напруги, що дозволяє отримати будь-яку частоту обертання двигуна.

З метою якісного керування електроприводу силовий електронний перетворювач і його поєднання з електричною машиною проектується спільно, що дозволяє досягти більшої гнучкості керування з урахуванням топології машини та перетворювача. Огляд спільної роботи перетворювача з електричною машиною ще на стадії проектування дає значні переваги – більшу гнучкість керування за рахунок підлаштування топології перетворювача під вимоги технологічних процесів, кількість фаз живлення, рівні напруг і струмів та їхньої частоти [7].

Конструкція електроприводу залежить від параметрів джерела живлення, типу живлячого струму та напруги.

Джерела змінного струму при його перетворенні у постійний мають характерні відмінні топології та передумови для керування струмами. Це може бути випрямний каскад, що складається з шестидіюдного мостового випрямляча. При цьому відбувається певна покрокова зміна форми хвилі струму.

Крім вимог до джерел постачання, важливим аспектом проектування є вимога досягнення найменших втрати у силовій електроніці – які залежать від значення робочої напруги під час перемикавання. Ця вимога призводить до необхідності роботи з підвищеними значеннями напруги у силових

пристроях. Більш високі значення вихідної напруги дозволяє отримати вищі параметри потоків потужності зі збереженням масово-габаритних показників та збільшення швидкодії процесів перемикання [7].

На додачу до збільшення значень напруги спостерігається і загальна тенденція у приводах зі змінною частот обертання зростання частотних функцій. Це дозволяє краще відстежувати параметри вхідних та вихідних сигналів, забезпечуючи кращу форму перехідної характеристики. Високі частотні значення стали можливими завдяки застосуванню нових поєднань матеріалів у конструкціях силових елементів.

Досягнення менших спотворень форми хвилі вхідних та вихідних струмів зменшують необхідність встановлення фільтруючих пристроїв для обмеження гармонійних спотворень. Високі значення частот дозволяють більш широко використовувати силові пристрої з широкою перехідною зоною, які є простішими у виготовленні та є більш дешевими.

Недоліками застосування високих частот є поява потужного електромагнітного випромінювання високої частоти, яке може здійснювати вплив на роботу прилеглого обладнання [7].

Більшість електричних машин працюють на синусоїдній змінній трифазній напрузі, а їхній пуск є прямим з урахуванням фазировки. Використання трьох фаз має беззаперечні переваги при розгляді можливості керування через ідентичність застосованого обладнання та використанні модульності при конструюванні, виготовленні та подальшому технічному обслуговуванні елементів електроприводу. Трифазні системи в разі трансформації змінного струму у постійний здатні забезпечити меншу пульсацію постійного струму з витікаючими звідси позитивними технологічними наслідками [7].

Трифазні системи дозволяють застосувати принцип модульності у контексті інтеграції приводу, що дозволяє забезпечити принципи відмовостійкості та простоти обслуговування.

Найбільший недолік застосування силових перетворювачів – це виникнення гармонійних коливань вищої частоти, які можуть «блукати» у мережі і впливати на роботу споживачів, підключених до даної мережі. Для зменшення цього негативного впливу необхідною вимогою є використання фільтрів. Дані пристрої конструюються згідно вимог, зазначених у нормативних актах, які визначають параметри якості енергопостачання у частині наявних гармонійних коливань. Також необхідно враховувати, що на даних фільтрах відбувається падіння напруги [8].

Отже, частота обертання валу ДПС може штучно змінюватися шляхом керування при живленні від джерела змінного або постійного струму. Структура найпоширенішого методу регулювання частоти обертання валу двигуна постійного струму показана на рис. 1.8 [8].

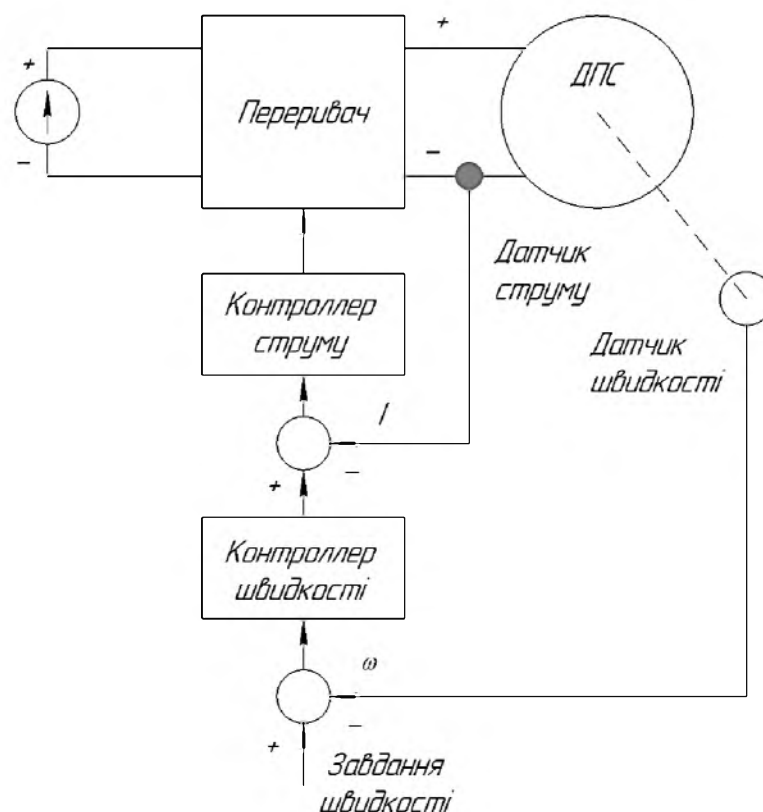
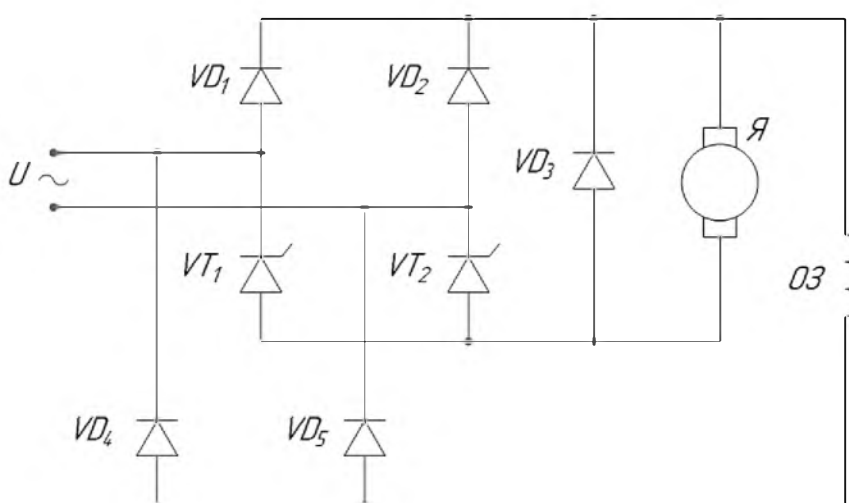


Рисунок 1.8 – Структура найпоширенішого методу регулювання частоти обертання валу ДПС

Для живлення обмотки якоря двигуна використовується керований випрямляч, а значення постійного струму засновано на контролі напруги якоря і, отже, від значення затримки відкриття керуючого елемента на випрямлячі [9].

Частота обертання валу двигуна визначається за середнім значенням напруги на якорі. Гармонічні коливання напруги нехтуються завдяки наявності інерційності двигуна.

У разі наявності лише джерела змінної напруги, попередньо необхідно цю напругу «випрямити», шляхом застосування керованого випрямляча. У разі використання динамічного гальмування, перетворювач повинен мати властивості інвертора. У разі живлення ДПС від джерела змінного струму можна здійснювати керування лише по одній фазі при використанні фазового перетворювача струму зі змінного у постійний (рис. 1.9) [9].



U – напруга змінного струму, VD_1 – VD_5 – випрямні діоди, VT_1 , VT_2 – керуючі тиристири, $Я$ – якір, $ОЗ$ – обмотка збудження

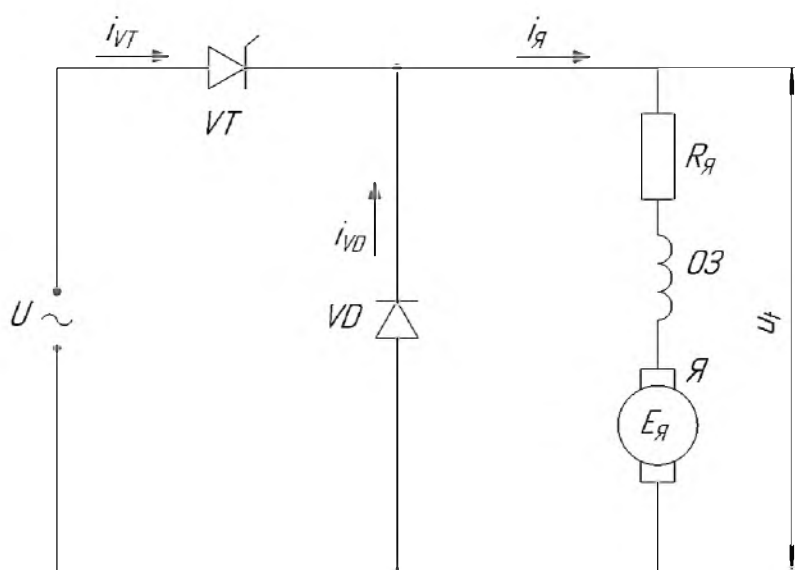
Рисунок 1.9 – Схема однофазного керування від джерела змінного струму з використанням випрямляча

Струм на двигуні можна змінювати шляхом подачі керуючих сигналів на тиристири. Дана схема дозволяє отримати широкий діапазон регулювання частоти обертання, при частих комутаційних режимах –

пусках, зупинках та реверсуванні. Тип та параметри перетворювача залежать від параметрів джерела живлення, номінальної та максимальної потужності приводу, наявності пульсацій напруги живлення та інше [9].

Напругу якоря можна контролювати за допомогою напівперіодного або повноперіодного перетворювача у разі живлення приводу від джерела змінного струму з випрямленням струму на діодному мості.

Однофазні напівперіодні перетворювачі можна застосовувати для малопотужних ДПС з послідовним збудженням (рис. 1.10) [9].



U – напруга змінного струму, VT – керуючий тиристор, VD – випрямний діод, $Я$ – якор, $ОЗ_i$ – обмотки збудження

Рисунок 1.10 – Схема керування за допомогою напівперіодного перетворювача при живленні від джерела змінного струму

Напівперіодний перетворювач для керування ДПС з послідовним збудженням містить один діод та тиристор. Через це струм на двигуні має переривчастий характер, що може призвести до незадовільної його роботи (рис. 1.11) [9].

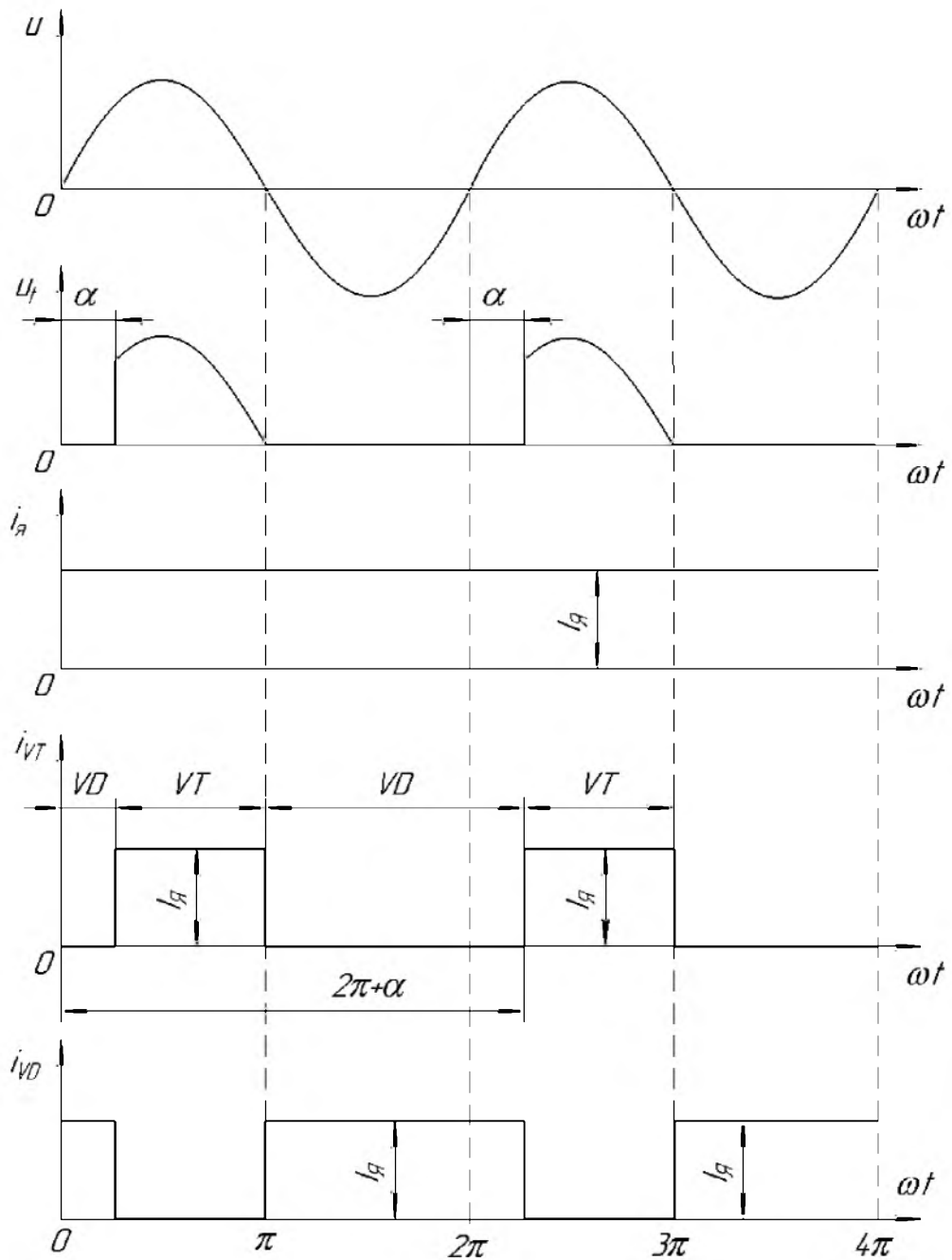
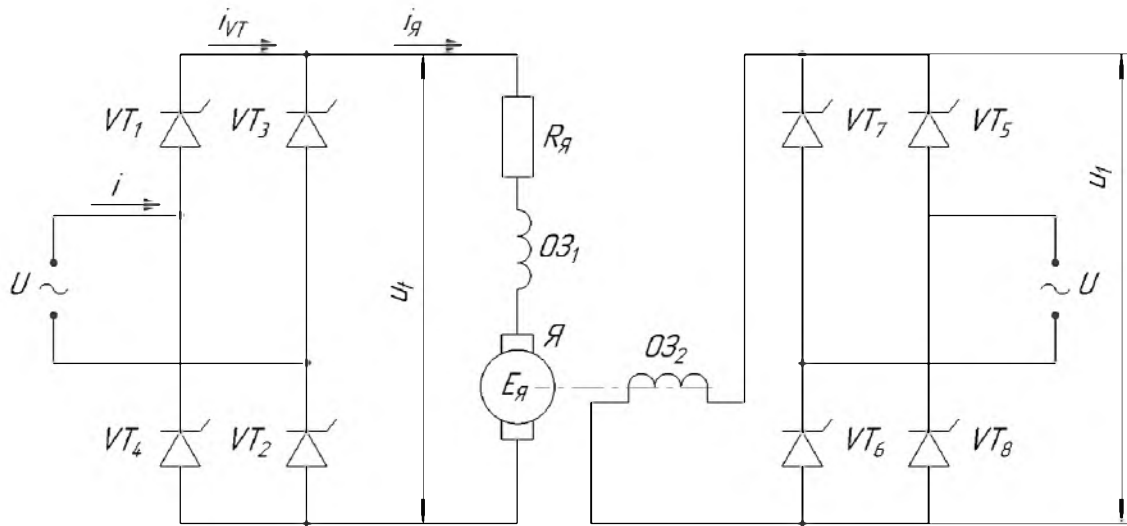


Рисунок 1.11 – Діаграми струмів та напруг для ілюстрації роботи напівперіодного перетворювача

Повноперіодний перетворювач доцільно використовувати для ДПС з незалежним або комбінованим збудженням (рис. 1.12) [9].



U – напруга змінного струму, VT_1 – VT_8 – керуючі тиристори, $Я$ – якор, $OЗ_i$ – обмотки збудження

Рисунок 1.12 – Схема керування за допомогою повноперіодного перетворювача при живленні від джерела змінного струму

У зображеній схемі тиристори VT_1 і VT_3 одночасно спрацьовують при куті їх відкриття α , а тиристори VT_2 і VT_4 – при куті $(\pi + \alpha)$. ДПС завжди підключається до живлення через тиристор. Тиристори VT_5 і VT_7 пропускають через себе струм протягом інтервалу часу $\alpha < \omega t < (\pi + \alpha)$, під'єднуючи двигун до джерела живлення. При цьому процесі полярність напруги на виході може змінюватися, проте струм залишається однонаправленим через тиристор. Даний перетворювач завдяки своїм властивостям може вести себе як інвертор (рис. 1.13) [9].

Контроль частоти обертання ДПС за допомогою переривача знаходять застосування у різних застосуваннях.

Переривач – це статичний пристрій, що перетворює постійний вхідний струм у змінну вихідну напругу постійного струму. Переривачі мають високу ефективність, гнучкість в управлінні, малу вагу, невеликі розміри, швидку реакцію та можливість регулювання у широких межах частот обертання. У порівнянні з керованими випрямлячами для переривачів характерна менша або навіть відсутня область перерви

живлення, що добре відгукується на якості регулювання частоти обертання та реакції привода. Частота пульсацій вихідної напруги, пульсації струму якоря менша, також є меншою область переривчастої роботи у площині електромеханічної характеристики. Усе це також призводить до менших втрат та збільшення коефіцієнту корисної дії й наближення роботи ДПС до номінальних режимів [9].

