

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний інститут, електротехнічний факультет  
(повне найменування інституту, факультету)

Електричні та електронні апарати  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему "Моделювання та дослідження енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу 480 кВт в умовах тривалого режиму роботи"

Виконав: студент(ка) \_2\_ курсу, групи Е-819м  
Спеціальності 141 "Електроенергетика,  
електротехніка, та електромеханіка"  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електромеханічне обладнання енергоємних  
виробництв

Животченко А. В

(прізвище та ініціали)

Керівник М. І. Коцур

(прізвище та ініціали)

Рецензент А. С. Діденко

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет ФТІ, ЕТФ  
Кафедра "Електричні та електронні апарати"  
Ступінь вищої освіти магістр  
Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"  
(код і найменування)  
Освітня програма (спеціалізація) Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри П. Д. Андрієнко

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Животченко Андрій Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) "Моделювання та дослідження енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу 480 кВт в умовах тривалого режиму роботи"

керівник проекту (роботи) Коцур Михайло Ігорович, канд. техн. наук, доцент,  
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «03» листопада 2020 року №313

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Потужність 480кВт; m=3; f=50 Гц; U=380В; синхронна частота обертання n=1000 об/хв.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Огляд сучасних способів регулювання асинхронних двигунів з фазним ротором. 2 Імітаційна модель електромагнітних та енергетичних процесів. 3 Оптимізація енергетичних втрат в системі асинхронного електроприводу. 4. Економічна оцінка асинхронного двигуна з фазним ротором. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

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

1. Презентація (ФА4); 2. ГКІЮ.680555.001П (ФА1) Імітаційна модель асинхронного електроприводу; 3. ГКІЮ.680555.002П (ФА1) Імітаційна модель блоку миттєвого розрахунку електричних втрат в асинхронному електроприводі.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	доц. Коцур М. І.		
Економічний	доц. В.М. Білоусов		
Охорона праці	ст. викл. Журавель М.О.		
Нормоконтроль	доц. Коцур М. І.		

7. Дата видачі завдання « 10 » 03 2020 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд сучасних способів регулювання асинхронних двигунів з фазним ротором	10.03.20-10.04.20	
2	Імітаційна модель електромагнітних та енергетичних процесів	10.04.20-14.06.20	
3	Оптимізація енергетичних втрат в системі асинхронного електроприводу	14.06.20-1.09.20	
4	Економічна оцінка асинхронного двигуна з фазним ротором	1.09.20-10.12.20	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	1.09.20-10.12.20	
7	Оформлення креслення та плакатів	01.09.20-10.12.20	
8	Оформлення ПЗ	до 15.12.20	

Студент(ка) \_\_\_\_\_ А.В. Животченко  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ М. І. Коцур  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 98 с, 4 табл., 22 рис., 71 джерел

ДВИГУН, ЕЛЕКТРОПРИВІД, ВТРАТИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ,  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ

**Предмет дослідження** – асинхронний електропривод потужністю 480кВт.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні та енергетичні процеси в асинхронному електроприводі.

**Мета роботи** – визначення оптимальної частоти комутації силових елементів перетворювача, при якій забезпечується мінімізація сумарних втрат в системі електроприводу.

**Метод дослідження** – аналітичний, чисельні методи розв'язання диференційних рівнянь, з використанням програм MatLAB, MS Word, Компас.

**Анотація.** Розглянуто особливості застосування асинхронних двигунів, та аналіз сучасного електроприводу з асинхронним двигуном з фазним ротором. Розроблено підсистеми моделей асинхронного двигуна, перетворювача та системи керування та розрахункову модель втрат в елементах перетворювача. Створено імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач", яка дозволяє враховувати постійні та змінні втрати в асинхронному двигуні, втрати в напівпровідникових елементах перетворювача та енергії ковзання ротора, що інвертується у мережу, в залежності від частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача. Проведено дослідження та запропоновано підхід щодо визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача. Розглянуто питання економічної оцінки асинхронного двигуна з фазним ротором, та питання охорони праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

**Актуальність.** Розвиток безконтактних систем регулювання асинхронних двигунів привело до зниження капітальних витрат на продукцію і підвищення енергоефективності виробничих механізмів. Застосування існуючих систем

регулювання дозволяє досягти плавності регулювання приводних двигунів, підтримувати постійний момент в підсинхронному діапазоні частоти обертання ротора, зберігаючи на високому рівні коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності електроприводу. Однак, для таких систем електроприводу не досліджено питання про визначення оптимального значення частоти комутації силових ключів перетворювача, що забезпечує мінімальний рівень втрат в системі двигун-перетворювач.

