

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-21м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Олександр ЯРОСЛАВ
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри КЕМСК

Василь КУТІН
(прізвище та ініціали)

«15» листопада 2022 р.

Опонент: д.т.н., доц кафед. ЕСЕСМ

Валентина О.В.
(прізвище та ініціали)

«19» серпня 2022 р.

Допущено до захисту каф КЕМСК

Зав. кафедри Микола МОЦНОРІЗ

«30» листопада 2022 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“06” вересня 2022 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ярослав Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування

керівник роботи Кутін Василь Михайлович, д.т.н., проф. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “14” вересня 2022 року № 203

2. Строк подання студентом роботи 30 2022

3. Вихідні дані до роботи: режим роботи повторно-короткочасний, АД з КЗ ротором типу А13-37-6, діаграма підйому, забезпечення режимів роботи установки: розгальмовування, розгін з частотною корекцією, робота на заданій швидкості в режимі руху, гальмування в рекуперативному режимі.

4. Зміст текстової частини: Вступ; 1 – Системи електропривода ІШТУ. перспективи використання режимів рекуперативного гальмування; 2 Вибір системи електропривода ІШТУ з реалізацією режимів рекуперативного гальмування; 3 Розробка математичної моделі електропривода шахтної підйомної машини в режимі рекуперативного гальмування; 4 Розробка системи керування електропривода ІШТУ в режимі рекуперативного гальмування живлення; 5 Комп'ютерне моделювання системи електропривода шахтної підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування; 6 Економічна частина; 11 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; 2 Системи електропривода шахтних підйомних установок; 3 Класифікація шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії; 4 Вибір системи електропривода ІШТУ з реалізацією режимів рекуперативного гальмування (2 плакати); 5 Математичні моделі ІШТУ з рекуперацією; 6 Математична моделі електромеханічної системи ІШТУ в режимі рекуперативного

гальмування; 7 Функціональна схема системи керування швидкістю ІППУ; 8 Моделювання динамічних режимів роботи (2 плакати); Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	д. т. н., проф. каф. КЕМСК Кутін В.М.	 06.09.2022	 15.11.2022
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 06.09.2022	 22.11.2022
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 06.09.2022	 29.11.2022

7. Дата видачі завдання 06.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	06.09.2022	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	15.11.2022	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	15.11.2022	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	22.11.2022	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	29.11.2022	
6	Попередній захист МКР	30.11.2022	
7	Нормоконтроль МКР	30.11.2022	
8	Рецензування МКР	19.12.2022	
9	Захист МКР	20.12.2022	

Студент

(підпис)

Дрослав О.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 62-83:622.673.1

Ярослав О.С. Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2022. 111 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 22 назв; рис.: 37; табл. 17.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. В основній частині роботи розглянуто можливі шляхи отримання енергії рекуперації в односудинних та двосудинних підйомних установках у режимі рекуперативного гальмування системи електроприводу, запропоновано математичну модель електромеханічної системи підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування, розроблено модернізовану систему управління швидкістю посудин ШПУ в режимі рекуперативного гальмування, проведено комп'ютерне моделювання існуючої системи електроприводу ШПУ на основі дволанкового перетворювача частоти з активним випрямлячем напруги зі стандартними налаштуваннями регуляторів системи керування, Розроблено імітаційну модель системи електроприводу ШПУ із врахуванням модернізованої структури системи управління, а також оптимізованої структури контурів регулювання в середовищі ППП Matlab Simulink.

Графічна частина складається з 11 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, перетворювач частоти, система керування, режими роботи, моделювання, механічні характеристики, математична модель.

ABSTRACT

Yaroslav O.S. Increasing the efficiency of the electric drive system of the mine lifting unit due to the use of regenerative braking modes. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2022. – 111 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 22 titles; fig.: 37; tabl. 17.

In the master's qualification work, solutions were proposed to increase the efficiency of the operation of the electric drive of the mine lifting unit due to the use of regenerative braking modes. In the main part of the work, the possible ways of obtaining recuperation energy in one-vessel and two-vessel lifting installations in the mode of regenerative braking of the electric drive system were considered, a mathematical model of the electromechanical system of the lifting installation in the mode of regenerative braking was proposed, a modernized system for controlling the speed of the SPU vessels in the mode of regenerative braking was developed, a computer was carried out computer simulation of the existing system of the electric drive of the ShPU based on a two-link frequency converter with an active voltage rectifier with standard settings of the control system regulators. A simulation model of the electric drive system of the ShPU was developed, taking into account the modernized structure of the control system, as well as the optimized structure of the control loops in the Matlab Simulink PPP environment.

The graphic part consists of 11 posters with the results of the work.

In the section on labor protection, the main provisions regarding the safe operation of the studied electrotechnical complex under the influence of harmful factors of the surrounding environment are defined.

Key words: electric drive, asynchronous motor, frequency converter, control system, operating modes, modeling, mechanical characteristics, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ	9
1.1 Загальна характеристика електропривода ШПУ	9
1.2 Класифікація шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії.....	10
1.3 Висновок	14
2 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ.....	15
2.1 Система електроприводу «матричний перетворювач частоти – асинхронний двигун».....	15
2.2 Система електроприводу «дволанковий перетворювач частоти – асинхронний двигун».....	18
2.3 Електропривод змінного струму на основі дволанкового перетворювача частоти із ланкою рекуперації електроенергії	25
2.4 Висновок	28
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ.....	29
3.1 Математична модель ланки рекуперації електроенергії	29
3.2 Математична модель механічної системи підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування	33
3.3 Математична моделі електромеханічної системи шахтної підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування	36
3.4 Висновок	38
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ	

ЖИВЛЕННЯ	39
4.1 Система керування електроприводу з прямим керуванням моментом	39
4.2 Розробка функціональної схеми модернізованої системи керування швидкістю посудин ШПУ	44
4.3 Методика синтезу регуляторів системи керування електроприводу ШПУ	47
4.4 Висновок	52
5 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ	53
5.1 Оцінка динамічних характеристик системи електропривода	53
5.2 Імітаційне моделювання системи електропривода ШПУ в ППП Matlab Simulink.....	55
5.3 Висновок	61
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	62
6.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту.....	62
6.2 Розрахунок експлуатаційних витрат	64
6.3 Визначення терміну окупності нового рішення	71
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	72
ВИСНОВКИ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	95
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина	100

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Транспортування корисних копалин та інших вантажів з шахти на поверхню та в зворотному напрямку є важливою частиною технологічних процесів будівництва шахт та рудників, видобутку корисних копалин. Шахтні підйомні установки (ШПУ) пов'язують підземні ділянки шахт з ділянками, які знаходяться на поверхні. Вони визначають продуктивність процесу виробництва, оскільки обсяг виробництва обмежується обсягом копалин, які можуть бути експортовані. При цьому технічний рівень підйомних машин, і, зокрема, систем управління приводними електричними двигунами, не завжди відповідають сучасним вимогам.

Станом на 2022 р. більшість ШПУ оснащені електроприводом постійного струму, побудований за допомогою "керованого перетворювача - двигуна DC" або "генератор двигуна", синхронним електричним приводом або асинхронним електроприводом з фазовим ротором та роторною станцією (АД ФР). Використання електроприводів на основі АД ФР з роторною станцією обумовлена збереженням потужності перевантаження двигуна в цій схемі на всьому діапазоні регулювання швидкості. У той же час такі електроприводи мають низьку ефективність, а контроль швидкості в них здійснюється шляхом ступеневої зміни опору роторною станцією, що призводить до виникнення динамічних навантажень у канатах, ривкам та ударам, а також призводить до втрати енергії.

Цих недоліків позбавлені системи електроприводу з частотним керуванням асинхронними двигунами. В даний час все більше і більше систем електроприводу побудовані відповідно до схеми "Перетворювач частоти – асинхронний двигун". У цьому випадку, як правило, двигуни не замінюються, а також додаються перетворювачі частоти, а системи керування модернізуються. Однак використання частотного керування для вже наявних асинхронних двигунів, розрахованих на постійну частоту напруги живлення 50 Гц, пов'язане з такими проблемами як погіршення

характеристик машини при зниженій частоті, перегрівання сталі, зменшення ефективності та коефіцієнта потужності машини. Крім того, для потужних асинхронних двигунів з напругою на статорі 6 кВ, часто неможливо вибрати частотний перетворювач, який має задовільні технічні та економічні показники.

Є два основних варіанти вирішення цієї проблеми. Перший полягає в тому, щоб замінити наявні двигуни на асинхронні короткозамкнуті машини, спеціально розроблені для систем частотного керування. Це рішення є дорогим через вартість самих спеціальних двигунів, перетворювача частот (або декілька, що працюють паралельно), а також через вартість демонтажу старого двигуна та встановлення нового. Більше того, це вимагає зупинки підйомної машини протягом періоду модернізації, що не завжди є прийнятним. Крім того, існуючі двигуни часто унікальні за своїми характеристиками, і не завжди можуть бути замінені серійними спеціальними машинами. До того ж, при використанні цього рішення виникає питання щодо утилізації демонтованого двигуна.

Другий варіант полягає у використанні вже існуючих двигунів з фазовим ротором з модернізацією системи управління електроприводом. Одним з варіантів здійснення такої модернізації є включення асинхронного двигуна з фазовим ротором по схемі машини подвійного живлення (МПЖ). При цьому, в існуючих публікаціях розгляду цього методу модернізації, вивчення властивостей МПЖ при регулюванні швидкості у великому діапазоні, розробці її математичної моделі для цього випадку та побудова системи керування таким електричним приводом не приділяється достатньо уваги.

Таким чином, розробка системи управління електроприводом змінного струму ШПУ є актуальним науковим завданням.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода шахтної підйомної установки.

Предметом дослідження є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електропривода шахтної підйомної установки за рахунок віддачі енергії гальмування в мережу живлення.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування електричного привода шахтної підйомної установки на основі перетворювача частоти та системи управління швидкістю судин, які забезпечують у сукупності підвищену віддачу енергії гальмування в мережу живлення.

Ідея роботи полягає у застосуванні дволанкового перетворювача частоти з удосконаленою структурою та системою керування електроприводом ШПУ, які забезпечують у сукупності підвищену віддачу енергії гальмування в мережу живлення.

В процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі **завдання**:

1. Провести критичний аналіз режимів роботи електроприводу ШПУ з точки зору можливості рекуперації електроенергії в мережу живлення.
2. Дослідити силовий канал системи електроприводу ШПУ у режимі рекуперативного гальмування, що включає дволанковий перетворювач частоти з удосконаленою структурою та асинхронний електродвигун.
3. Розробити математичну модель системи електроприводу ШПУ, яка враховує в режимі рекуперативного гальмування зміну величини кінцевого навантаження ШПУ, змінну жорсткість канатів та процеси, що протікають у перетворювачі частоти з удосконаленою структурою.
4. Створити модернізовану систему управління швидкістю судин ШПУ, що компенсує у режимі рекуперативного гальмування вплив кінцевого навантаження.
5. Здійснити оцінку ефективності розробленої системи управління швидкістю судин ШПУ у режимі рекуперативного гальмування на імітаційній моделі.

Методи дослідження засновані на використанні методів теорії теорії автоматичного управління, електричних машин, методів синтезу систем управління, теорії та методів математичного та імітаційного комп'ютерного

моделювання та інших системних методів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено алгоритм управління дволанковим перетворювачем частоти з удосконаленою структурою, яка відрізняється тим, що дозволяє збільшити рекуперований струм в мережу живлення при гальмуванні асинхронного електродвигуна.

2. Розроблено математичну модель та удосконалену систему управління електроприводом ШПУ, яка в режимі рекуперативного гальмування враховує зміну величини кінцевого навантаження ШПМ, зміну жорсткості канатів та процеси, що протікають у перетворювачі частоти.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

- результати отриманих досліджень можуть бути використані в задачах проектування та оптимізації режимів роботи шахтних підйомних установок;

- розрахункові результати досліджень можуть бути використанні під час вивчення фахових дисциплін таких освітніх програм як «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» та «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2022).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», Вінниця, 2023 – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 3 с.

1 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

1.1 Загальна характеристика електропривода ШПУ

Шахтні підйомні установки (ШПУ) відносяться до ряду потужного та відповідального устаткування. Електропривод таких установок повинен відповідати підвищеним вимогам стосовно динаміки роботи та надійності [1,2].

Структурна схема шахтної двохскіпової підйомної установки приведена на рисунку 1.1.

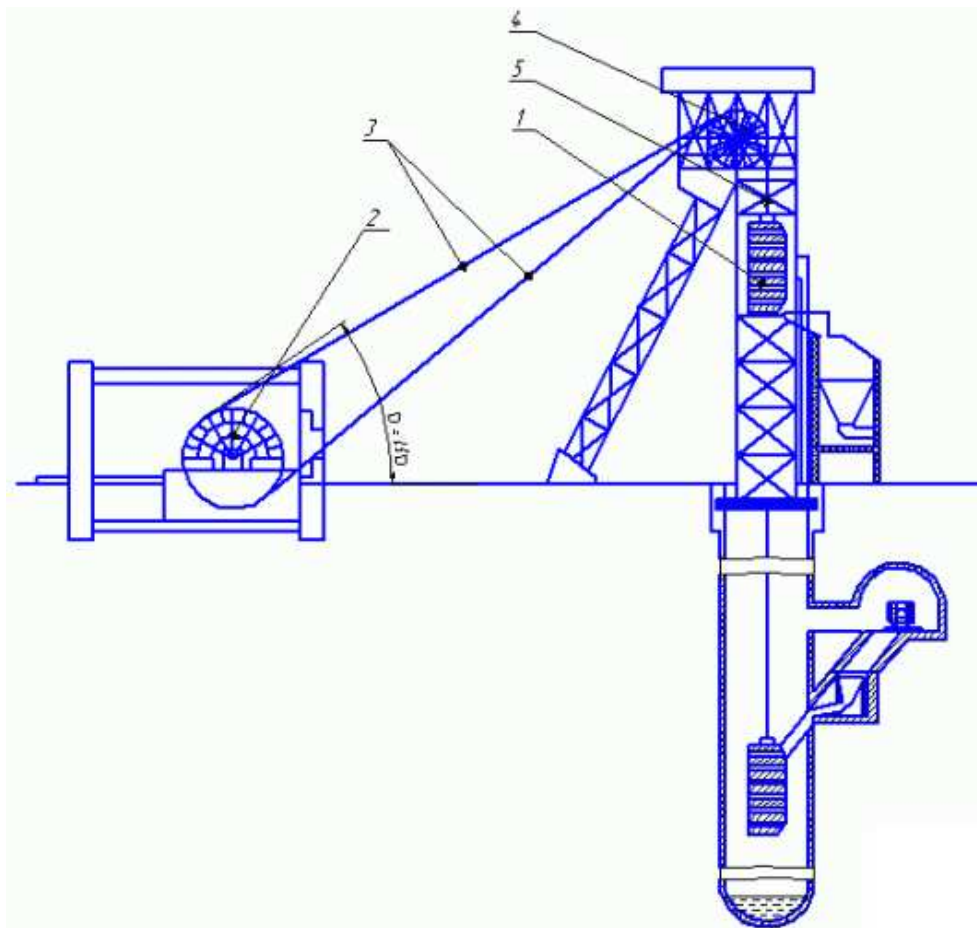


Рисунок 1.1 – Структурна схема ШПУ

На рисунку 1.1: 1 – підйомна посудина; 2 – підйомна машина; 3 – підйомні канати; 4 – направляючі шківів; 5 – металокаркас підйомної установки.

На підприємствах видобувної промисловості набирає темпу модернізація електроприводів шахтних підйомних установок, але цей процес поступовий. Внаслідок великої потужності приводних двигунів витрати на модернізацію устаткування завеликі. Сучасні системи електропривода підйомних установок мають високі енергетичні та динамічні характеристики, але більшість підприємств використовують існуюче устаткування.

Електропривод підйомної установки повинен забезпечувати виконання заданої діаграми швидкості, забезпечувати необхідну динаміку під час розгону та під час гальмування, а також при дотягуванні підйомної посудини до розвантаження. Внаслідок наявності в електромеханічній системі елементів з високою інерційністю, під час будь-якого перехідного процесу в цій системі виникають пружні коливання. Величина коливань пропорційна прикладеному зусиллю та швидкості цього впливу.

Вимоги до динаміки роботи підйомної установки визначаються тим, що ШПУ здійснюють ще й спуск/підйом робочого персоналу. При цьому, необхідно забезпечити виконання нормативів технології підйому. На сьогоднішній день більшість з працюючих систем електроприводів ШПУ вже нездатні забезпечити виконання вимог стосовно динаміки та регульовальних характеристик.

1.2 Класифікація шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії

У всіх розвинених країнах світу напрям енергозбереження є одним із пріоритетних напрямів технічної політики. Енергозбереження є найбільш дешевим і безпечним способом збільшення генеруючих потужностей, оскільки витрати на економію 1 кВт потужності обходяться в 4-5 разів дешевше, ніж вартість нововведеного 1 кВт потужності [3]. ШПУ є одним із основних споживачів електроенергії на шахті. Навіть невелике відносне зниження їхнього енергоспоживання дає значну економію енергоресурсів.

Наприклад, для шахтних підйомних установок (ШПУ) з приводом потужністю 2000 кВт зниження електроспоживання на 1% дає абсолютну річну економію близько 80-120 тис. кВт·год [3]. Енергозбереження в електроприводах ШПУ зводиться до визначення можливих шляхів економії електроенергії під час руху гілок вантажних посудин.

За кількістю підйомних посудин ШПУ поділяються на [1-2, 4]:

- однопосудинні без противаги, коли підйомна машина приводить у рух одну гілку канату з приєднаною до нього підйомною посудиною (рисунок 1.1. а);

- однопосудинні з противагою, коли до кінця однієї з двох гілок канатів замість посудини підвішується противага (рисунок 1.1. б);

- двопосудинні, в яких передбачається приведення в рух одночасно двох посудин однією підйомною машиною, завантажена посудина піднімається, а порожня в цей же час опускається (рисунок 1.1. в).

Результати проведеного аналізу показали, що існує кілька способів економії електроенергії в однопосудинних та двопосудинних ШПУ, а саме:

- економія електроенергії під час спуску важких вантажів на великі відстані (глибини);

- економія електроенергії в режимі уповільнення електроприводу ШПУ.

Енергозбереження в однопосудинних підйомних установках без противаги може бути досягнуто в процесі спуску кінцевого навантаження. Потенційна енергія спуску кінцевого навантаження залежатиме від двох основних величин: маси вантажу, що спускається і висоти спуску. Причому, чим більші згадані величини, тим вищим буде ефект від рекуперації.

В однопосудинній підйомній установці з противагою енергія рекуперації визначатиметься залежно від співвідношення маси кінцевого навантаження та противаги. Як відомо, маса противаги вантажолюдських установок дорівнює сумі маси судини і половини маси максимального розрахункового вантажу, що спускається в посудині. При транспортуванні

людей на підйомних вантажолюдських установках допускається в окремих випадках зменшення маси противаги до значення рівного масі посудини (кліті) з порожніми вагонетками. Отже, в даному типі підйомної установки, як і в установці без противаги, спуск кінцевого навантаження, що має велику масу, дозволить отримати рекуперацію енергії в мережу живлення.

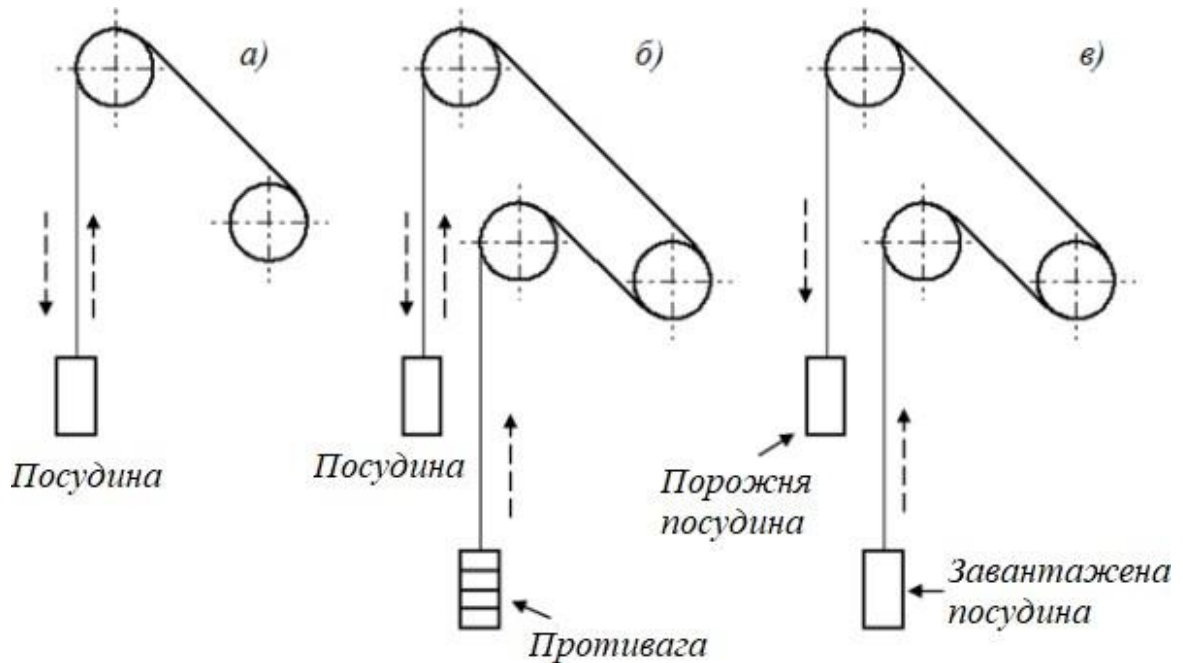


Рисунок 1.2 – Схеми підйомних установок:

а – однопосудинної;

б – однопосудинної з противагою;

в – двопосудинної;

В двопосудинних підйомних установках, що мають структури скіп-кліть та скіп-скіп, існують кілька способів одержання енергії рекуперації, а саме: при спуску кінцевого навантаження, коли маса одної з посудин перевищує іншу; при переході електроприводу ШПУ в режим уповільнення (ШПУ кількома горизонтами).

Таким чином, при дослідженні режимів роботи електроприводів ШПУ можна зробити висновок, що існують два способи отримання енергії рекуперації. Причому найбільший ефект від рекуперації досягається при спуску важких вантажів на великі висоти (висоти спуску).

Для оцінки економічного ефекту від рекуперованої в процесі гальмування електроенергії як приклад розглядаються однопосудинні підйомні установки вертикального та похилого стволів, однопосудинні підйомні установки з противагою, двопосудинні підйомні установки з кількома горизонтами, двопосудинні підйомні установки структур скіп-кліть та скіп-скіп.

На підставі положень динаміки руху тіл запишемо основне рівняння руху посудин підйомної установки при прикладанні до рушійної системи зовнішніх сил та сил інерції[5]:

$$M_{об} = M_{ст} + M_{д,,} \quad (1.1)$$

де $M_{об}$ – крутний момент відносно осі обертання органів навивки, що розвивається двигуном (Н·м); $M_{ст}, M_{д}$ – відповідно статичний та динамічний моменти підйомної установки щодо тієї ж осі (Н·м).

В основу розрахунків покладено основне динамічне рівняння для підйомних установок з постійним радіусом навивки каната без урахування врівноважуючого каната та динамічних складових:

$$F_{дв} = k \cdot Q_{п} - (H - 2h_x) \cdot p,, \quad (1.2)$$

де $F_{дв}$ – рушійне зусилля, що створюється двигуном на окружності органу навивки (Н); k – коефіцієнт опорів (при клітковому підйомі прийнятий 1); $Q_{п}$ – корисна вага вантажу, що піднімається (спускається) (кг); H – висота підйому (спуску) (м); h_x – відстань, пройдена підйомними посудинами від приймальних майданчиків (м); p – вага 1 м підйомного каната (кг/м).

Як відомо всілякий вантаж, що спускається на деяку висоту, має потенційну енергію. При цьому величина одержуваної енергії залежить від двох основних параметрів: маси вантажу, що спускається m_v і висоти h , з якої опускається вантаж. Вираз, що характеризує економію електроенергії при N -й кількості спусків на добу під час роботи підйомної установки, буде виглядати таким чином:

$$E_{\text{ЕЛ}} = P_{\text{РЕК}} \cdot N_{\text{СП}} \cdot C_{\text{ЕЛ}}, \quad (1.3)$$

де $P_{\text{РЕК}}$ – енергія рекуперації ШПУ за цикл спуску; $N_{\text{СП}}$ – кількість спусків на добу роботи, $C_{\text{ЕЛ}}$ – тариф на електроенергію (грн/кВт·год).

1.3 Висновок: Розглянуто можливі шляхи отримання енергії рекуперації в односудинних та двосудинних підйомних установках у режимі рекуперативного гальмування системи електроприводу. Приведено класифікацію шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії.

2 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

На сьогоднішній день у всьому світі, враховуючи урбанізацію та нестачу генеруючих потужностей, йде процес переходу від старих систем управління на більш досконалі. Оскільки основними споживачами електроенергії у промисловості є електроприводи, цей процес набуває актуальності. Регульовані ЕП змінного струму з урахуванням перетворювачів частоти відтіснили існуючі системи управління та майже переважають у всіх галузях.

Провідні виробники промислового обладнання широко застосовують такі системи у підйомно-транспортних механізмах [7]. Сьогодні найбільшою популярністю користуються продукція таких виробників перетворювачів, як ABB, Siemens, Schneider Electric, Control Techniques, Danfoss, Lenze та інших. До менш відомих європейських виробників перетворювачів частоти відносяться Vacon, Electronica Santerno, Emotron. Найбільш популярним американським виробником перетворювачів частоти є General Electric. Серед азіатських компаній найбільш відомі продукція таких виробників, як Mitsubishi Electric, Omron, Hitachi, Toshiba, Fuji Electric, корейські та тайванські LG Hyundai Electronics, Long Sheng Electronic, Delta Electronics. У 2012 році на частку ABB припадало 19% світового ринку частотно-регульованих електроприводів. Siemens та Schneider Electric займали відповідно 13.8 % та 8.5 % [7].

З появою двонаправлених високовольтних силових біполярних транзисторів з ізольованим затвором на ринку електроприводів змінного струму з'явилися модернізовані перетворювачі частоти, такі як матричні (МПЧ) та дволанкові з рекуперативним випрямлячем (ДПЧ з АВН). На сьогоднішній день ці перетворювачі частоти стали використовуватися в електроприводах підйомно-транспортних механізмів та в установках, що працюють тривалий час у режимі рекуперативного гальмування.

2.1 Система електроприводу «матричний перетворювач частоти – асинхронний двигун»

Що стосується підйомних установок, електропривод на основі МПЧ, який є представником безпосередніх перетворювачів частоти, більш прийнятний, враховуючи той факт, що перетворювач побудований на повністю керованих напівпровідникових елементах з двосторонньою провідністю струму. Однак через складність структури перетворювача, практичної реалізації, особливостей алгоритмів управління напівпровідниковими елементами та низки комутаційних проблем даний вид перетворювача частоти ще не знайшов свого широкого промислового застосування [8-9].

МПЧ це універсальний перетворювач електричної енергії, що дозволяє забезпечити будь-які перетворення між двома системами. Застосування в МПЧ повністю керованого напівпровідникового елемента IGBT – транзистора та методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) робить його, незважаючи на наявність у системі управління великого числа напівпровідникових елементів, цілком конкурентоспроможним з перетворювачем частоти з рекуперативним (активним) випрямлячем за наявності переваг. Це обумовлено відсутністю в силовій схемі МПЧ накопичувальних елементів великої ємності.

Принципова схема асинхронного електроприводу з МПЧ приведено на рисунку 2.1. Електропривод складається з мережевого фільтра (СФ), силових IGBT-транзисторів, вузла захисту від перенапруг, що складається із шести діодів із накопичувальним конденсатором та АД. Ємність Сф у складі СФ є обов'язковим елементом за умовами комутації струму мережі живлення. Частота модуляції приймається зазвичай 3 кГц.

Форми вихідних напруг систем дволанкового перетворювача частоти з інвертором напруги (ДПЧ) та МПЧ приведено на малюнку 2.2. а і б відповідно.