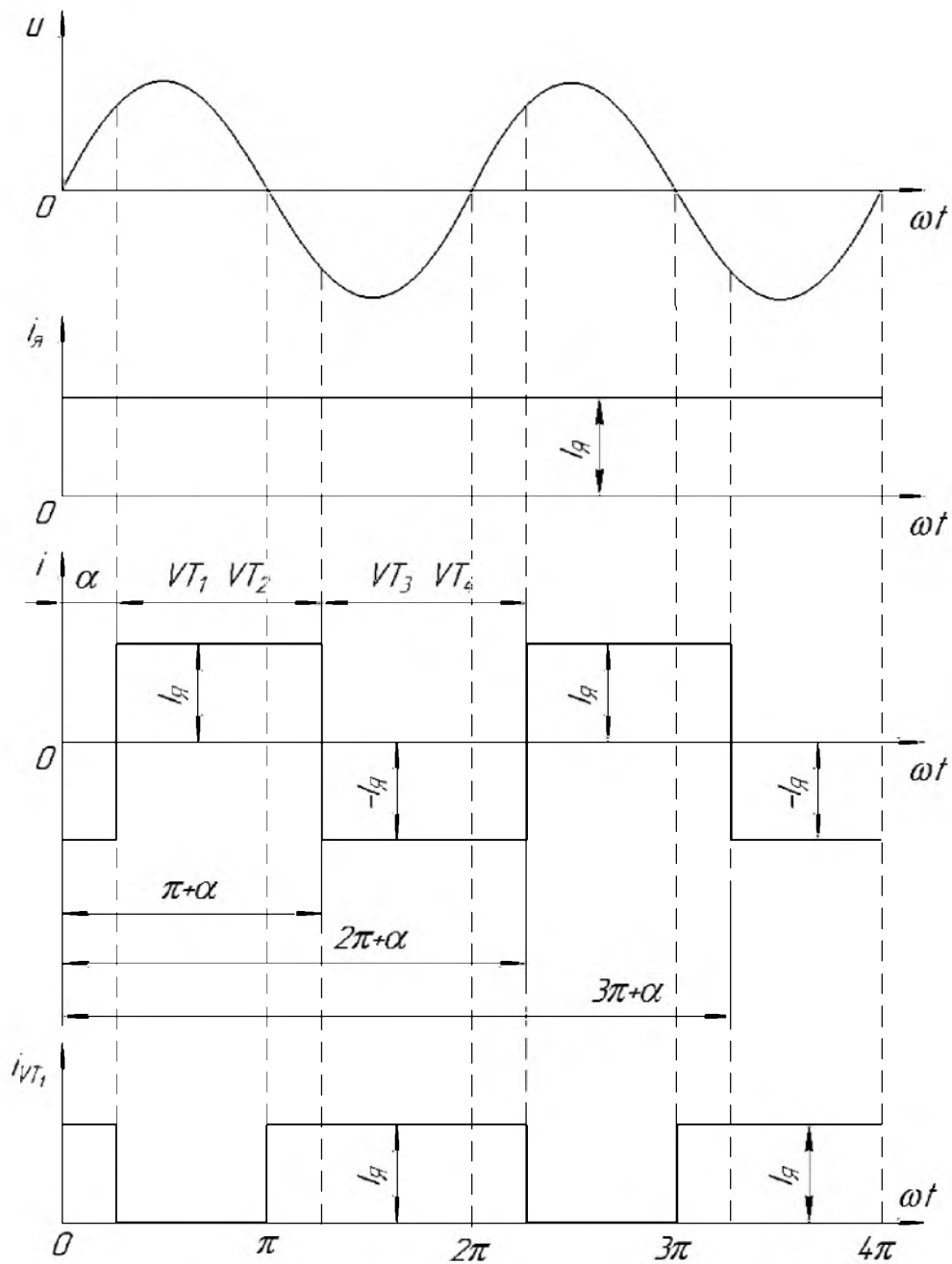


Рисунок 1.13 – Діаграми струмів та напруг для ілюстрації роботи повноперіодного перетворювача

2 ОГЛЯД ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ

Для нормального функціонування ДПС необхідно регулярно здійснювати перевірку усіх його механічних на предмет ослаблення та розвитку серйозних проблем. Періодичному огляду на наявність ознак зношення повинні піддаватись живильні кабелі двигуна. Корпуси двигунів повинні бути підключені до заземлення через провідник з низьким омичним опором [7].

У разі, коли двигун не функціонує належним чином необхідно визначити та виокремити знайдену проблему, а тільки потім починати її вирішувати.

Усі проблемні питання можна умовно розділити на [10]:

- механічні,
- електричні,
- керуючі,
- можливі комбінації усіх трьох.

Для виявлення проблеми необхідно ізолювати, по можливості, кожен компонент системи та переконатися, що кожен компонент функціонує належним чином у разі його незалежного використання.

Виходячи з конструкції двигуна, можна передбачити, що контактна щітка може дотикатися до двох і більше сегментів колектора одночасно, що викликає коротке замикання між окремими котушками. Це явище і період короткого замикання називають комутацією або періодом комутації. При комутації у котушці якоря відбуваються зміни, проілюстровані на рис. 2.1, 2.2 [11].

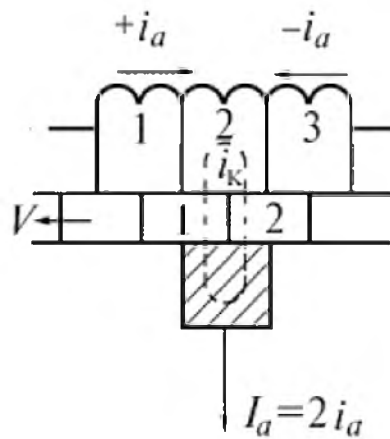
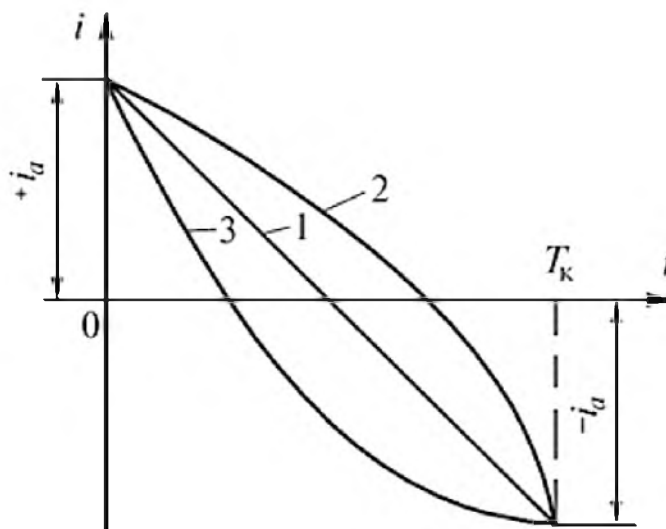


Рисунок 2.1 – Схема комутації у колекторі ДПС



1 – лінійна комутація, 2 – уповільнена комутація, 3 – прискорена комутація, T_k – час комутації

Рисунок 2.2 – Графіки зміни струму в секції, що комутує

При комутації струм i_a протікає до щітки через якір зліва і справа, що призводить до загального струму через щітку по величині $2i_a$. Таким чином, під час періоду короткого замикання необхідно створити такі умови, щоб струм у короткозамкненій котушці мав зворотний напрям.

Зазначене явище короткого замикання призводить до появи різниці між струмами, що передаються окремими котушками, і який проявляється у вигляді іскри, яка «перестрибує» з колекторної планки на щітку. Енергія у цих іскрах може бути досить високою, що призводить до критичного

підвищення температури комутатора та втраті його провідної здатності у короткий термін.

Проблеми, що відбуваються зі струм при досягненні його повного значення у зворотному напрямку до кінця короткого замикання, пов'язані з тим, що напрямок струму у «закорочений» котушці змінюється. Коли по котушці протікає постійний струм, він створює магнітне поле і ЕРС, що індукується в котушці, відмінні від тих, що продукується обертанням котушки у головному магнітному полі. Як і всі індуковані ЕРС, вона намагається зупинити зростання струму. Ця індукована напруга називається напругою реактивного опору або реактивною напругою [12].

Для нейтралізації реактивної напруги, необхідно індукувати у короткозамкнених котушках ЕРС, напрямок якої протилежний до напрямку реактивної напруги. Дану вимогу можна реалізувати шляхом знаходження такого положення щіток, при якій вони опиняються на нейтральній відстані. Складність реалізації даного методу полягає у тому, що при змінному навантаженні нейтральне положення може змінюватися і необхідно використовувати потужні провідникові вводи для передачі значних величин навантажень [12].

Іншим методом нейтралізації реактивної напруги є продукування комутуючої ЕРС, для чого необхідно, щоб котушки оберталися у комутуючому магнітному полі. Це поле можна реалізувати за допомогою додаткових полюсів, які називають комутуючими або міжполюсними. Їх розташовують посередині між основними полюсами, а їхнє збудження відбувається таким чином, щоб кожен з них мав ту ж полярність, що і наступний основний полюс попереду [13].

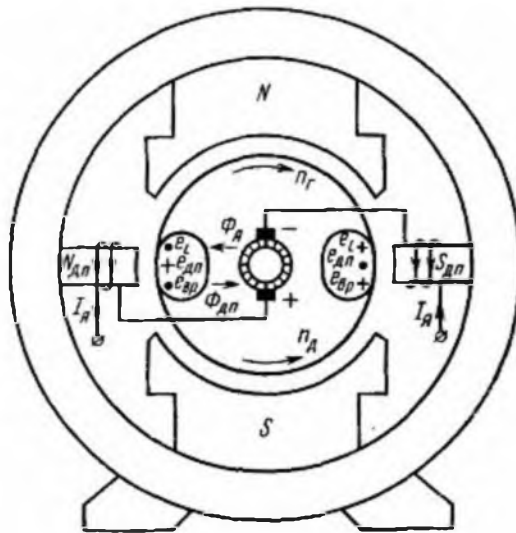


Рисунок 2.3 – Схема продукування комутуючої ЕРС

Використання цього методу викликає зміну реактивної напруги пропорційно зміні сили струму в короткозамкненій котушці. З огляду на це, комутуюча ЕРС та комутуюче магнітне поле повинні бути пропорційними струму якоря. Це положення вимагає постійної зміни величини збуджуючого струму в залежності від навантаження, що досягається пропорційним збудженням котушок, які з'єднуються послідовно з якорем [13].

Пробої, що можуть виникнути, завжди мають причину та джерело і супроводжуються вибухом, появою диму та шумом. У більшості випадків, місцем виникнення пробою є колектор. Колектори зазвичай виконують з мідних сегментів, розділених один від одного слюдяним прошарком. До кожної пари сегментів підключено котушку якоря, а електричний зв'язок відбувається через набір щіток. При виході з ладу слюдяної ізоляції струм починає протікати через більшу кількість мідних сегментів колектора і майже миттєво переходить від одного щіткотримача до іншого, утворюючи пробійну дугу [12].

Причиною виникнення пробою виступає не напруга між сегментами колектора, яка є досить низькою, не товщина слюдяної ізоляції, яка є достатньою, бруд, що накопичується у проміжках між сегментами, і через

який струм має здатність до протікання. Коли накопичується достатньо бруду, щоб перекрити простір між сегментами, через нього починає протікати струм. Сам бруд нагрівається і плавиться, утворюючи струмопровідну доріжку, що призводить до ще більшого підвищення сили струму. Це візуально проявляється у появі світлової плями, яка розростається, і при обертанні якоря утворює світлове кільце [13].

Причиною також може буди повітря, яке під дією високої температури перетворюється на струмопровідний газ, тобто відбувається процес іонізації, який розвивається ще більше при зародженні та розвитку іскріння. Сильні іскри можуть виникати внаслідок відриву щітки від колектора, що може відбуватися при раптовій різкій зміні навантаження аж до перевантаження на валу двигуна.

Причиною виникнення пробою може також бути втрата контакту між колектором і щіткою, які можуть виникати при високих частотах обертання, при зношеності пружин щіткотримача або застряганні щіток у тримачах. Ці розриви викликають появу електричної дуги, яка спричиняє руйнівний вплив на елементи двигуна.

Найбільш складними є пробої у потужних двигунах, що виникають через раптову та різку зміну навантаження. При роботі двигуна на повній напрузі, раптове навантаження викликає іскріння на щітках і недопустиме протікання струму по поверхні колектора, що призводить до короткого замикання. При утворенні в обмеженому просторі навколо колектора іонізованого повітря і полум'я, струм може поширюватися в багатьох напрямках, та спричиняти руйнівні ефекти: вигорання мідних сегментів колектора, пошкодження щіток і щіткоприймачів, спалахування мастила та інші [12].

Виявити зазначені дефекти можна лише візуально оглянувши окремі елементи зовні, після чого їх можна усунути шляхом очищення, механічної обробки чи заміни.

Пробої у двигунах постійного струму – це не норма але звичайне явище і є основною причиною передчасних їхніх відмов та виходу з ладу. Вони є досить складними у плані передбачення та прогнозування. Діагностика може здійснюватися обслуговуючим персоналом лише візуально, щоб побачити наявні дефекти та вжити заходів щодо їх усунення.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Визначення вихідних даних

Електричний привод повинен бути надійним та здатним забезпечити протікання технологічного процесу, швидкодію та точність при роботі, здатність до обслуговування.

Досить суттєвий вплив на електроприводи зчинив розвиток сплеску впровадження силових напівпровідникових приладів – тиристорних перетворювачів. Ці пристрої здатні передавати значні потужності, мають високі значення коефіцієнтів корисної дії, є малоінерційними, споживають незначну кількість потужності на процес керування, мають широкий діапазон регулювання швидкості, незначні масогабаритні показники, високий ступінь готовності до роботи та інше.

Тиристорні перетворювачі є сучасним засобом для перетворення змінної напруги у регульовану постійну напругу. Дані апарати є керованими випрямлячами для перетворення систем синусоїдних напруг у регульовану за величиною постійну напругу [14].

Недоліками тиристорних перетворювачів є наявність пульсації на виході випрямленої напруги і струму, необхідність установки згладжуючих та компенсуючих пристроїв, нижча перевантажувальна здатність, спотворення форми напруги у мережах змінного струму, виникнення гармонік [14].

За завданням у електроприводі застосовано двигун постійного струму 2ПН160ЛУХЛ4, технічні дані якого наведено у табл. 3.1 [15].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики ДПС

Параметр	Позначення	Од. виміру	Значення
Потужність	P_H	кВт	24
Напруга	U_H	В	440
Частота обертання			
номінальна	n_H	об./хв.	3150
максимальна	n_{max}		4000
ККД	η	%	89
Опір обмотки при 15 °С			
якоря	$R_{\text{я}}$	Ом	0,096
додаткових полюсів	$R_{\text{ДП}}$		0,073
збудження	$R_{\text{ЗБ}}$		13,4
Індуктивність ланцюга якоря	$L_{\text{я}}$	мГн	3

Для перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму за допомогою силових напівпровідників використовуємо схему з нульовим виводом через її енергетичну ефективність та кращі енергетичні показники, низький рівень пульсацій.

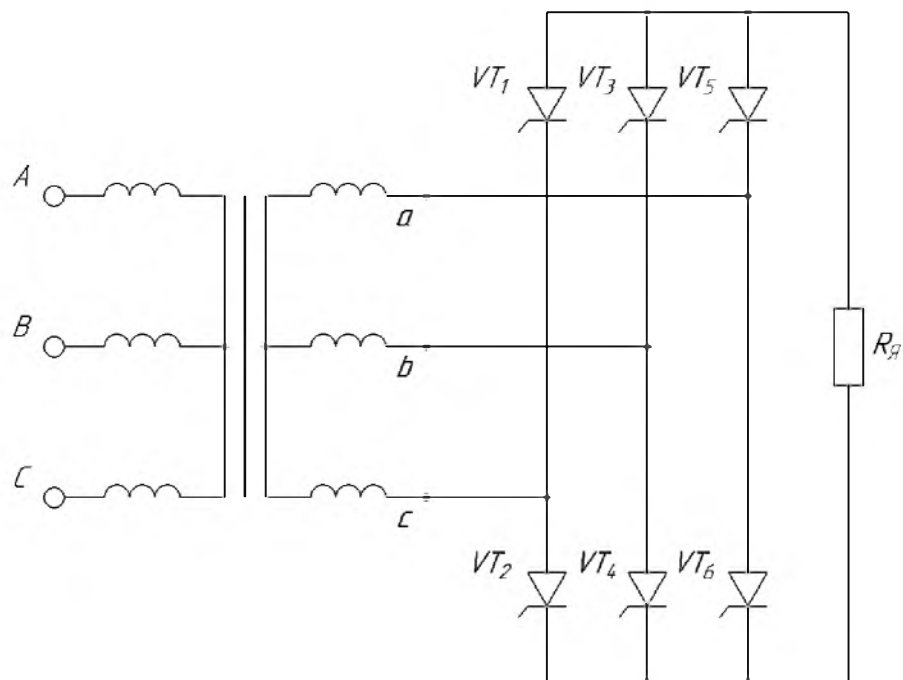


Рисунок 3.1 – Схема трифазної мостової схеми випрямляча

3.2 Розрахунок параметрів двигуна постійного струму

Номінальну кутову швидкість ДПС визначимо за формулою [16]:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 3150}{30} = 329,7 \text{ рад/с} \quad (3.1)$$

Номінальний струм ДПС визначимо за формулою [16]:

$$I_a = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta} = \frac{24 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,89} = 61,29 \text{ А} \quad (3.2)$$

Сумарний опір ланцюга якоря визначимо за формулою [16]:

$$R_{яс} = R_a + R_{дп} = 0,096 + 0,073 = 0,169 \text{ Ом} \quad (3.3)$$

Номінальний магнітний потік ДПС визначимо за формулою [16]:

$$\Phi_n = \frac{U_n - I_a \cdot R_{яс}}{\omega_n} = \frac{440 - 61,29 \cdot 0,169}{329,7} = 1,303 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (3.4)$$

Номінальний момент ДПС визначимо за формулою [16]:

$$M_n = \Phi_n \cdot I_a = 1,303 \cdot 61,29 = 79,87 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.5)$$

Номінальна ЕРС ДПС визначимо за формулою [16]:

$$E_n = \Phi_n \cdot \omega_n = 1,303 \cdot 329,7 = 429,6 \text{ В} \quad (3.6)$$

Постійну часу якірного ланцюга ДПС визначимо за формулою [16]:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{яс}}} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,169} = 0,0178 \text{ с} \quad (3.7)$$

Постійну часу обмотки збудження ДПС визначимо за формулою [16]:

$$T_{\text{зб}} = (7 \div 10) \cdot T_{\text{я}} = 10 \cdot 0,0178 = 0,178 \text{ с} \quad (3.8)$$

Індуктивність обмотки збудження ДПС визначимо за формулою [16]:

$$L_{\text{зб}} = T_{\text{зб}} \cdot R_{\text{зб}} = 0,178 \cdot 13,4 = 2,39 \text{ Гн} \quad (3.9)$$

Струм в обмотці збудження ДПС визначимо за формулою, А [16]:

$$I_{\text{зб}} = \frac{U_{\text{зб}}}{R_{\text{зб}}} \quad (3.10)$$

де $U_{\text{зб}}$ – напруга обмотки збудження, $U_{\text{зб}} = 220 \text{ В}$.

$$I_{\text{зб}} = \frac{220}{13,4} = 16,42 \text{ А}$$

Індуктивність ланцюга намагнічування ДПС визначимо за формулою [16]:

$$L_{\text{af}} = \frac{\Phi_{\text{н}}}{I_{\text{зб}}} = \frac{1,303}{16,42} = 0,0794 \text{ Гн} \quad (3.11)$$

3.3 Розрахунок трансформатора узгодження

Фазну напругу на вторинних обмотках трансформатора узгодження визначимо за формулою, В [16]:

$$U_{2\phi} = k_u \cdot k_c \cdot k_\alpha \cdot k_r \cdot U_H, \quad (3.12)$$

де k_u – відношення між напругою на вторинній обмотці трансформатора та номінальною напругою, $k_u = 0,562$ [16],

k_c – коефіцієнт, що враховує можливе зниження напруги в ланцюзі, $k_c = 1,1$ [16],

k_α – коефіцієнт запасу, що враховує можливе зниження випрямленої напруги, $k_\alpha = 1,1$ [16],

k_r – коефіцієнт запасу, що враховує внутрішнє падіння напруги в тиристорному перетворювачі, $k_r = 1,1$ [16].

$$U_{2\phi} = 0,562 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 440 = 329,13 \text{ В.}$$

Фазний струм вторинної обмотки трансформатора визначимо за формулою, А [16]:

$$I_{2\phi} = k_{i1} \cdot k_{i2} \cdot I_\alpha \quad (3.13)$$

де k_{i1} – відношення між струмом у вторинній обмотці трансформатора та струму якоря, $k_{i1} = 0,837$ [16],

k_{i2} – коефіцієнт, що враховує відхилення форми струму на аноді тиристора від прямокутної форми, $k_{i2} = 1,1$ [16].

$$I_{2\phi} = 0,837 \cdot 1,1 \cdot 61,29 = 56,43 \text{ А}$$

Розрахункову потужність трансформатора визначимо за формулою, $B \cdot A$ [16]:

$$S_{\text{тр}} = k_u \cdot k_\alpha \cdot k_s \cdot k_{i2} \cdot U_H \cdot I_{\text{я}} \quad (3.14)$$

де k_s – коефіцієнт, який характеризує відношення між потужністю трансформатора і потужністю, що вивільняється на якорі ДПС, $k_s = 1,102$ [16],

$$S_{\text{тр}} = 0,562 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 440 \cdot 61,29 = 20172,36 \text{ В} \cdot \text{А}$$

За розрахованими значеннями напруги, струму і потужності обираємо трансформатор узгодження: ТМГ-25-6/0,4, характеристики якого наведено у табл. 3.2 [17].