#### **Наукова новизна:**

Удосконалено імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач", яка дозволяє враховувати постійні та змінні втрати в асинхронному двигуні, втрати в напівпровідникових елементах перетворювача та енергії ковзання ротора, що інвертується у мережу, в залежності від частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача.

#### **Практична цінність:**

Запропоновано підхід щодо визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача, який полягає в формуванні цільової аналітичної функції залежності сумарних втрат в електроприводі від частоти комутації силових ключів перетворювача. Похибка розрахунку за аналітичним виразом та за результатами моделювання не перевищує 3,5%. Запропонований підхід визначення оптимальної частоти комутації силового ключа може бути застосовано при інженерному проектуванні, а також при налагоджувальних роботах перетворювачів в залежності від класу і способу роботи електроприводу.

Публікації за результатом дипломної магістерської роботи:

1. Животченко О.В. Дослідження енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу в умовах тривалого режиму роботи механізму [Текст] / О. В. Животченко, Коцур М.І. // Тиждень науки-2020. Електротехнічний факультет: наук. – практ. конф., 13-17 квітня 2020 р.: Запоріжжя, 2020. – С. 87-88.

## ЗМІСТ

	С.
Завдання на дипломний проект	
Реферат	
Вступ.....	8
1 Огляд сучасних способів регулювання асинхронних двигунів з фазним ротором .....	9
1.1 Особливості застосування асинхронних двигунів.....	9
1.2 Аналіз сучасного електроприводу з асинхронним двигуном з фазним ротором.....	10
2 Імітаційна модель електромагнітних та енергетичних процесів асинхронного електроприводу .....	21
2.1 Підсистема моделі асинхронного двигуна .....	22
2.2 Підсистема моделі перетворювача .....	30
2.3 Підсистема моделі електричних втрат в системі електроприводу.....	33
3 Оптимізація енергетичних втрат в системі асинхронного електроприводу..	47
4 Економічна оцінка асинхронного двигуна з фазним ротором	56
4.1 Розробка собівартості та ціни виробу.....	56
4.2 Економічна ефективність асинхронного двигуна	65
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	67
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	67
5.2 Заходи з охорони праці	69
5.2.1 Заходи по забезпеченню безпеки	69
5.2.2 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці	73
5.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	77
5.3.1 Заходи з пожежної безпеки	77
5.3.2 Повноваження місцевих державних адміністрацій і органів місцевого самоврядування у сфері цивільного захисту	79
5.3.3 Дослідження захисту споруд цивільного захисту за місткістю	85

	7
Висновки.....	90
Перелік джерел посилання.....	92

## ВСТУП

Розвиток безконтактних систем регулювання асинхронних двигунів привело до зниження капітальних витрат на продукцію і підвищення енергоефективності виробничих механізмів. Застосування існуючих систем регулювання дозволяє досягти плавності регулювання приводних двигунів, підтримувати постійний момент в підсинхронному діапазоні частоти обертання ротора, зберігаючи на високому рівні коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності електроприводу.

З метою підвищення економічності значної кількості електроприводів можливе застосування енергоефективних систем регулювання електроприводу, таких як перетворювачі частоти (ПЧ), індукторні-ємнісні перетворювачі (ІЄП) і перетворювачі за схемою асинхронно-вентильного каскаду (АВК). За допомогою цих систем можна незалежно регулювати швидкість і момент електродвигуна (асинхронного або синхронного). Однак ПЧ і ІЄП мають велику встановлену потужність, яка порівнянна з потужністю двигуна. Крім того, застосування ПЧ і ІЄП обмежена у використанні класом напруги напівпровідникових елементів перетворювача. Тому, в таких електроприводах можливим залишається регулювання швидкості на роторній стороні двигуна, де напруга ротора значно нижче ніж напруга статора. Для цього може бути застосований АВК, причому, даний клас електроприводу повинен мати високий ступінь енергоефективності. Відомо, що підвищення частоти комутації ключа призводить до зниження вмісту вищих гармонік струмів статора і ротора АД, отже, до зниження втрат в самому АД. Однак, через підвищення частоти комутації силових ключів ростуть основні і комутаційні втрати в ключах перетворювача. Отже, існує необхідність у визначенні оптимальної частоти комутації силових ключів даного класу системи електроприводу.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ФАЗНИМ РОТОРОМ

## 1.1. Особливості застосування асинхронних двигунів

Асинхронні двигуни (АД) - найпоширеніші з усіх видів електричних двигунів, що відрізняється високою надійністю в роботі, конструктивною простотою, відносною дешевизною у виробництві, в обслуговуванні та ремонті, меншими ваговими і габаритними параметрами [1].