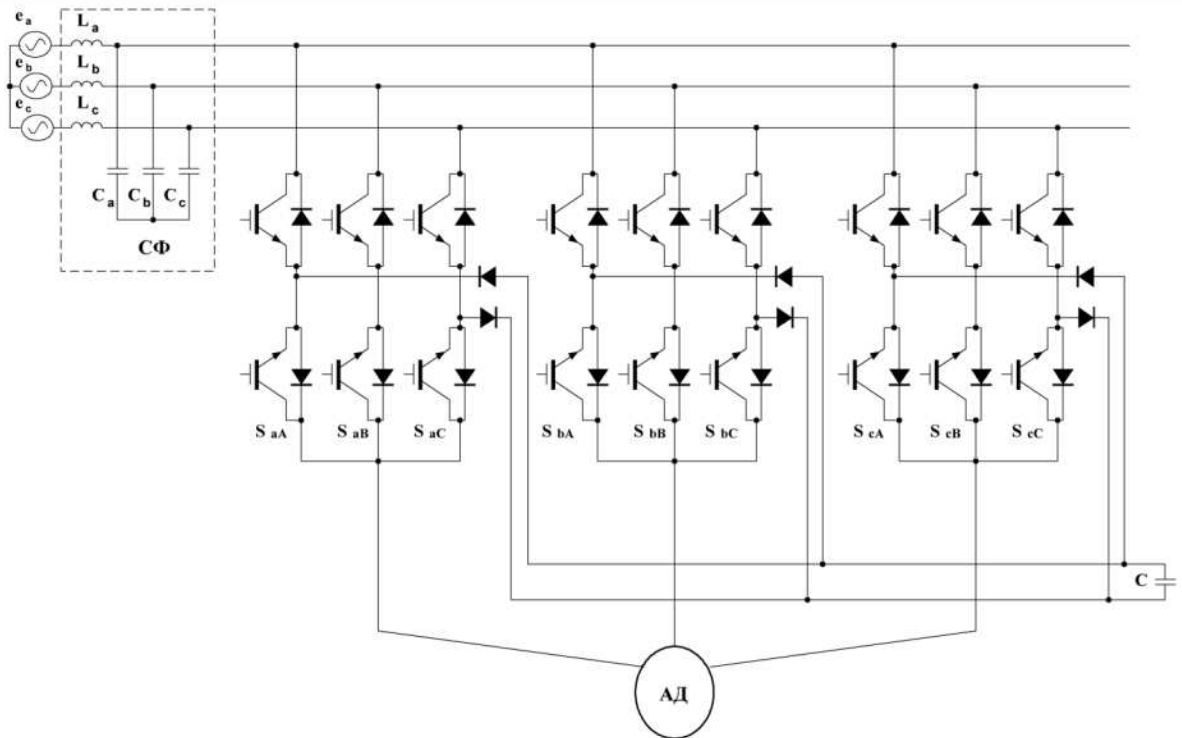


Рисунок 2.1 – Принципова схема асинхронного електроприводу з МПЧ

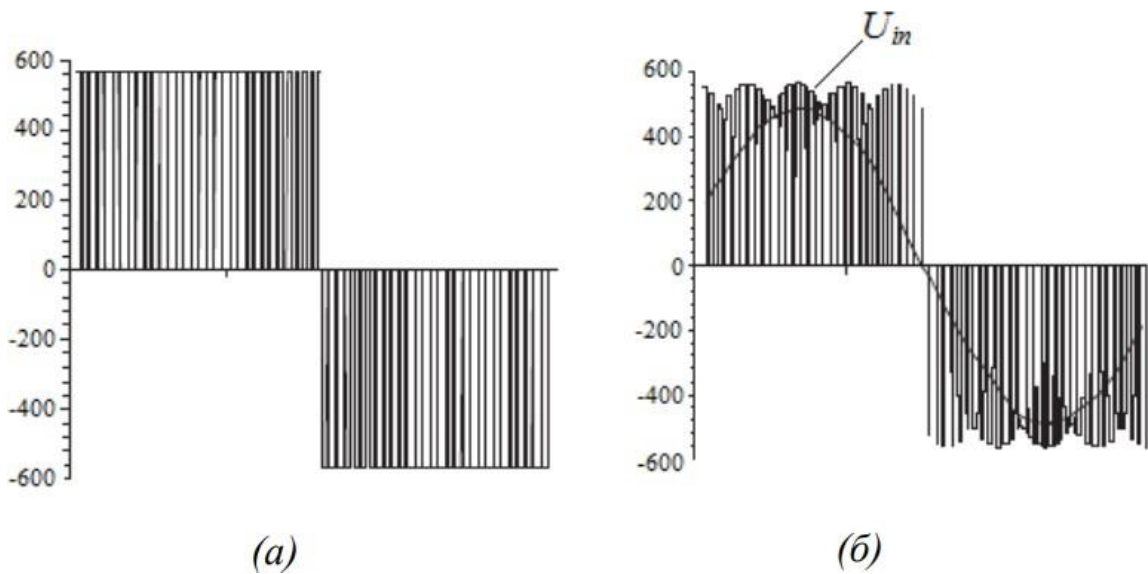


Рисунок 2.2 – Форма вихідної напруги системи ДПЧ(а), МПЧ(б)

Як видно напруга на затискачах статора АД є послідовністю високочастотних прямокутних імпульсів. Самі високочастотні імпульси мають змінну ширину, що змінюється по закону модулюючої функції [8].

Оскільки вхід і вихід МПЧ мають прямий зв'язок, його вихідна напруга в будь-який момент часу повинна знаходитися в межах огинаючої U_{in}

(рисунок 2.1 б). З цієї причини максимальне значення вихідної напруги, яке може формувати МПЧ без перемодуляції, не перевищує 87% амплітуди вхідного сигналу, незалежно від способу управління [13]. Останнім часом для МПЧ запропоновано нові схемні рішення та алгоритми управління [10,11]. Вони спрямовані на мінімізацію силових кіл та спрощення системи управління.

Переваги МПЧ у порівнянні з ДПЧ з АІН:

- синусоїдальна форма вхідного та вихідного струмів при мінімальному рівні гармонік вищих порядків;
- двонаправлена передача електричної енергії;
- контроль коефіцієнта потужності;
- простота та можливість захисту всіх ключів МПЧ за допомогою одного емнісного накопичувача [15].

Незважаючи на очевидні переваги, МПЧ має такі недоліки:

- необхідність встановлення 12 швидких високовольтних діодів, які в принципі можна замінити на 6 двонаправлених ключів [15] або використовувати 6 діодів;
- обмежений на рівні 87% коефіцієнт передачі синусоїдальної напруги;
- складність апаратної реалізації та алгоритму управління;
- чутливість до спотворень та перекосу фаз вхідної напруги;
- необхідність у відсутності переривання струму в індуктивних колах.

Всі ці недоліки призвели до обмеженого виробництва та впровадження подібних перетворювачів.

2.2 Система електропривода «дволанковий перетворювач частоти – асинхронний двигун»

В даний час електропривод змінного струму на основі ДПЧ зі ланкою постійного струму отримав широке застосування в підйомно-транспортних механізмах. Дані перетворювачі будуються на основі діодного

(некерованого), тиристорного (напівкерованого) та транзисторного (активного) випрямлячів.

Принципова схема системи електроприводу на основі ДПЧ з діодним випрямлячем приведена на рисунку 2.3. Електропривод складається з мережі живлення, мережевого R -фільтра (СФ), випрямляча на базі діодів (VD1-VD6), проміжного LC - фільтра ланки постійного струму, вузла динамічного гальмування, що включає резистор R_m і перемикач K_m , АІН на IGBT-транзисторах зі зворотними діодами, АД із короткозамкненим ротором.

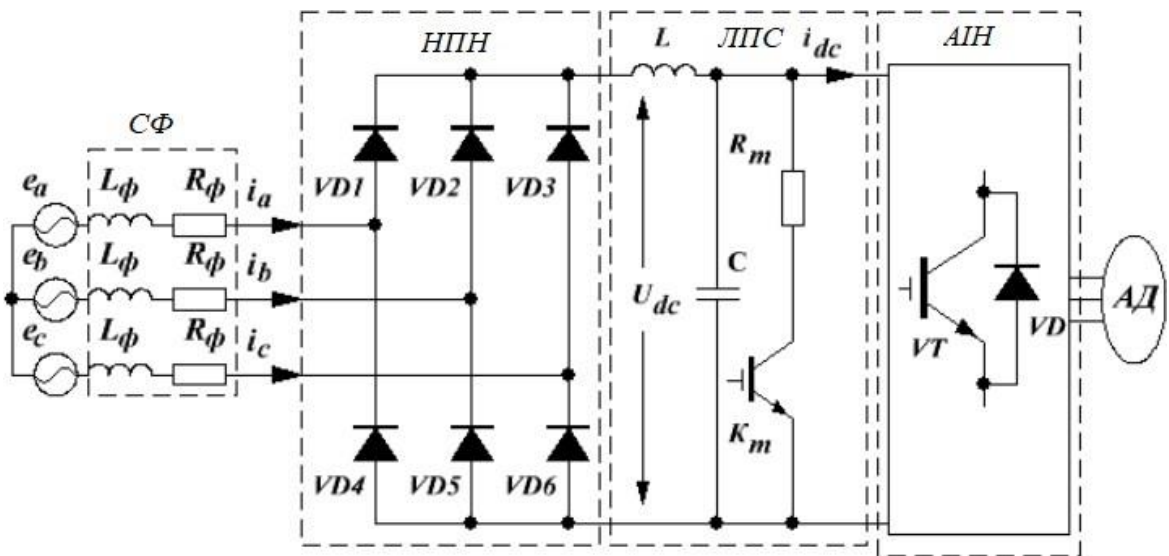


Рисунок 2.3 – Принципова схема системи ЕП на основі ДПЧ з діодним випрямлячем

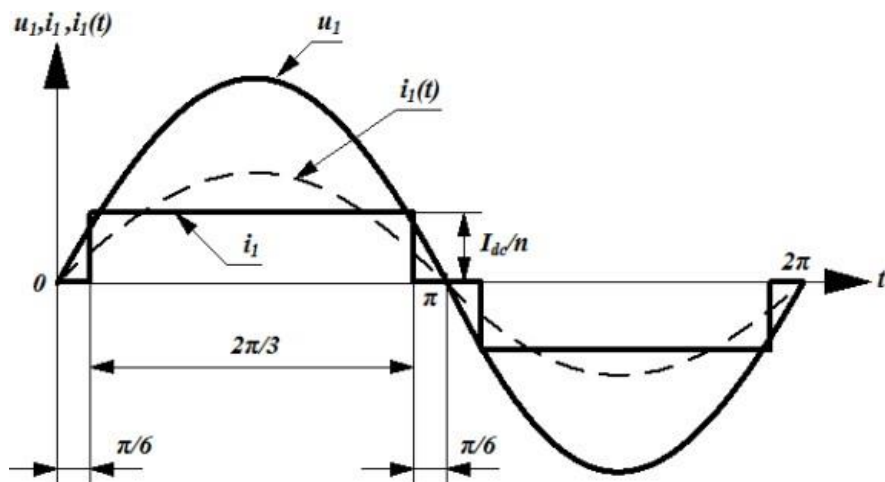


Рисунок 2.4 – Криві струму та напруги системи електроприводу на основі ДПЧ з діодним випрямлячем

На рисунку 2.4 наведені криві струму та напруги мережі живлення системи ЕП на основі ДПЧ з діодним випрямлячем. Принципова схема системи електропривода на основі ДПЧ з тиристорним випрямлячем представлена на рисунку 2.5. Електропривод складається з мережевого фільтра (СФ), напівкерованого випрямляча на тиристорах (НВН), ланки постійного струму (ЗПС) з LC - фільтром, інвертора напруги і АД.

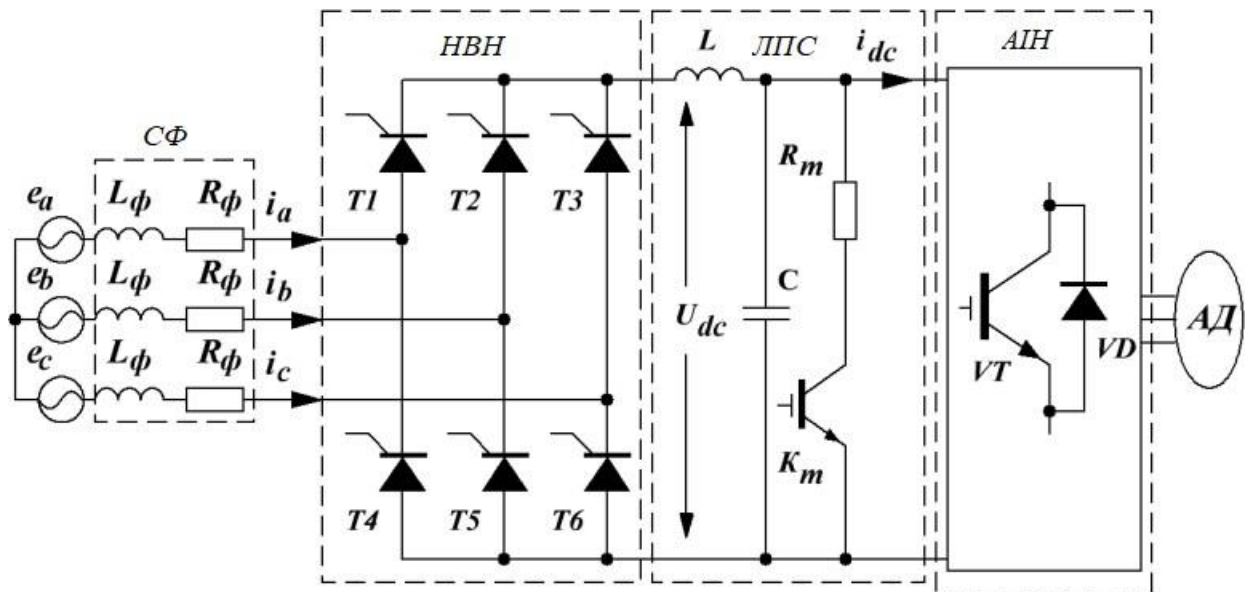


Рисунок 2.5 – Принципова схема системи електропривода на основі ДПЧ з тиристорним випрямлячем

На рисунку 2.6 наведені криві струму та напруги на стороні мережі живлення системи електроприводу на основі ДПЧ з тиристорним випрямлячем. Аналіз кривих струму та напруги проведено без урахування впливу на них процесів комутації напівпровідникових елементів випрямляча.

Управління частотою $\omega_{0ел}$ на виході системи електроприводу здійснюється впливом на систему управління інвертора, де сигнал завдання частоти перетворюється на тривалість сигналів управління, що подаються на IGBT-транзистори АІН. У ланці постійного струму передбачене коло гальмування, що складається з резистора гальмівного R_t і переривника K_t . При переході системи електроприводу в режим рекуперативного гальмування, при перевищенні напруги ланки постійного струму лінійних

напруг мережі живлення, переривник K_T відкривається, і енергія гальмування розсіюється в гальмівному резисторі R_T у вигляді тепла.

Значення амплітуди напруги змінного струму на виході АН визначається значенням випрямленої напруги U_{dc} у ланці постійного струму, що формує напругу на затискачах статора АД.

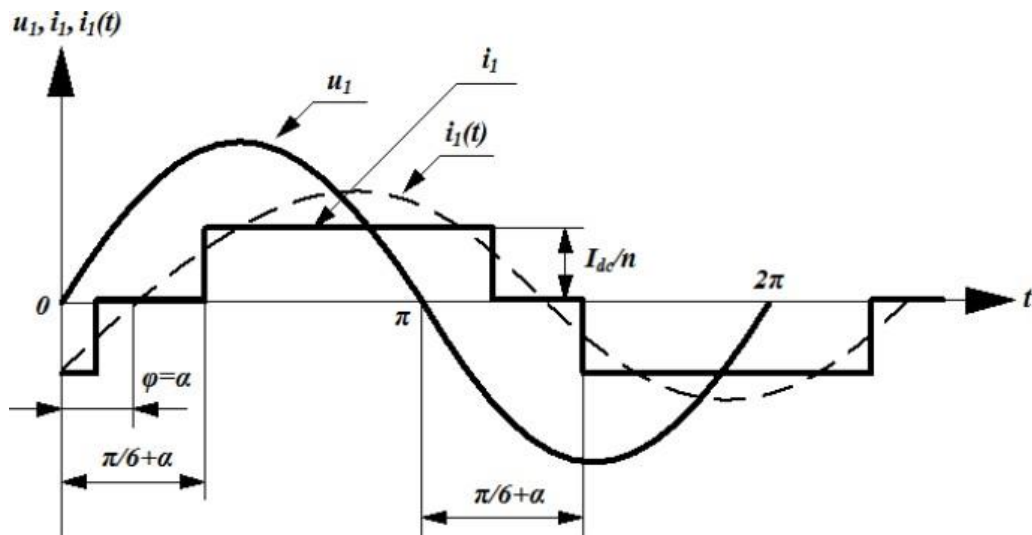


Рисунок 2.6 – Криві струму та напруги системи електроприводу на основі ДПЧ з тиристорним випрямлячем

В електроприводі ШПУ, побудованого на основі ДПЧ, існують три способи утилізації енергії гальмування при спуску кінцевого навантаження:

- перший спосіб полягає у розсіюванні енергії гальмування на спеціальних гальмівних резисторах (динамічне гальмування) ланки постійного струму.
- другий спосіб полягає у поверненні енергії гальмування в мережу живлення за допомогою додаткових блоків рекуперації.
- третій спосіб полягає у використанні АВН (AFE – Active front end) замість діодних і тиристорних випрямлячів.

Вибираючи раціональний спосіб гальмування, необхідно враховувати як технологічні вимоги, що пред'являються до електроприводу з боку механізму, так і економічну доцільність схемного рішення. Традиційні ДПЧ з АН допускають передачу енергії тільки в одному напрямку: від мережі

живлення до АТ. Системи електроприводу на основі ДПЧ з тиристорним і діодним випрямлячами не ефективні, оскільки активна потужність при гальмуванні передається у ланку постійного струму, а потім в мережу живлення за допомогою додаткових комплектів керування інверторів. При рекуперації активної потужності в мережу живлення відбувається споживання реактивної енергії керування інвертором, яка залежить від кута управління тиристорів, що знижує коефіцієнт потужності електроприводу при гальмуванні. Для таких електроприводів найбільше доцільно застосування динамічного гальмування АД.

Електропривод на основі ДПЧ з АВН (рисунок 2.7) є комплексним енергозберігаючим рекуперативним перетворювачем. Випрямляч ДПЧ утворений із біполярних транзисторів із зворотними діодами. Така конструкція дозволяє забезпечити двосторонній обмін енергією між мережею живлення та електродвигуном.

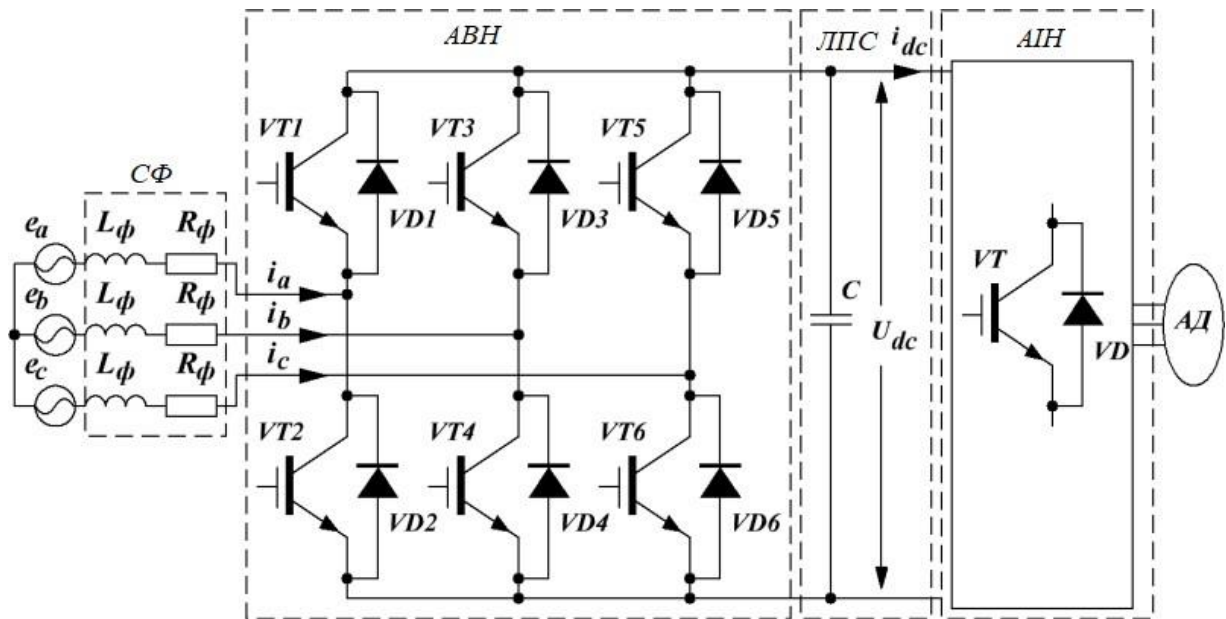


Рисунок 2.7 – Принципова схема системи електропривода на основі ДПЧ з АВН

Ланка постійного струму з накопичувальним конденсатором є невід'ємною частиною системи електроприводу з ДПЧ, який забезпечує:

- циркуляцію потоку енергії в системі керування електроприводом;

- згладжування пульсації вихідної напруги випрямляча;
- захист ДПЧ від перенапруги, внаслідок комутації IGBT-транзисторів АВН та АІН;

До переваг системи ЕП на основі ДПЧ з АВН можна віднести:

- синусоїдальний характер мережного струму та вихідної напруги на затискачах АД;
- низький спектр вищих гармонік струму та напруги;
- двосторонній обмін енергії між мережею живлення і АД;
- високі енергетичні показники ($\cos\phi=1$);
- можливість керування кількома механізмами однією шиною ланки постійного струму.

До недоліків можна віднести:

- наявність електролітичних конденсаторів у ланці постійного струму;
- подвійне перетворення енергії і можливість повернення енергії гальмування в мережу живлення тільки за умови, коли напруга ланки постійного струму перевищує лінійні напруги мережі живлення [12].

Функціональна схема системи електроприводу на основі ДПЧ з АВН у режимі рекуперативного гальмування наведена на рисунку 2.8.

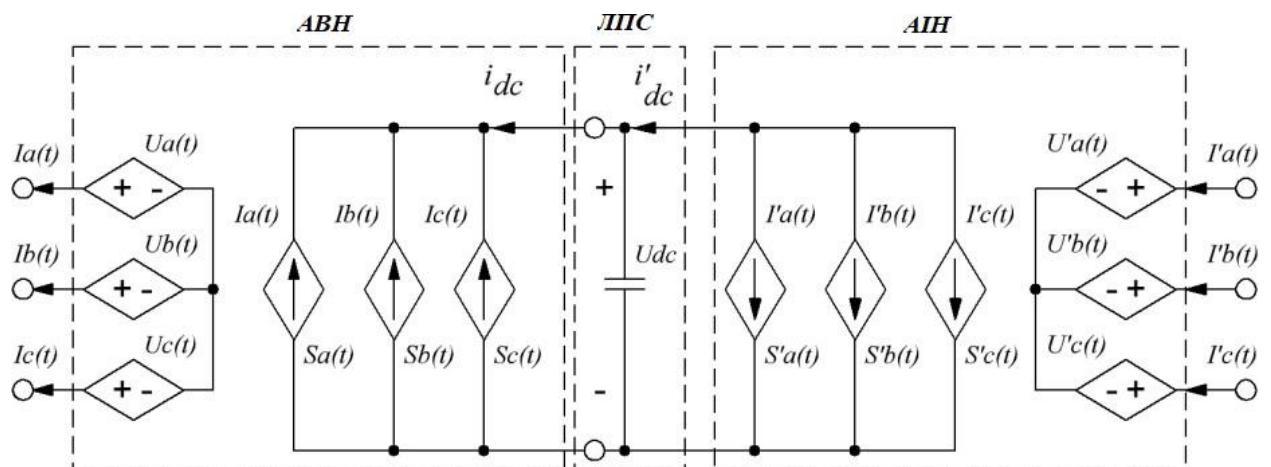
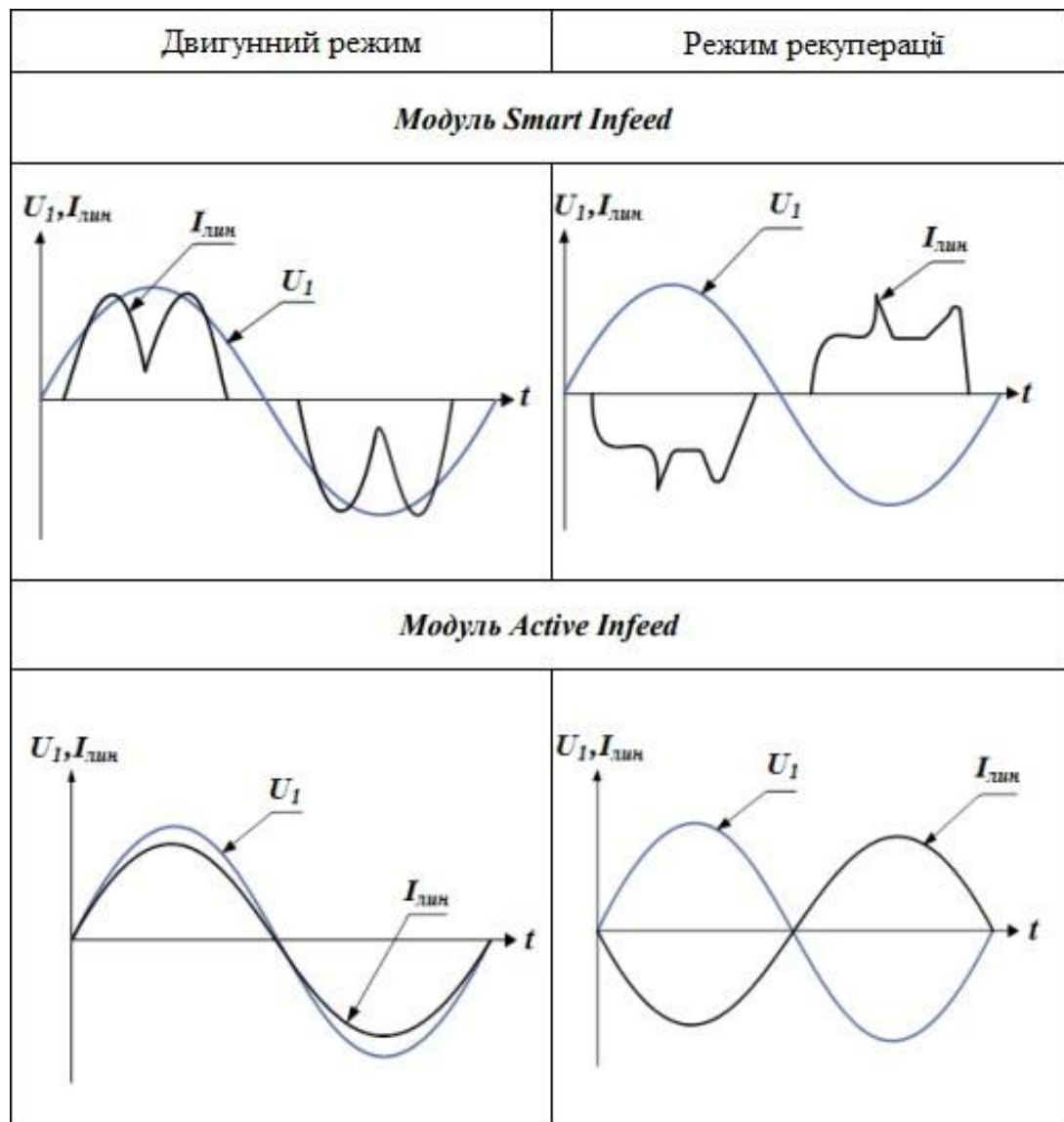


Рисунок 2.8 – Функціональна схема системи ЕП на основі ДПЧ з АВН у режимі рекуперативного гальмування

Фірма Siemens випускає енергозберігаючі модулі рекуперації електроенергії видів Smart Infeed та Active Infeed. Безпосередні порівняння тимчасових характеристик лінійних струмів та напруг модулів рекуперації Smart Infeed та Active Infeed під час роботи на номінальну потужність у режимах двигуна та в рекуперативному гальмуванні представлені у таблиці 1.3. Модуль рекуперації Smart Infeed складається з трифазного мостового АВН, транзистори якого працюють синхронізовано з мережею живлення. Модуль рекуперації серії Active є керованим випрямлячем напруги, що функціонує в режимі широтно імпульсної модуляції.

Таблиця 2.1 – Порівняння лінійних струмів модулів рекуперації



2.3 Електропривод змінного струму на основі дволанкового перетворювача частоти із ланкою рекуперації електроенергії

Даний електропривод має хороші динамічні та енергетичні характеристики. Однак через мостову структуру АВН в режимі рекуперативного гальмування діапазон рекуперації енергії залежить від різниці напруг ланки постійного струму та лінійної напруги мережі живлення [12].

Електрична схема удосконаленого варіанту асинхронного електроприводу на основі ДПЧ із ланкою рекуперації електроенергії (ЛРЕ) приведена на рисунку 2.9. Система автоматичного управління (САУ) ЛРЕ є двоконтурною, із зовнішнім контуром регулювання напруги ланки постійного струму та внутрішнім контуром регулювання мережевого струму перетворювача частоти.

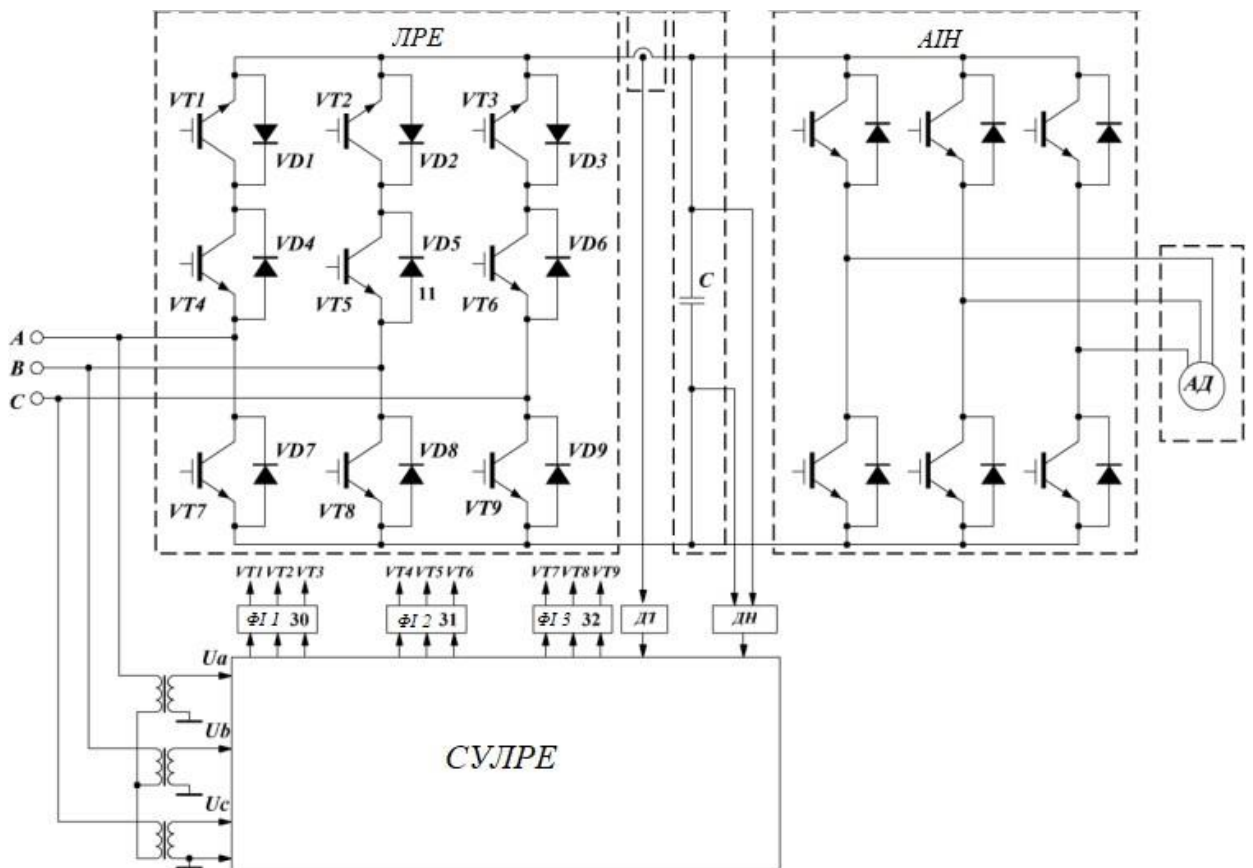


Рисунок 2.9 – Електропривод змінного струму на основі дволанкового перетворювача частоти із ланкою рекуперації електроенергії

На рисунку 2.9 прийнято такі позначення: ЛРЕ – ланка рекуперації електроенергії; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; ФІ – формувач імпульсів управління; ДП – датчик струму; ДН – датчик напруги; СУЛРЕ – система управління ланкою рекуперації електроенергії; U_a , U_b , U_c – фазні напруги, що підводяться з вторинних обмоток узгоджувачого трансформатора до СУЛРЕ.