Коефіцієнт трансформації визначимо за формулою [16]:

$$k_T = \frac{U_{1\text{л}}}{U_{2\text{л}}}, \quad (3.15)$$

де $U_{1\text{л}}$ – лінійна напруга первинної обмотки трансформатора, $U_{1\text{л}} = 6 \cdot 10^3 \text{ В}$.

$U_{2\text{л}}$ – лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора, $U_{2\text{л}} = 400 \text{ В}$.

$$k_T = \frac{6000}{400} = 15.$$

Номінальний фазний струм у первинній обмотці трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$I_{1\text{фн}} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{л}}} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 2,41 \text{ А}. \quad (3.16)$$

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики трансформатора узгодження

Параметр	Од. виміру	Значення
Номінальна потужність	кВА	25
Номінальна напруга на боці ВН	В	6000
Номінальна напруга на боці НН	В	400
Втрати холостого ходу	Вт	105
Втрати короткого замикання	Вт	600
Струм холостого ходу	%	2,4
Напруга короткого замикання	%	4,5
Схема з'єднання	–	У/Ун-0 (зірка-зірка), Д/Ун-11 (трикутник-зірка), У/Зн-11 (зірка-зигзаг)
Кліматичне виконання та категорія розміщення	–	У1, УХЛ1
Матеріал обмоток	–	алюміній, мідь
Допустима температура експлуатації	°С	від –45 до +40 (У1), від –60 до +40 (УХЛ1)
Сейсмостійкість	–	9

Номінальний фазний струм у вторинній обмотці трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$I_{2\text{фн}} = I_{1\text{ф}} \cdot k_T = 2,41 \cdot 15 = 36,15 \text{ А.} \quad (3.17)$$

Фазну напругу на первинній обмотці трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3464,1 \text{ В.} \quad (3.18)$$

Фазну напругу на вторинній обмотці трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$U_{2\text{фн}} = \frac{U_{2\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ В.} \quad (3.19)$$

Отримані значення говорять про правильність вибору зазначеного трансформатора.

Напругу короткого замикання визначимо формулою [16]:

$$U_{\text{кзф}} = \frac{U_{\text{к}} \cdot U_{1\text{фн}}}{100} = \frac{4,5 \cdot 3464,1}{100} = 155,88 \text{ В} \quad (3.20)$$

Повний опір короткого замикання визначимо за формулою [16]:

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{кзф}}}{I_{1\text{ф}}} = \frac{155,88}{2,41} = 64,68 \text{ Ом} \quad (3.21)$$

Активну складову опору короткого замикання визначимо за формулою [16]:

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{ф}}^2 \cdot 3} = \frac{600}{2,41^2 \cdot 3} = 34,43 \text{ Ом} \quad (3.22)$$

Реактивну складову опору короткого замикання визначимо за формулою [16]:

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2} = \sqrt{64,68^2 - 34,43^2} = 54,75 \text{ Ом} \quad (3.23)$$

Наведений активний опір первинної обмотки трансформатора до вторинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{34,43}{2} = 17,22 \text{ Ом} \quad (3.24)$$

Наведений реактивний опір первинної обмотки трансформатора до вторинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{54,75}{2} = 27,38 \text{ Ом} \quad (3.25)$$

Наведений активний опір вторинної обмотки трансформатора до первинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$R_2 = \frac{R_1}{k_T^2} = \frac{17,22}{15^2} = 0,0765 \text{ Ом} \quad (3.26)$$

Наведений реактивний опір вторинної обмотки трансформатора до первинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$X_2 = \frac{X_1}{k_T^2} = \frac{27,38}{15^2} = 0,122 \text{ Ом} \quad (3.27)$$

Фазний струм холостого ходу визначимо за формулою [16]:

$$I_{0\Phi} = \frac{I_{xx} \cdot I_{l\Phi}}{100} = \frac{2,4 \cdot 2,41}{100} = 0,0578 \text{ А} \quad (3.28)$$

Активну складову опору ланцюга намагнічування визначимо за формулою [16]:

$$R_m = \frac{U_{1Л}^2}{P_0} = \frac{6000^2}{105} = 342,86 \text{ Ом} \quad (3.29)$$

Реактивну складову опору ланцюга намагнічування визначимо за формулою [16]:

$$X_m = \frac{U_{1Л}}{I_{0ф}} = \frac{6000}{0,0578} = 103806,23 \text{ Ом} \quad (3.30)$$

Індуктивність первинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{27,38}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0872 \text{ Гн} \quad (3.31)$$

Індуктивність вторинної обмотки трансформатора визначимо за формулою [16]:

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,122}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,000388 \text{ Гн} \quad (3.32)$$

Індуктивність ланцюга намагнічування визначимо за формулою [16]:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{103806,23}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 330,59 \text{ Гн} \quad (3.33)$$

3.4 Розрахунок силових напівпровідникових елементів

У якості силових напівпровідникових елементів обираємо тиристори.

Прямий струм через тиристор визначимо за формулою [18]:

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{я}}}{3} = \frac{61,29}{3} = 20,43 \text{ А} \quad (3.34)$$

Максимальний струм визначимо за формулою [18]:

$$I_{\text{пр max}} = I_{\text{пр}} = 20,43 \text{ А} \quad (3.35)$$

Зворотну напругу на тиристорі у його закритому стані визначимо за формулою [18]:

$$U_{\text{зв}} = 1,045 \cdot U_{\text{н}} = 1,045 \cdot 440 = 459,8 \text{ В} \quad (3.36)$$

Максимальну зворотну напругу на тиристорі у його закритому стані визначимо за формулою [18]:

$$U_{\text{зв max}} = 2 \cdot U_{\text{зв}} = 2 \cdot 459,8 = 919,6 \text{ В} \quad (3.37)$$

Номінальний кут управління вентилями визначимо за формулою [18]:

$$\alpha_{\text{н}} = \arccos\left(\frac{U_{\text{н}}}{2,34 \cdot U_{2\text{фн}}}\right) = \arccos\left(\frac{440}{2,34 \cdot 230,94}\right) = 39,4^\circ \quad (3.38)$$

За розрахованими значеннями вибираємо тиристор T132-25 – низькочастотний штирьового виконання загального призначення. Призначений для роботи в перетворювальних пристроях, ланцюгах постійного і змінного струму різних силових установок. Основні характеристики тиристора T132-25 наведено у табл. 3.3 [19].

Таблиця 3.3 – Основні характеристики тиристора

Показник	Значення показника
Повторювана імпульсна напруга в закритому стані; імпульсна зворотна напруга, що повторюється	100-2000 В
Максимально допустимий середній струм у відкритому стані (температура корпусу)	25 А (85°C)
Максимально допустимий струм, що діє, у відкритому стані	39 А
Ударний струм у відкритому стані	0,33 кА
Максимально допустима температура переходу	125 °C
Імпульсна напруга у відкритому стані / імпульсний струм у відкритому стані	2,20/78,5 В/А
Порогова напруга тиристора у відкритому стані	1,30 В
Динамічний опір у відкритому стані	0,0110 мОм
Повторний імпульсний струм у закритому стані; імпульсний зворотний струм, що повторюється	9,0 мА
Критична швидкість наростання напруги у закритому стані	50-1000 В/мкс
Постійний струм управління, що відмикає	100 мА
Постійна напруга управління, що відмикає	3,0 В
Критична швидкість наростання струму у відкритому стані	160 А/мкс
Час вимкнення	63-250 мкс

Тиристори у ланцюзі випрямляча використовуються у якості керованих ключів. Для їхньої роботи необхідно, щоб енергетичний потенціал анода був більшим за енергетичний потенціал катода, а на керуючому електроді був наявним керуючий імпульс [18].

При позитивній напрузі між анодом та катодом відбувається його відкривання – дану подію можна змінити у часовому і векторному просторі шляхом подачі управляючого імпульсу на керуючий електрод. Дане відкриття задається кутом відкривання, через що керуємо часом початку проходження струму через тиристор з одночасним регулюванням напруга випрямляча [18].

Для загального керування тиристорами у теперішній час найбільшого розповсюдження отримали системи імпульсно-фазового керування, на які покладено наступні функції [19]:

- завдання сигналами керування моментів часу відкриття тиристорів,
- формування у визначені моменти часу відкриваючих імпульсів розрахункової амплітуди і тривалості.

За способом отримання імпульсів розрізняють горизонтальний, вертикальний і інтегруючий принципи управління [18, 19].

4 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЗАСОБІВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

4.1 Пошук шляхів підвищення надійності електричних приводів з двигунами постійного струму засобами силової електроніки

У загальному розумінні, силова електроніка – це електронні пристрої для перетворення електричної енергії. Завданнями, що стоять перед силовою електронікою, є обробка, фільтрація, транспортування і поставка для споживання з максимальним ступенем ефективності при найменших масо-габаритних показниках [20].

Принципи силової електроніки передбачають використання електронних пристроїв із застосуванням теорії комутаційних перемикачів та теорії систем, методи проектування та сучасних інструментів для аналізу на базі комп'ютерних програм моделювання. Іншими, не менш важливими функціями силових перетворювачів, є можливість підвищення надійності роботи електроприводів [20].

Головними показниками, що характеризують роботу перетворювачів частоти є вихідна частота, паспортні значення напруги й потужності та значення стабілізованого вихідного параметра.

При коротких замиканнях, надмірному підвищенні або зниженні живлячої напруги силові пристрої здатні вимкнути електропривод від живлячої мережі та виключити можливість повторного включення до усунення несправності [21 – 23].

Тепловий захист двигуна за допомогою засобів силової електроніки реалізується шляхом безперервного контролю перетворювачем частоти температури двигуна, як різниця між кількістю тепла, що виділяється в обмотках та кількістю тепла, яке може бути розсіяно існуючими засобами охолодження [21 – 23].

Контрольованим параметром також може виступати струм у якірній обмотці та обмотці збудження та час, у продовж якого спостерігається перевищення заданого його значення [21 – 23].

Розробка, впровадження і реалізація теплового захисту засобами силової електроніки дозволяє значно підвищити надійність роботи електроприводу при тривалих режимах роботи.

Захист від різкої зміни регульованого параметра під час протікання технологічного процесу направлене на контроль неадекватної (аварійної) поведінки підключеного до електричного приводу технологічного механізму. Ця подія викликає різку зміну частоти обертання двигуна (у обидва боки – до нуля і до максимально-можливого значення), що викликає спрацювання системи попереджувальної сигналізації у перетворювачі, а в залежності від його налаштувань навіть подати сигнал на зупинку [21 – 23].

Короткочасні навантаження, що перевищують встановлені значення, також викликають збільшення струмів та зменшення частоти обертання проти заданих значень у впродовж заданого інтервалу часу.

З метою зменшення вірогідності виникнення перевантажень при пусках та зупинках двигуна перетворювачі на базі силових елементів дозволяють здійснювати плавний розгін та плавне гальмування двигуна електроприводу. При цьому можна реалізувати лінійну характеристику, що забезпечує постійність навантаження на двигун, запобігти ривкам та коливанням частоти обертання під впливом зміни навантаження, реалізувати ефективний розгін або гальмування за умови найменших витрат та умов енергозбереження [21 – 23].

Максимальна потужність, що розвивається двигуном, та допустима зміна (збільшення) напруги у ланцюгах постійного струму визначають значення максимальної швидкості (або прискорення/уповільнення) розгону та гальмування двигуна, що може контролюватися і забезпечуватися перетворювачами, побудованих із використанням силових

напівпровідникових елементів. Силові перетворювачі можуть виступати у ролі зовнішніх електричних гальмівних пристроїв, на яких відбувається розсіювання «виділеної» енергії постійного струму, що може скоротити час зупинки двигуна [21 – 23].

Напівпровідникові перетворювачі дозволяють виключити певні (розраховані і задані заздалегідь) частоти, що викликають у приводних механізмах резонансних коливань. Ця можливість дозволяє збільшити термін служби та ресурс елементів електроприводу та покращити експлуатаційні показники його роботи [21 – 23].

Силові перетворювачі дозволяють забезпечити певну характеристику, що визначає залежність між живлячою напругою і частотою обертання двигуна. Дана можливість дозволяє виключити ситуації, при яких можливий перегрів і вихід з ладу обмоток – це відбувається, коли при номінальних значеннях напруги маємо частоту обертання валу, близької до нуля. Цей факт також позитивно може відобразитись на надійності та тривалості безперебійної роботи двигуна [21 – 23].

Деякі режими роботи приводів при зменшенні навантаження дозволяють знизити значення напруги, що позитивно відображається на споживанні електричної енергії.

Перетворювачі частоти дозволяють здійснити облік роботи приводу, що дозволяє більш точно визначати остаточний ресурс роботи двигуна та супутніх елементів. За наявності елементів запам'ятовування, можна вести статистику роботи: кількість і тривалість спрацювання захисних апаратів, виникнення передаварійних ситуацій та їх причин [21 – 23].

4.2 Загальні відомості про силові перетворювачі

Тиристор – це кремнієвий керований випрямляч. Його вольт-амперна характеристика складається з чотирьох частин: вентильної, блокуючої, провідної та комутаційної. Перехід від блокування до провідності відбувається шляхом прикладання імпульсу струму до ланцюга затвора, який запускає лавинну реакцію – це досить проста задача. Складнощі виникають, коли необхідно перевести елемент у початковий стан – для цього необхідно використання додаткових складних комутаційних схем. У теперішній час тиристори використовуються лише в системах з керованими випрямлячами з комутацією мереж. Більш досконалим вважають асиметричні тиристори – тиристор зі зворотним струмом, для яких характерна менша товщина внутрішніх шарів та менший час відновлення, можливість роботи з вищими частотами перемикання [24].

Симистор – це двонаправлений тиристор, який має характеристики двох паралельно-з'єднаних тиристорів. Керування ним є аналогічним керуванню тиристором і використовується, в основному, в схемах, де на меті є регулювання середньоквадратичного значення вихідних напруг і струмів та відрізняються низькою потужністю [24].

Тиристор GTO (GCT) являє собою чотиришаровий повністю керований елемент. Їхньою відмінністю є можливість їх використання у надпотужних приводах з надвисокими (тисячі одиниць) значеннями напруги, струму і частоти. Принципи керування тиристора GTO (GCT) подібні, а для відключення на затвор необхідно подати негативний струм з піковим значенням до 25% від значення основного вимикаючого струму, що пред'являє високі вимоги до ланцюгів управління [24].

Біполярні транзистори (BJT) використовують у схемах з цифровим керування для перетворення двійкових операцій. Ці пристрої працюють інакше ніж тиристори – у залежності від керуючого сигналу вони можуть

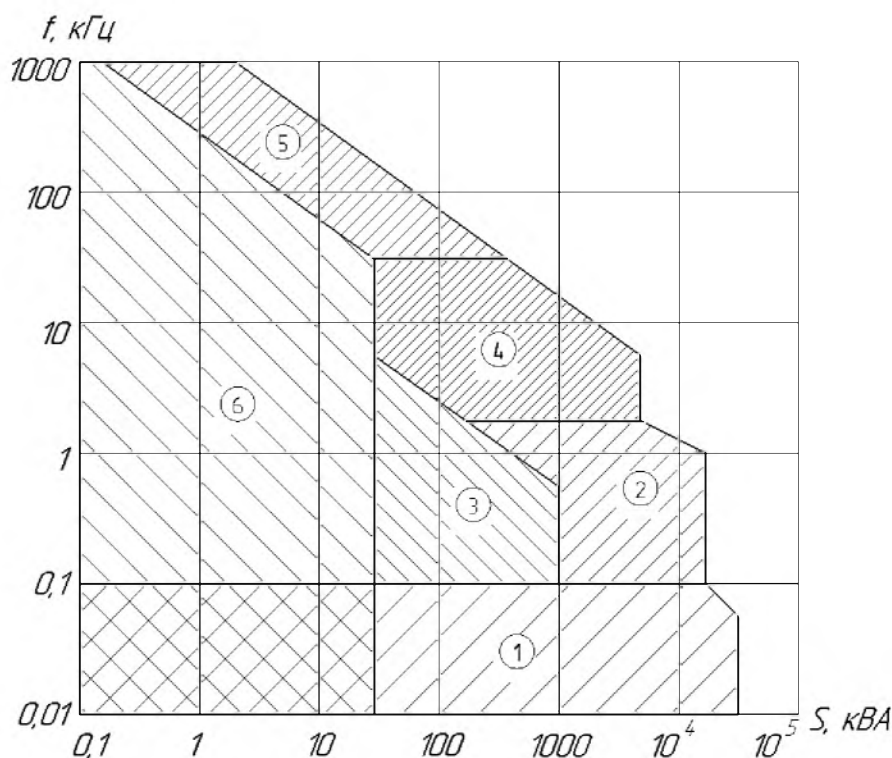
бути переведені у стан провідності або стан блокування з високим внутрішнім опором, що підтримується постійним базовим струмом. Їх переважно використовують у системах управління з великою потужністю та низькою частотою перемикання [24].