Особливість системи управління електроприводу полягає в регулюванні фази вхідного струму, як в режимі руху, так і в режимі рекуперативного гальмування. Реалізація зазначеної структури та САУ дозволяє отримати бажане значення коефіцієнта потужності в системі електроприводу. Отже, асинхронний електропривод на основі ДПЧ із ЛРЕ може розглядатися як енергозберігаючий пристрій.

В режимі генераторного гальмування рекуперація електричної енергії в мережу живлення здійснюється за рахунок зовнішнього моменту (потенційна енергія спуску кінцевого навантаження в ШПМ), який спрямований у бік обертання ротора АД. Асинхронним двигуном індуктується ЕРС, величина якої визначається швидкістю обертання ротора та струмом намагнічування кола статора АД. ЕДС, що індуктується, випрямляється діодами АІН при закритих транзисторах і подається на конденсатор ланки постійного струму. Далі ЗРЕ переходить в інверторний режим, при якому працюють діоди VD1, VD2, VD3 і синхронізовані з мережею живлення транзистори VT4, VT5, VT6, VT7, VT8, VT9 за умови постійно закритих транзисторах VT1, VT2, VT3 керованого з мережею інвертора.

Відповідно до даної структури дволанкового перетворювача частоти із ланкою рекуперації електроенергії запропоновано алгоритм управління силовими ключами ланки рекуперації електроенергії (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Алгоритм керування силовими ключами ланки ЛРЕ

	VT1/ VD1	VT2/ VD2	VT3/ VD3	VT4/ VD4	VT5/ VD5	VT6/ VD6	VT7/ VD7	VT8/ VD8	VT9/ VD9
Кут керування α	Двигунний режим								
Постійний кут керування	+/-	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
Кут керування α	Режим рекуперативного гальмування								
Постійний кут керування	-/+	-/+	-/+	—	—	—	—	—	—
Регульований кут керування	—	—	—	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-

В таблиці 2.2 приведені стани перемикання силових ключів ЛРЕ в режимах двигуна та рекуперативного гальмування. Знаки « + » та « - » позначають поточний стан напівпровідникових елементів, тобто відкритий (пропускає струм) або закритий (не пропускає струм). Транзистори VT1, VT2 і VT3 у в режимі двигуна постійно відкриті, а в режимі рекуперативного гальмування – закриті. Формування імпульсів управління для транзисторів VT7, VT8, VT9 з подальшим розподілом на формувачі імпульсів (ФІ) здійснюються щодо лінійних напруг U_{ca} , U_{ab} , U_{bc} при їх позитивних значеннях з тривалістю 120 електричних градусів у блоці СУЛРЕ. Формування імпульсів управління для транзисторів VT4, VT5, VT6 здійснюються щодо фазної напруги U_a , U_b , U_c при їх позитивних значеннях з тривалістю 180 електричних градусів у блоці СУЛРЕ. Для виключення протікання наскрізних струмів через кола транзисторів використовуються логічні елементи «АБО-НЕ» в СУЛРЕ, що забороняють одночасну подачу імпульсів управління на транзистори верхнього та нижнього плечей. Наприклад, у разі одночасної подачі високих сигналів на верхні та нижні транзистори ЛРЕ верхній сигнал блокується і т.д. Запропонований алгоритм управління силовими ключами ланки рекуперації електроенергії дозволяє в режимі рекуперативного гальмування розширити діапазон рекуперованої в мережу живлення електроенергії.

2.4 Висновок:

- Встановлено, що останнім часом електропривод змінного струму з частотним керуванням за схемою дволанковий перетворювач частоти - асинхронний двигун з діодним випрямлячем отримав широке застосування в ШПУ. Дослідження показали, що в режимі рекуперативного гальмування використання відомих структур не забезпечує енергоефективність, оскільки потенційна енергія спуску кінцевого навантаження не передається в мережу живлення, а розсіюється в блоках гальмівних опорів.

- електроприводи, побудовані на базі ДПЧ з діодним або тиристорним випрямлячем, малоефективні в режимі рекуперативного гальмування;

- діодний випрямляч допускає передачу енергії тільки в одному напрямку, а тиристорний, що відноситься до категорії напівкерованих, має комутаційні проблеми;

- використання запропонованого перетворювача із вище приведеним алгоритмом управління силовими ключами в якості головного електропривода ШПМ дозволить підвищити ефективність роботи системи електроприводу в режимі рекуперативного гальмування на 8 % порівняно з традиційною системою електроприводу на основі АВН, оскільки вирішена проблема повернення енергії при гальмуванні внаслідок особливості структури, при якій здійснюється незалежність потоку енергії в режимі рекуперативного гальмування (незалежно від співвідношень напруг ланки постійного струму та напруги мережі існує можливість рекуперувати як енергію гальмування, так і енергію конденсатора ланки постійного струму).

Таким чином, пропонується пристрій рекуперації з розробленим алгоритмом управління є комплексним енергозберігаючим пристроєм, який може бути досліджений у складі електроприводу системи ШПУ.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМАННЯ

3.1 Математична модель ланки рекуперації електроенергії

Для дослідження можливості та особливостей застосування ДПЧ у електроприводі ШПУ необхідно дослідити особливості електромеханічного перетворення енергії. Метою розділу є побудова математичної моделі ШПУ в режимах рекуперативного гальмування.

Математична модель дволанкового перетворювача частоти з ланкою рекуперації електроенергії утворюється з математичного опису наступних окремих функціональних блоків:

- ланки рекуперації електроенергії (ЛРЕ);
- ланки постійного струму (ЛПС);
- автономного інвертора напруги (АІН).

Схема ланки рекуперації електроенергії приведена на рисунку 3.1.

На рисунку 3.1 введено такі позначення: ЛРЕ – ланка рекуперації електроенергії; ЛПС – ланка постійного струму; ФІ – формувач імпульсів; ДП – датчик струму; ДН – датчик напруги. Математична модель ЛРЕ може бути описана системою рівнянь [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_a \frac{di_a}{dt} = e_a - u_{dc} \cdot \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3} - R_a \cdot I_a, \\ L_b \frac{di_b}{dt} = e_b - u_{dc} \cdot \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} - R_b \cdot I_b, \\ L_c \frac{di_c}{dt} = e_c - u_{dc} \cdot \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3} - R_c \cdot I_c, \\ C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = S_{a1} i_a + S_{b1} i_b + S_{c1} i_c \pm i_{dc} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де L_a, L_b, L_c – індуктивність вхідного фільтра дволанкового перетворювача частоти (Гн); i_a, i_b, i_c – лінійні струми трифазної системи (А);

e_a, e_b, e_c – лінійна напруга трифазної системи (В);

R_a, R_b, R_c – активні опори вхідного фільтра дволанкового перетворювача частоти (Ом);

u_{dc} - напруга ланки постійного струму (В);

S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} – ключові стани IGBT – транзисторів ланки рекуперації електроенергії (1 – увімкнено, 0 – відключено);

C – ємність конденсатора ланки постійного струму (мкФ);

i_{dc} - струм навантаження, що надходить у ланку постійного струму (Load current) (А). Знак "-" в i_{dc} відповідає режиму випрямлення (руховий режим), а знак "+" відповідає режиму інвертування (рекуперативне гальмування).

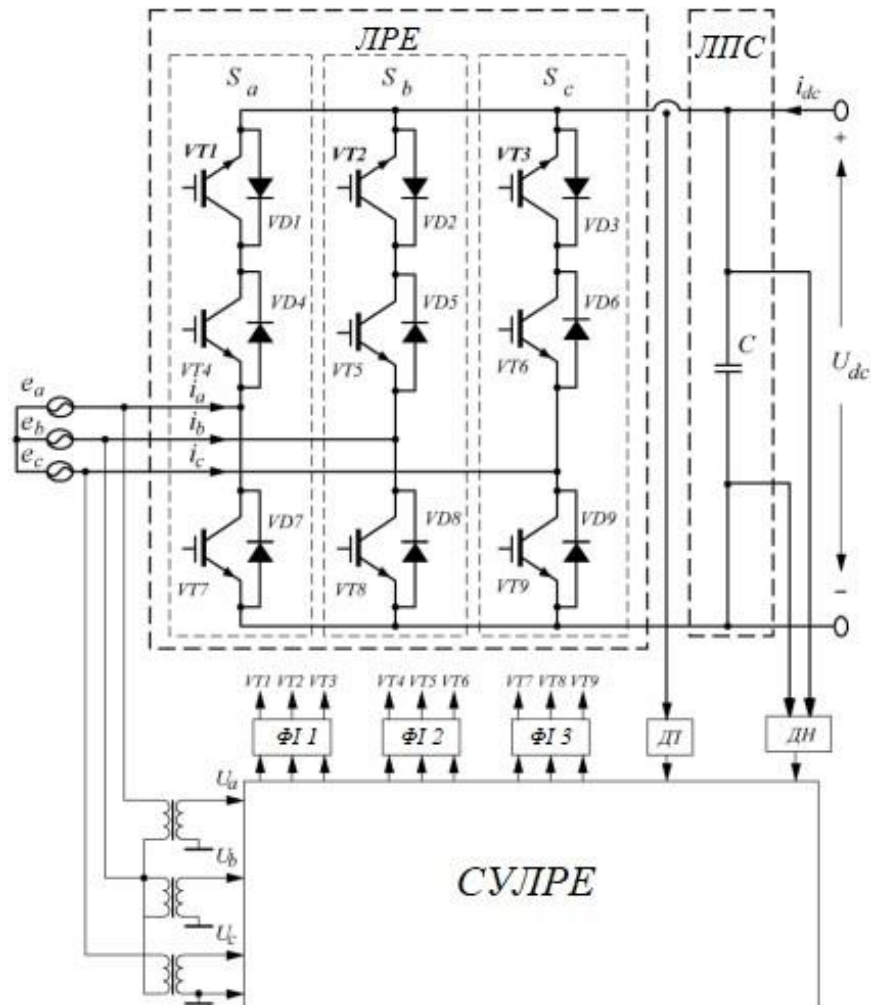


Рисунок 3.1 – Схема ланки рекуперації електроенергії

АН у структурі дволанкового перетворювача частоти можна

представити як повернутий випрямляч напруги з урахуванням двонаправлених силових ключів (IGBT – модулів). Отже, струм навантаження у ланці постійного струму i_{dc} з урахуванням силових модулів АІН виглядає так:

$$i_{dc} = S_{a2} i_a + S_{b2} i_b + S_{c2} i_c \pm i_{dc}, \quad (3.2)$$

де i_a, i_b, i_c - фазні струми на стороні навантаження (А); S_{a2}, S_{b2}, S_{c2} – ключові стани силових модулів АІН.

Фазні напруги ланки рекуперації електроенергії визначаємо наступним чином:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + u_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3} \\ \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} \\ \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Для побудови структурної схеми математичної моделі ланки рекуперації електроенергії введемо такі позначення: k_a, k_b, k_c – коефіцієнти, що враховують стан перемикання IGBT – транзисторів у фазах ланки рекуперації електроенергії; u_{Sa}, u_{Sb}, u_{Sc} – відповідно напруги трьох фаз ланки рекуперації електроенергії (В), які описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} k_a = \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3}, \\ k_b = \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3}, \\ k_c = \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3}, \\ u_{Sa} = k_a \cdot u_{dc}, \\ u_{Sb} = k_b \cdot u_{dc}, \\ u_{Sc} = k_c \cdot u_{dc}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Структурна схема математичної моделі ланки рекуперації

електроенергії, що відповідає виразам (3.1), (3.3) та (3.4), приведена на рисунку 3.2.

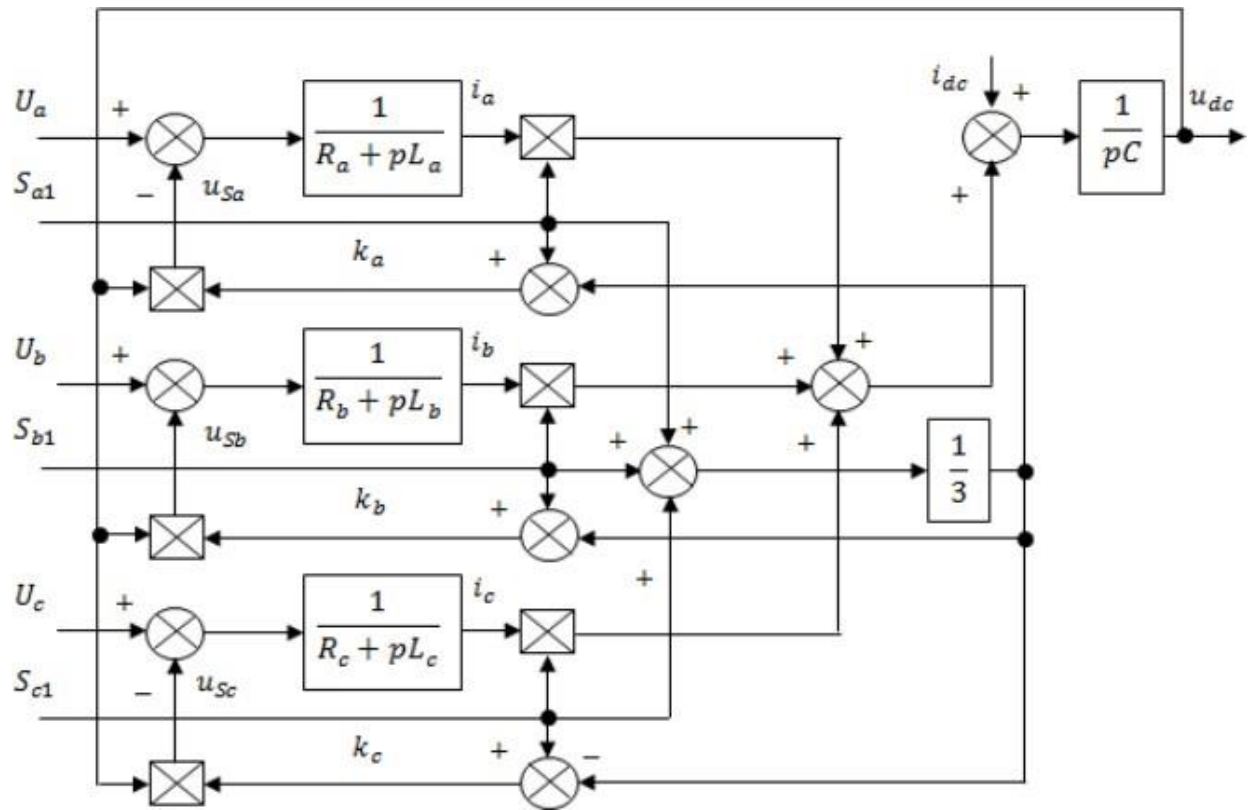


Рисунок 3.3 – Структурна схема математичної моделі ланки рекуперації електроенергії

3.2 Математична модель механічної системи підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування

Механічна система підйомної установки є тримасовою пружною системою [16]. До першої маси відноситься – ротор АТ, до другої – вузол посудини з кінцевим навантаженням і до третьої – вузол противаги (безредукторний електропривод). Кінематична схема механічної частини підйомної установки наведена на рисунку 3.3.

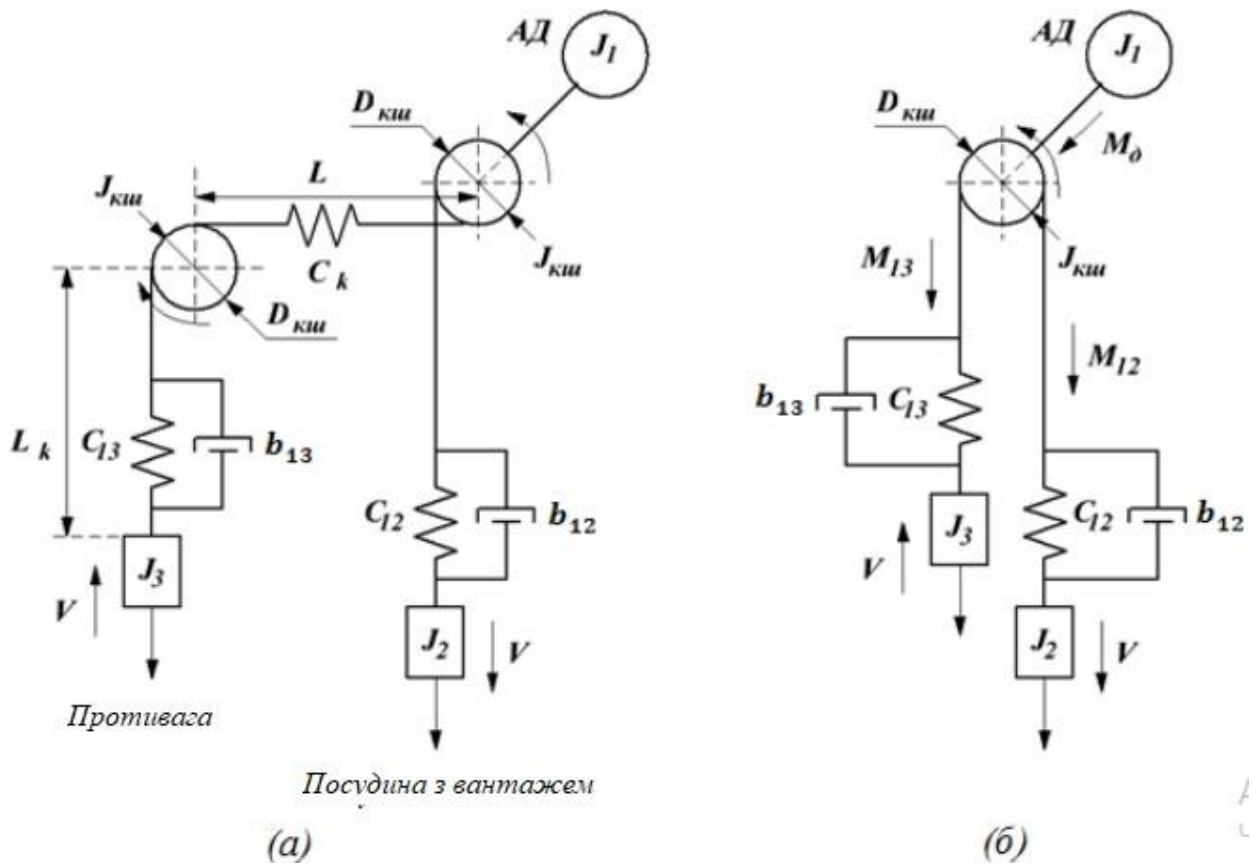


Рисунок 3.3 – Кінематична схема механічної частини підйомної установки (а), спрощена розрахункова схема механічної системи (б)

На рисунку 3.3 прийнято такі позначення: J_1 – наведений момент інерції першої маси, включаючи момент інерції ротора АТ, органу навивки, направляючих шківів ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$); J_2 – наведений момент інерції другої маси ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$); J_3 – наведений момент інерції третьої маси ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$); $C_{\phi 12}$ – наведена

жорсткість струн каната між органом навивки та завантаженою підйомною судиною (кг/с^2); $C\phi 13$ – наведена жорсткість струн каната між органом навивки та протывагою (кг/с^2); b_{12} , b_{13} – коефіцієнти внутрішнього в'язкого тертя (демпфування); $D_{\text{кш}}$ – діаметр барабана канатоведучого шківів (м); $J_{\text{кш}}$ – момент інерції напрямних шківів ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$); L – відстань між канатоведущим шківом і відвідною опорою (м); $L_{\text{к}}$ – довжина канатів (м); $C_{\text{к}}$ – жорсткість каната при розтягуванні (кг/с^2); V – лінійна швидкість руху судин (м/с); $M_{\text{д}}$ – електромагнітний момент АТ (Н·м); M_{12} , M_{13} – відповідно моменти пружних зв'язків (Н·м); $F_{\text{пр}}$, $F_{\text{кн}}$ – відповідно зусилля на протывагу та в посудині з кінцевим навантаженням (Н).

В ході досліджень прийнято низку припущень, що спрощують побудову математичної моделі механічної системи підйомної установки [16-17]:

- 1) механічна частина підйомної установки є рядом абсолютно жорстких елементів, що характеризуються зосередженими моментами інерції;
- 2) зосереджені елементи з'єднані між собою пружними зв'язками;
- 3) деформація пружних зв'язків підпорядковується закону Гука;
- 4) демпфування коливань механічної частини здійснюється силами внутрішнього в'язкого тертя у матеріалі пружних зв'язків за її деформації.

Структурна схема тримасової пружної системи приведена на рисунку 3.4.

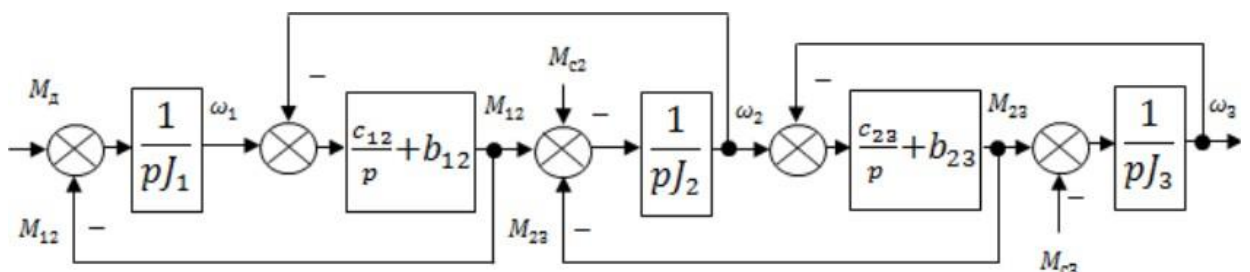


Рисунок 3.4 – Структурна схема тримасової механічної системи

Пружні властивості механічної передачі враховуються коефіцієнтами

жорсткості $c\varphi_{12}$, $c\varphi_{23}$, залежністю пружних моментів M_{12} , M_{23} . До керуючого впливу відноситься електромагнітний момент двигуна, збурюючими впливами є моменти статичних опорів C_2 і C_3 . Швидкості ω_1 , ω_2 і ω_3 , а також моменти пружних зв'язків M_{12} і M_{23} вважаються регульованими змінними. Врахування загасання (демпфування) коливань при обертальному русі здійснюється коефіцієнтами внутрішнього в'язкого тертя b_{12} , b_{23} . Розрахункова схема тримасової механічної системи підйомної установки приведена на рисунку 3.5.

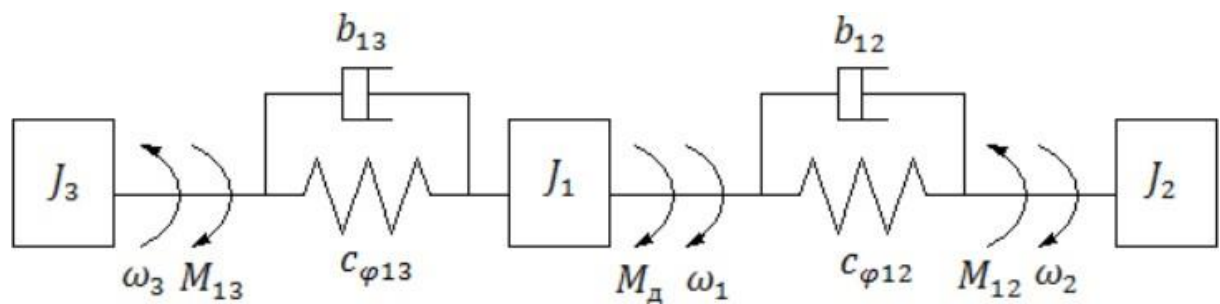


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема тримасової механічної системи підйомної установки

У поданій розрахунковій схемі індекси коефіцієнтів жорсткості $c\varphi_{12}$, $c\varphi_{13}$, пружних моментів M_{12} , M_{13} , демпфування b_{12} , b_{13} , а також моментів інерції мас відповідають кінематичній механічній схемі частини підйомної установки (рисунок 3.3).

Математична модель тримасової механічної системи підйомної установки виглядає таким чином:

Вираз (3.5) враховує моменти інерції першої, другої та третьої маси (J_1 , J_2 , J_3) електроприводу ШПМ, які незначно змінюються внаслідок зміни маси каната в двопосудинній підйомній установці.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_d + M_{12} - M_{13}, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2}, \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{13} - M_{c3}, \\ M_{12} = c_{\phi_{12}} \cdot (\phi_1 - \phi_2) + b_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \\ M_{13} = c_{\phi_{13}} \cdot (\phi_1 - \phi_3) + b_{13} \cdot (\omega_1 - \omega_3). \end{array} \right. , \quad (3.5)$$

Спуск першої посудини (посудина з кінцевим навантаженням) супроводжується підйомом другої (противага), отже, вплив моментів статичних опорів з боку посудин відрізнятимуться залежно від діючих зусиль у кінематичному колі.

3.3 Математична моделі електромеханічної системи шахтної підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування

Вихідна комплексна математична модель електромеханічної системи ШПУ у режимі рекуперативного гальмування із врахуванням структури перетворювача, змінності кінцевого навантаження та впливу жорсткості канатів описується виразом (3.6).

Вихідна комплексна математична модель електромеханічної системи підйомної установки враховує взаємодію системи керування електроприводом ШПУ із її механічною частиною в режимі рекуперативного гальмування. Модель складається з наступних локальних вузлів: дволанковий перетворювач частоти з ланкою рекуперації електроенергії; асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; механічна система підйомної установки, що складається з вузлів посудини з кінцевим навантаженням та противагою.

впливає на динамічні показники якості електроприводу ШПУ. У зв'язку з цим необхідно розробити систему керування електроприводом ШПУ, яка в режимі рекуперативного гальмування компенсує вплив кінцевого навантаження.

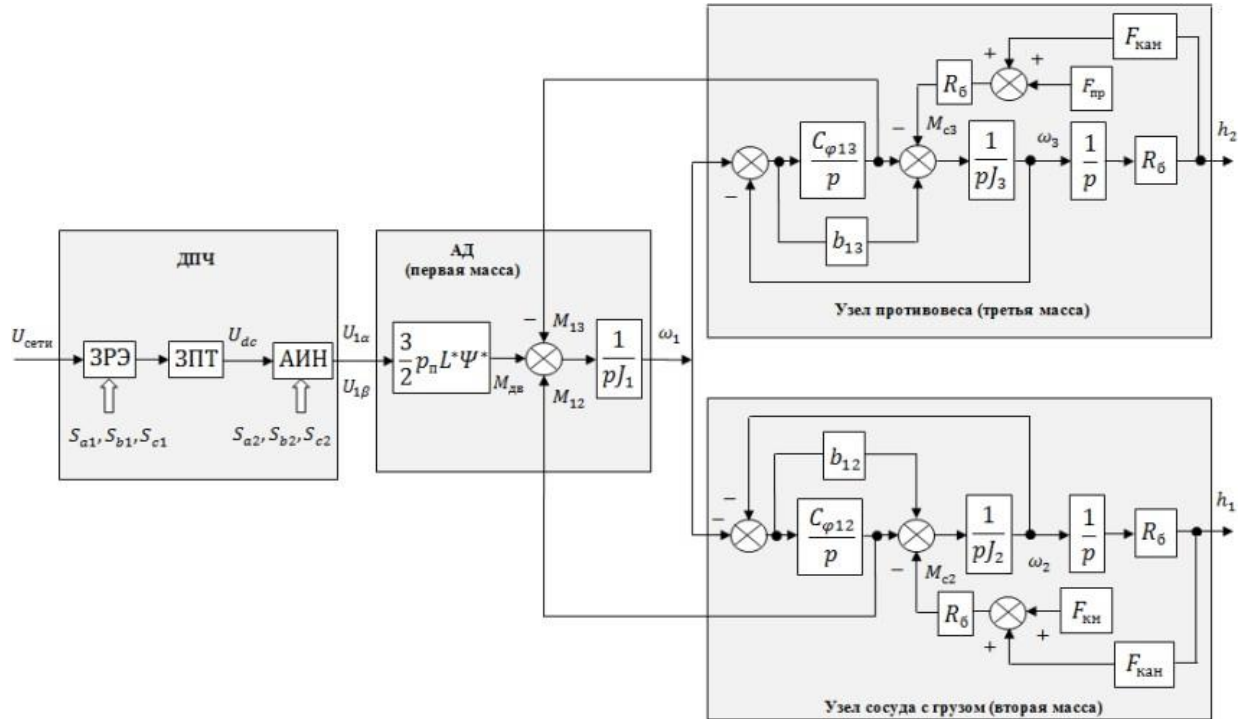


Рисунок 3.6 – Структурна схема тримасової системи ШПУ

3.4 Висновок:

Запропоновано математичну модель ЕМС підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування. Математичний опис складається з опису дволанкового перетворювача частоти, асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором, механічної частини підйомної установки, що складається з вузлів посудини з кінцевим навантаженням та противагою. Розроблена математична модель системи електроприводу ШПУ в режимі рекуперативного гальмування враховує зміну величини кінцевого навантаження ШПУ, змінну жорсткість канатів та процеси, що протікають у перетворювачі частоти.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

4.1 Система керування електроприводу з прямим керуванням моментом

Внаслідок простоти та хороших енергетичних та регулювальних характеристик електропривод змінного струму з перетворювачем частоти стає стандартом електричного приводу для більшості гірських машин, у тому числі для підйомно-транспортних механізмів. У більшості випадків в електроприводах підйомно-транспортних механізмів використовуються дволанковий перетворювач частоти (ДПЧ), вентильні частини яких виконані на основі некерованого або напівкерованого випрямляча, утворені силовими діодами та тиристорами. Подібні перетворювачі частоти є нелінійними споживачами електричної енергії, які в більшості випадків споживають реактивну енергію і вносять спотворення в мережу живлення. У подібних системах електроприводу неможливо забезпечити режим рекуперативного гальмування, оскільки електрична енергія, що віддається електродвигуном, не передається в мережу живлення, а розсіюється у вигляді тепла в гальмівному опорі ланки постійного струму, що веде до обмеження енергетичних можливостей електроприводу шахтних підйомів. подібних систем [14].

В електроприводах на основі ДПЧ з АВН завдяки використанню режиму ШІМ імпульсна напруга на стороні змінного струму має сприятливий спектральний склад, що створює хороші умови для фільтрації вищих гармонік споживаного струму. Цей електропривод є універсальним енергозберігаючим пристроєм. Використання цього перетворювача в підйомно-транспортних механізмах, зокрема в підйомних установках дозволяє при спуску кінцевого навантаження рекуперувати енергію гальмування в мережу живлення.

На сьогоднішній день провідним виробником регульованих

електроприводів, в яких реалізований вищезгаданий алгоритм управління, є концерн АВВ. За інформацією АВВ, ці системи відпрацьовують стовідсотковий стрибок завдання моменту, забезпечують регулювання електромагнітного моменту при низьких частотах обертання, включаючи і нульову, а також забезпечують точність підтримки швидкості на рівні 10 % ковзання АД без використання датчика швидкості та 0.01% - з використанням датчика швидкості [18]. Алгоритм прямого управління моментом (ПУМ) відрізняється простотою, тому що немає перетворень координат і має високу швидкодію. Порівняно з векторним управлінням системи ПУМ, завдяки застосуванню гістерезисних регуляторів та таблиці перемикачів ключів, інвертори мають ряд переваг: простота в реалізації, висока динаміка; висока швидкодія по моменту та потоку, порівняно з класичним векторним управлінням; низька частота вибірки, і навіть постійна частота перемикачів. У зв'язку з цим алгоритм управління ПУМ, що забезпечує високу швидкодію по каналу електромагнітного моменту, є кращим для управління електроприводами підйомно-транспортних механізмів, зокрема в управлінні електроприводу ШПУ. Недоліком системи ПУМ є використання релейних регуляторів, застосування яких призводить до збільшення комутаційних втрат в інверторі, а також підвищенню пульсацій моменту. Останній недолік знижує точність регулювання, підвищує електроспоживання та збільшує акустичний шум АД. В основу ПУМ закладено рівняння електромагнітного моменту асинхронного двигуна. Функціональна схема асинхронного електропривода з прямим керуванням моментом приведена на рисунку 4.1.

В схемі приведено такі позначення: ЗІ – задатчик інтенсивності; РШ – регулятор швидкості; БО – блок обмеження; РМ – регулятор моменту; РП – регулятор поточкозчеплення; БВВН – блок вибору вектора напруги; БОН – блок обчислення напруги; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний двигун. РМ будується на основі трипозиційної релейної ланки із зоною нечутливості та з гістерезисним допуском (рисунк 4.2. а). РП

будується на основі двопозиційної релейної ланки з гістерезисним допуском (рисунок 4.2. б).

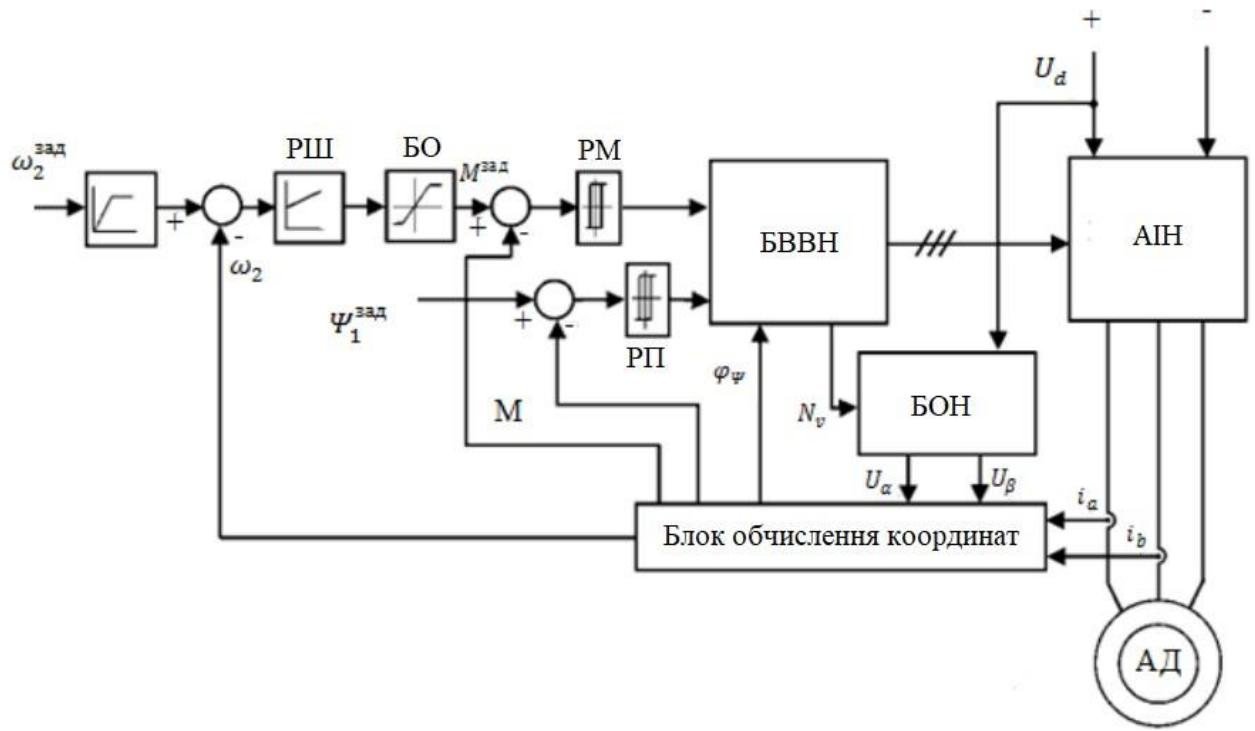


Рисунок 4.1 – Функціональна схема електроприводу з прямим керуванням моментом

Трипозиційний релейний регулятор моменту описується наступним чином [18]:

$$Y = \begin{cases} C \text{ при } X > (a + b), \\ -C \text{ при } X < -a, \\ 0 \text{ при } -a < X < a, \\ -C \text{ при } X < -(a + b). \end{cases} , \tag{4.1}$$

Двопозиційний релейний регулятор потокозчеплення описується виразом:

$$Y = \begin{cases} C \text{ при } X > b, \\ -C \text{ при } X < b, \\ C \text{ при } X > b, \\ -C \text{ при } X < -b. \end{cases}, \quad (4.2)$$

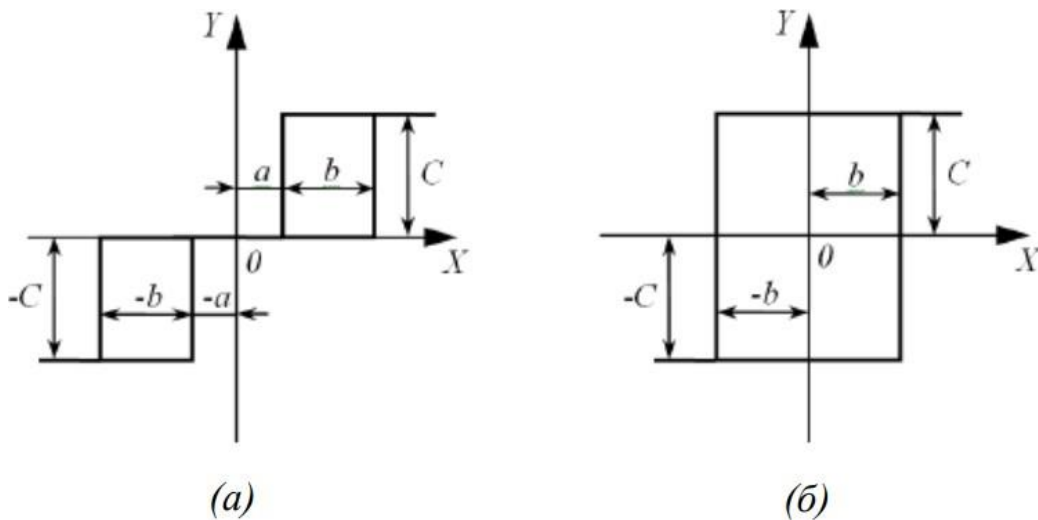


Рисунок 4.2 – Релейні регулятори моменту та потокозчеплення

Стани перемикання IGBT – транзисторів АІН у класичній системі ПУМ визначаються відповідно до таблиці 4/1. Знак «+» в таблиці 3.2 відповідає включеному стану IGBT - транзистора, знак «-» вимкненому. Таким чином, у кожен момент часу будь-яка фаза асинхронного двигуна може бути підключена до плюсової або мінусової шини ланки постійного струму [19].

Таблиця 4.1 – Таблиця перемикання силових модулів АІН

	U ₁	U ₀	U ₂	U ₇	U ₃	U ₀	U ₄	U ₇	U ₅	U ₀	U ₆	U ₇
VT1	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+
VT2	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-
VT3	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+
VT4	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-
VT5	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+
VT6	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-

Принципова схема АІН приведена на рисунку 4.2. Фазні напруги на виході АІН є ступінчастими функціями, які можуть видозмінюватися залежно від алгоритму управління IGBT – транзисторами у разі виникнення пауз в циклі перемикань.

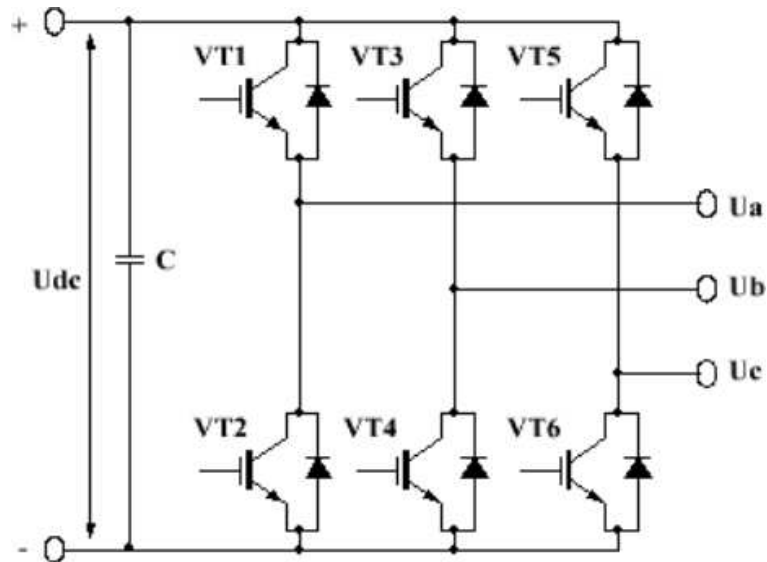


Рисунок 4.2 – Схема автономного інвертора напруги

Функціональна схема електропривода з алгоритмом ПУМ (DTC) із врахуванням просторово-векторної модуляції напруги приведена на рисунку 4.3 В даній схемі введені такі позначення: РШ, РП, РМ – відповідно регулятори швидкості, потокозчеплення та моменту; ПВМ – блокпросторово-векторної модуляції; АІН – автономний інвертор напруги; БОН – блок обчислення напруги; АД – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.

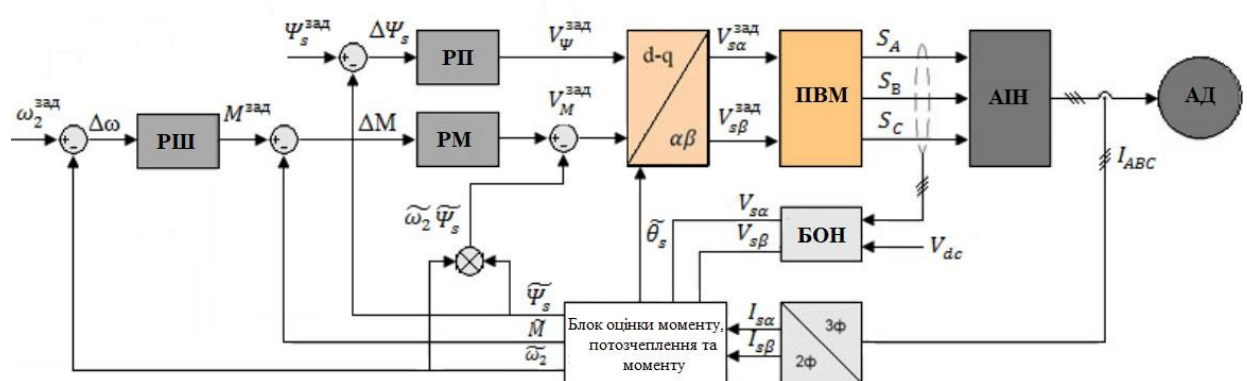


Рисунок 4.3 – Функціональна схема електроприводу з ПУМ на основі просторово-векторної модуляції напруги

Виходи регуляторів потокозчеплення та електромагнітного моменту ($V_{T\text{зад}}$ і $V_{M\text{зад}}$) являють собою опорні складові напруги на затискачах статора

АД в системі координат dq (S-FOC, stator flux-oriented control). Дані сигнали (постійні напруги) перетворюються в нерухому систему координат α - β за допомогою зворотного перетворення Парку (dq- $\alpha\beta$). Керуючі значення $V_{s\alpha\text{зад}}$, $V_{s\beta\text{зад}}$ надходять на блок просторово-векторної модуляції (ПВМ). Схемотехнічною відмінністю представленої схеми електроприводу з DTC-SVM від класичної схеми ПУМ є заміна таблиці перемикання на блок ПВМ, а замість гістерезисних регуляторів потокозчеплення та електромагнітного моменту використовуються лінійні регулятори цих величин. У порівнянні з класичним алгоритмом ПУМ система DTC-SVM функціонує на постійній частоті перемикання.

4.2 Розробка функціональної схеми модернізованої системи керування швидкістю посудин ШПУ

На основі розробленої математичної моделі тримасової ЕМС ШПУ в режимі рекуперативного гальмування функціональна схема системи керування швидкістю посудин ШПУ може бути представлена в якості системи підпорядкованого регулювання, приведеної на рисунку 4.4 [16-18].

На рисунку 4.4 приведено такі позначення: ЛРЕ – ланка рекуперації електроенергії; ЛПС – ланка постійного струму; БПУМ – блок прямого управління моментом; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний двигун; ВПН – вузол посудини з кінцевим навантаженням; ВПР – вузол противаги; БОЗН – блок обчислення задаючих напруг; БОК – блок обчислення координат, що не спостерігаються; $\omega_{\text{зад}}$, $T_{\text{зад}}$, $M_{\text{упр_зад}}$ – сигнали завдання швидкості, потокозчеплення ротора АД та пружного моменту навантаження ШПУ, $T_{\text{факт}}$, $M_{\text{упр_факт}}$ – фактичні сигнали потокозчеплення та пружного моменту навантаження, заводи; $k_{\text{зш}}$, $k_{\text{зп}}$, $k_{\text{зм}}$, $k_{\text{зум}}$ – відповідно коефіцієнти зворотних зв'язків за швидкістю, потоком зчеплення ротора, електромагнітним моментом та пружним моментом навантаження; $U_{\text{зад}}$, $V_{\text{зад}}$ – вихідні сигнали регуляторів моменту та потокозчеплення ротора АД; S1 –

скорочено від S_{a1} , S_{b1} , S_{c1} ; S_2 – скорочено від S_{a2} , S_{b2} , S_{c2} ; ФПМ – формувач пружного моменту навантаження; БПВ – блок порівняння величин; БП – блок пам'яті; $h_{\text{упов}}$ – висота ділянки уповільнення.

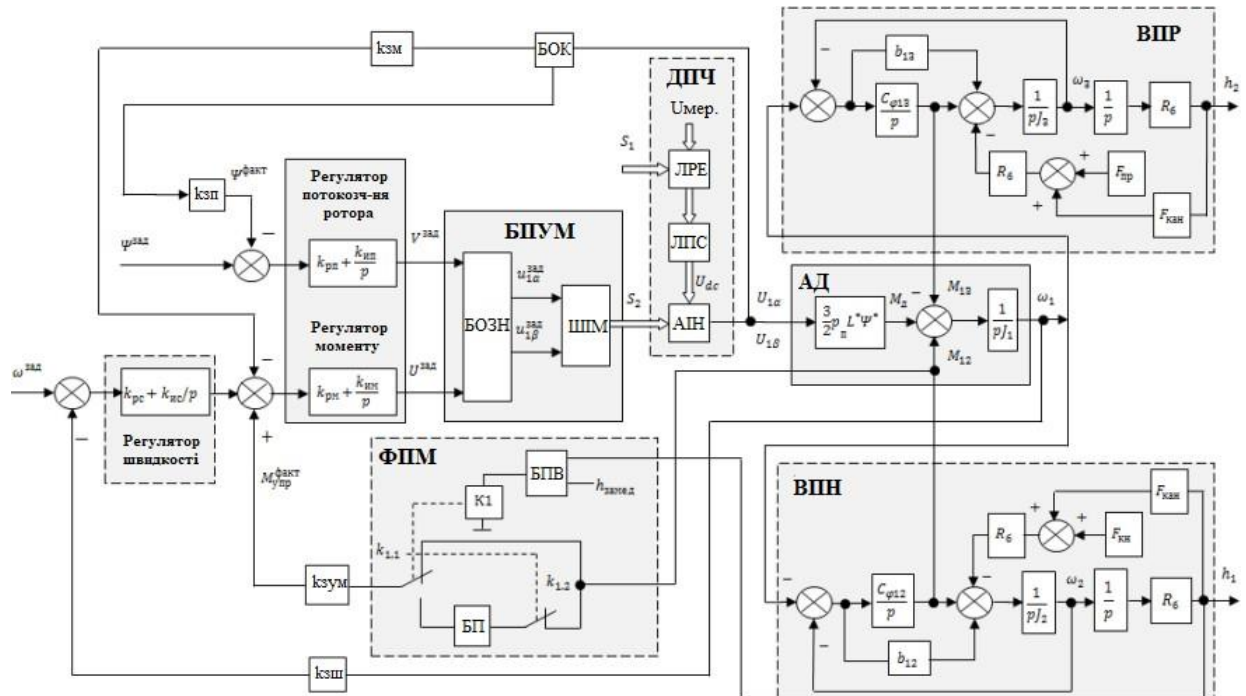


Рисунок 4.4 – Функціональна схема модернізованої системи керування електроприводом ШПУ

Система автоматичного управління побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат із зовнішнім контуром регулювання швидкістю посудин ШПУ та внутрішніми контурами регулювання моментом та потокозчепленням ротора АД. Блок «регулятор швидкості» (РШ) отримує інформацію про стан електроприводу (на вході РШ порівнюються сигнали негативного зворотного зв'язку швидкості з сигналом завдання по швидкості) та видає завдання на контур регулювання ПУМ. У контурі ПУМ формуються відповідні керуючі сигнали керування АД. На вході контуру ПУМ порівнюються сигнали (фактичні) зворотних зв'язків за електромагнітним моментом та пружним моментом навантаження. Фактичні сигнали зворотних зв'язків по потоку зчеплення ротора та електромагнітного моменту через блок «обчислення неспостережуваних

координат» (БОК) порівнюються із заданими сигналами. Результат порівняння є сигналом завдання внутрішніх контурів потокозчеплення ротора і моменту. Компенсуючий зворотний зв'язок за пружним моментом навантаження введено для обмеження величини перерегулювання в режимі рекуперативного гальмування при спуску кінцевого навантаження. Блок дволанкового перетворювача частоти ДПЧ з розробленою ланкою рекуперації електроенергії (ЛРЕ) та алгоритмом управління силовими ключами ($S1 - Sa1, Sb1, Sc1$) дозволяє забезпечити двосторонній обмін енергією між механізмом живлення і електродвигуном .

Проведені комп'ютерні моделювання існуючого електроприводу ШПУ на основі дволанкового перетворювача частоти з активним випрямлячем напруги зі стандартними налаштуваннями регуляторів у режимі гальмування рекуперативного приведені на рисунку 4.5.

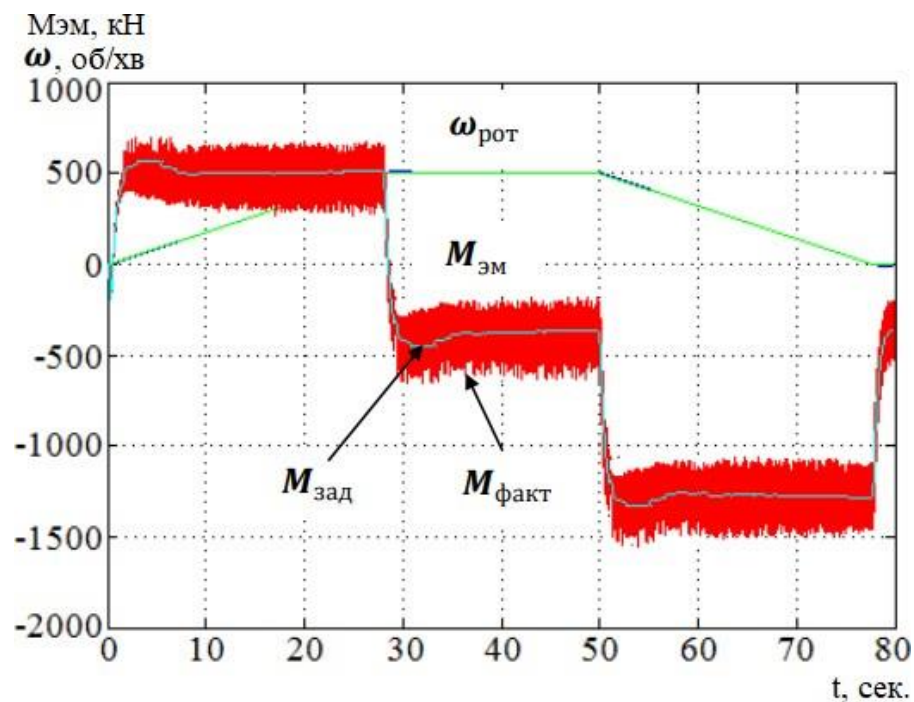


Рисунок 4.5 – Перехідний процес у системі з обмеженням моменту при стандартних налаштуваннях

Поданий рисунок відповідає режиму рекуперативного гальмування протягом циклу роботи ШПУ (час циклу прийнято 80 с). Основні параметри системи електроприводу ШПУ, використані в ході комп'ютерного

моделювання, представлені на таблиці 4.2. В якості об'єкту управління вибраний АД з короткозамкненим ротором серії А13-37-6. Як видно з рисунку 4.5 спуск посудини з кінцевим навантаженням зумовлює появу пульсацій і перерегулювання в каналах електромагнітного моменту і швидкості посудин електроприводу ШПУ.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики асинхронного двигуна

№ п/п	Паспортні характеристики	Значення
1.	Тип асинхронного двигуна	А13-37-6
2.	Номінальна потужність P_n , кВт	500
3.	Синхронна частота обертання, n_0 об/хв	1000
4.	Кількість пар полюсів АД p_n	3
5.	Номінальний ККД АД, %	93,5
6.	Номінальний коефіцієнт потужності, в.о.	0,87
7.	Номінальне ковзання S_n , в.о.	0,02
8.	Кратність пускового моменту M_p/M_n	2

Як наслідок, це призводить до зниження точності управління, підвищення електроспоживання та збільшення акустичних шумів у АД. Також це призводить до зниження швидкодії системи електроприводу ШПУ. Перерегулювання по каналу моменту досягає значення 7%, що не прийнятно для ШПУ з точки зору швидкодії і точності управління. Перерегулювання каналом швидкості становить 3%.

4.3 Методика синтезу регуляторів системи керування електроприводу ШПУ

Метод синтезу регуляторів у системі керування електроприводом ШПУ із алгоритмом роботи ПУМ представлений у наступному вигляді. Оптимізація контурів регулювання системи керування електроприводом проводиться в три етапи.

На першому етапі проведено синтез регуляторів внутрішнього контуру системи керування електроприводом ШПУ з алгоритмом роботи ПУМ без урахування впливу внутрішнього зворотного зв'язку за пружним моментом навантаження відповідно до стандартного настроювання на технічний оптимум. При цьому керування каналами регулювання моменту та потокозчеплення ротора здійснювалося окремо із застосуванням лінійних регуляторів замість існуючих релейних, що дозволило зменшити пульсацію електромагнітного моменту АД.

На другому етапі проведено синтез контуру моменту з урахуванням внутрішнього зворотного зв'язку за пружним моментом навантаження. На третьому етапі проведено синтез зовнішнього контуру із регулятором швидкості (РШ). Контур швидкості налаштований на симетричний оптимум. При цьому в процесі налаштування зовнішнього контуру не враховано вплив внутрішнього зворотного зв'язку за пружним навантаженням.

Як було зазначено раніше, використання релейних регуляторів у системі електроприводу з ПУМ алгоритмом управління призводить до зростання комутаційних втрат у перетворювачі частоти та зростання пульсації електромагнітного моменту АД. Одним із способів усунення цього недоліку є використання роздільного способу управління САУ моментом і потоком зчеплення ротора АД [17-18].

Параметри регуляторів у ході досліджень динаміки синтезованих регуляторів системи керування електроприводом обрані з міркування забезпечення бажаної швидкодії каналами електромагнітного моменту та швидкості посудин ШПУ в режимі рекуперативного гальмування.

Структурна схема замкнутих контурів регулювання швидкістю, потокозчепленням та моментом системи керування електроприводом ШПУ з ПУМ-алгоритмом управління приведено на рисунку 4.6.

У структурній схемі 4.6 введені такі позначення: РП – регулятор потокозчеплення ротора АД; РШ – регулятор швидкості; РМ – регулятор моменту; ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний двигун із

короткозамкненим ротором.

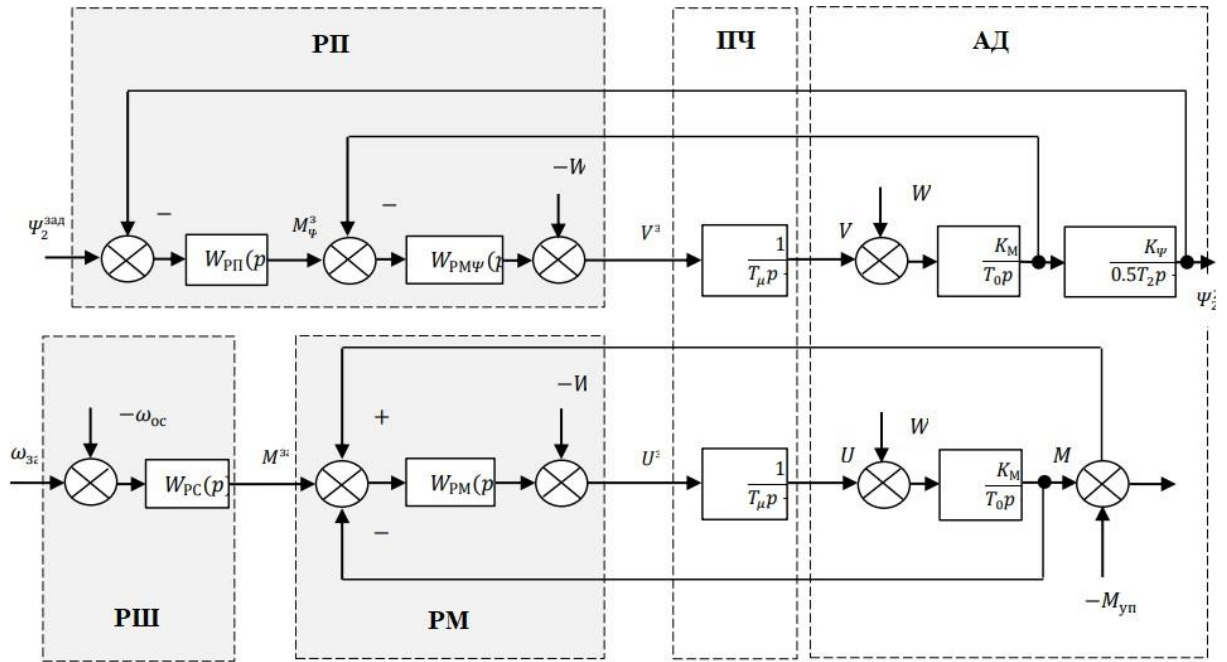


Рисунок 4.6 – Структурна схема синтезу регуляторів системи керування електропривода ШПУ із ПУМ-алгоритмом управління

Синтез контуру моменту без урахування внутрішнього зворотного зв'язку пружного моменту навантаження. На рисунку 4.7 приведена структурна схема контуру моменту.

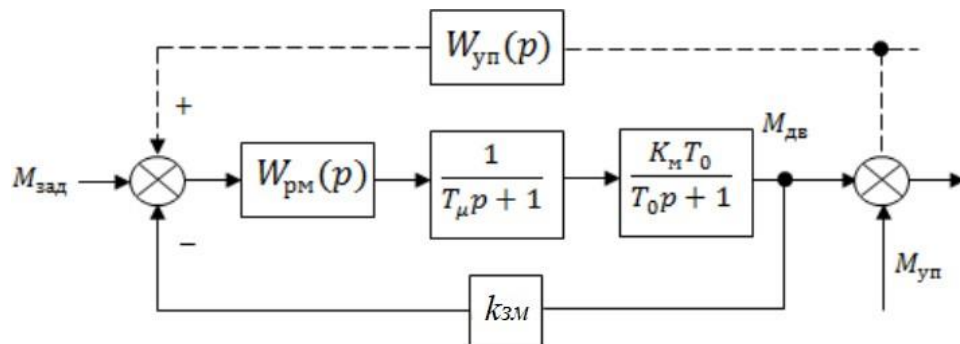


Рисунок 4.7 – Структурна схема контуру моменту

Синтез зовнішнього контуру швидкості електроприводу ШПУ. Структурна схема зовнішнього контуру швидкості системи електроприводу ШПУ приведена на рисунку 4.8.