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) це монолітний кремнієвий елемент, який являє собою комбінацію біполярного та польового транзистора. Керуючі сигнали надходять на затвор полярного транзистора, а біполярна структура проводить струм навантаження. IGBT-транзистори мають коміркову структуру, що дозволяє здійснювати керування більшими потужностями та отримувати рівномірний розподіл струму в перехідних режимах [24].

Польовий транзистор (MOSFET, DMOS) являє собою метал-оксидний напівпровідник, де основними носіями заряду є електрони, що керуються напругою на керуючому електроді, ізолюваному від основної структури елемента. Електричне поле, що індукується напругою затвора, сприяє руху потоку електронів між шарами транзистора. Дані силові елементи відрізняються монолітною структурою, що містить велику кількість окремих, з'єднаних паралельно елементів. Для здійснення управління керуючим електродом витрачається досить мало енергії, що позитивно позначається на втраті енергії. Процеси вмикання і розмикання протікають з доволі високою швидкістю, що дозволяють використовувати дані елементи у мережах з високою частотою [24].

Інтелектуальні комбіновані технології (SIT) – являють собою модулі, що складаються з компонентів силової електроніки і містять елементи керування та захисту. Це так звані «розумні пристрої», які реалізують визначений взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами, постачені регуляторами на основі мікроконтролерів, мають елементи захисту та самодіагностики. У їх будові можна використовувати методики створення штучних нейронних мереж та штучного інтелекту [24].

Для того, щоб визначити, який елемент найкраще підійде до заданих умов можна скористатися діаграмою, що відображає залежність між напругою та частотою ланцюга, у якому необхідно здійснювати регулювання [24].



1 – «звичайний» тиристори, 2 – тиристори GTO (GCT), 3 – біполярні транзистори (BJT), 4 – біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT), 5 – інтелектуальні комбіновані технології (SIT), 6 – польові транзистори (MOSFET, DMOS)

Рисунок 4.1 – Область застосування силових перетворювачів

Аналіз представленої діаграми дозволяє говорити про те, що сучасні системи силової електроніки здатні «покрити» весь діапазон технологічних напруг і частот. За необхідності досягнення вищих параметрів доцільно розглядати системи з лінійними комутованими випрямлячами, інвертори та перетворювачі різного виду струмів, створені на базі напівпровідникових елементів.

4.3 Моделювання роботи електроприводу у програмному середовищі Matlab

Моделювання являє собою дослідницький процес результатом якого є реалізація певного технологічного процесу або технічного об'єкта. При моделюванні здійснюють адекватну заміну означених явищ та агрегатів для їхнього подальшого вивчення та дослідження [25].

Створені моделі не можуть бути точною копією означеного через те, що при її створенні приймають деякі припущення та спрощення. Тим не менш, вони досить точно можуть описувати досліджувані процеси та дає можливість здійснювати дослідження лише проектуємого об'єкта.

Сучасний розвиток програмного забезпечення пропонує для моделювання технічних систем багато різних програм – частина з них направлено на вирішення широкого кола проблем, а інші є вузькоспеціалізованими. Серед найрозповсюдженіших програм можна виділити наступні: Maple, MathCAD, Matlab. Дані програми дозволяють здійснювати різноманітні розрахунки при складанні моделі у формульному вигляді, проводити численні досліди, здійснювати проектування технічних об'єктів і систем. Для спрощення моделювання дані програми мають стандартизовані блоки, сформовані у бібліотеки [25].

Перевагою застосування прикладних програм є можливість реалізації математичних та структурних взаємних зв'язків, задавати фіксовані значення визначених параметрів, забезпечення гарної обчислювальної продуктивності, враховувати закони збереження енергії, досліджувати перехідні процеси, параметри сумісності, визначати ефективність впровадження енергозберігаючих заходів [25].

За результатами моделювання можна здійснити аналіз та співставити отримані дані з експериментом, проведеним у реальних умовах чи за допомогою лабораторних установок.

При використанні моделювання необхідно дотримуватися певного алгоритму дій [25]:

- визначити мету досліджень,
- визначити аналітичні і фізичні параметри роботи системи,
- розробка і будова моделі,
- складання змодельованих параметрів,
- виправлення похибок моделювання,
- отримання результатів моделювання,
- аналіз результатів моделювання.

У якості об'єкта досліджень виступає двигун постійного струму з незалежним збудженням.

Для реалізації фізичної моделі ДПС у програмному пакеті Matlab/Simulink скористуємося блоками наявної бібліотеки [26 – 28].

Таблиця 4.2 – Застосовані при моделюванні блоки

Назва блоку	Призначення
DC Machine	Імітація двигуна постійного струму
DC Voltage Source	Імітація джерела постійної напруги
Three-Phase Programmable Voltage Source	Імітація джерела змінної напруги
Thyristor	Імітація тиристора
Pulse Generator	Імітація генератора імпульсів
Ground	Імітація заземлювача
Constant	Імітація величини постійного значення
IGBT	Імітація IGBT-транзистора
MOSFET	Імітація MOSFET-транзистора

Спочатку розробимо модель керування ДПС для однієї фази змінного струму. Після додавання блоків, з'єднуємо їх між собою згідно функціональних зв'язків та отримуємо готову модель (рис. 4.1).

Для забезпечення коректної роботи моделі в кожному відповідному блоці необхідно ввести задані раніше параметри: напруги, опори, струми, частоту та інші (рис. 4.2).

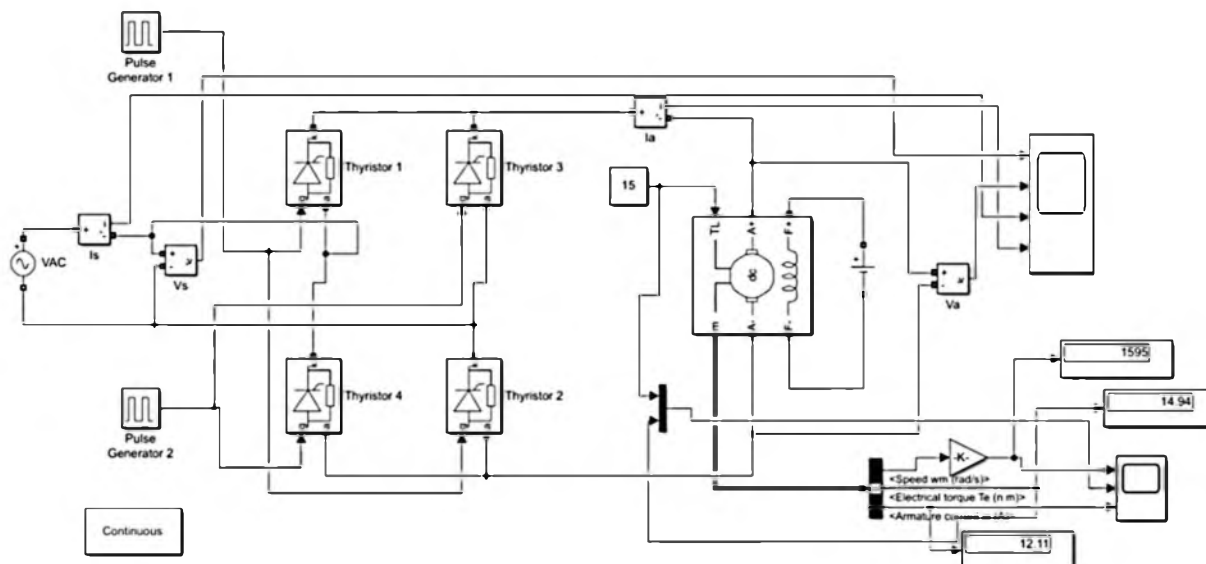


Рисунок 4.1 – Модель керування ДПС незалежного збудження з використанням тиристорів

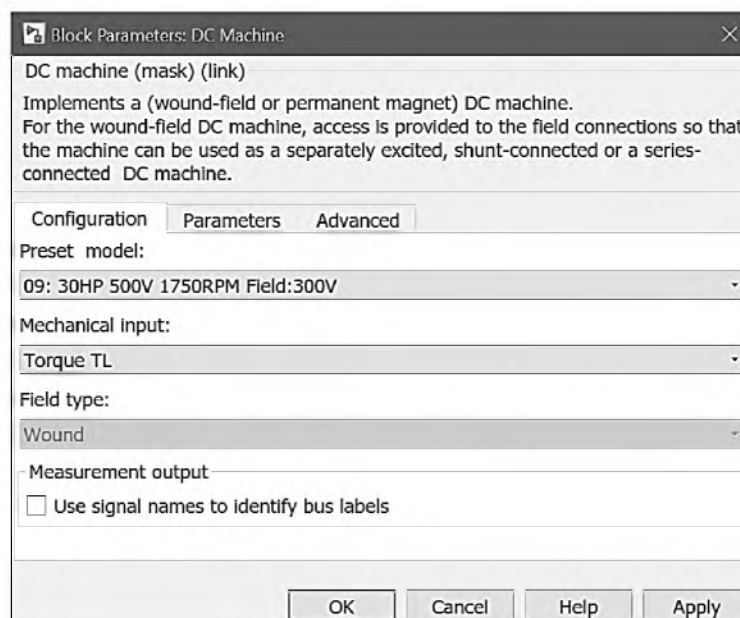
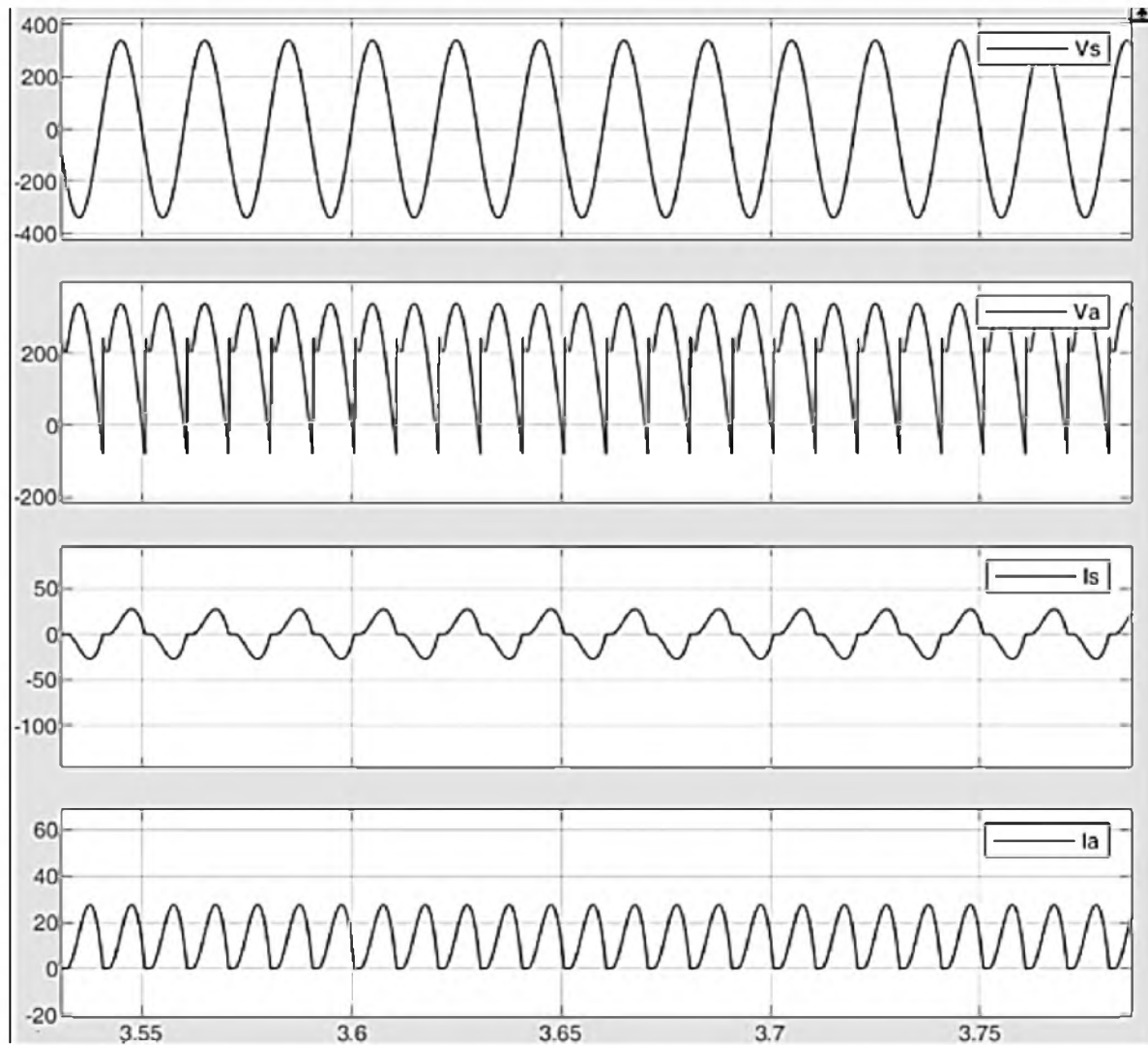


Рисунок 4.2 – Вікно завдання параметрів двигуна постійного струму

Після завдання параметрів можна запускати процес моделювання, результати якого виводяться на осцилограф: зміна значення напруг, зміна значення струмів та інші – рис. 4.3.



V_s – зміна напруги джерела живлення, V_a – зміна напруги на якорі,
 I_s – зміна струму джерела живлення, I_a – зміна струму у якорі,

Рисунок 4.3 – Результати моделювання керування ДПС

Наведена вище схема складена для однієї фази, щоб перейти до трифазної напруги використаємо бібліотечний блок Three-Phase Programmable Voltage Source (джерело трифазної напруги) та блоку тиристорного керування (рис. 4.4, 4.5) [26 – 28].

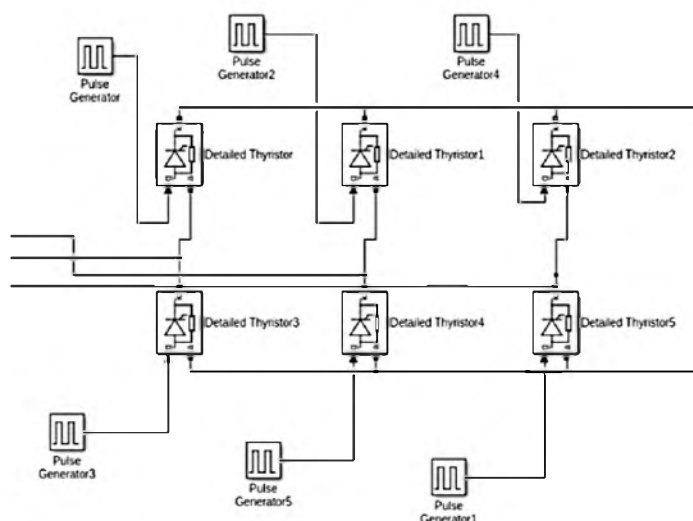


Рисунок 4.4 – Перехід до трифазної системи тиристорного керування

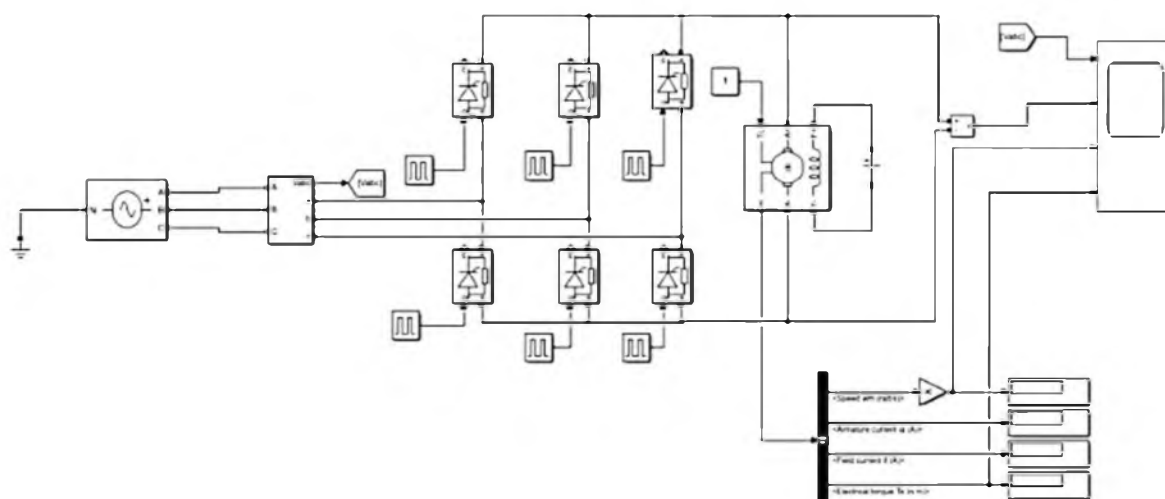


Рисунок 4.5 – Кінцева модель керування ДПС

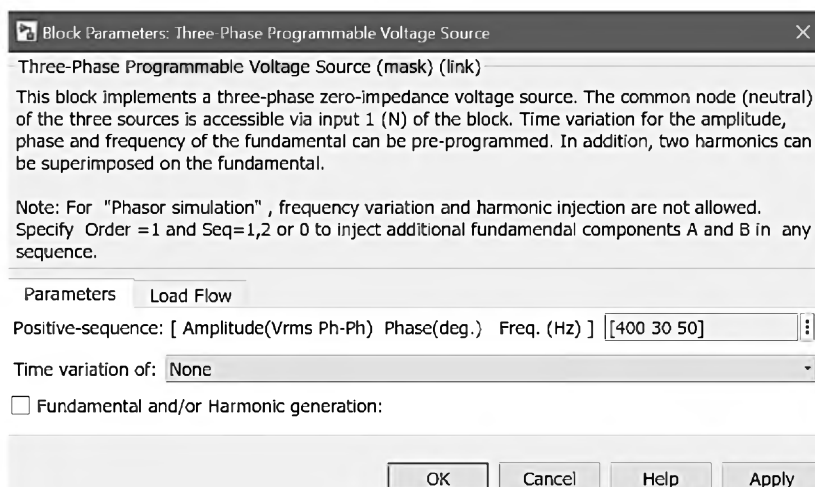


Рисунок 4.6 – Завдання параметрів блока «Three-Phase Programmable Voltage Source»

Задаючи різні значення відкриття тиристорів можемо отримати різні форми керуючої напруги – рис. 4.7–4.9.