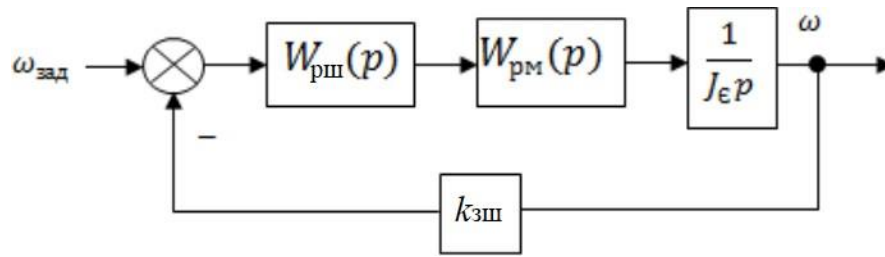


Рисунок 4.8 – Структурна схема контуру швидкості

Зовнішній регулятор у системах ПУМ, зазвичай, це регулятор пропорційно-інтегрального типу [21]. Однак, відомі системи, в яких використовуються П-регулятори та ПІД-регулятори. Зовнішній контур регулювання у системах ПУМ замкнутий за частотою обертання двигуна. Сигнал зворотного зв'язку може бути отриманий шляхом прямого вимірювання частоти обертання за допомогою обертового датчика швидкості будь-якого виду, або може бути обчислений в блоці обчислення неспостережуваних координат на підставі інформації про фазні напруги і струми асинхронного двигуна. Під час налаштування зовнішнього контуру не враховано вплив внутрішнього зворотного зв'язку за пружним моментом навантаження.

Оцінка працездатності синтезованих регуляторів системи управління електроприводом ШПУ проводилася на розробленій комп'ютерній моделі. На рисунку 4.9 представлений результат комп'ютерного моделювання системи електроприводу ШПУ при налаштуванні системи керування на основі запропонованої методики із врахуванням впливу внутрішнього зворотного зв'язку за пружним моментом навантаження.

Отримані графіки ілюструють монотонний характер зміни електромагнітного моменту в системі з оптимізованою структурою та практично відсутністю перерегулювання в моментах пуску, скидання навантаження та переходу в режим уповільнення ШПУ, що є найбільш доцільним з точки зору швидкодії системи електроприводу. В результаті оптимізації контурів регулювання величина перерегулювання каналом швидкості зменшувалася з 3% до 1%. Також принцип роздільного керування

каналами потокозчеплення та моментом дозволив зменшити пульсації електромагнітного моменту АД на 10 %.

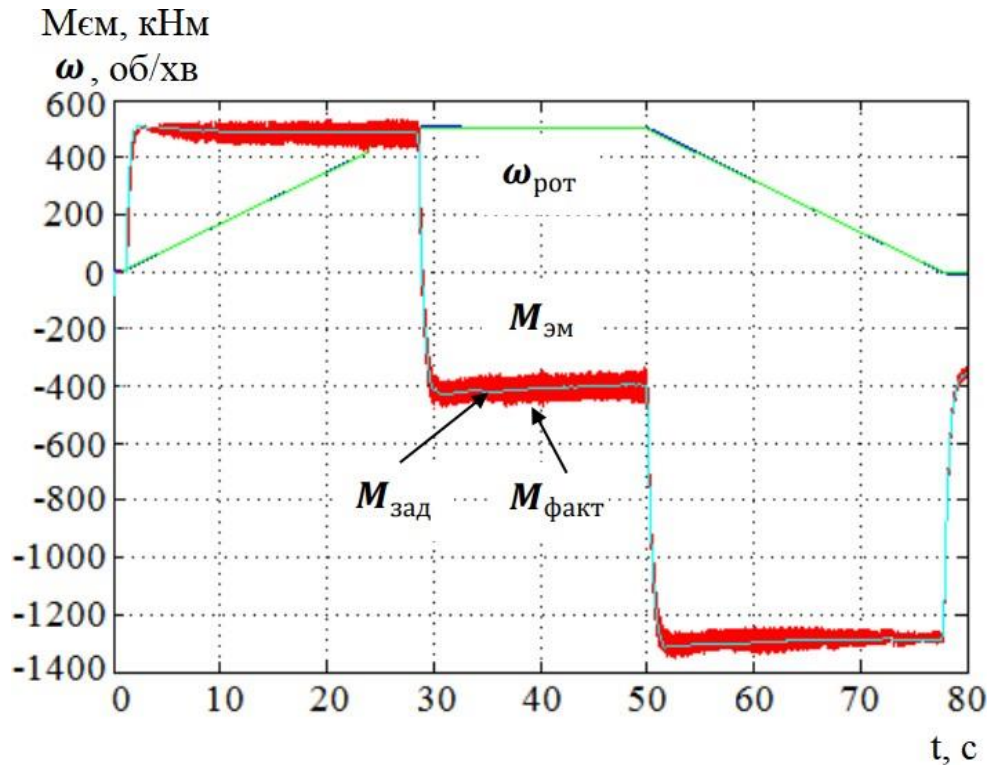


Рисунок 4.9 – Перехідний процес у системі з обмеженням моменту при налаштуванні системи управління на основі запропонованої методики

На підставі отриманих результатів комп'ютерного моделювання приходимо до такого висновку: запропонована методика поетапного синтезу контурів регулювання системи керування електроприводом ШПУ дозволила на першому етапі визначити вплив внутрішніх збурень та реакцію системи керування на вплив кінцевого навантаження. Наступний етап синтезу з додатковим введенням внутрішнього позитивного зворотного зв'язку за пружним моментом навантаження дозволив оптимізувати структуру системи управління, в результаті, пульсації електромагнітного моменту скоротилися на 10%, величина перерегулювання каналу моменту зменшувалася в 2.33 рази, а також величина перерегулювання каналом швидкості зменшилася з 3% до 1%.

4.4 Висновки

Запропоновано модернізовану систему управління швидкістю псудин ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Розроблена структура побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат та забезпечує компенсацію впливу кінцевого навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Проведено комп'ютерне моделювання існуючої системи електроприводу ШПУ на основі дволанкового перетворювача частоти з активним випрямлячем напруги зі стандартними налаштуваннями регуляторів системи керування. Встановлено, що при стандартному налаштуванні регуляторів величина перерегулювання каналом електромагнітного моменту АД має значення $\sigma=7\%$, що неприйнятно з точки зору швидкодії системи електроприводу. Запропоновано поетапну методику синтезу контурів регулювання, що дозволяє оцінити вплив зовнішніх збурювальних впливів (вплив кінцевого навантаження ШПМ) та покращити швидкодію системи електропривода ШПУ.

5 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

5.1 Оцінка динамічних характеристик системи електропривода

Для перевірки достовірності аналітичних розрахунків та детального вивчення особливостей роботи запропонованої структури у середовищі моделювання побудовано імітаційну модель системи електроприводу (рисунок 5.1). За основу взято реальні параметри АД (потужність АД прийнята 2.2 кВт, синхронна швидкість обертання ротора 1500 об/хв) та параметри ДПЧ з ланкою рекуперації електроенергії. При складанні імітаційної моделі системи ЕП використовувалися прийняті у перетворювальній техніці такі припущення [19]:

- джерело живлення є ідеальним джерелом напруги;
- кола постійного та змінного струму, включаючи навантаження (АД), містять лише лінійні елементи, тому описуються лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами;
- ключові елементи є ідеальними.

Сформульовані припущення прийнято в більшості робіт з перетворювальної техніки і не призводять до помітних похибок при розрахунку основних електромагнітних процесів.

Осцилограми струму та напруги асинхронного електроприводу приведено на рисунку 5.2. Коефіцієнт потужності має значення 0,92. ЛАЧХ системи електропривода приведено на рисунку 5.3.

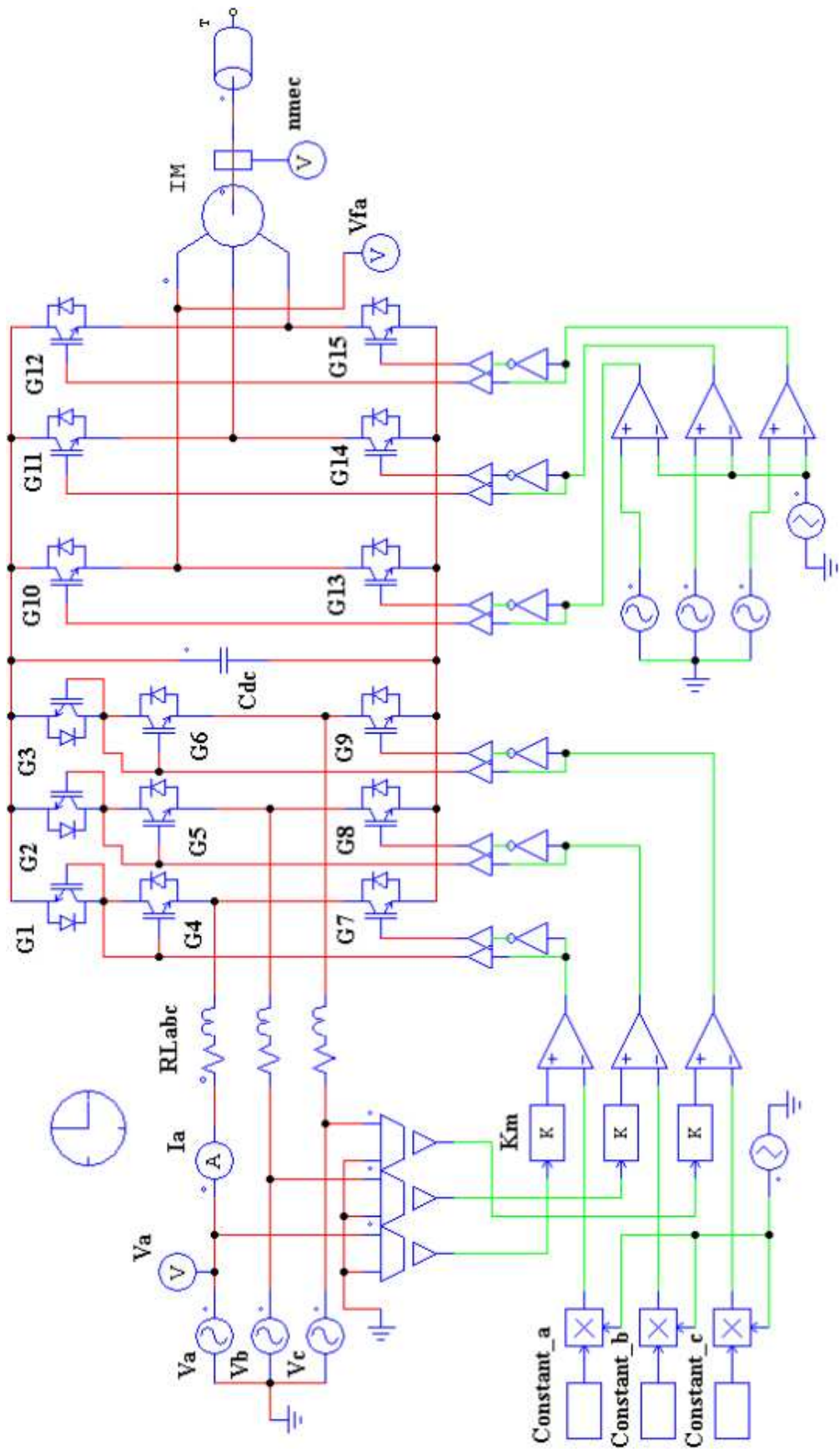


Рисунок 5.1 – Імітаційна модель системи електропривода

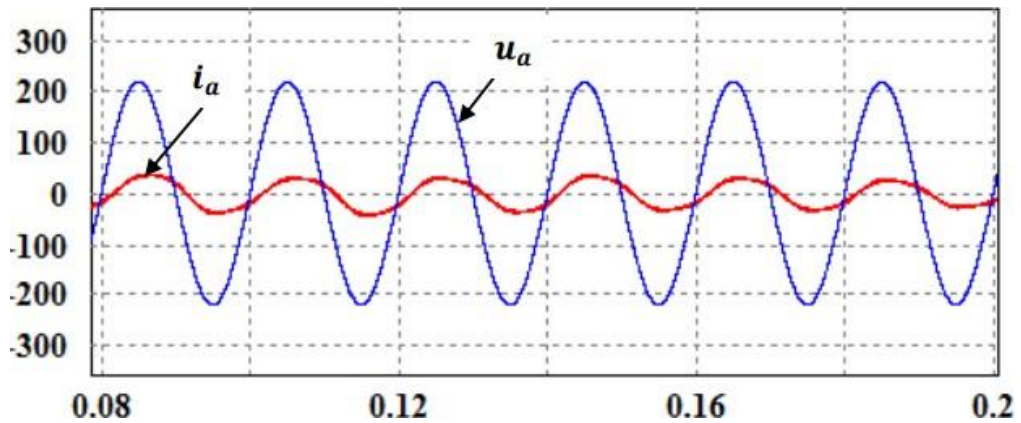


Рисунок 5.2 –
на стороні мережі живлення

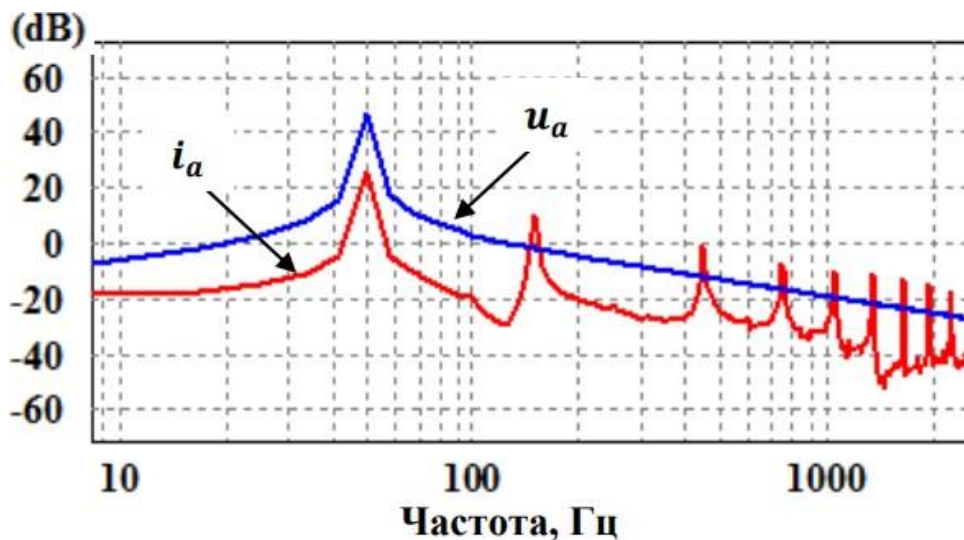


Рисунок 5.3 – ЛАЧХ системи електропривода

5.2 Імітаційне моделювання системи електропривода ШПУ в ППП Matlab Simulink

Найбільш перспективним комплексом прикладних програм, що забезпечує потреби інженерів, що працюють в галузі електроприводів, є пакет ППП MatLab Simulink. Середовище MatLab Simulink представляє досліднику та проектувальнику найширші можливості дослідження процесів у найскладніших системах за будь-яких змін параметрів, включаючи аварійні режими. Моделювання суттєво скорочує терміни розробки та налагодження систем електроприводів. Недолік пакету MatLab Simulink – це неможливість

досить точного моделювання перехідних процесів у напівпровідникових елементах. Напівпровідникові елементи та мікропроцесор краще моделювати за допомогою спеціальних комплексів прикладних програм, наприклад MicroCap, Workbench та ін. Однак такі програми не підходять для моделювання систем електроприводів. Середовище MatLab Simulink прийняте як офіційний засіб при оформленні документації у наукових працях. Середовище Simulink, що є засобом програмування на основі лінійних і нелінійних динамічних систем, а також безліч функції розширення системи, сприяло популярності системи MatLab. В одній із бібліотек Simulink – SimPowerSystems виконується імітаційне моделювання електротехнічних пристроїв.

Схема моделі системи електроприводау ШПУ із врахуванням вдосконаленої системи управління приведена на рисунку 5.4. Основні вузли моделі: мережа живлення; ланка рекуперації електроенергії із системою управління транзисторами; ланка постійного струму із конденсатором фільтра (ЛПС); зовнішній регулятор швидкості; блок ПУМ (пряме управління моментом) з регуляторами моменту та потокозчеплення ротора АД; асинхронний двигун (АД); вузол формування пружного моменту навантаження (ВФПМ); контрольно-вимірювальні блоки.

Модель блоку ПУМ в середовищі Matlab Simulink приведена на рисунку 5.5. Модель блоку ПУМ складається з таких локальних вузлів: ПІ – регулятор моменту (Torque PI); ПІ – регулятор потокозчеплення (Flux PI); блок обчислення моменту та потокозчеплення (Torque and Flux calculator); блок обчислення часу перемикання ключів інвертора (switching time calculator); блок формування імпульсів керування (gates logic).

Математичні моделі ПІ-регуляторів потокозчеплення ротора та моменту в середовищі Matlab Simulink представлені на рисунках 5.6 та 5.7 відповідно. Моделі складаються з таких основних вузлів: сигнали завдання по потоку та моменту (Flux*, Torque*); фактичні сигнали по потоку та моменту, що заводяться через зворотні зв'язки (Flux, Torque); пропорційна та інтегральна складові регуляторів потокозчеплення та моменту (k_i , k_p).

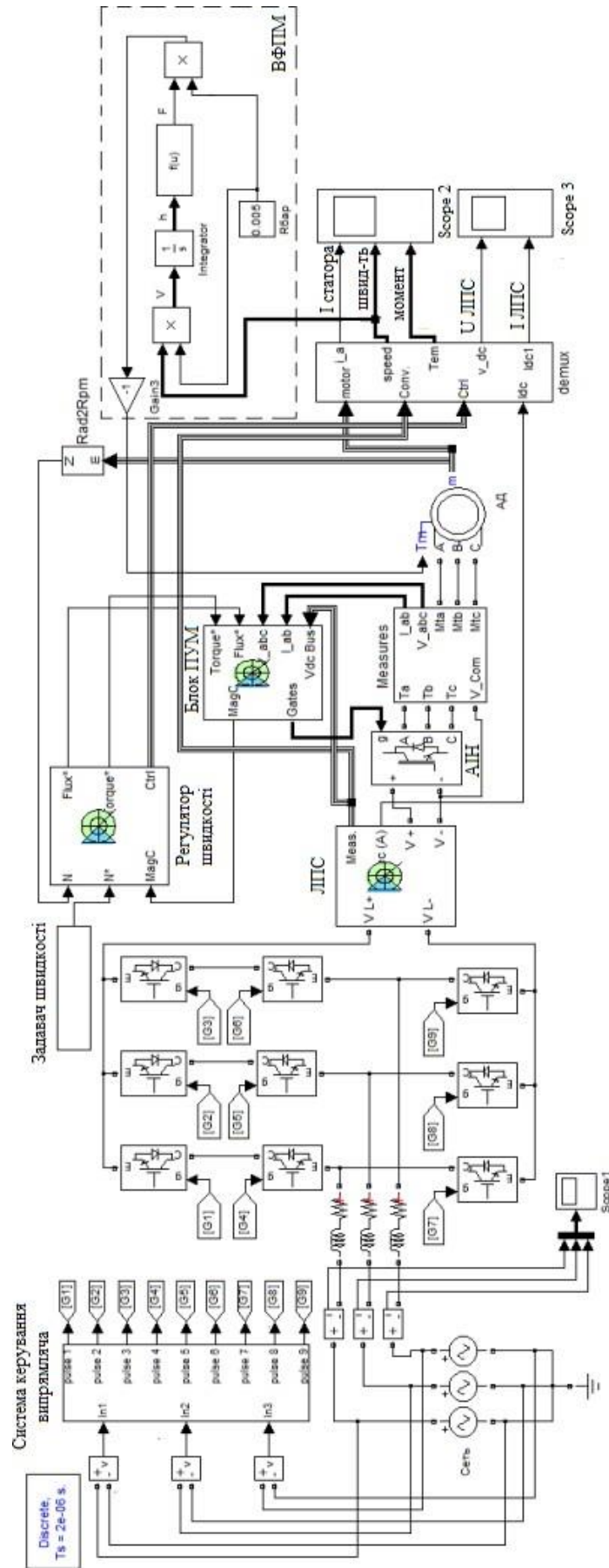


Рисунок 5.4 – Модель електропривода ШПМ с ПУМ в ППП Matlab Simulink

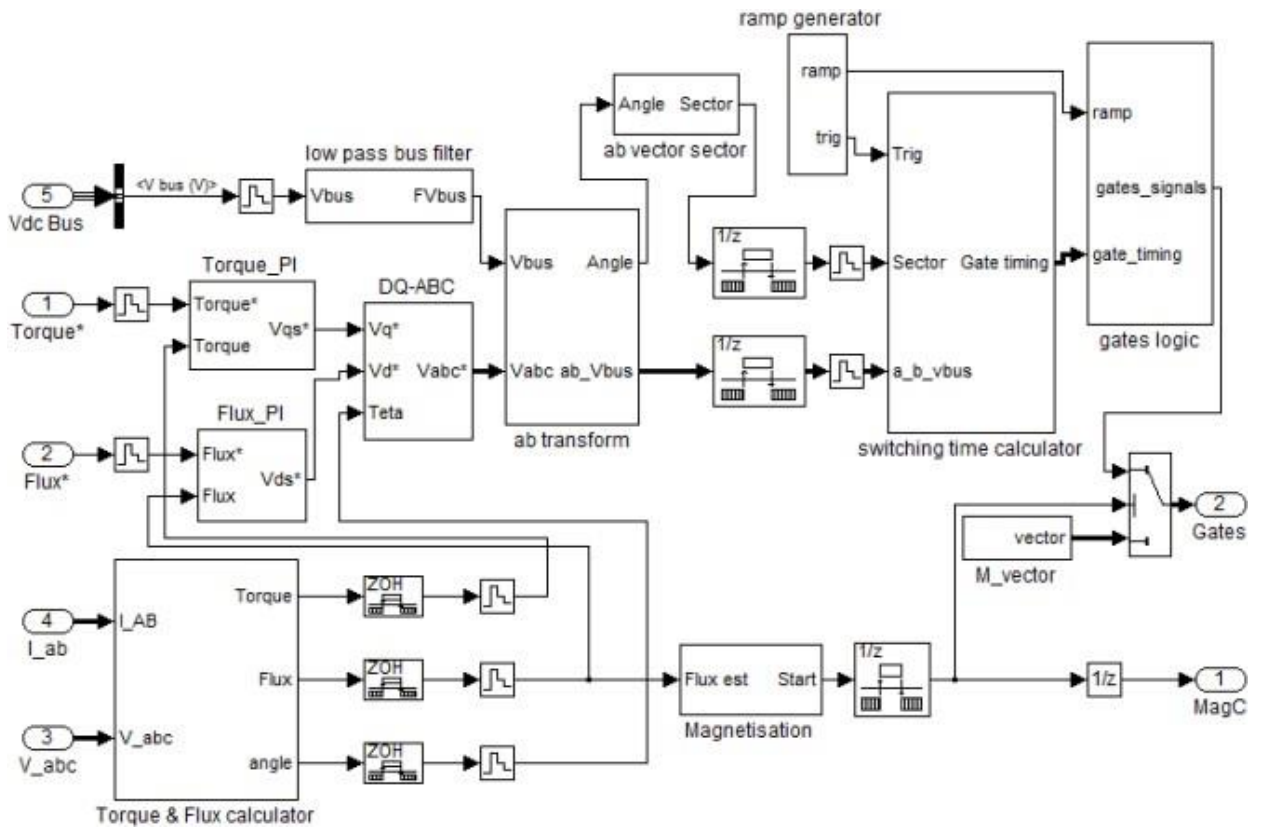


Рисунок 5.5 – Модель блоку ПУМ в ППП Matlab Simulink

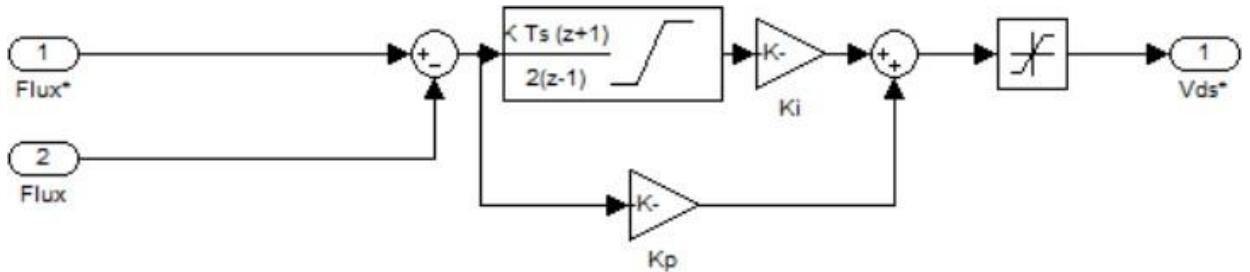


Рисунок 5.6 – Модель ПІ-регулятора потокозчеплення в ППП Matlab Simulink

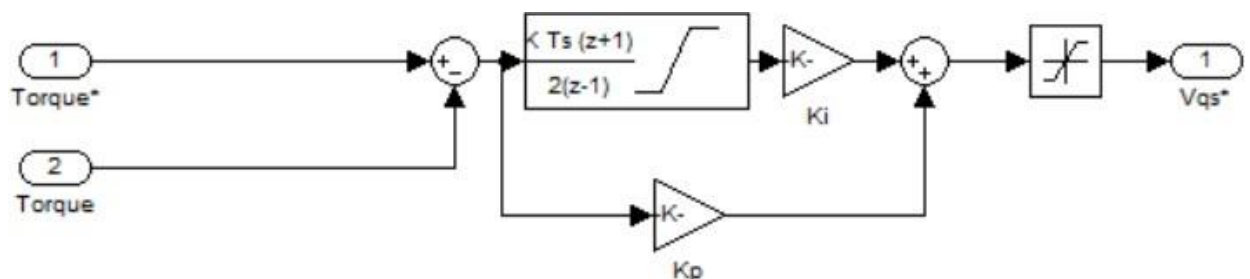


Рисунок 5.7 – Модель ПІ-регулятора моменту в ППП Matlab Simulink

Модель ПІ-регулятора швидкості середовищі Matlab Simulink приведено на рисунку 5.8.

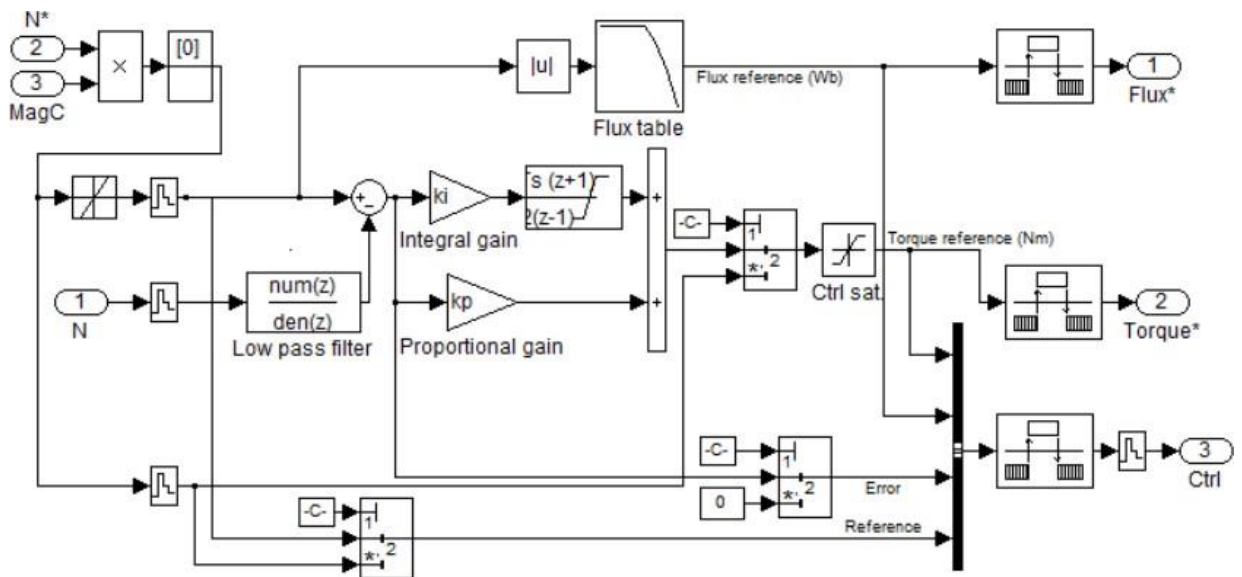


Рисунок 5.8 – Модель ПІ-регулятора швидкості в ППП Matlab Simulink

На рисунку 5.9 представлені осцилограми струму на стороні мережі живлення у разі рекуперації протягом циклу роботи електроприводу ШПУ.

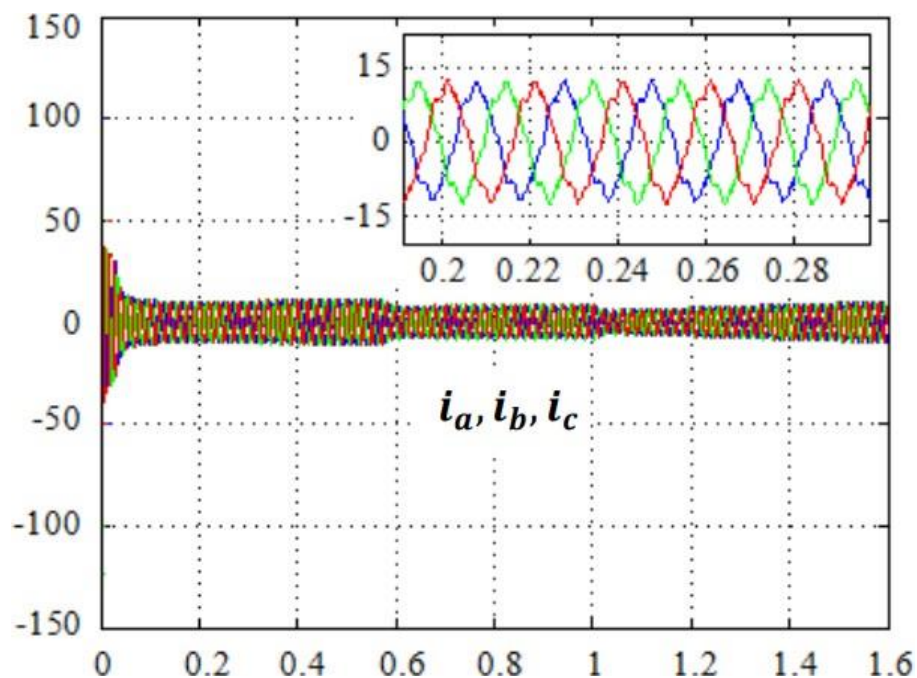


Рисунок 5.9 – Модель ПІ-регулятора швидкості в ППП Matlab Simulink

Перехідні процеси швидкості обертання ротора АД та електромагнітного моменту в режимі рекуперативного гальмування, що відповідають режиму рекуперації на ділянці уповільнення електроприводу

ШПУ, приведені на рисунку 5.10.

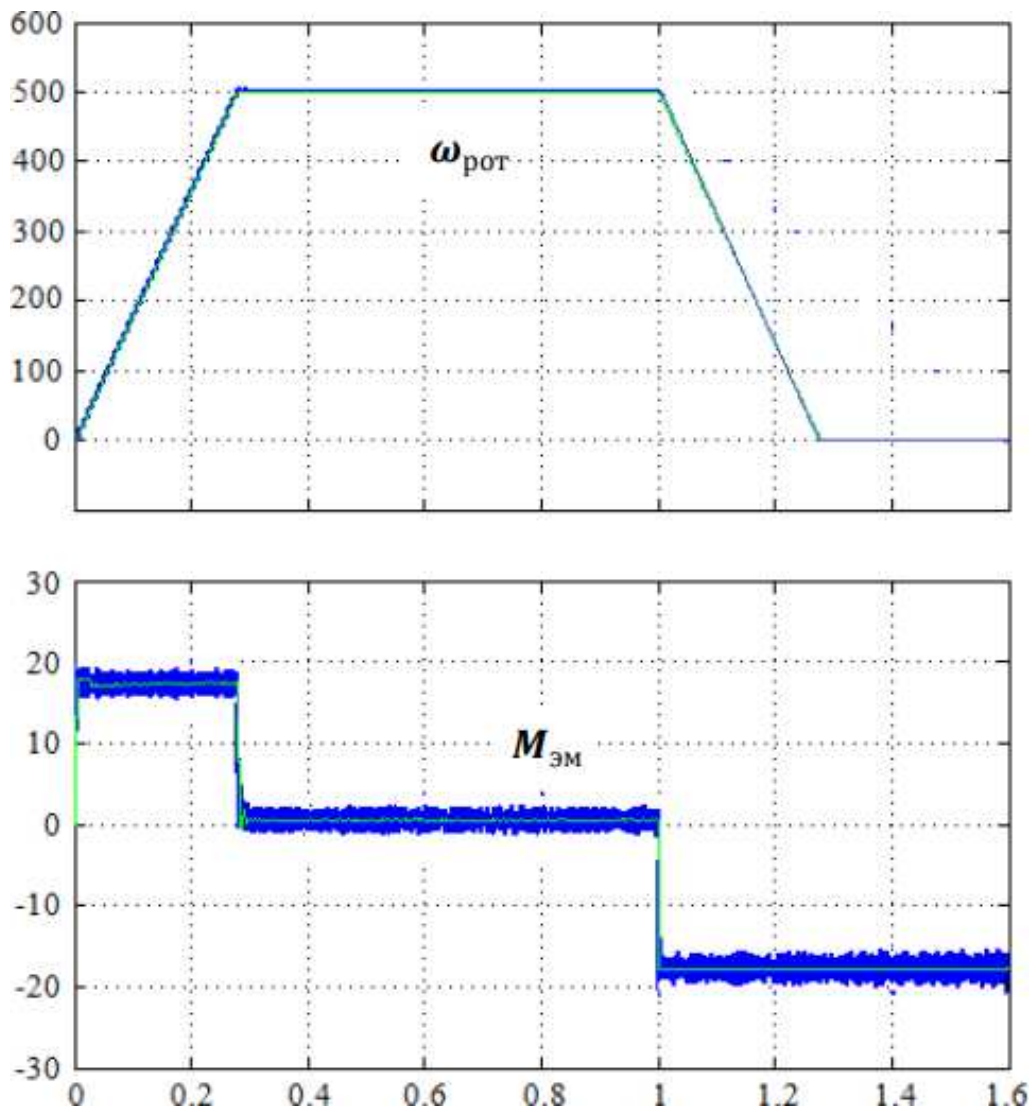


Рисунок 5.10 – Перехідні процеси швидкості обертання ротора та електромагнітного моменту електропривода ШПУ в режимі рекуперативного гальмування

Отримані перехідні процеси свідчать про працездатність запропонованої системи управління швидкістю посудин ШПУ з удосконаленою структурою системи управління та розробленою методикою налаштування контурів регулювання в режимі рекуперативного гальмування. Також отримані результати свідчать про працездатність комплексної імітаційної моделі системи електроприводу ШПУ у режимі рекуперативного гальмування. Таким чином, запропонована система електроприводу з

удосконаленою структурою ланки рекуперації та модернізованою системою управління більш ефективна, оскільки показала високі динамічні показники електроприводу в режимі рекуперативного гальмування. Використання розробленої системи електроприводу в режимі рекуперативного гальмування дозволяє значно підвищити енергоефективність електропривода ШПУ.

5.3 Висновок

Розроблено імітаційну модель системи електропривода ШПУ із врахуванням модернізованої структури системи управління, а також оптимізованої структури контурів регулювання в середовищі ППП Matlab Simulink. Розроблена модель враховує канал пружного моменту навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Отримано осцилограми струмів на стороні мережі живлення в режимі рекуперативного гальмування та перехідні процеси швидкості обертання та електромагнітного моменту роботи електроприводу ШПУ. Отримані результати підтверджують працездатність розробленої структури системи керування електроприводом ШПУ, а також оптимізованої структури контурів регулювання.

6.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Електропривод шахтної підйомної установки має певний спектр особливостей ефективної експлуатації та вимог функціонування, серед них [4-6]:

1. Двигун шахтної підйомної установки працює у руховому та гальмівному режимі на різних ділянках робочого циклу. При цьому час роботи в гальмівному режимі можна порівняти з часом роботи в режимі руху;

2. Двигун установки повинен забезпечувати рух підйомної судини як вгору, так і вниз, тобто повинен мати можливість обертання в обох напрямках (реверсування);

3. Привод повинен забезпечувати великий діапазон регулювання швидкості із збереженням постійного прискорення та перевантажувальної здатності машини;

4. Привод повинен забезпечувати режим розгальмовування, тобто забезпечення необхідного технологією підйому динамічного моменту при $\omega = 0$ і режим гальмування з точною зупинкою підйомної посудини.

Станом на 2022 р. більшість ШПУ оснащені електроприводом постійного струму, побудований за допомогою "керованого перетворювача - двигуна DC" або "генератор двигуна", синхронним електричним приводом або асинхронним електроприводом з фазовим ротором та роторною станцією (АД ФР). Використання електроприводів на основі АД ФР з роторною станцією обумовлена збереженням потужності перевантаження двигуна в цій схемі на всьому діапазоні регулювання швидкості. У той же час такі електроприводи мають низьку ефективність, а контроль швидкості в них здійснюється шляхом ступеневої зміни опору роторною станцією, що призводить до виникнення динамічних навантажень у канатах, ривкам та ударам, а також призводить до втрати енергії.

Цих недоліків позбавлені системи електроприводу з частотним керуванням асинхронними двигунами. В даний час все більше і більше

систем електроприводу побудовані відповідно до схеми "Перетворювач частоти – асинхронний двигун". У цьому випадку, як правило, двигуни не замінюються, а також додаються перетворювачі частоти, а системи керування модернізуються.

В якості базового варіанту системи електропривода досліджуваного механізму приймається система ПЧ-АД. Вона розглядається як така, що підлягає модернізації за рахунок введення в структуру системи керування дволанкового перетворювача з ланкою рекуперації електричної енергії для віддачі енергії гальмування в мережу живлення.

В таблиці 6.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на модернізацію електропривода степенів рухомості промислового робота [20].

Таблиця 6.1 – Капітальні витрати на електроустаткування базового та нового варіантів

Найменування електрообладнання	Кошторисна вартість варіанту	
	Базова (ПЧ-АД)	Нова (ДПЧ-АД, система рекуперації)
Вартість двигуна А13-37-6 Р=500 кВт)	320480,0	320480,0
Вартість системи керування	539940,0	567720,0
Кабелі, апарати захисту, сенсори та інше обладнання	112440	130440
Вимірювальні прилади, показчики, реєстратори захищеного виконання	28200	28200
Спеціалізований інструментарій	17750	17750
ІКС (інформ.-керуюча система)	—	42600
Апаратна надбудова ДПЧ (ланка для рекуперації електроенергії – ЛРЕ)	—	38680
Разом капіталовкладення:	1018810,0	1145870,0
Транспортні витрати 13%	132445,3	148963,1
Всього ціна обладнання	1151255,3	1294833,1
Монтажні роботи 10%	115125,5	129483,3
Капітальні витрати	1266380,8	1424316,4

Отже, $K_6 = 1266380,8$ грн.; $K_n = 1424316,4$ грн.

Пропонована схема електропривода шахтної підйомної установки на основі дволанкового перетворювача частоти та ланки рекуперації електроенергії технічно реалізується на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, перетворювача частоти та системи управління перетворювачем, яка побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат та забезпечує компенсацію впливу кінцевого навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування.

6.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік [20].

Експлуатаційні витрати включають такі складові:

1. Амортизаційні відрахування E_a .
2. Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату).
3. Витрати на силову електроенергію E_e .
4. Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$.
5. Інші витрати $E_{ін}$.

Вираз, який включає в себе усі вище перераховані складові експлуатаційних витрат, має вигляд:

$$Z = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (6.1)$$

6.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування для базового та нового варіантів становлять (норма амортизації становить 10 % в рік):

$$E_{аб} = 1266380,8 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 126638,0 \text{ грн.};$$

$$E_{ан} = 1424316, \text{ грн.} \cdot 0,10 = 142431,6 \text{ грн.}$$

6.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки класом напруги до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці. Враховуючи надзвичайно високий рівень відповідальності даного об'єкта галузі промисловості приймаємо відповідно IV та V тарифні розряди для базового та нового варіантів розрахунку [20].

Таблиця 6.1 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_z = E_{зо} + E_{зд}, \quad (6.2)$$

де $E_{зо}$ – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{зд}$ – додаткова заробітна плата;

$$E_{зо} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{ефо} \cdot K_c \cdot \beta, \quad (6.3)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують систему керування шахтної підйомної установки ($N = 2$ чел.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду (22 грн./год);

K – тарифний коефіцієнт ($K_б = 2,03$, $K_н = 2,33$);

$\Phi_{ефо}$ – ефективний фонд робочого часу по обслуговуванню за рік (приймаємо рівним 220 год.);

K_c – коефіцієнт співвідношень, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$ для базового варіанту, $\beta = 0,7$ для нового варіанту).

Розрахуємо $E_{зо}$ для базового та нового варіантів.

$$E_{зо б} = 2 \cdot 22 \cdot 2,03 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 1 = 19650,4 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зо н} = 2 \cdot 22 \cdot 2,33 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 0,7 = 15788,1 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{зд}$ (за професійну та майстерну діяльність) становить 10 % основної заробітної плати. $E_{зд}$ для базового та нового варіантів відповідно становить:

$$E_{зд б} = 19650,4 \cdot 0,10 = 1965,1 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зд н} = 15788,1 \cdot 0,10 = 1578,8 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату для базового та нового варіантів зведемо в таблицю 6.2.

Таким чином в результаті виконання підстановки у вираз (6.2) маємо:

$$E_{з б} = 19650,4 + 1965,1 = 21615,5 \text{ (грн.)},$$

$$E_{з н} = 15788,1 + 1578,8 = 17366,9 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 10.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Базовий варіант	Новий варіант
Основна заробітна плата, $E_{зо}$, грн.	19650,4	15788,1
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$, грн.	1965,1	1578,8
ВСЬОГО з нарахуванням, грн.	21615,5	17366,9

6.2.3 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot V \cdot \Phi_{еф} \cdot K_{вм} \cdot K_3, \quad (6.4)$$

де B – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для непобутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з II класом напруги з ПДВ складає приблизно 6,1 грн/кВт·год. (4,59 грн. - вартість закупівлі 1 кВт год, 1,51 грн. – вартість розподілу 1 кВт год. електроенергії – <https://vin.enera.ua/el/tariff>).

P – встановлена потужність приводного двигуна (500 кВт);

η – ККД установки;

$\Phi_{\text{ефр}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом);

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Коефіцієнт корисної дії системи електропривода обчислено як добуток ККД двигуна і силового перетворювача. Для базового варіанту ККД складає 0,8. Для нового варіанту із врахуванням віддачі електричної енергії в мережу на рівні 3-5% (в різних режимах роботи установки) ККД приймаємо рівним 0,88. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,8 в обох варіантах, а коефіцієнт завантаження для базового варіанту рівний 0,78, а для нового – 0,8.

Ефективний фонд робочого часу для двох варіантів при режимі роботи в 1 зміну протягом 95 % часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{ефр}} = 250 \text{ днів} \cdot 8 \text{ год.} \cdot 0,95 = 1900 \text{ (год.)}$$

Отже, з виразу (6.4) для базового та нового варіантів маємо:

$$E_{\text{ЕБ}} = \frac{500}{0,8} \cdot 6,1 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,78 = 4\,520\,100 \text{ (грн./рік)}.$$

$$E_{\text{ЕН}} = \frac{500}{0,85} \cdot 6,1 \cdot 1900 \cdot 0,8 \cdot 0,81 = 4\,417\,835 \text{ (грн./рік)}.$$

6.2.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів, у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Графік планово-попереджувальних ремонтів для базового та нового варіантів наведено в таблицях 6.3 та 6.4.

Таблиця 6.3 – Графік ремонтів для базового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	7			6			7			6		7	33
АД з КЗ ротором		5			5			5			6		21
Кабельна мережа	4					4				4		6	18
Апарати ком-ії та захисту		10				10				11			31
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												115	

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер п'ятого розряду для базового варіанту та шостого – для нового (система на базі новітнього обладнання потребує вищої кваліфікації працівника). Із врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт, (6.3) прийме вигляд:

$$E_{zo} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эфр}}, \quad (6.5)$$

Таблиця 6.4 – Графік для нового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудомісткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ДПЧ	6			5			4			6		5	26
АД з КЗ ротором		4			5			4				5	18
Кабельна мережа	4					4						6	14
ІКС, ЛРЕ		5			4			5				4	18
Апарати ком-ії та захисту		7				6				6			20
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												108	

З попередніх розрахунків відомо, що $T_1 = 22$ грн./год, отже, маємо:

$$E_{зоб} = 22 \cdot 2,7 \cdot 115 = 6831 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зон} = 22 \cdot 2,33 \cdot 108 = 5536,1 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату (38 %):

$$E_{знб} = 6831 \cdot 0,38 = 2595,8 \text{ (грн.)},$$

$$E_{знн} = 5536,1 \cdot 0,38 = 2103,2 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

- для базового варіанту: $6831 + 2595,8 = 9426,8$ (грн.),
- для нового варіанту: $5536,1 + 2103,2 = 7639,3$ (грн.).

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймаємо рівними 15 % витрат на основну заробітну плату. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становлять:

- для базового варіанту: $9426,8 \cdot 0,15 = 2947,6$ (грн.);
- для нового варіанту: $7639,3 \cdot 0,15 = 2368,2$ (грн.).

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{прб} = 9426,8 + 2947,6 = 12374,4 \text{ (грн.)},$$

$$E_{прн} = 7639,3 + 2368,2 = 10007,5 \text{ (грн.)}.$$

6.2.5 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін б}} = (126638,0 + 21615,5 + 4\,520\,100,0 + 12374,4) \cdot 0,05 = 234\,036,4 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{ін н}} = (142431,6 + 17366,9 + 4\,417\,835 + 10007,5) \cdot 0,05 = 229\,382,05 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за (6.1) наведемо у вигляді таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Базовий варіант	Новий варіант
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	126 638,0	142 431,6
Заробітна плата $E_{\text{зп}}$ обслуговуючого персоналу, грн.	21 615,5	17 366,9
Витрати на електроенергію E_e , грн.	4 520 100,0	4 417 835
Витрати на поточний ремонт $E_{\text{пр}}$, грн.	12 374,4	10 007,5
Інші витрати $E_{\text{ін}}$, грн.	234 036,4	229 382,1
Всього експлуатаційні витрати Z, грн.	4 914 764,30	4 817 023,1

Оскільки ми розраховуємо ефективність нової системи після модернізації, то необхідно порівняти експлуатаційні витрати, використовуючи відносні показники.

Для порівняння експлуатаційних витрат розрахуємо показник відносної економії (зменшення) витрат [20]:

$$\lambda_B = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B} \cdot 100\%, \quad (6.6)$$

$$\lambda_B = \frac{4\,914\,764,30 - 4\,817\,023,1}{4\,914\,764,30} \cdot 100\% = 1,99\%$$

З результатів наведених розрахунків робимо висновок, що модернізація системи слідкуючого електропривода є економічно доцільною. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 1,99 %.

6.3 Визначення терміну окупності нового рішення

При оцінці ефективності використання нового варіанта визначаються і порівнюються також термін окупності додаткових капітальних затрат, рік:

$$T_{ок} = (K_n - K_б) / (Z_{еб} - Z_{ен}), \quad (6.7)$$

$$T_{ок} = (1424316,4 - 1266380,8) / (4\,914\,764,30 - 4\,817\,023,1) = 1,62 \text{ (роки)}.$$

Отже, розраховані економічні показники свідчать про цілком виправдану економічну доцільність модернізації системи ЕП шатної підйомної установки та досить високу експлуатаційну надійність та енергетичну ефективність за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування [20].

Висновки: Вдосконалення системи електропривода шахтної підйомної установки на основі АД з КЗ за рахунок дообладнання системи електропривода та використання режимів рекуперативного гальмування є економічно доцільним та виправданим. За рахунок незначної модернізації системи електропривода досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 1,99 %, що підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1 Загальні положення

У цьому розділі магістерської дипломної роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі модернізації електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Аварії машин і механізмів, які використовуються на заводі, а також невиконання правил по безпечній їх експлуатації може призвести до серйозної загрози життю та здоров'ю технологічного персоналу через небезпеку професійних захворювань і травмів під час будівництва.

Відповідно до ГОСТ 12.003-74, на оперативно-ремонтний електротехнічний персонал, який здійснює обслуговування систем електропривода шахтних механізмів, впливають наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21]:

Фізичні: рухомі машини і механізми; вироби, заготовки, матеріали, що пересуваються; незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря; підвищена та понижена вологість повітря; підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів; підвищена запиленість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зони; недостатність природного освітлення; небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень вібрації; розташування робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі (підлоги); гострі кромки, задирки та шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання.

Психофізіологічні: фізичні перевантаження (динамічні); нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів). [21].

7.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

7.2.1 Технічні рішення з безпечної організації робочого місця

Живлення силового обладнання заводу та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – особливо небезпечні, так як виконуються назовні.

Все силове обладнання заводу повинно відповідати вимогам нормативних документів і на них повинна бути експлуатаційна документація, а крани та інші машини, що придбані за кордоном – повинні мати сертифікат відповідності вимогам безпеки праці. Забороняється експлуатація засобів механізації без передбачених їх конструкцією огорож, блокувань, систем сигналізації та інших засобів колективного захисту працюючих. До управління і обслуговування машин і механізмів допускаються особи (працівники), що отримали відповідну професійно-технічну підготовку, пройшли навчання і перевірку знань із безпеки праці.

Персонал, який експлуатує засоби механізації, оснащення, пристрої та ручні машини, до початку робіт повинен бути навчений безпечним методам та способам робіт відповідно до інструкцій заводу-виробника та інструкції з охорони праці. Робочі місця, засоби підмоцнування (риштовання, помости, робочі площадки тощо, які забезпечують безпеку виконання робіт на висоті) повинні відповідати вимогам цього розділу, розділу 6 цих норм, ГОСТ 24258, ГОСТ 26887, ГОСТ 27321, ГОСТ 28012. Під час виконання будівельно-монтажних робіт необхідно застосовувати переважно інвентарні засоби підмоцнування.

Робочі навантаження на риштовання в процесі виконання робіт не повинні перевищувати визначених технічною документацією. За необхідності передавання на риштовання додаткових навантажень (від підйомників, вантажопідіймальних площадок тощо) їх конструкцію необхідно перевірити на ці навантаження. У місцях піднімання людей на риштовання повинні бути вивішені плакати, на яких зазначено схеми навантажень, їх величини, а також схеми евакуації працівників на випадок аварійних ситуацій.

Під час роботи на конструкціях, під якими розташовані струмовідні частини, що перебувають під напругою, ремонтні пристосування і інструмент прив'язуються для запобігання їх падінню. Застосовувати в цих випадках монтерські запобіжні паски зі стропами з металевого ланцюга забороняється [21].

подавати деталі на конструкції чи устаткування слід за допомогою «нескінченного» канату. Працівник, який стоїть внизу, повинен утримувати канат для запобігання його розгойдуванню і наближенню до струмопровідних частин. Працівники, які виконують роботи на висоті або верхолазні роботи, повинні бути в спецодязі, що не заважає рухам. Особистий інструмент слід зберігати в сумці.

Засоби підмоцнування повинні бути зроблені з рівних робочих настилів із зазором між дошками не більше ніж 5 мм, а у разі розміщення настилу на висоті 1,3 м та вище встановлювати огорожі з суцільною бортовою обшивкою по низу. Висота огорожі повинна бути не менше ніж 1,1 м, бортові обшивки - не менше ніж 0,15 м, відстань між горизонтальними елементами огорожі - не більше ніж 0,5 м.

Засоби підмоцнування, які використовуються під час робіт у місцях, під якими здійснюються інші роботи або є прохід, необхідно виконувати настилами без зазорів. Риштування та помості висотою до 4 м допускаються в експлуатацію після їх приймання керівником робіт та реєстрації в журналі робіт, а вище ніж 4 м – після приймання комісією, призначеною особою, яка відповідає за забезпечення охорони праці в організації, та оформлення відповідного акту.

Під час приймання риштувань та підмостей повинні бути перевірені: наявність кріплень, що забезпечують їх стійкість, вузли кріплення окремих елементів, робочі настили та огороження, вертикальність стояків, надійність опорних площадок та заземлення (для металевих риштувань).

Під час виконання робіт із риштувань висотою понад 6 м і більше повинно бути улаштовано не менше ніж два настили: робочий (верхній) і захисний (нижній); кожне робоче місце на риштуваннях, що прилягає до будинку чи споруди, повинно бути захищене зверху настилом, розташованим на висоті не вище ніж 2 м від робочого настилу. Якщо під час виконання

робіт рух людей чи транспорту під риштуваннями і поблизу від них не передбачається, улаштування захисного (нижнього) настилу не обов'язкове.

Експлуатація ручного електроінструменту дозволяється у разі дотримання таких вимог [21]:

- перед кожною видачею інструменту в роботу повинна бути перевірена його комплектність та надійність кріплення деталей, справність захисного кожуху, кабелю (рукава);
- перед початком роботи повинна бути перевірена справність вимикача та машини на холостому ходу;
- під час перерв у роботі, після закінчення роботи, під час змащування, очищення, заміни робочого елемента інструменту ручні машини необхідно вимкнути та від'єднати від електричної мережі;
- ручні машини, маса яких із розрахунку на руки працюючого, перевищує 10 кг, повинні мати пристрій для підвішування;
- під час роботи з ручними машинами на висоті необхідно використовувати засоби підмоцнування (помости);
- нагляд за експлуатацією ручних машин необхідно доручати спеціально призначеній для цього особі. [20].

7.2.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [22]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі;

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки [22].

7.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

7.3.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	ПБ	15-29	70 при 25°С	0,2-0,5
Холодний	ПБ	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдуву;
- провітрювання приміщення.

7.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 7.2 [21].

Таблиця 7.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглецю оксид (СО)	20	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

- провітрювання приміщення;

- цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;
- встановлення пиловловлюючих засобів.

7.3.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення.

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на:

- природне освітлення – освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (e_n). КПО – відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна.

Штучне освітлення.

Штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення – освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до розташування обладнання. Комбіноване освітлення - додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місьцеве освітлення – освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Характеристика зорових робіт – малої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Таблиця 7.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	3	1,8

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального [21, 22].

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

7.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки» (таблиця 7.4).

Таблиця 7.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Шум порушує нормальну роботу шлунку, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори [21-22].

7.5 Вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу - За. Тобто технологічна вібрація діюча на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються сама лінія та вентилятори, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 10.6.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Таблиця 7.6 – Середньоквадратичні значення

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		м·с ⁻²	ДБ	м·с ⁻² ·10 ⁻²	ДБ
За	Z ₀ , Y ₀ , X ₀	0,1	100	0,2	92

7.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці [21]. Робота монтажника будівельних конструкцій потребує великих фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

1. Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (ккал/м) – до 290; зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, кг/(Вт): при регіональному навантаженні (для чоловіків) – 13000; при загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – до 44000; маса вантажу, що постійно підіймається та переміщується вручну, кг – до 30 кг; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук)- до 40000; при регіональному навантаженні(участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кг/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, в позі «стоячи» – до 60% часу зміни;нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів; переміщення у просторі (переходи через виконання технологічного процесу) – по горизонталі більше 8, вертикалі – 4 км.

7.6.2 Класи умов праці за показниками напруженості праці

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи - рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності

Сенсорні навантаження: зосередження (%за зміну) - більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год) - більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни) [21].

7.7 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи електропривода шахтної підйомної установки в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Всі системи електропостачання (СЕР) промислових об'єктів є досить вразливими до дії загрозливих чинників, що виникають у надзвичайних ситуаціях. Тому важливим питанням є забезпечення високої стійкості роботи СЕР. В даному випадку оцінка її стійкості може бути проведена за допомогою моделювання його ураження, що враховують можливі наслідки ураження людей, виникнення пожеж, виходу з ладу елементів енергетичних систем [21].

Дія радіації на матеріали залежить від виду випромінювання, дози, природи опроміненої речовини та від умов навколишнього середовища. В енергетичних системах використовують різні матеріали: метали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли), найбільш чутливими до радіації є метали, бо в них велика концентрація вільних носіїв. Основними заходами підвищення радіаційної стійкості є: використання радіаційно-стійких елементів та матеріалів; застосування різних екранів, або активного захисту від дії радіації.

При взаємодії гама-випромінювань та деяким середовищем, цьому середовищу надається певна кількість енергії. Більша частина цієї енергії йде на поступальний рух електронів та іонів, що були утворені в процесі іонізації. Подальшу іонізацію викликають первинні електрони, що мають велику енергію. Як наслідок виникають тимчасові електричні та магнітні поля.

Виникнення електромагнітного імпульсу (ЕМІ), може викликати високі імпульси струму та напруги в кабельних лініях електропередачі, системи зв'язку, обчислювальних машин, антен радіостанцій тощо. В результаті імпульс струму чи напруги проникає в систему і спричиняє пошкодження, ступінь яких залежить від чутливості складових системи вузлів. ЕМІ може поширюватись на десятки кілометрів в навколишньому середовищі і по різних комунікаціях, здійснюючи вплив на об'єкти там, де ударна хвиля, світлове вимірювання і проникаюча радіація втрачають своє значення, як вражаючі фактори.

Результатом такого впливу може бути вихід із ладу різних пристроїв та спорядження. Особливо негативний вплив електромагнітного імпульсу на обладнання, яке не має спеціального захисту (вимикачі, різні «домішки» до системи проводів, електромагнітне екранування тощо).

Електромагнітний імпульс являє собою велику небезпеку для елементів СЕП, зокрема вимикачі та трансформатори, добре захищених від дії інших вражаючих факторів. Тому захист елементів від механічних пошкоджень не захищає від дії електромагнітного імпульсу. Саме тому, обов'язковим для обладнання СЕП є дослідження стійкості його роботи в умовах впливу електромагнітного імпульсу та іонізуючих випромінювань.

7.7.1 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання шахтного обладнання міста в умовах дії іонізуючих випромінювань

Критерієм стійкості роботи енергетичного обладнання СЕП є граничне значення експозиційної дози ($D_{гр}$, Р), при якому в елементній базі можуть виникати зворотні зміни. Визначаємо граничні значення експозиційних доз для елементів СЕП. По мінімальному значенню $D_{гр}$, визначаємо границю стійкості системи в цілому. Так як трансформатори та вимикачі мають мінімальне значення $D_{гр}$, то далі для них розрахована Дослідження стійкості роботи при дії ІВ та ЕМІ, а кабельні лінії та повітряна лінія мають грозозахист, і стійкі до дії ЕМІ, то подальші розрахунки для них не виконуються. Результати заносимо у таблицю 7.7.

Розрахуємо можливу дозу для СЕП, граничний час експлуатації 10р.

$$D_{ем} = \frac{2 \cdot P_{1max} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{осл}} = \frac{2 \cdot 4,92 \cdot (\sqrt{87660} - \sqrt{1})}{1} = 2903,53 \quad (P).$$

Таким чином система буде працювати стійко, так як, можлива експозиційна доза менша за граничну $2903,53 < 100000$.

Таблиця 7.7 – Граничні дози для елементів житлової забудови

Елементи СЕП	$g_{рі}, P$	$g_{р}, P$
Кабельні лінії ААБ (3x70 мм ²)	0 ⁸	0 ²
Кабельна лінії ААБ (3x120 мм ²)	0 ⁹	
Трансформатори	0 ²	
Вимикачі	0 ⁴	

Визначаємо допустимий час роботи елементів СЕП за формулою:

$$t_{дон} = \left(\frac{D_{сп} \cdot K_{осл} + 2 \cdot p_{1max} \cdot \sqrt{t_p}}{2 \cdot p_{1max}} \right)^2$$

Отже,

$$t_{\text{доптр-р}} = \left(\frac{10^2 \cdot 1 + 2 \cdot 4,92 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,92} \right)^2 = 116,7 \cdot 10^2 \text{ год} = 13,3 \text{ (років)}$$

$$t_{\text{допвим}} = \left(\frac{10^4 \cdot 1 + 2 \cdot 4,92 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,92} \right)^2 = 9631 \cdot 10^4 \text{ год} = 10,9 \text{ (років)}$$

Отже, допустимий час роботи трансформаторів складатиме не менше 13 років, а вимикачів – близько 11 років.