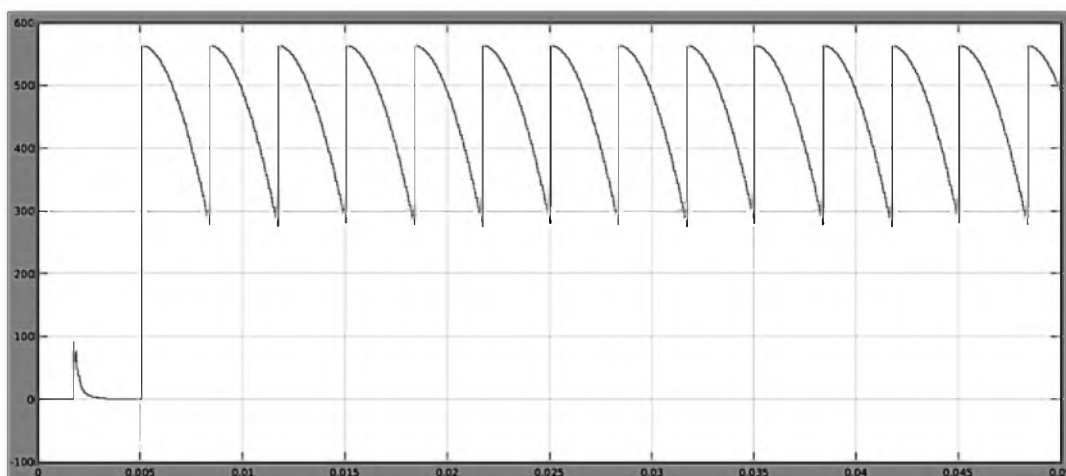


Рисунок 4.7 – Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 30^\circ$

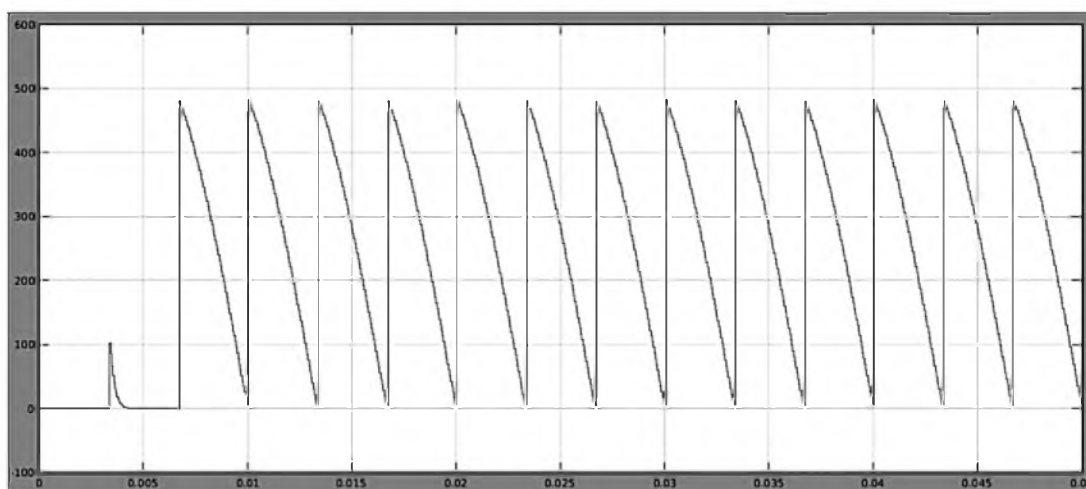


Рисунок 4.8 – Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 60^\circ$

Аналіз графіків на рис. 4.7-4.9 показав можливість здійснення регулювання напруги, яка буде синхронною до зміни керуючих імпульсів на тиристорах – проходить лише частина синусоїдної хвилі у залежності від кута відкриття.

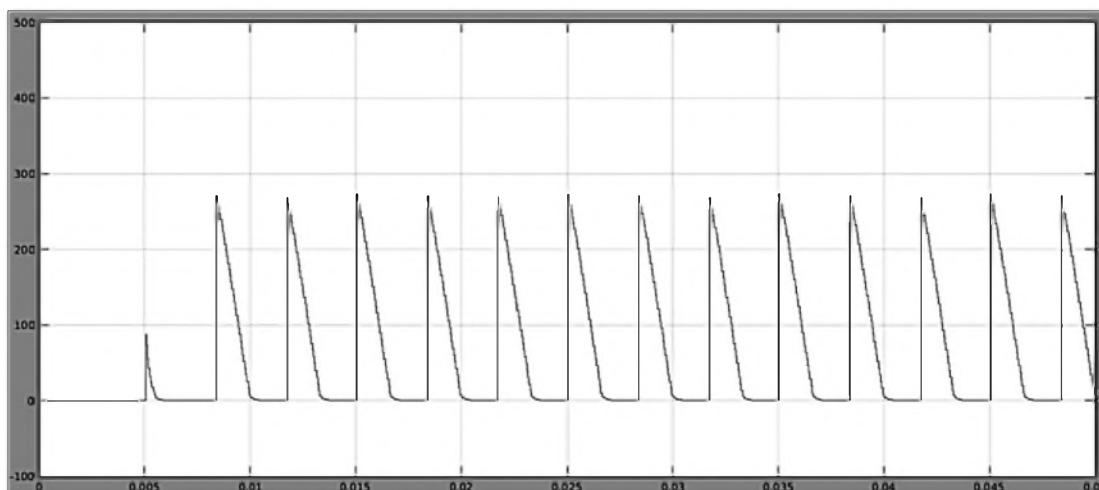


Рисунок 4.9 – Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 90^\circ$

Тиристорні перетворювачі мають низьку інерційність, пов'язану з процесом комутації тиристорів і дискретний характер роботи, що для трифазної мережі дає запізнення у 0,0035 с.

Здійснююче загальне моделювання по складеній моделі отримаємо графічні залежності, що характеризують зміну контрольованих параметрів її роботи – рис. 4.10–4.15.

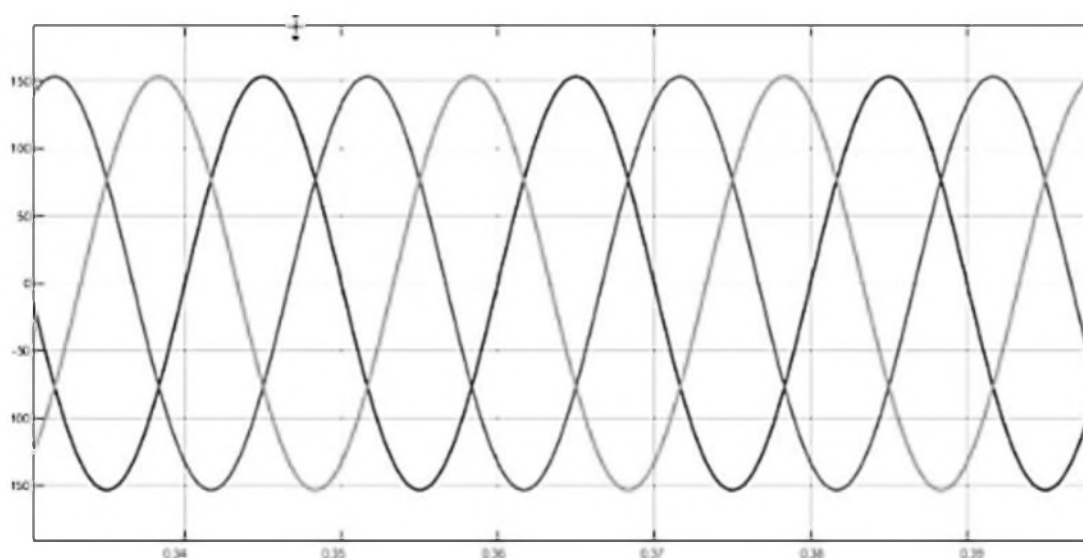


Рисунок 4.10 – Графіки зміни напру синусоїдного джерела живлення

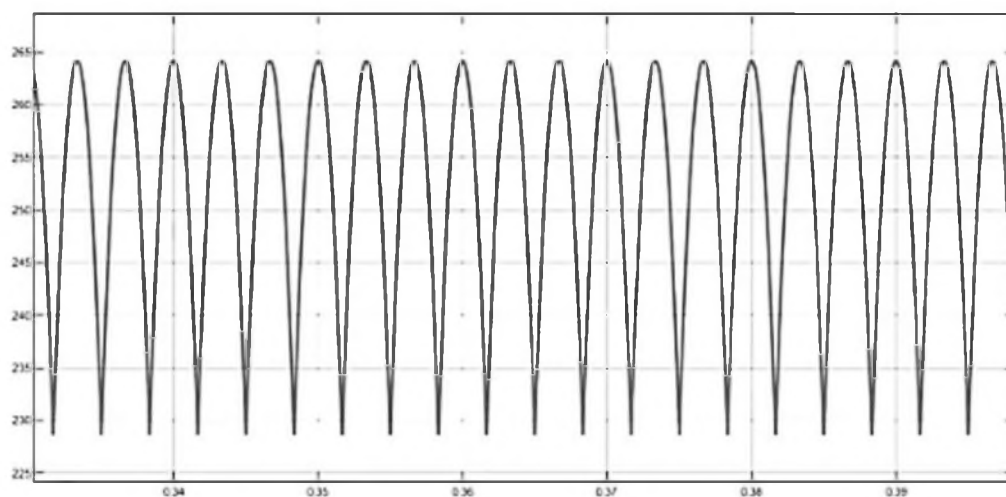


Рисунок 4.11 – Графік зміни напруги на ДПС

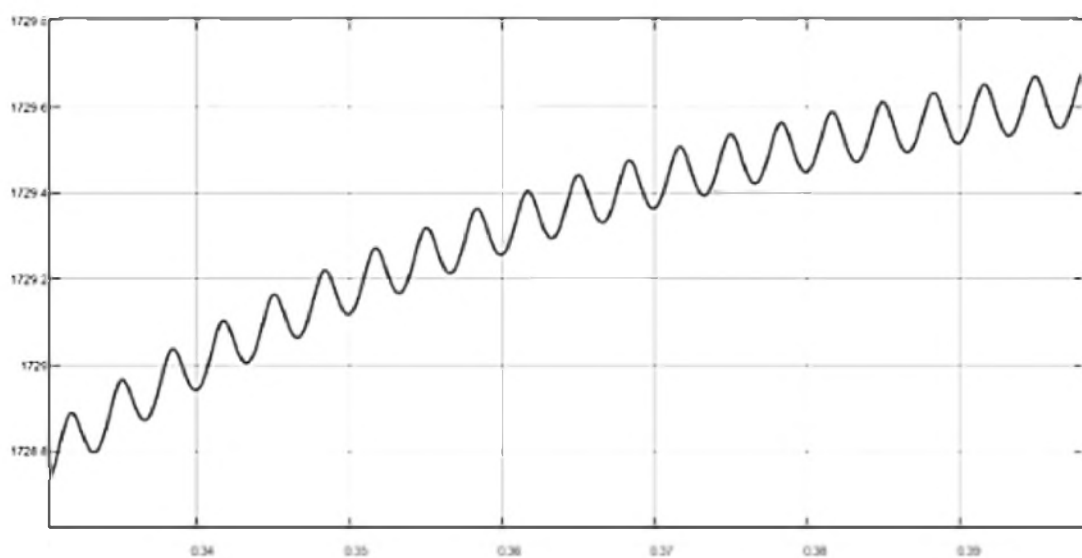


Рисунок 4.12 – Графік зміни струму якоря ДПС у пусковий період

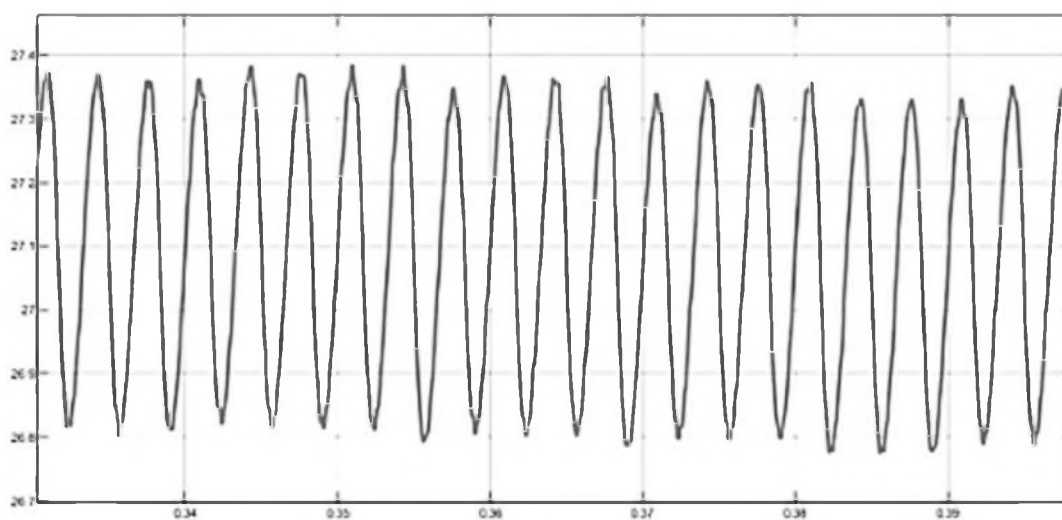


Рисунок 4.13 – Графік зміни крутного моменту у пусковий період

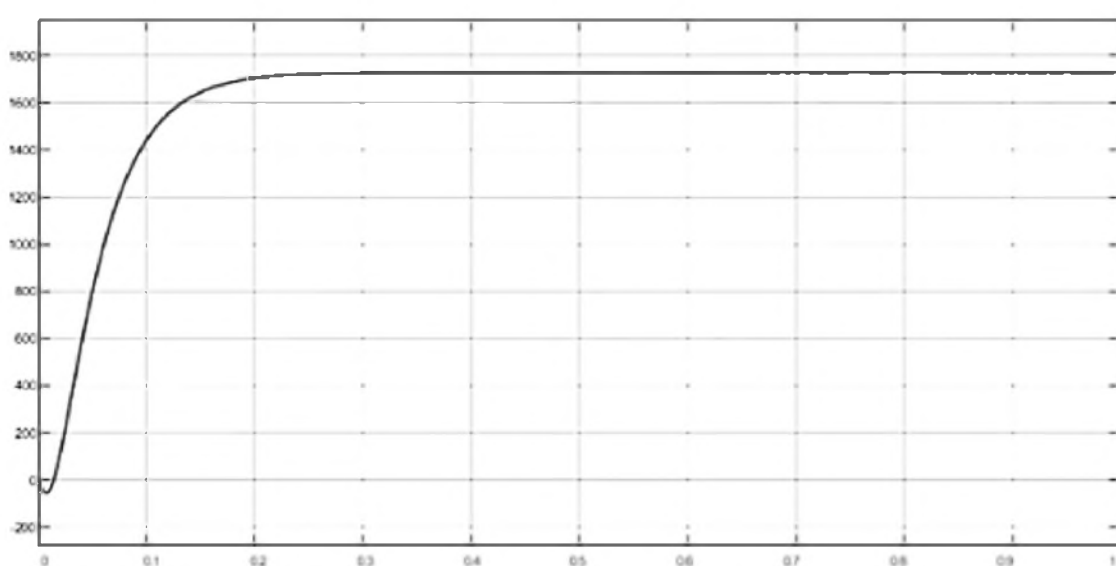


Рисунок 4.14 – Графік зміни струму якоря ДПС в усталеному режимі

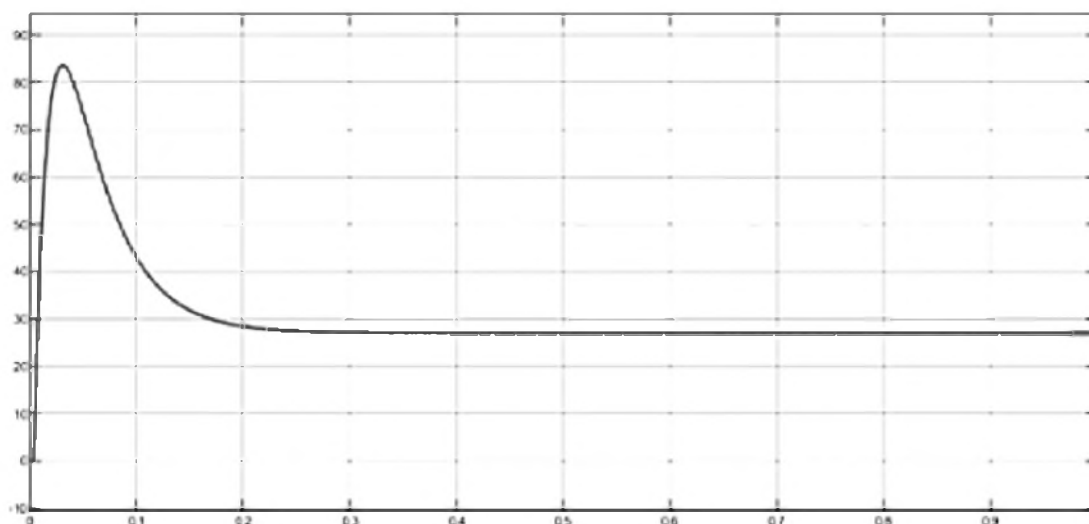


Рисунок 4.15 – Графік зміни крутного моменту в усталеному режимі

Аналіз графічних залежностей 4.10–4.15 показав можливість досягнення визначених параметрів роботи системи та згладжений режим пуску ДПС при застосування відповідних засобів регулювання з розрахованими параметрами керування.

Сучасний електропривод характеризується інтенсивним переходом від нерегульованого електроприводу до регульованого. Це також стає можливим завдяки стрімкому розвитку та широкому впровадженню статичних напівпровідникових перетворювальних пристроїв.

Одними з таких є транзистор IGBT, який дозволяє відтворити режим широтно-імпульсного перетворювання постійної напруги. Різна комбінація включення напівпровідникових приладів дає змогу створити імпульсні перетворювальні пристрої з високою частотою з різними законами комутації силового ланцюга та дозволять отримати високі енергетичні показники. Дані системи володіють високою точністю та широким діапазоном регулювання електроприводу, характеризується безперервністю регулювання та економічністю, має невисокі масо-габаритні параметри [24].

На рис. 4.16 представлено модель керування роботою ДПС з використанням IGBT-транзистора, у якій реалізується ідея широтно-імпульсного перетворювання.