7.7.2 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання району житлової забудови в умовах дії електромагнітного імпульсу

Напряга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині:

$$U_{\Gamma} = E_{\text{в}} \cdot l_{\Gamma},$$

$$U_{\text{в}} = E_{\text{в}} \cdot l_{\text{в}},$$

де $E_{\text{в}}$ – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

l_{Γ} – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи (м),

$l_{\text{в}}$ – довжина вертикальної струмопровідної частини системи (м).

Розрахуємо U_{Γ} для трансформаторів та вимикачів:

$$U_{\Gamma\text{тр-р}} = 11,78 \cdot 1,48 \cdot 10^3 = 17460 \text{ (кВ/м)},$$

$$U_{\Gamma\text{вим}} = 11,78 \cdot 0,68 \cdot 10^3 = 8051 \text{ (кВ/м)}.$$

Допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N,$$

де N – відсоток допуску,

$U_{\text{ж}}$ – напруга живлення;

$$U_{\text{дон}} = 10 + \frac{10}{100} \cdot (\pm 5) = 9,5 - 10,5 (\text{кВ})$$

За критерієм стійкості роботи радіоелектронних систем, або окремих їх елементів в умовах дії електромагнітних випромінювань можна прийняти коефіцієнт безпеки, який для нормальної роботи механізму повинен бути рівним [22]:

$$K_{\text{б}} \geq 40 \text{ (дБ)}.$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної і вертикальної безпеки:

$$K_{\text{бгі}} = 20 \cdot \lg(U_{\text{д}} / U_{\text{гі}}),$$

$$K_{\text{бгі}} = 20 \cdot \lg(U_{\text{д}} / U_{\text{гі}}).$$

$$K_{\text{бГТр-р}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{17460}\right) = -9,3 \text{ (дБ)},$$

$$K_{\text{бГВим}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{8051}\right) = 5,43 \text{ (дБ)}.$$

Так як для трансформатора і вимикача $K_{\text{бз}} < 40$ дБ, то обладнання не буде працювати стійко.

Для збільшення стійкості слід застосувати екранування. Перехідне затухання екрану:

$$A = K_{\text{Бном}} - K_{\text{Бмін}}, \text{ (дБ)};$$

де $K_{\text{Бном}}$ – номінальний коефіцієнт безпеки (40 дБ),

$K_{\text{Бмін}}$ – мінімальний коефіцієнт безпеки, отриманий при розрахунку;

$$A = 40 - 5,43 = 34,57 \text{ (дБ)}.$$

Товщина захисного екрану

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}$$

де f – частота,

$$t = \frac{34,57}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,12 \quad (\text{см}).$$

Розрахуємо U_B трансформатора 630 кВА:

$$U_{BTP} = 11,58 * 0,251 = 2,91 (\text{кВ/м}).$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної безпеки для трансформатора:

$$K_{бзTP-p} = 20 \lg \left(\frac{9500}{2,91} \right) = 70,2 \quad (\text{дБ}).$$

Так як $K_{бз} < 40$ дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Розрахуємо U_B для вимикача 10 кВ:

$$U_B = 11,58 * 0,335 = 3,88 (\text{кВ/м}).$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для вимикача:

$$K_b = 20 \lg \left(\frac{9500}{3,88} \right) = 67,7 \quad (\text{дБ}),$$

Так як $K_{бз} < 40$ дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Результати зведемо у таблицю 6.

Приймаємо, що вибір товщини захисного екрану для кабельних ліній не розглядається.

Таблиця 7.8 – Результати розрахунків пасивного екрану елементів СЕП

Елементи СЕП	$U_r, \text{кВ}$	$U_B, \text{кВ}$	$K_{бв}, \text{дБ}$	$K_{б,г}, \text{дБ}$	Товщина захисного екрану, см
Трансформатори	17460	2,91	70,2	-9,3	0,12
Вимикачі	8051	3,88	67,7	5,43	0,11

Отже, спроектована система електроживлення буде працювати стійко до дії іонізуючих випромінювань. А до дії ЕМІ – не стійко, але при

застосуванні захисного екрану для трансформаторів та вимикачів (0,12см), буде працювати стійко.

Відповідно, наша система при застосуванні вище вказаних заходів буде працювати стійко в умовах НС.

Висновок: Провівши аналіз, щодо стійкості системи електропостачання до дії ЕМІ, видно, що трансформатори та вимикачі найбільш уразливі, тому передбачила застосування захисного екрану (0,11см). Інші елементи (кабельні лінії) стійкі до дії ЕМІ, з коефіцієнтами безпеки 70,2 та 67,7 відповідно. Отже дія ЕМІ та іонізуючого випромінювання негативно впливають на роботу СЕП, що призводить до виходу з ладу, або ж повного знищення елементів системи електропостачання району житлової забудови, зокрема трансформатори та вимикачі. В результаті дослідження стійкості роботи системи електропостачання району житлової забудови до дії іонізуючих випромінювань, були визначено, що її елементи є стійкими, тому проводити додаткові заходи не потрібно.

Також в даному розділі було проведено дослідження стійкості роботи системи електропостачання шахтного обладнання в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах дії іонізуючих випромінювань, час роботи якої в заданих умовах становить 13 років, для трансформаторів та 11 років для вимикачів, при рівні радіації 4,92 Р/год. Досліджена стійкість роботи СЕП в умовах впливу електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування електропривода та отримано такі результати досліджень:

1. Розглянуто можливі шляхи отримання енергії рекуперації в односудинних та двосудинних підйомних установках у режимі рекуперативного гальмування системи електроприводу. Приведено класифікацію шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії.

2. Запропоновано математичну модель ЕМС підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування. Математичний опис складається з опису дволанкового перетворювача частоти, асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором, механічної частини підйомної установки, що складається з вузлів посудини з кінцевим навантаженням та противагою. Розроблена математична модель системи електроприводу ШПУ в режимі рекуперативного гальмування враховує зміну величини кінцевого навантаження ШПУ, змінну жорсткість канатів та процеси, що протікають у перетворювачі частоти.

3. Розроблено модернізовану систему управління швидкістю посудин ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Розроблена структура побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат та забезпечує компенсацію впливу кінцевого навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Проведено комп'ютерне моделювання існуючої системи електроприводу ШПУ на основі дволанкового перетворювача частоти з активним випрямлячем напруги зі стандартними налаштуваннями регуляторів системи керування. Встановлено, що при стандартному налаштуванні регуляторів величина перерегулювання каналом

електромагнітного моменту АД має значення $\sigma=7\%$, що неприйнятно з точки зору швидкодії системи електроприводу. Запропоновано поетапну методику синтезу контурів регулювання, що дозволяє оцінити вплив зовнішніх збурювальних впливів (вплив кінцевого навантаження ШПМ) та покращити швидкість системи електропривода ШПУ.

4. Розроблено імітаційну модель системи електропривода ШПУ із врахуванням модернізованої структури системи управління, а також оптимізованої структури контурів регулювання в середовищі ППП Matlab Simulink. Розроблена модель враховує канал пружного моменту навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Отримано осцилограми струмів на стороні мережі живлення в режимі рекуперативного гальмування та перехідні процеси швидкості обертання та електромагнітного моменту роботи електроприводу ШПУ. Отримані результати підтверджують працездатність розробленої структури системи керування електроприводом ШПУ, а також оптимізованої структури контурів регулювання.

5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бешта О. С., Балахонцев О. Б. Электропривод шахтных подъемных установок. Перспективы развития // Гірничча електромеханіка та автоматика. – 2007. – Вип.78/2007. с.115-118.
2. Остроухов І. О., Борисенко В.Ф. Порівняльний аналіз систем електроприводів шахтних підйомних установок // Збірник трудів ДонНТУ. - 2005. –с.143-145.
3. Дацьковський Л. Х. Роговий В.І. Электропривод шахтных стационарных установок. Современный стан та перспективи// Електромашинобудування та обладнання. – 2006. – Вип. 66/2006. с.85-93.
4. Datskovskii, L. Kh. Electric drives of mine-lifting machines / L. kh Datskovskii, V. I Rogovoi, I. S. Kuznetsov, I. A. Kuz'min, P. G. Vainstein, A. V. Biryukov // Russian Electrical Engineering. — 2010. — Vol 81. — No 1. — P. 15 – 30.
5. Anders Carlson. The back to back converter. Control and design / Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology. – Sweden, 1998. – 114 pp.
6. Пугачёв, Е.В. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Е.В. Пугачёв, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, В.С. Иванов, В.А. Корнеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. – №5 (111). – С. 111-116.
7. Синюкова, Т.В. Системы частотного асинхронного электропривода с корректирующими элементами и прямым управлением моментом: диссертация кандидата технических наук. – Липецк, 2015.-166 с.
8. Островляничик, В.Ю. Асинхронный электропривод шахтной подъемной установки, построенный по схеме машины двойного питания с комбинированным управлением / В. Ю. Островляничик, И. Ю. Поползин // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2016. — №3. — С. 303 – 309.

9. Kubota, H. Speed sensorless field-oriented control of induction machines with rotor resistance adaptation / H. Kubota, K. Matsuse // IEEE Transactions on Industry Application. — 1994. — Vol. 30. — No.5. — P. 1219 – 1224.

10. Akagi, H. Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system / H. Akagi, H. Sato // IEEE Transactions on Power Electronics. — January 2002. — Vol. 17. — №1. — P. 109 – 116

11. Нусратов, П.Р. Сравнительный анализ преобразователей частоты в режиме генераторного торможения с рекуперацией энергии в питающей сети / П.Р. Нусратов // Наука и образование в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 января 2015 г.: в 5 частях. Часть III. М.: «АР-Консалт», 2015 г. – С. 33-36.

12. Нусратов, П.Р. Рекуперативное торможение асинхронного электропривода / П.Р. Нусратов // Наука, образование, общество: актуальные вопросы и перспективы развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 мая 2015 г.: в 3 частях. Часть I. М.: «АР-Консалт», 2015 г. – С. 51-52.

13. Пугачёв, Е.В. Спектральный анализ тока и напряжения электропривода переменного тока с двухзвенным преобразователем частоты / Е.В. Пугачёв, А.С. Иванов, П.Р. Нусратов, В.С. Иванов // Вестник таджикского национального университета. 2014. – № 1 (126). – С. 95-100.

14. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

15. Roberts, P. Performance of Rotors in a Brushless Doubly-Fed Induction Machine (BDFM) [Электронный ресурс] / P. C. Roberts, R. A. McMahon, P.J. Tavner, J. M. Maciejowski, T. J. Flack, X. Wang // International Conference of Electrical Machines, 2004, Cracow, Poland. URL : <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/pryw/bienpdf/dfim2.pdf>

16. Голуб А.П., Кузнецов Б.И., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системы управления электроприводами: Навчальний посібник. – К.: НМК ВО, 1992. – 352с.

17. Онищенко, Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. — М. : Энергия, 1979. — 200 с.

18. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

19. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)», Вінниця, 2022. [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 3 с.

20. Демов О. Д., Бірюков О. О., Мельничук Л. М., Демов А. Д., Бірюков А. А., Мельничук Л. М., Demov O. D., Biryukov A. A., Melnychuk L. M.. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві. Демов О. Д. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві [Текст] : навчальний посібник / О. Д. Демов, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 92 с.

21. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с. управління моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4.

22. Ерофеев, Г. С. Проблемы безопасности шахтных подъемов Кузбасса / Г. С. Ерофеев, В. И. Завгородний // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной областях. Труды Третьей Всероссийской научно практической конференции. — Новокузнецк : СибГИУ, 2006. — С. 7 – 11.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

«20» вересня 2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ ЗА РАХУНОК
ВИКОРИСТАННЯ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ**

08-16.МКР.009.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

Василь КУТІН

«20» вересня 2022 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-21м

Олександр ЯРОСЛАВ

«20» _____ 2022 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування».

Скорочене найменування розробки – «Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Шахтні підйомні установки (ШПУ) пов'язують підземні ділянки шахт з ділянками, які знаходяться на поверхні. Вони визначають продуктивність процесу виробництва, оскільки обсяг виробництва обмежується обсягом копалин, які можуть бути експортовані.

4 Вимоги до розробки

Аналізуючи механічні характеристики машини в різних режимах, функціонування машини передбачає розбиття робочої зони механічних характеристик машини на ділянки, в яких механічні характеристики машини не змінюються якісним чином. Виділимо такі ділянки: розгальмовування, розгін з частотною корекцією, робота на заданій швидкості в режимі руху, гальмування в рекуперативному режимі, робота в області малих швидкостей, зупинка приводу, реверсування при нульовій швидкості.

5 Комплектація розробки

Пропонована схема електропривода шахтної підйомної установки з рекуперацією електричної енергії технічно реалізується на основі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором, дволанкового перетворювача частоти та системи управління перетворювачем, що працює під контролем інформаційно-керуючої системи (ІКС).

6 Джерела розробки

1. Бешта О. С., Балахонцев О. Б. Електропривод шахтних підйомних установок. Перспективи розвитку // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2007. – Вип.78/2007. с.115-118.

2. Остроухов І. О., Борисенко В.Ф. Порівняльний аналіз систем електроприводів шахтних підйомних установок // Збірник трудів ДонНТУ. - 2005. –с.143-145.

3. Дацьковський Л. Х. Роговий В.І. Електропривод шахтних стаціонарних установок. Сучасний стан та перспективи// Електромашинобудування та обладнання. – 2006. – Вип. 66/2006. с.85-93.

4. Datskovskii, L. Kh. Electric drives of mine-lifting machines / L. kh Datskovskii, V. I Rogovoi, I. S. Kuznetsov, I. A. Kuz'min, P. G. Vainstein, A. V. Biryukov // Russian Electrical Engineering. — 2010. — Vol 81. — No 1. — P. 15 – 30

7 Технічні характеристики

Керований перетворювач напруги забезпечує управління машиною в діапазоні швидкостей $0,1\omega_0 \leq \omega \leq \omega_0$, при регулюванні швидкості вгору від нульової та в діапазоні швидкостей $0 \leq \omega \leq \omega_0$ вниз від номінальної. Керований перетворювач струму необхідний для реалізації режиму розгальмовування та розгону машини в діапазоні $0 \leq \omega \leq 0,1\omega_0$, а також як аварійний резерв. Система автоматичного регулювання, що складається з регуляторів моменту та швидкості, задатчика інтенсивності та системи

логічного управління, здійснює управління приводом відповідно до запропонованого алгоритму

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

ЛРЕ – ланка рекуперації електроенергії; ЛПС – ланка постійного струму; БПУМ – блок прямого управління моментом; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний двигун; ВПН – вузол посудини з кінцевим навантаженням; ВПР - вузол противаги; БОЗН – блок обчислення задаючих напруг; БОК – блок обчислення координат, що не спостерігаються; БПВ – блок порівняння величин; БП – блок пам'яті; $h_{\text{упов}}$ – висота ділянки уповільнення.

10 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

11 Показники технологічності

Електропривод шахтної підйомної установки – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинен відповідати правилам влаштування електроустановок.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-

електромонтажниками відповідної кваліфікації та відповідний контингент фахівців, які займаються програмуванням робота. Технічний огляд механізму здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконано напругою 380 В від силової мережі підприємства.

14 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ ЗА
РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ГАЛЬМУВАННЯ**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода шахтної підйомної установки.

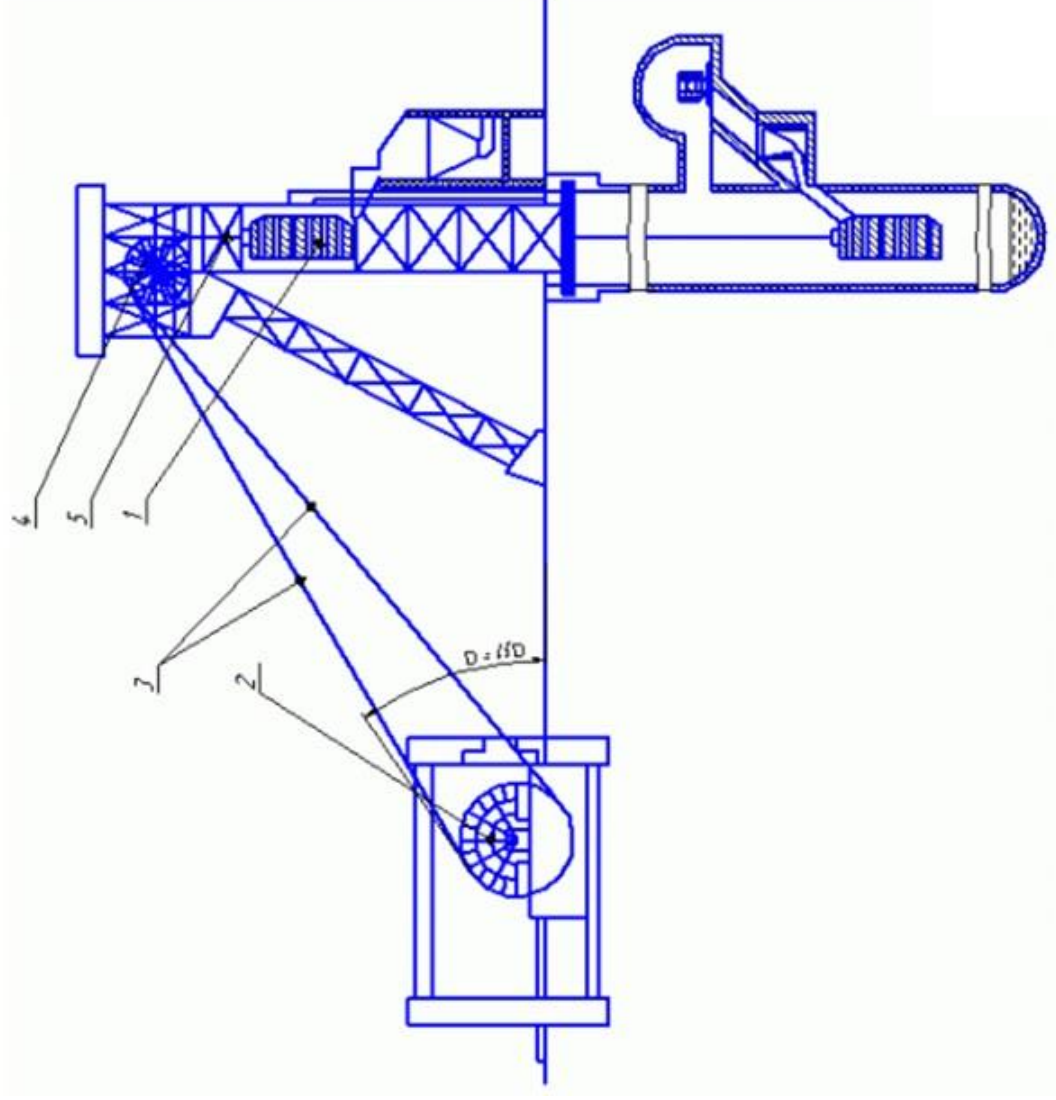
Предметом дослідження є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити ефективність електропривода шахтної підйомної установки за рахунок віддачі енергії гальмування в мережу живлення.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування електричного привода шахтної підйомної установки на основі перетворювача частоти та системи управління швидкістю судин, які забезпечують у сукупності підвищену віддачу енергії гальмування в мережу живлення. Ідея роботи полягає у застосуванні дволанкового перетворювача частоти з удосконаленою структурою та системою керування електроприводом ІППУ, які забезпечують у сукупності підвищену віддачу енергії гальмування в мережу живлення.

В процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі **завдання**:

1. Провести критичний аналіз режимів роботи електроприводу ІППУ з точки зору можливості рекуперації електроенергії в мережу живлення.
2. Дослідити силовий канал системи електроприводу ІППУ у режимі рекуперативного гальмування, що включає дволанковий перетворювач частоти з удосконаленою структурою та асинхронний електродвигун.
3. Розробити математичну модель системи електроприводу ІППУ, яка враховує в режимі рекуперативного гальмування зміну величини кінцевого навантаження ІППУ, змінну жорсткість канатів та процеси, що протікають у перетворювачі частоти з удосконаленою структурою.
4. Створити модернізовану систему управління швидкістю судин ІППУ, що компенсує у режимі рекуперативного гальмування вплив кінцевого навантаження.
5. Здійснити оцінку ефективності розробленої системи управління швидкістю судин ІППУ у режимі рекуперативного гальмування на імітаційній моделі.

СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК



- 1 – підйомна посудина; 2 – підйомна машина; 3 – підйомні канати; 4 – направляючі шківви; 5 – металоконструкція підйомної установки.

Рисунок 1.1 – Структурна схема ІШГУ

КЛАСИФІКАЦІЯ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК З МОЖЛИВІСТЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

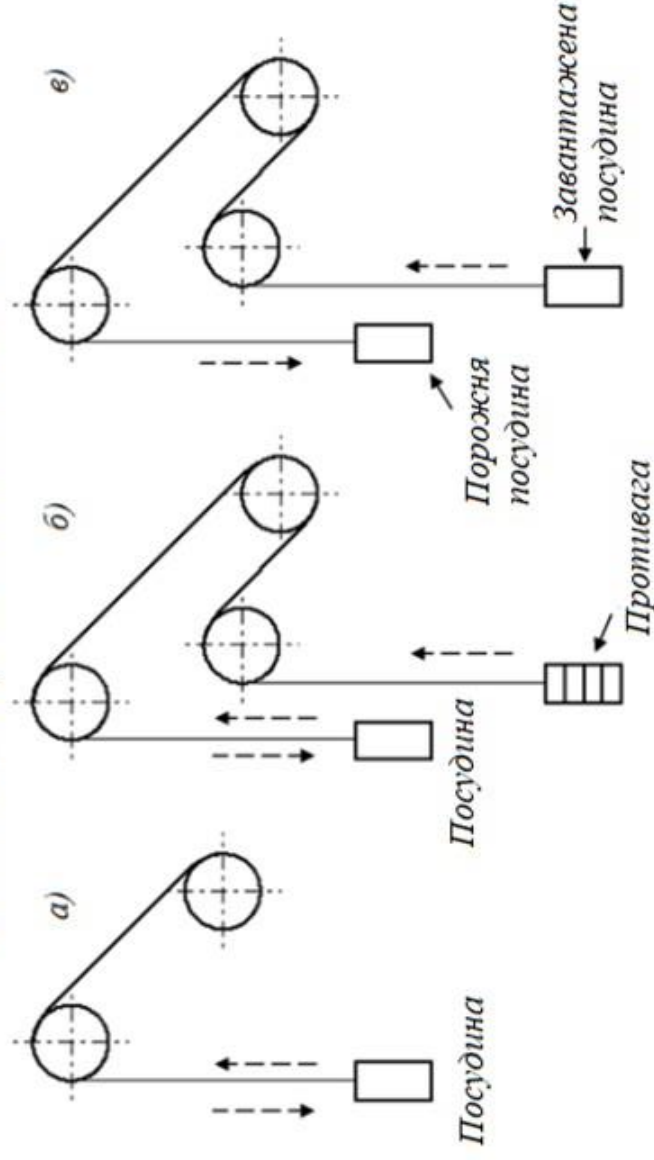


Рисунок 1.2 – Схеми підйомних установок: а – однопосудинної; б – однопосудинної з противагою; в – двопосудинної;

Існує кілька способів економії електроенергії в однопосудинних та двопосудинних ШПУ, а саме: – економія електроенергії під час спуску важких вантажів на великій відстані (глибини); – економія електроенергії в режимі уповільнення електроприводу ШПУ.

$$E_{ел} = P_{РЕК} \cdot N_{СП} \cdot C_{ЕЛ} \gg \gg \quad (1.3)$$

де $P_{РЕК}$ – енергія рекуперації ШПУ за цикл спуску; $N_{СП}$ – кількість спусків на добу роботи, $C_{ЕЛ}$ – тариф на електроенергію (грн/кВт·год).

ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

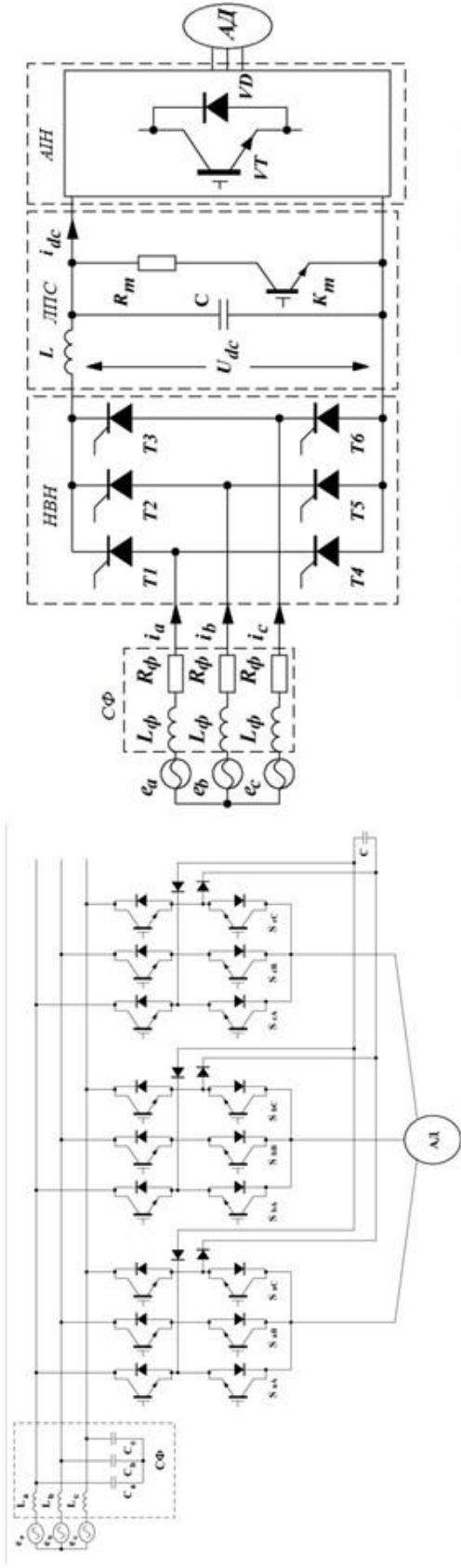


Рисунок 2.2 – Принципова схема системи електропривода на основі ДПЧ з тиристорним випрямлячем

Рисунок 2.1 – Принципова схема асинхронного електроприводу з МПЧ

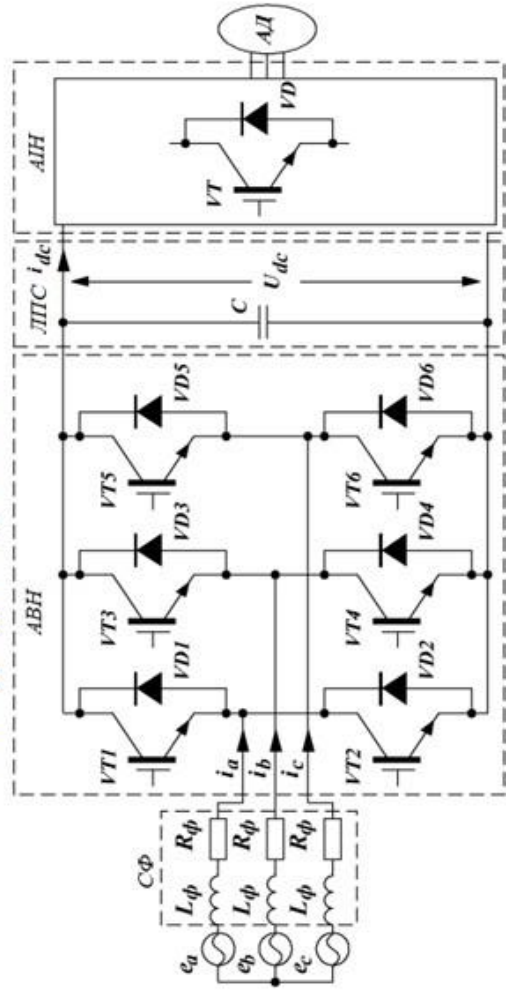
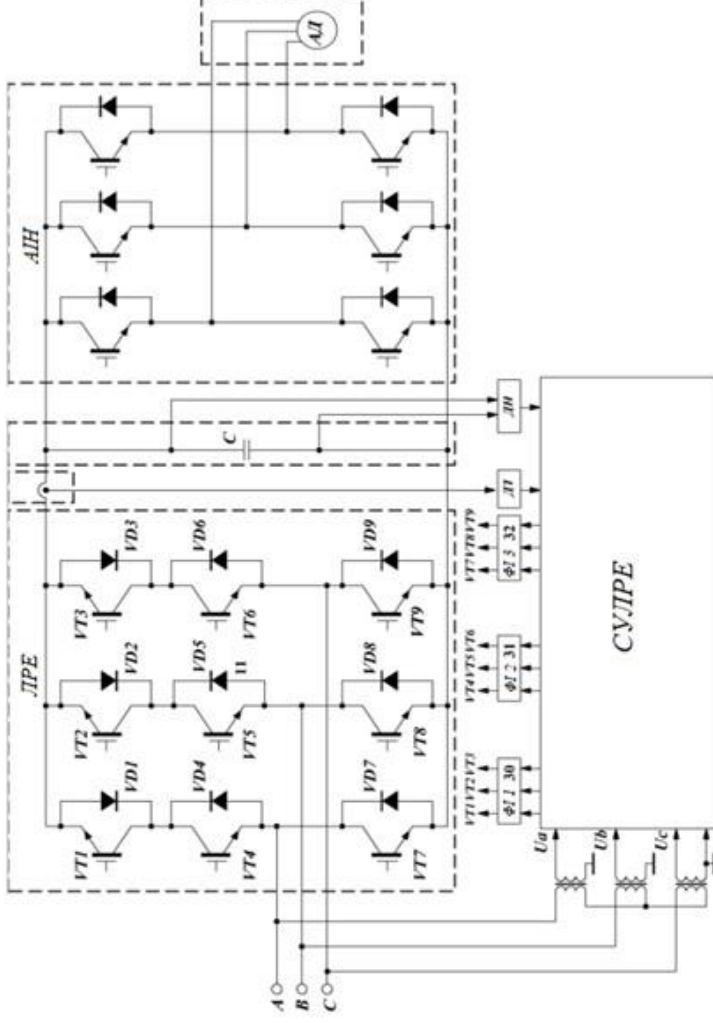


Рисунок 2.3 – Принципова схема системи електропривода на основі ДПЧ з АВН

ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШПУЗ РЕАЛІЗАЦІЮ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ



На рисунку 2.3: ЛРЕ – ланка рекуперації електроенергії; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; ФІ – формувач імпульсів управління; ДП – датчик струму; ДН – датчик напруги; СУПРЕ – система управління ланкою рекуперації електроенергії; U_a , U_b , U_c – фазні напруги, що підводяться з вторинних обмоток узгоджуючого трансформатора до СУПРЕ.

Рисунок 2.4 – Електропривод змінного струму на основі ДПЧ із ланкою рекуперації електроенергії

Кут керування α	Двигунний режим								
	VT1/ VD1	VT2/ VD2	VT3/ VD3	VT4/ VD4	VT5/ VD5	VT6/ VD6	VT7/ VD7	VT8/ VD8	VT9/ VD9
Постійний кут керування	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
Кут керування α	Режим рекуперативного гальмування								
Постійний кут керування	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
Регульований кут керування	-	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-

Таблиця 1 – Алгоритм керування силовими ключами ланки ЛРЕ

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ШІУЗ РЕКУПЕРАЦІЮ

Математична модель ЛРЕ може бути описана системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} L_a \frac{di_a}{dt} &= e_a - u_{dk} \cdot \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3} - R_a \cdot I_a, \\ L_b \frac{di_b}{dt} &= e_b - u_{dk} \cdot \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} - R_b \cdot I_b, \\ L_c \frac{di_c}{dt} &= e_c - u_{dk} \cdot \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3} - R_c \cdot I_c, \\ C \frac{du_{dk}}{dt} &= S_{a1} i_a + S_{b1} i_b + S_{c1} i_c \pm i_{dk} \end{aligned} \right. \quad (3.1)$$

Фазні напруги ланки рекуперації електроенергії визначаємо наступним чином

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + u_{dk} \begin{bmatrix} \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3} \\ \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} \\ \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_a &= \frac{2S_{a1} - (S_{b1} + S_{c1})}{3}, \\ k_b &= \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3}, \\ k_c &= \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{b1})}{3}, \end{aligned} \right. \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_{Sa} &= k_a \cdot u_{dk}, \\ u_{Sb} &= k_b \cdot u_{dk}, \\ u_{Sc} &= k_c \cdot u_{dk}. \end{aligned} \right.$$

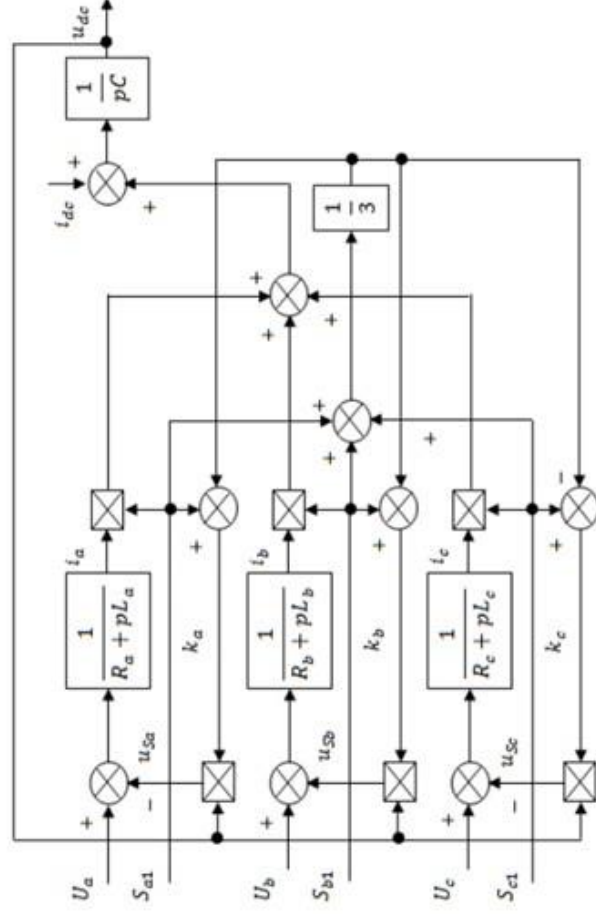


Рисунок 3.1 – Структурна схема математичної моделі ланки рекуперації електроенергії

Математична моделі електромеханічної системи ШПУв режимі рекуперативного гальмування

Модель складається з наступних локальних вузлів: дволанкової перетворювач частоти з ланкою рекуперації електроенергії; асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; механічна система підйомної установки, що складається з вузлів посудини з кінцевим навантаженням та протитягою.

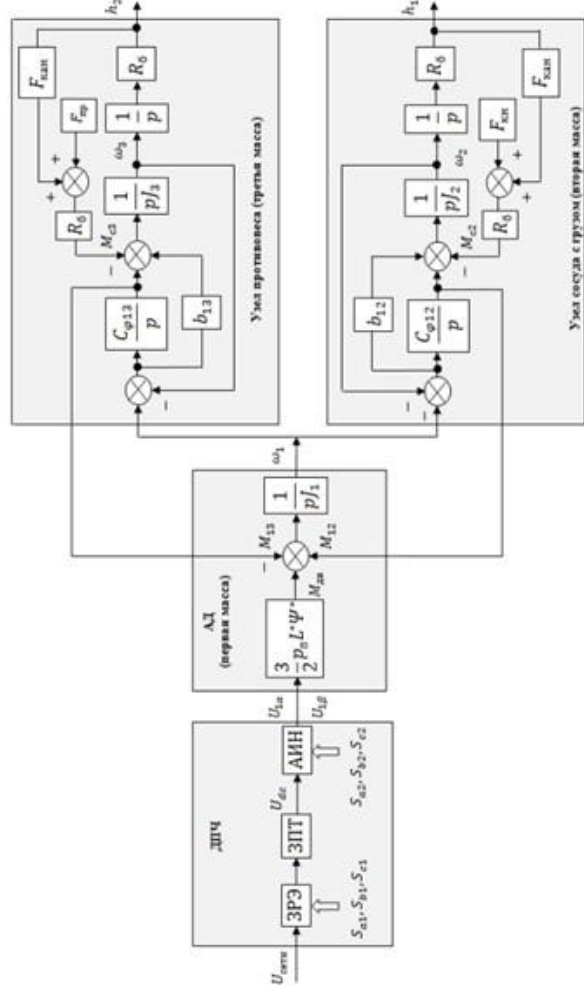


Рисунок 3.2 – Структурна схема тримасової системи ШПУ

$$L_a \frac{di_a}{dt} = e_a - u_{dk} \cdot \frac{2S_{a1} - (S_{h1} + S_{c1})}{3} - R_a \cdot I_a,$$

$$L_b \frac{di_b}{dt} = e_b - u_{dk} \cdot \frac{2S_{b1} - (S_{a1} + S_{c1})}{3} - R_b \cdot I_b,$$

$$L_c \frac{di_c}{dt} = e_c - u_{dk} \cdot \frac{2S_{c1} - (S_{a1} + S_{h1})}{3} - R_c \cdot I_c,$$

$$C \frac{du_{dk}}{dt} = S_{a1} i_a + S_{h1} i_b + S_{c1} i_c \pm i_{dk},$$

$$i_{dk} = S_{a2} i_a + S_{b2} i_b + S_{c2} i_c \pm i_{dk},$$

$$U_{1\alpha} = u_{dk} \cdot (S_{a2} - 1/2 \cdot (S_{h2} - S_{c2})),$$

$$U_{1\beta} = \sqrt{3}/2 \cdot u_{dk} \cdot (S_{b2} - S_{c2}),$$

$$\frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = U_a - U_{1a} - U_0 - i_{1\alpha} \cdot R_{11},$$

$$\frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_b - U_{1b} - U_c - U_{1c}) - i_{1\beta} \cdot R_{11},$$

$$U_0 = (U_a + U_b + U_c + U_{1a} - U_{1b} - U_{1c} - U_{1c}),$$

$$M_{11} = 3/2 \cdot p \cdot I_1 \cdot \frac{L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} \cdot (\psi_{1\beta} \cdot \psi_{2\alpha} - \psi_{2\beta} \cdot \psi_{1\alpha}),$$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_d + M_{12} - M_{13},$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2},$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{13} - M_{c3},$$

$$M_{12} = c_{\varphi12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + b_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2),$$

$$M_{13} = c_{\varphi13} \cdot (\varphi_1 - \varphi_3) + b_{13} \cdot (\omega_1 - \omega_3),$$

$$\frac{dh}{dt} = \omega_1 \cdot R_{61P},$$

$$M_{c2} = (F_{61H} + (F_{61H} \cdot h_1)) \cdot R_{61P},$$

$$M_{c3} = (F_{61P} + F_{61H} \cdot (h_0 - h_2)) \cdot R_{61P},$$

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ІШУ

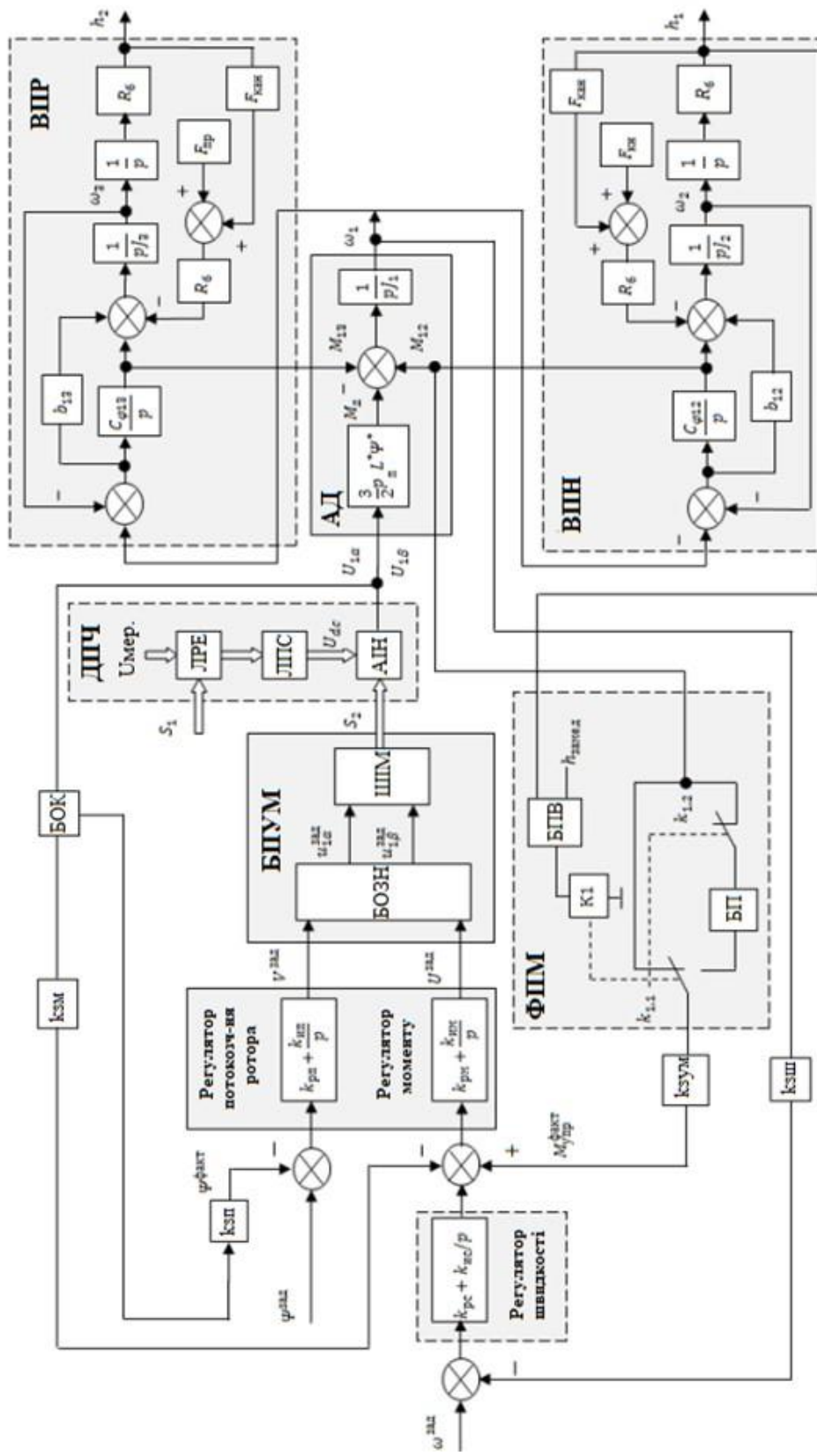


Рисунок 4.1 – Структурна схема регулювання струму ротора в схемі з керованим випрямлячем струму

На рисунку 4.1: ЛПЧ – ланка рекуперації електроенергії; ЛПС – ланка постійного струму; БПМ – блок прямого управління моментом; АН – автономний інвертор напруги; АД – блок асинхронний двигун; ВПН – вузол посудини з кінцевим навантаженням; ВПР – вузол протитяги; БОЗН – блок обчислення задаючих напруг; БОК – блок обчислення координат; ФПМ – формувач пружного моменту навантаження; БПВ – блок порівняння величин; БП – блок пам'яті; $i_{шв}$ – висота ділянки уповільнення.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

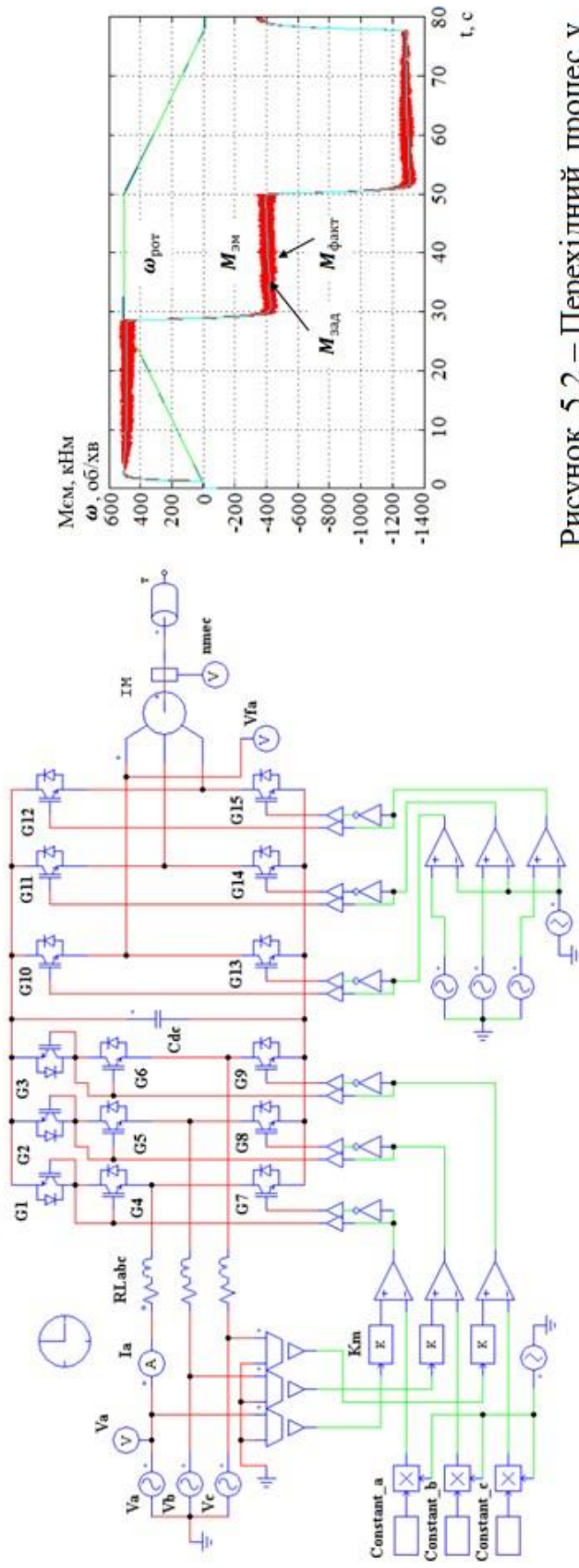


Рисунок 5.2 – Перехідний процес у системі з обмеженням моменту

Рисунок 5.1 – Імітаційна модель системи електропривода

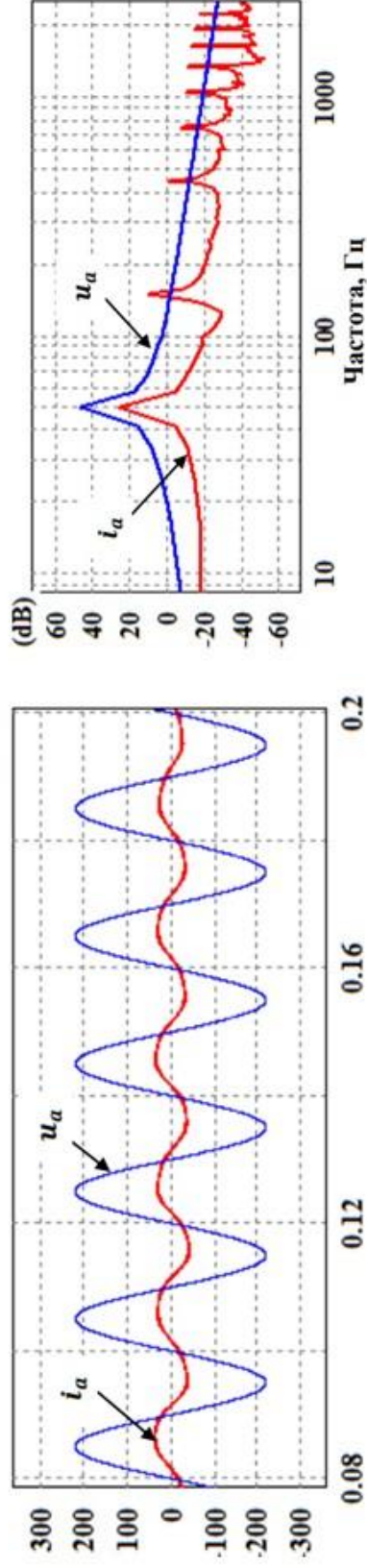


Рисунок 5.3 – Осцилограма струму та напруги та ЛАЧХ системи електропривода

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

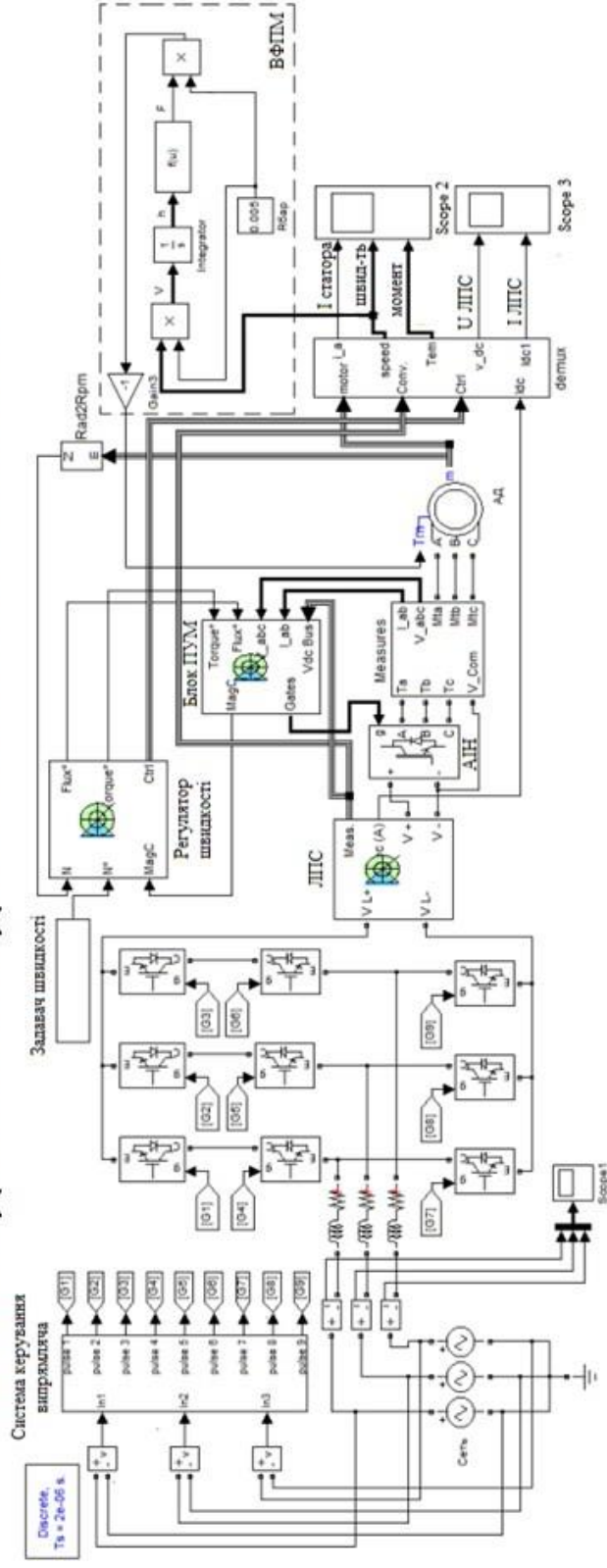


Рисунок 5.4 – Модель електропривода ШПМ с ПУМ в ІППІ Matlab Simulink

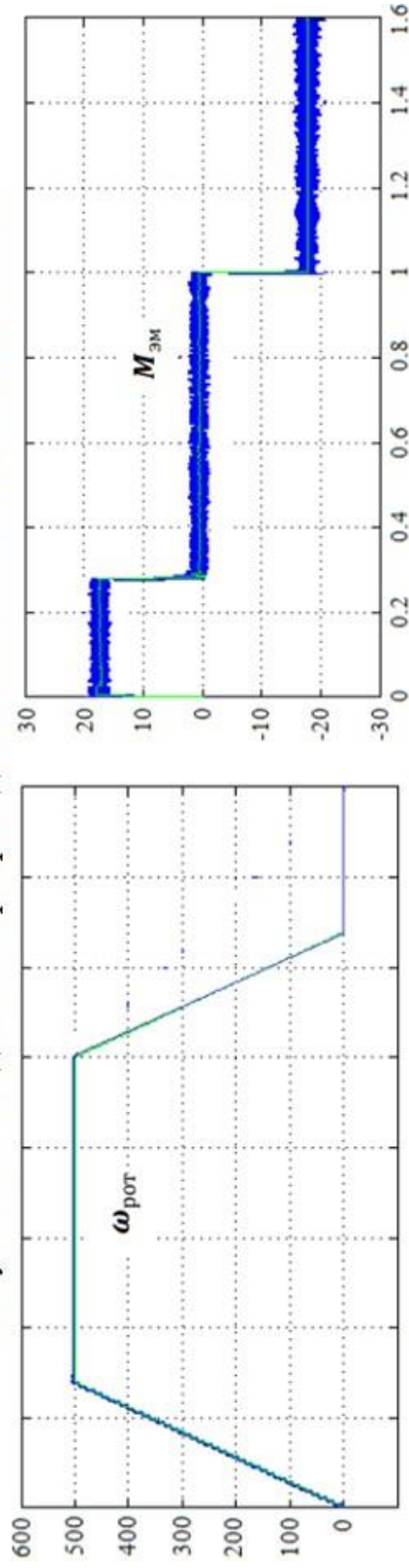


Рисунок 5.5 – Перехідні процеси швидкості обертання ротора та електромагнітного моменту електропривода ІППУ в режимі рекуперативного гальмування

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто можливі шляхи отримання енергії рекуперації в односудинних та двосудинних підйомних установках у режимі рекуперативного гальмування системи електроприводу. Приведено класифікацію шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії.
2. Запропоновано математичну модель ЕМС підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування. Математичний опис складається з опису дволанкового перетворювача частоти, асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором, механічної частини підйомної установки, що складається з вузлів посудини з кінцевим навантаженням та противагою.
3. Розроблено модернізовану систему управління швидкістю посудин ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Розроблена структура побудована за принципом підпорядкованого регулювання координат та забезпечує компенсацію впливу кінцевого навантаження ШПУ в режимі рекуперативного гальмування. Проведено комп'ютерне моделювання існуючої системи електроприводу ШПУ на основі дволанкового перетворювача частоти з активним випрямлячем напруги зі стандартними налаштуваннями регуляторів системи керування. Встановлено, що при стандартному налаштуванні регуляторів величина перерегулювання каналом електромагнітного моменту АД має значення $\sigma=7\%$, що неприйнятно з точки зору швидкодії системи електроприводу.
4. Розроблено імітаційну модель системи електропривода ШПУ із врахуванням модернізованої структури системи управління, а також оптимізованої структури конгурів регулювання в середовищі ППП Matlab Simulink. Отримані результати підтверджують працездатність розробленої структури системи керування електроприводом ШПУ.
5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.
6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

08-16.МКР.009.00.000

					08-16.МКР.009.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Мета, задачі та об'єкт дослідження.	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив:		Ярослав О.С.		15.11.22					
Перевірив		Кутін В.М.		15.11.22					
Т. конгр.									
Рецензент		Бєденок О.В.		19.12.22		Аркуш	Аркушів	101	
Норм. кон.		Міщенко Т.В.		20.11.22		ВНТУ, гр. ЕПА-21 м			
Затверд.		Мошворіз М.М.		30.11.22					



08-16.МКР.009.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Системи електропривода шахтних підйомних установок.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.	<i>[Signature]</i>	15.12.				
Перевірив		Кутін В.М.	<i>[Signature]</i>	15.12.				
Т. контр.			<i>[Signature]</i>					
Архивув.		Тихоненко В.	<i>[Signature]</i>	15.12.				
Норм. коп.		Павлюк О.	<i>[Signature]</i>	30.11.				
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	30.11.				
						Аркуш	Аркушів 102	
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

ПІДПИСАНО ТА ПЕЧАТОВАНО ЗАКРИТОЮ КВАДРАТНОЮ ПЕЧАТКОЮ
 ПЕЧАТКОЮ ПІДПИСАНО ТА ПЕЧАТОВАНО ЗАКРИТОЮ КВАДРАТНОЮ ПЕЧАТКОЮ

					08-16.МКР.009.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Класифікація шахтних підйомних установок з можливістю рекуперації електроенергії.	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив:		Ярослав О.С.	<i>[Signature]</i>	15.11.11					
Перевіряв:		Кутін В.М.	<i>[Signature]</i>	15.11.11					
Т. контр.			<i>[Signature]</i>						
Вислужив:		Бабенко О.В.	<i>[Signature]</i>	15.12.11		Аркуш	Аркушів 126		
Норм. кон.		Поліном Р.А.	<i>[Signature]</i>	30.11.11		ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	10.11.11					

					08-16.МКР.009.00.000 Е1			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Вибір системи електропривода ШПУ з реалізацією режимів рекуперативного гальмування.	Ліг.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.		15.11.22				
Перевірив		Кутін В.М.		15.11.22				
Т. контр.								
Рецидент		Биденко О.В.		19.12.22		Аркуш	Аркушів	126
Норм. кон.		Малюк О.А.		30.11.22	ВНТУ, гр. ЕПА-21м			
Затверд.		Мошноріз М.М.		30.11.22				

08-16.МКР.009.00.000 Е1

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Вибір системи електропривода ШПУ з реалізацією режимів рекуперативного гальмування.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.		15.11.11				
Перевірив		Кутін В.М.		15.11.11				
Т. контр.								
Рецензував		Григоренко О.А.		19.12.11				
Норм. кон.		Навоненко В.А.		20.11.11				
Затверд.		Мошноріз М.М.		20.11.11				
						Аркуш	Аркушів	126
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

08-16.МКР.009.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Математичні моделі ШТУ з рекуперацією.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.		11.11.22				
Перевірив		Кутін В.М.		15.11.22				
Т. контр.								
Рецензував		Борисенко О.С.		15.11.22				
Норм. кон.		Пилипенко О.П.		30.11.22				
Затверд.		Мошноріз М.М.		30.11.22				
						Аркуш	Аркушів 126	
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

08-16.МКР.009.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Математична моделі електромеханічної системи ШПУ в режимі рекуперативного гальмування.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.		15.11.17				
Перевірив		Кутів В.М.		15.11.17				
Т. контр.								
Арх. кон.		Горько О.О.		15.12.17				
Норм. кон.		Горько О.О.		30.11.17				
Затверд.		Мошноріз М.М.		17.11.17				
						Аркуш	Аркушів	126
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

08-16.МКР.009.00.000 Е2

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електроприводів шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Функціональна схема системи керування швидкістю ШПУ.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.	<i>[Signature]</i>	15.11.22				
Перевірив		Кутін В.М.	<i>[Signature]</i>	15.11.22				
Т. контр.								
Відп. за виконання		Григоренко О.П.	<i>[Signature]</i>	15.12.22				
Норм. кон.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	30.11.22				
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	30.11.22				
						Аркуш	Аркушів 126	
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

					08-16.МКР.009.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Моделювання динамічних режимів роботи.	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив:	Ярослав О.С.			15.11.24					
Перевірив	Кутін В.М.			15.11.24					
Т. контр.									
Процедура	Баденко О.В.			15.12.24		Аркуш		Аркушів 126	
Норм. кон.	Шапоко І.В.			30.11.24	ВНТУ, гр. ЕПА-21м				
Затверд.	Мошноріз М.М.			30.11.24					

08-16.МКР.009.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Моделювання динамічних режимів роботи.	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Ярослав О.С.	<i>[Signature]</i>	15.11.22				
Перевірив		Кутів В.М.	<i>[Signature]</i>	15.11.22				
Т. контр.								
Розробив		Бадський О.В.	<i>[Signature]</i>	15.11.22				
Норм. кон.		Павлюк О.Т.	<i>[Signature]</i>	10.11.22				
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	30.11.22				
						Аркуш	Аркушів 126	
						ВНТУ, гр. ЕПА-21м		

ПРОЕКТИ

					08-16.МКР.009.00.000				
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування. Висновки.	Літ.	Маса	Масштаб	
Розробив:	Ярослав О.С.			15.11.11					
Перевірив	Кутін В.М.			15.11.11					
Т. контр.									
Результат	Григоренко О.І.			19.12.11		Аркуш	Аркушів	126	
Норм. кон.	Павлюк М.М.			30.11.11	ВНТУ, гр. ЕПА-21м				
Затверд.	Мошноріз М.М.			20.11.11					

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності системи електропривода шахтної підйомної установки за рахунок використання режимів рекуперативного гальмування

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-21м

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кутін В.М.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність	88,9%
Схожість	11,1%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

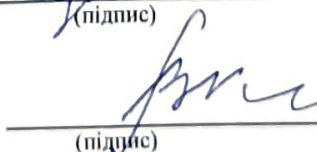
Автор роботи


(підпис)

Ярослав О.С.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Кутін В.М.

(прізвище, ініціали)