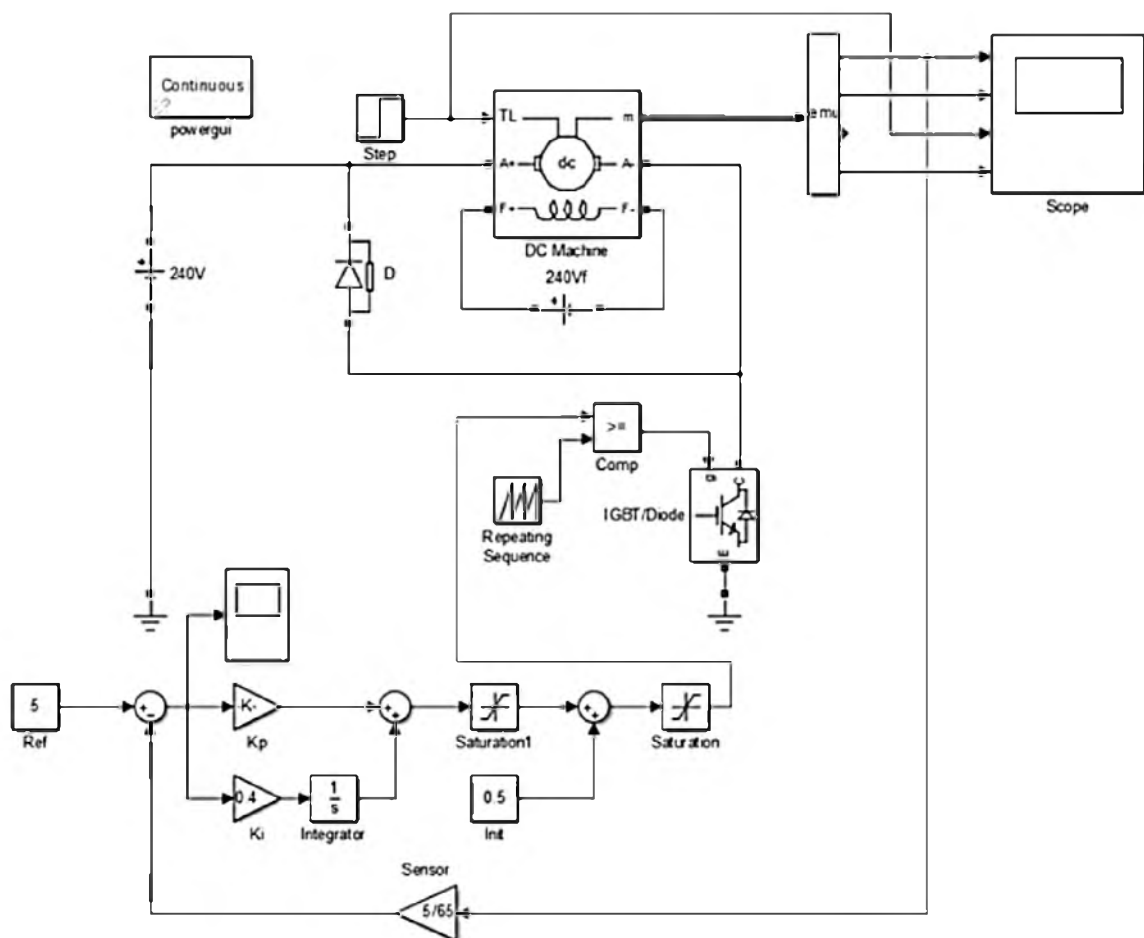


Рисунок 4.16 – Модель керування роботою ДПС з використанням IGBT-транзистора

У даній схемі можна виділити блоки живлення, широтно-імпульсного модулятора, підсилювача імпульсів, обчислювача та пристрою керування. Широтно-імпульсний модулятор формує модульовані за тривалістю, визначається рівнем вхідного сигналу, імпульси з постійною частотою. Підсилювач імпульсів здійснює широтно-імпульсне регулювання напруги на якорі ДПС. Оптимальна частота перемикання вибирається за умови забезпечення мінімуму додаткових сумарних втрат в ланцюгу якоря і втрат в комутуючих елементах [29].

На рис. 4.17–4.19 наведено графічні залежності, що ілюструють принцип регулювання у моделі рис. 4.16.

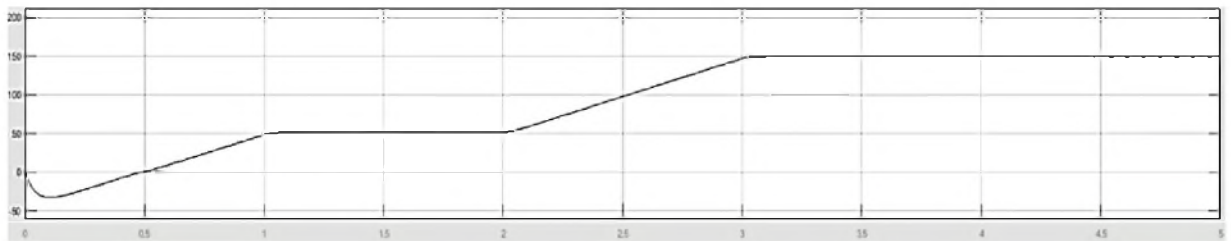


Рисунок 4.17 – Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулюванні за допомогою IGBT-транзистора

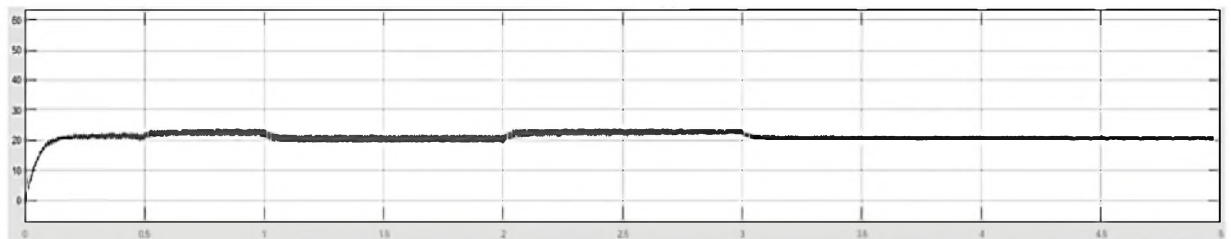


Рисунок 4.18 – Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулюванні за допомогою IGBT-транзистора

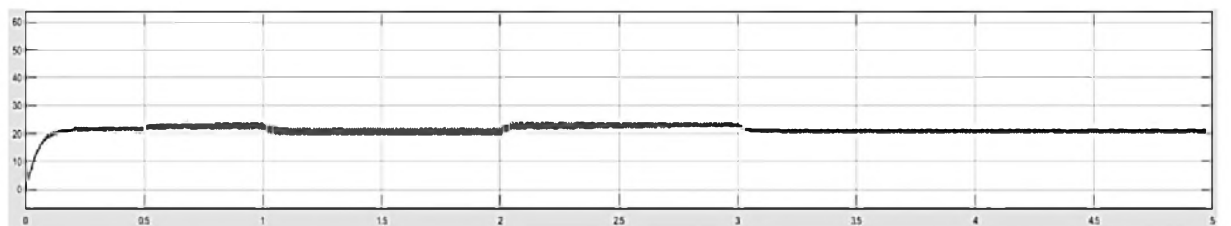


Рисунок 4.19 – Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулюванні за допомогою IGBT-транзистора

Для підвищення точності регулювання та можливості здійснення реверсу ДПС, замість одного IGBT-транзистора необхідно встановити чотири MOSFET-транзистора зібраних за схемою Н-моста (рис. 4.20).

MOSFET-транзистор – це польовий напівпровідниковий триод р-канального типу, який відкривається на затворі негативною по відношенню до джерела напругою; діод паразитного типу приєднується до частини стоку, а катод з'єднується з витком [24].

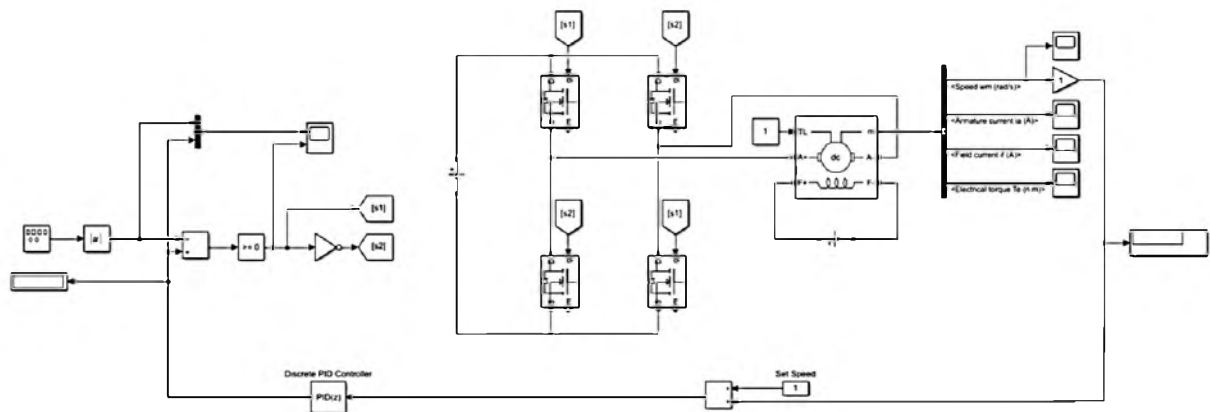


Рисунок 4.20 – Модель керування роботою ДПС з MOSFET-транзисторами

Управління цими транзисторами може бути спільним або виокремленим. Послідовне включення та або перемикання транзисторних ключів визначається законом комутації: симетричний, несиметричний або почерговий [29].

При симетричному способі управління в стані перемикання знаходяться усі чотири транзисторні ключі моста, а напруга на виході характеризується знакозмінні імпульсами, тривалість яких регулюється вхідним сигналом.

При несиметричному способі управління транзисторні ключі перемикаються по черзі, причому ключі однієї групи є постійно відкритими, а другої – постійно закритими. При цьому на виході формуються знакопостійні імпульси.

Результати моделювання представлено у вигляді графіків зміни якірного струму – рис. 4.21 і електромагнітного крутного моменту – рис. 4.22.

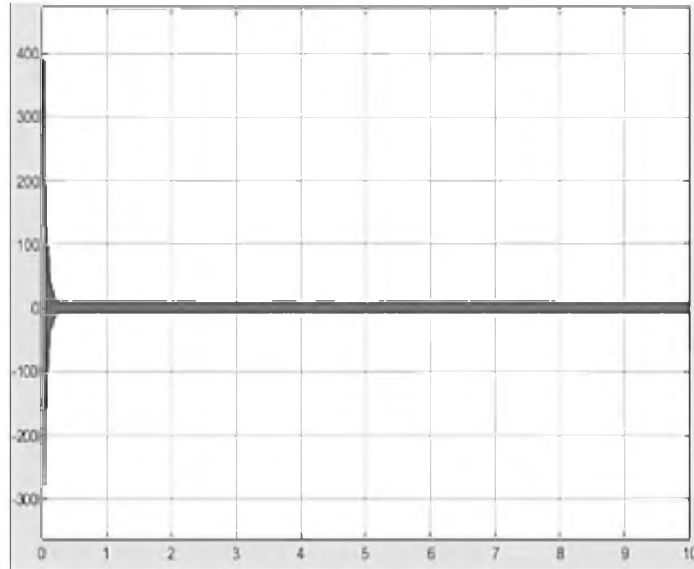


Рисунок 4.21 – Графік зміни якірного струму при застосуванні Н-моста на MOSFET-транзисторах

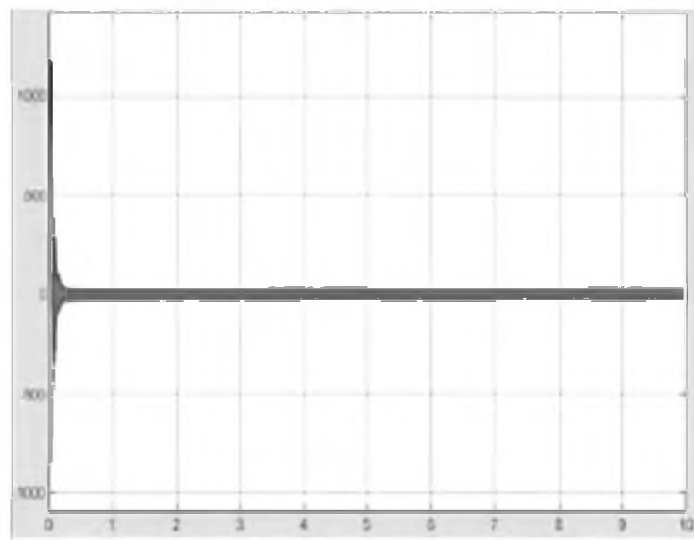


Рисунок 4.22 – Графік зміни електромагнітного моменту при застосуванні Н-моста на MOSFET-транзисторах

Аналіз графіків рис. 4.20, 4.21 показує, що при застосуванні Н-моста на MOSFET-транзисторах номінальні значення струму якоря та

електромагнітного моменту досягаються досить швидко – за час у 0,25 с, що гарним чином відображається на енергетичних та експлуатаційних показниках роботи електроприводу.

Те чи інше поєднання двигуна постійного струму з силовими перетворювачами залежить від типу джерела змінного струму або методу регулювання напруги: однофазні, трифазні чи з використанням ділників та інверторів.

Двигуни постійного струму мають досить універсальні характеристики керування у широкому діапазоні частот обертання та досить прості методи регулювання.

Тиристорні перетворювачі у приводах постійного струму часто вимагають складних систем керування – аналогових і цифрових зі зворотним зв'язком, фазової автосинхронізації та інших.

Графіки показали, що ідеальним регульованим джерелом живлення є такі, які забезпечує на виході заздалегідь задане значення напруги постійного струму.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження були проаналізовані та зіставлені фізична, структурна, математична та комп'ютерна модель роботи електроприводу з двигуном постійного струму.

Ця мета була реалізована шляхом здійснення імітаційного моделювання у програмному середовищі Matlab. Для вирішення широкого кола завдань було створено кілька комп'ютерних моделей за заданими параметрами з використанням стандартних блоків програмного комплексу SimPowerSystems оболонки Matlab. Отримані результати моделювання показали їх адекватність та застосованість у реальних додатках завдяки допустимим значенням похибки та реальності протікання досліджуваних процесів натурним зразкам.

Не дивлячись на те, що фізичне моделювання дозволяє отримати та проаналізувати більшу кількість фізичних явищ, воно є складнішим з точки зору реалізації та ціни. На допомогу цьому може прийти комп'ютерне моделювання.

Створена модель може точно визначити поведінку системи завдяки прогнозуванню змін електромеханічних параметрів, що відображають стан досліджуваної системи. Структура комп'ютерної моделі є більш простою за будовою у порівнянні з фізичною але вимагає проведення додаткових розрахунків і суворе знання початкових і крайових умов.

Неоцінимою перевагою комп'ютерних моделей, на відміну від фізичної моделі, є можливість визначення будь-якої змінної у будь-якій точці створеної моделі.

З огляду на здійснене моделювання можна сказати, що ті три типи напівпровідникових елементів, які були використані для моделювання доволі чітко з високим ступенем точності можуть бути рекомендовані для впровадження при необхідності здійснення керування двигунами

постійного струму. Силові перетворювачі дають змогу здійснювати регулювання частоти обертання: униз від номінальної – за допомогою регулювання напруги якоря, уверх від номінальної – за допомогою керування потоком магнітного поля. Дані методи дозволяють отримати досить широкий діапазон регулювання.

У загальному випадку, перед силовими елементами стоять захисні функції від:

- коротких замикань,
- критичного перевищення напруги,
- критичного падання напруги,
- перевищення теплових параметрів,
- різкої зміни вихідного параметра,
- короткочасних перевантажень,
- надмірного прискорення та гальмування,
- перевищення напруги у ланцюгах постійного струму,
- розвитку резонансних частот,
- перевитрати електричної енергії.

Усі зазначені функції дають змогу говорити про те, що використання силових перетворювачів на базі напівпровідникових елементів можуть значно підвищити надійність роботи електроприводів з двигунами постійного струму.

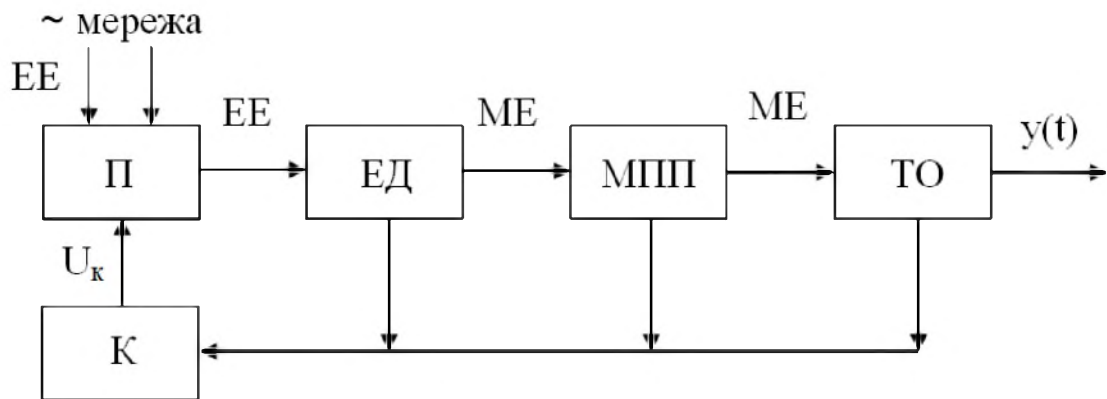
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Кочетков В.П. Основы электропривода: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.
3. Kenjo, T. (1991) Electric Motors and their Controls. New York: Oxford Science Publications. Кенджо.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cutt.ly/cTBf24t>
6. Jabłoński M.: Maszyny prądu stałego, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1973 , wersja elektroniczna Biblioteka Politechniki Łódzkiej.
7. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
8. Valentine, R. (1998) Motor Control Electronics Handbook. New York: McGraw Hill. Includes hardware and software elements of digital motor/drive control.
9. Абрамович М.И., Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И. Абрамович, В.М. Бабайлов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432с.
10. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 336 с.
11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://poznayka.org/s81041t1.html>
12. RCSen. Principles Of Electric Machine And Power Electronics. John Willy & Sons, 1997. RCSen.

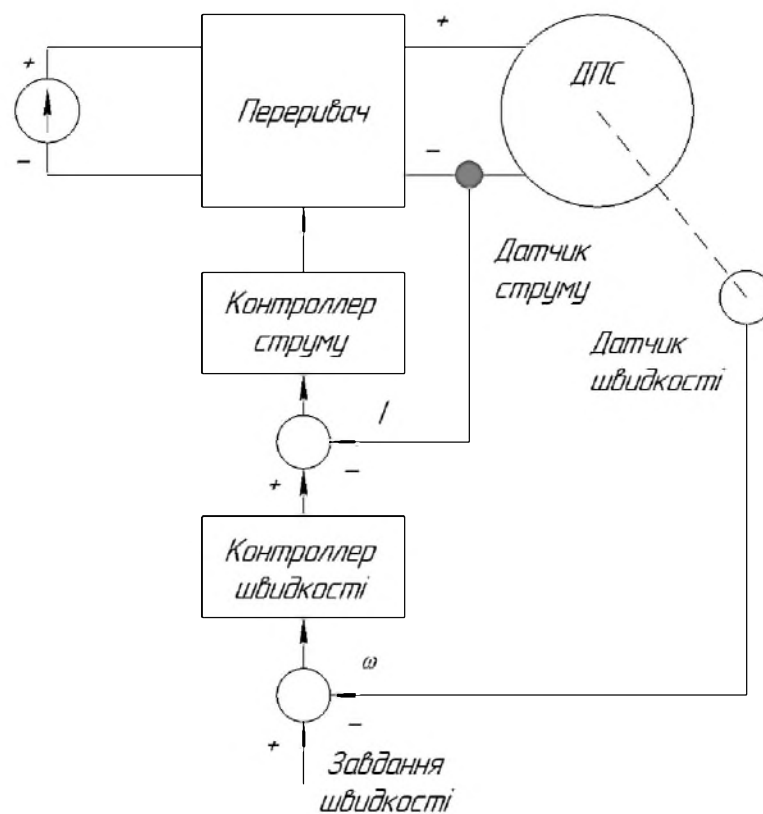
13. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока. М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
14. Тиристоры: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272с.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cutt.ly/sT8srgZ>
16. Вольдек А.И. Электрические машины. М.-Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pairoon.technology/p366697484-transformator-tmg-maslyanyj.html>
18. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недшивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400с.
19. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/t132/t132-25.html>
20. N. Mohan, M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design. Hoboken, NJ: Wiley, 1995.
21. 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.
22. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – № 1(31). – с. 50-52.
23. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий. – М.: ИРПО; Изд. Центр «Академия», 2000.
24. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.
25. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода. М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 60 с.

26. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Учебное пособие. - М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
27. Bide Motor Modelling And Control – A Matlab /Simulink Implementation. Work By Stefan Baldiwnson May. 2005.
28. Семёнов А.С. Программа MATLAB. - М.: Издательство «Спутники-», 2012. – 40 с.
29. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи. – Л.: Энергия, 1979. – 96 с.
30. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С. Г. Герман-Галкин, В. Д. Лебедев, Б. А. Марков, Н. И. Чичерин. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 244 с.
31. S. Ang and A. Oliva, Power-Switching Converters, 2d ed., Taylor & Francis, Boca Raton, Fla., 2005.
32. Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496с.
33. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



ЕЕ – електрична енергія, МЕ – механічна енергія, П – перетворювач,
 ЕД – електричний двигун, МПП – механічний передавальний пристрій,
 ТО – технологічний об'єкт, К – контроллер
 Функціональна схема сучасних електричних приводів



Структура найпоширенішого методу регулювання частоти обертання валу
 ДПС

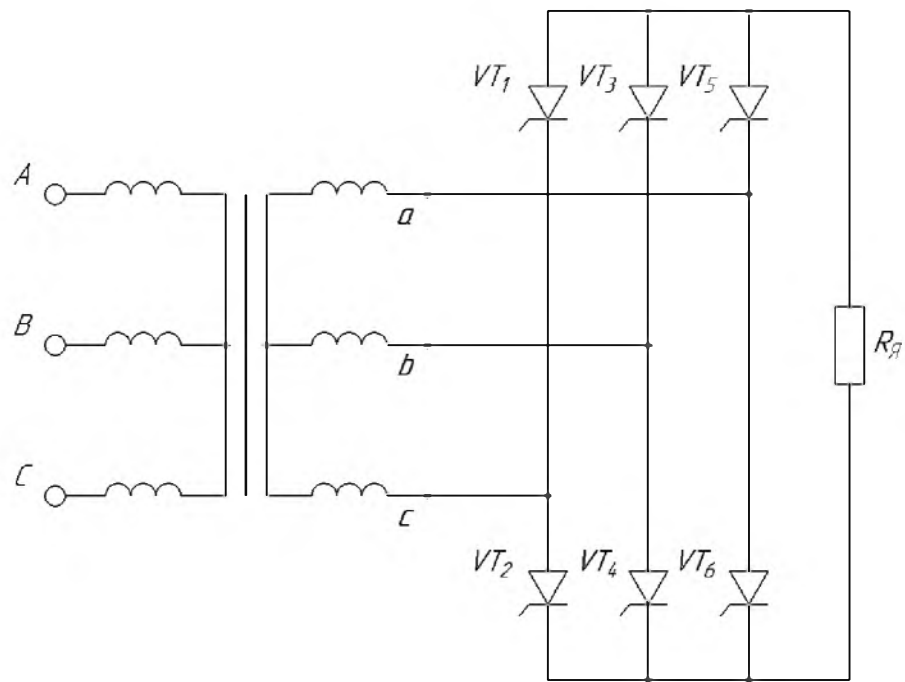
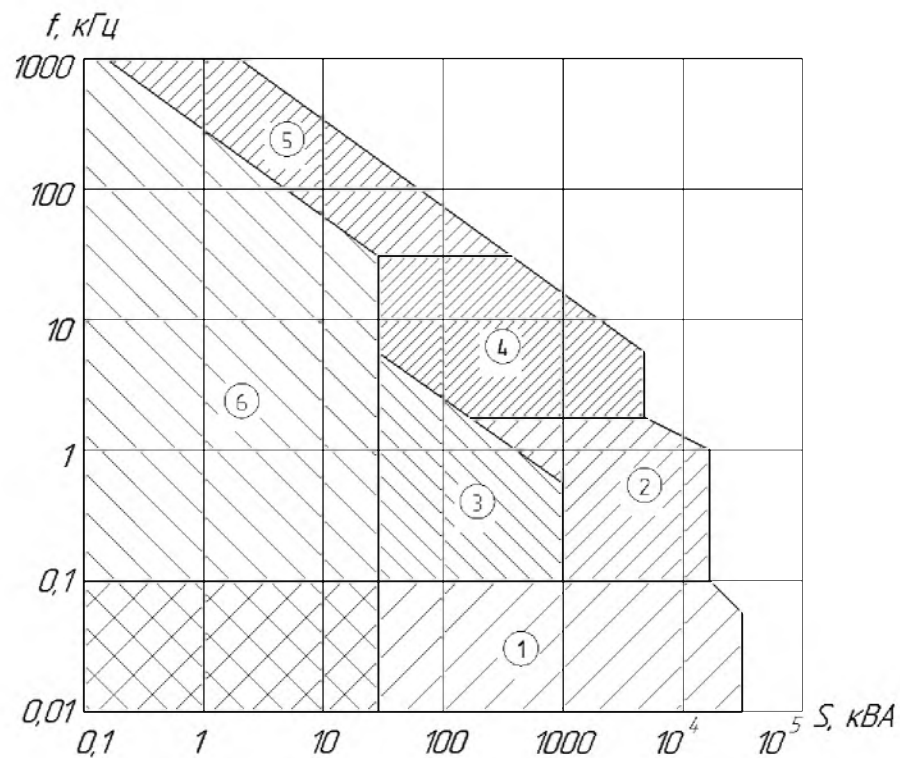
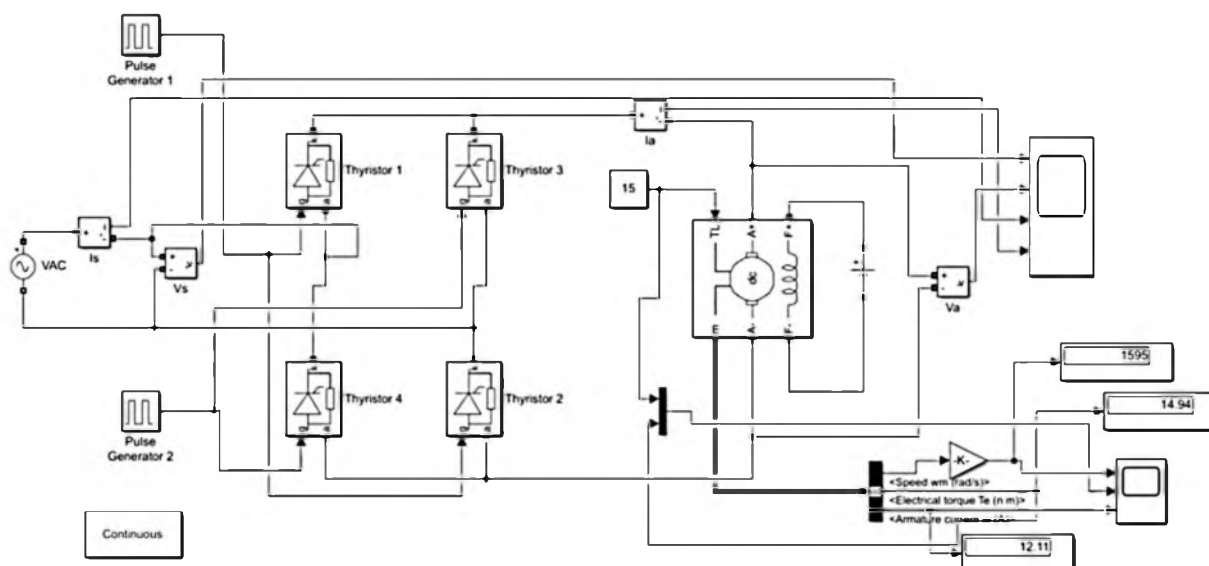


Схема трифазної мостової схеми випрямляча

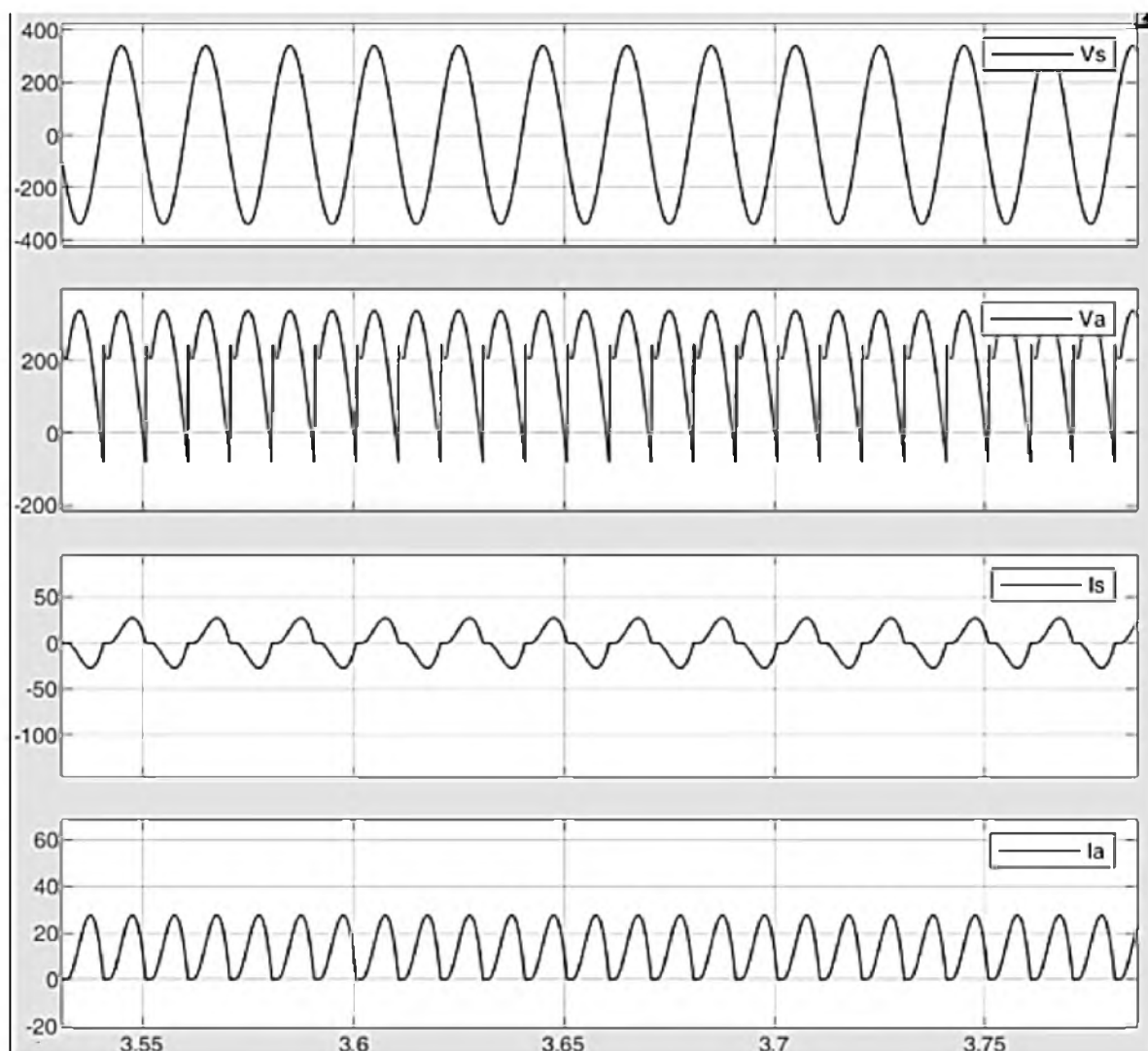


1 – «звичайний» тиристори, 2 – тиристори GTO (GCT), 3 – біполярні транзистори (BJT), 4 – біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT), 5 – інтелектуальні комбіновані технології (SIT), 6 – польові транзистори (MOSFET, DMOS)

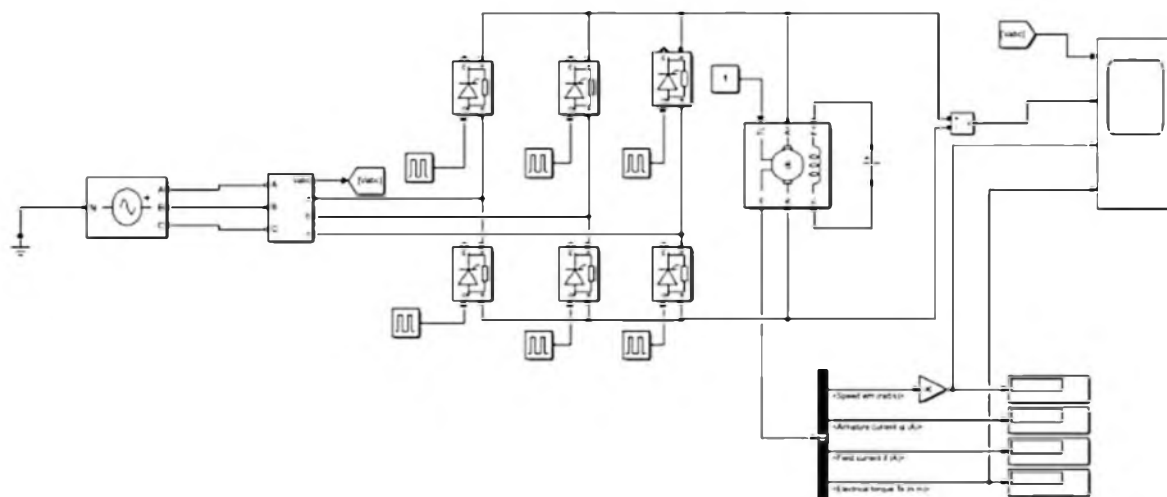
Область застосування силових перетворювачів



Модель керування ДПС незалежного збудження з використанням тиристорів



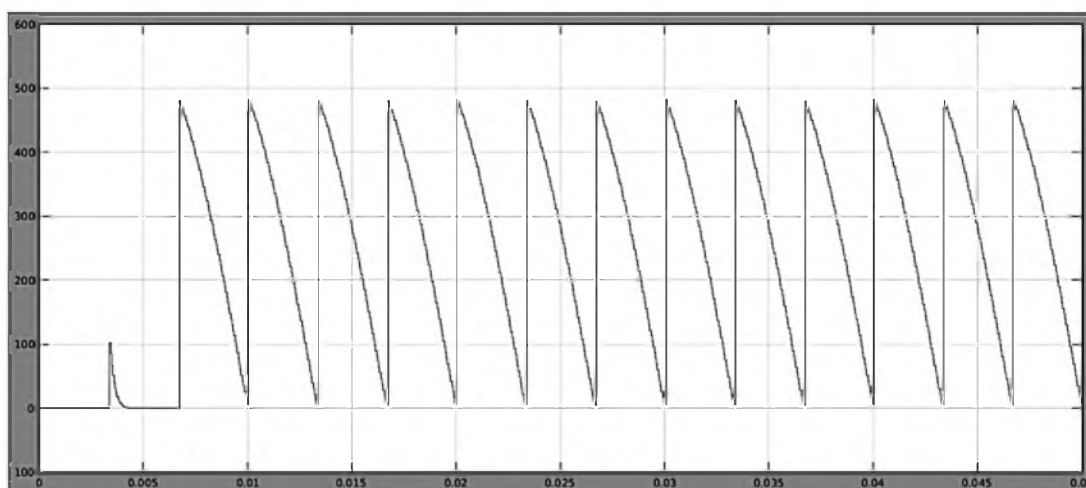
V_s – зміна напруги джерела живлення, V_a – зміна напруги на якорі,
 I_s – зміна струму джерела живлення, I_a – зміна струму у якорі,
 Результати моделювання керування ДПС



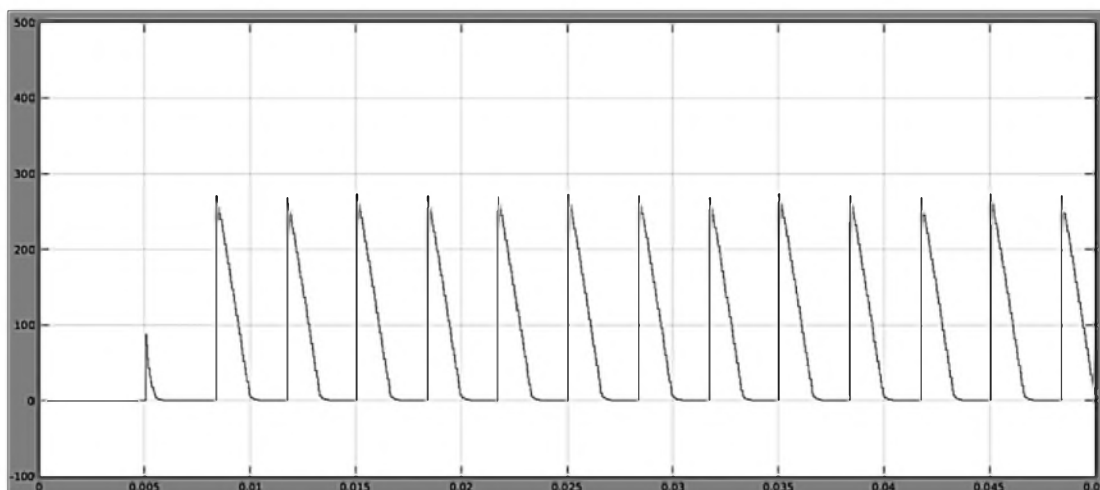
Кінцева модель керування ДПС



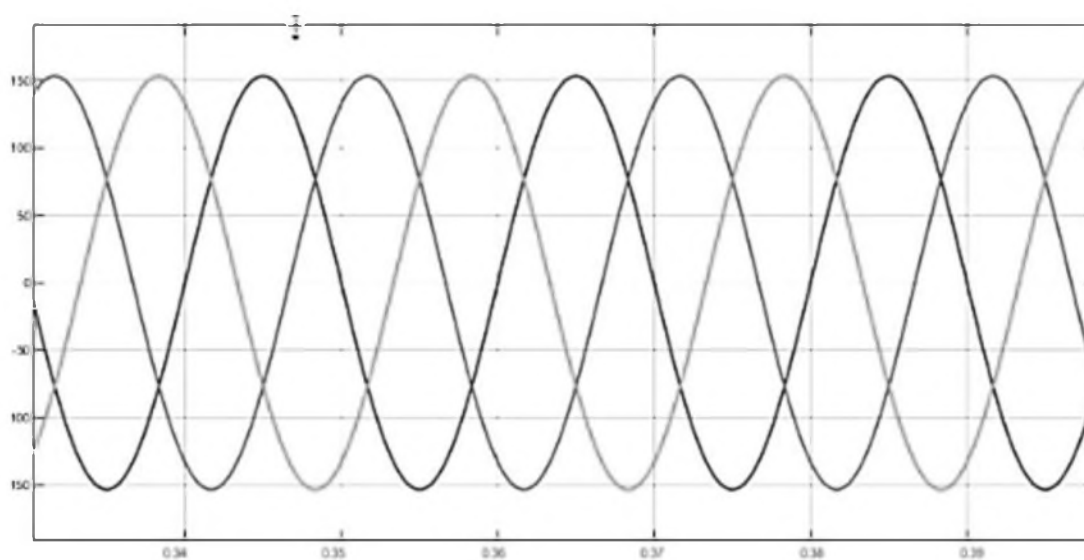
Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 30^\circ$



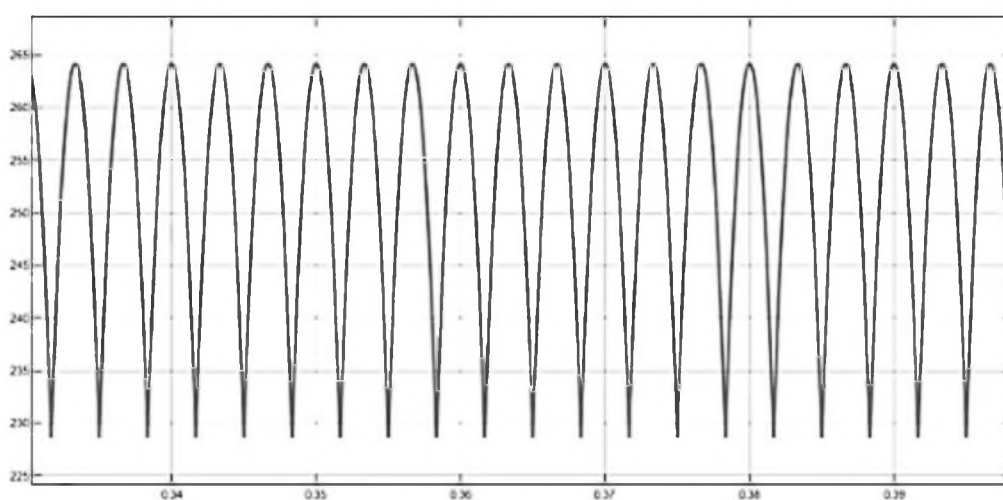
Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 60^\circ$



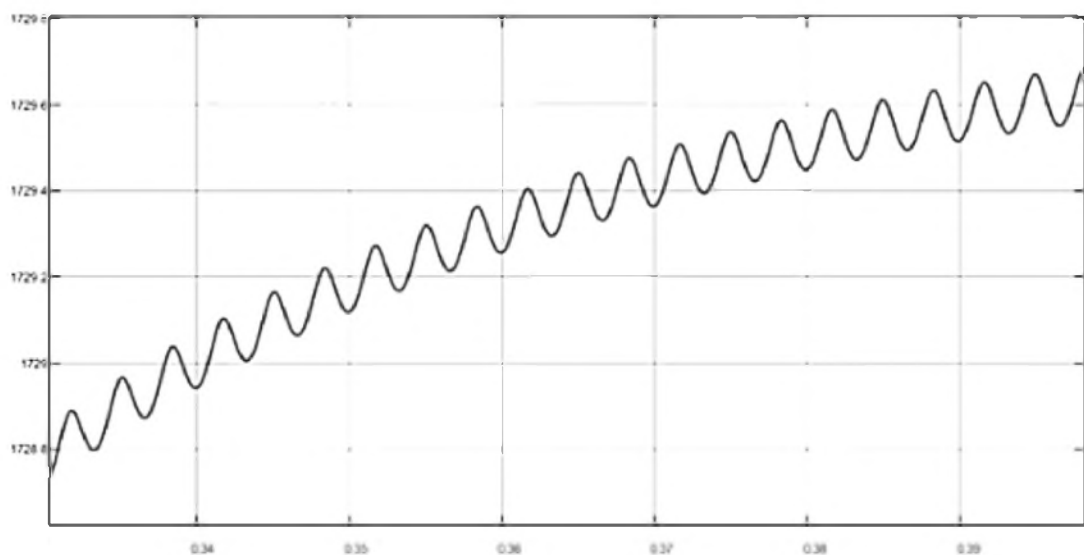
Форма керуючої напруги при куті відкриття тиристора $\alpha = 90^\circ$



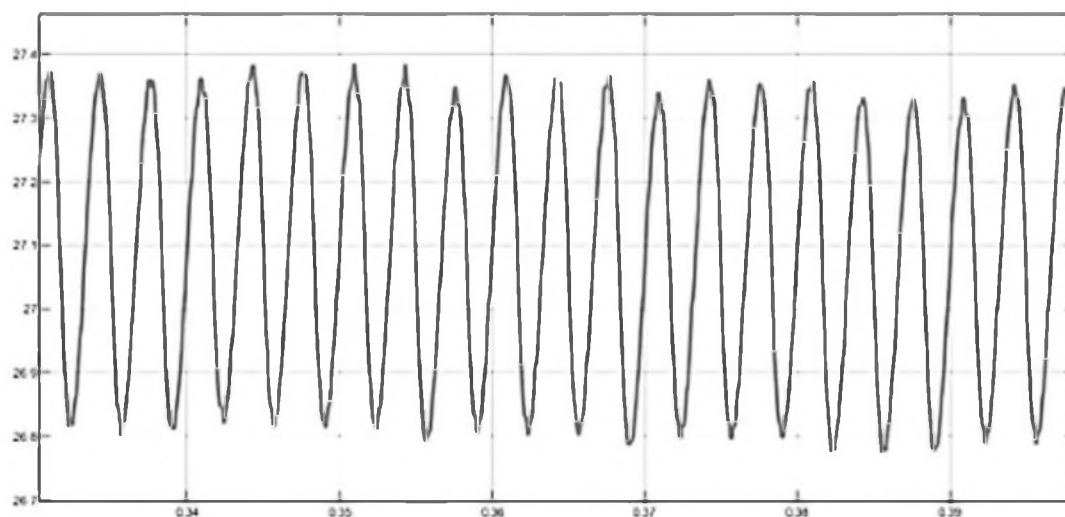
Графіки зміни напругу синусоїдного джерела живлення



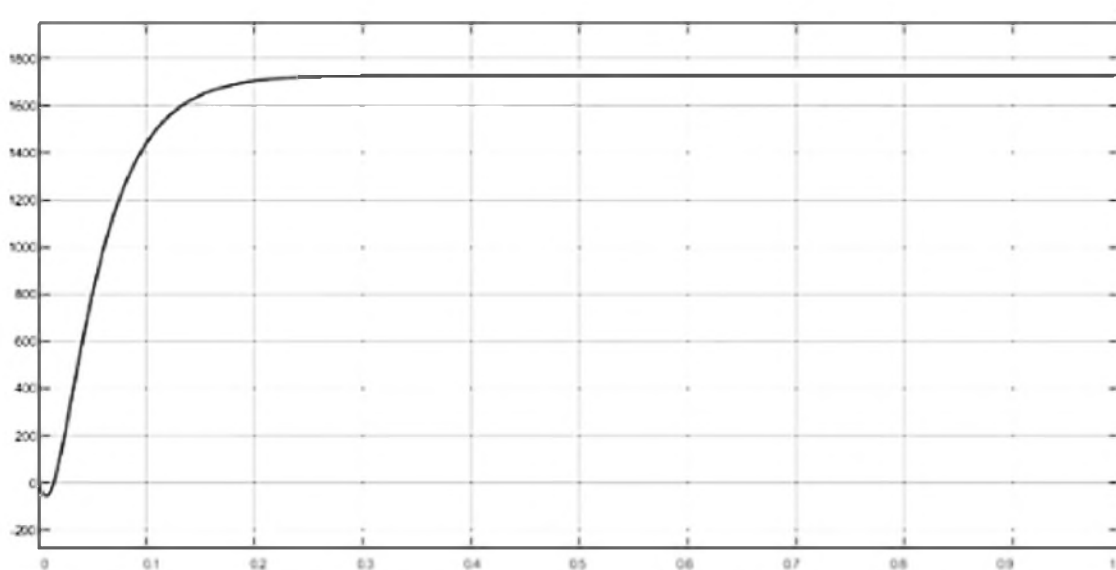
Графік зміни напруги на ДПС



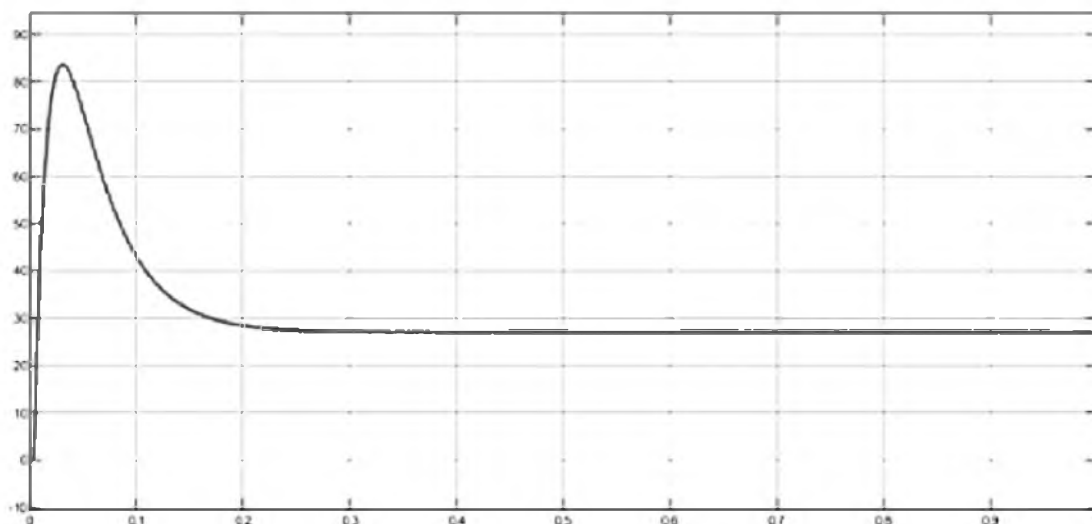
Графік зміни струму якоря ДПС у пусковий період



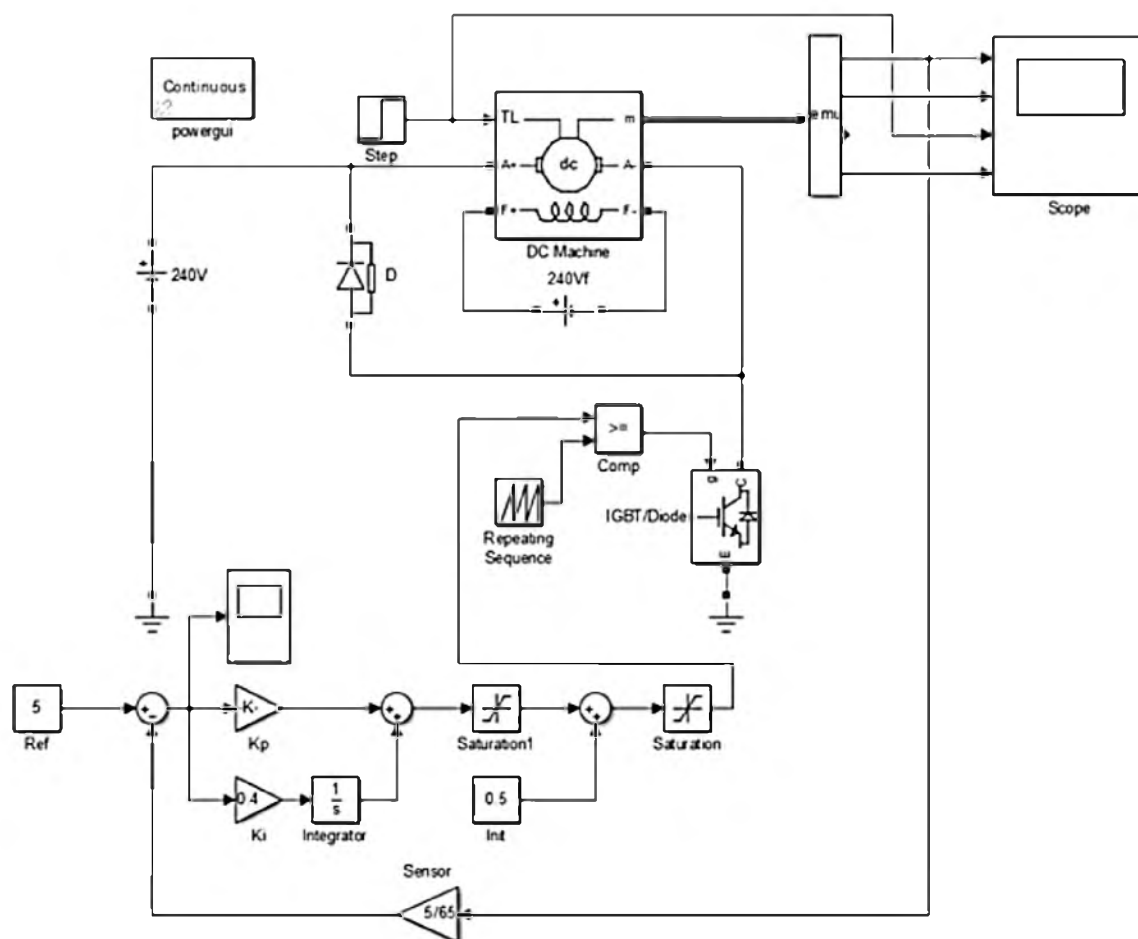
Графік зміни крутного моменту у пусковий період



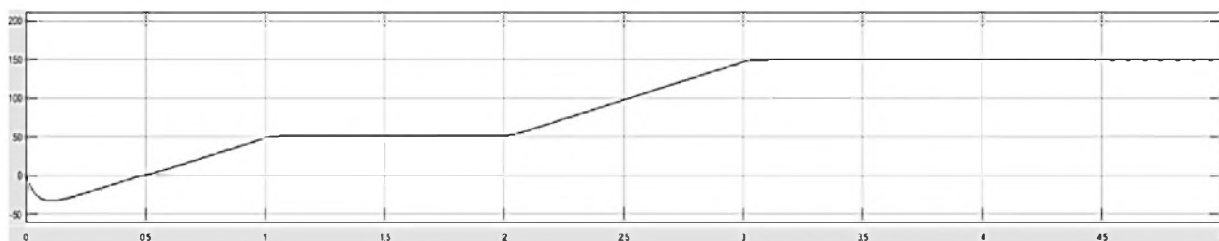
Графік зміни струму якоря ДПС в усталеному режимі



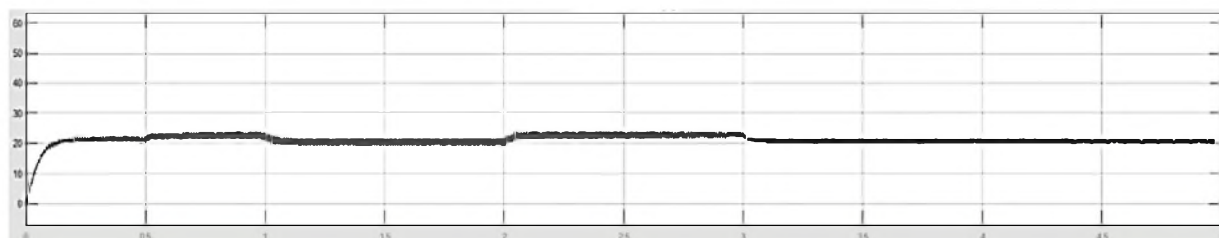
Графік зміни крутного моменту в усталеному режимі



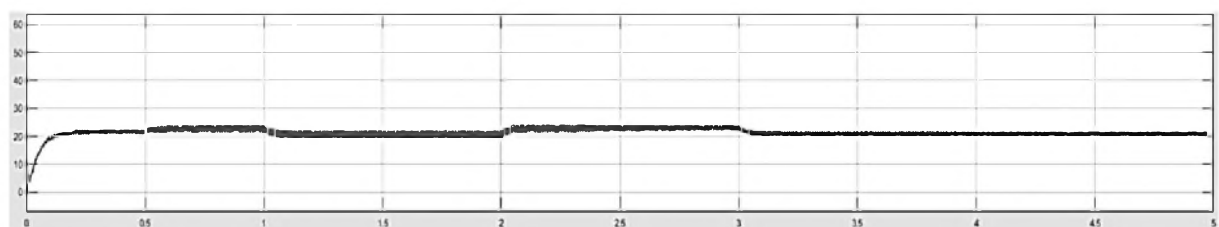
Модель керування роботою ДПС з використанням IGBT-транзистора



Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулювання за допомогою IGBT-транзистора



Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулювання за допомогою IGBT-транзистора



Графік зміни частоти обертання якоря ДПС при регулювання за допомогою IGBT-транзистора

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 установлюється 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, ПУЭ, 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, ПУЭ, 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 перемикань 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 установленої 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 ДО
ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____