В даний час на частку АД припадає не менше 80% всіх електродвигунів, що випускаються електротехнічної промисловістю. При цьому значну питому вагу в усьому класі АД становлять АД з короткозамкненим ротором [2].

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором застосовуються в приводах, що вимагають значного пускового моменту при відносно невеликому пусковому струмі і малому часу розгону.

Для забезпечення плавного пуску при розгоні і гальмуванні асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором застосовуються перетворювачі частоти без зниження статичного моменту на валу. Застосування АД з короткозамкненим ротором в основному поширено в конвеєрних механізмах. Конвеєр відноситься до механізмів безперервної дії з постійною розподіленістю навантаженням. Режим роботи асинхронного двигуна в такому механізмі тривалий (S1) [3].

Також асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором знайшли застосування в кранових механізмах всіх типів (підйом, пересування, поворот), які працюють тільки в повторно - короткочасному режимі.

Тривалий режим (S1) - це режим тривалої роботи при практично незмінному навантаженні і температурі охолоджувального середовища, достатньої для нагріву всіх її частин до величини сталої температури. Режим характеризується незмінними втратами протягом всього часу роботи машини [3].

Повторно-короткочасний режим (S3) - режим повторно-короткочасного навантаження. Характеризується послідовністю ідентичних циклів, кожен з яких складається з періодів роботи двигуна при постійному навантаженні і періодів

відключення, причому тривалість періодів роботи недостатня для досягнення теплового рівноваги за час одного робочого циклу [3].

## 1.2 Аналіз сучасного електроприводу з асинхронним двигуном з фазним ротором

Для збільшення енергозбереження роботи АД необхідне плавне регулювання швидкості обертання ротора приводного двигуна. Для таких приводів доцільним є застосування сучасні системи регулювання такі як перетворювачі частоти (ПЧ), індукторно-ємнісні перетворювачі (ІЄП) та перетворювачі за схемою асинхронно-вентильного каскаду (АВК), за допомогою яких можна незалежно регулювати швидкість та момент електродвигуна (асинхронного або синхронного) [4-6]. Однак ПЧ та ІЄП мають виклику встановлену потужність, яка сумірна з потужністю двигуна. Крім того застосування ПЧ та ІЄП обмежені у використанні у високовольтному електроприводі ВГП класом напруги напівпровідникових елементів перетворювача. [5-14]. Тому в таких електроприводах можливим залишається регулювання швидкості на роторній стороні двигуна, де напруга ротора значно нижча ніж напруга статора. Для цього може бути застосований АВК. [15-18].

Регулювання швидкості асинхронного двигуна (АД) в схемах АВК здійснюється шляхом зміни ковзання двигуна при постійній швидкості обертання електромагнітного поля. Особливістю даного способу є корисне використання потужності ковзання. На рис.1.1 представлений класичний варіант схеми керування асинхронного двигуна з використанням АВК [14-20]. Основна складність корисного використання енергії ковзання полягає в тому, що частота ЕРС ротора  $i$ , відповідно, струм ротора змінюється залежно від ковзання (швидкості) двигуна. Тому, в схемах АВК струм ротора асинхронного двигуна з фазним ротором АД, як правило, випрямляється за допомогою некерованого

випрямляча В ( рис. 1.1). Таким чином, в коло випрямленого струму ротора вводиться додаткова проти ЕРС постійного струму - ЕРС інвертора. При цьому, величина випрямленого струму ротора визначається різницею випрямленою ЕРС ротора, ЕРС інвертора і еквівалентним опором кола. Трансформатор Т служить для узгодження напруги мережі і напруги ротора АД. Потужність, споживана з мережі через обмотку статора, без врахування втрат в статорі, перетвориться в потужність обертаючого магнітного поля. Остання породжує механічну потужність, реалізовану на валу АД та електричну, трансформовану в обмотках ротора (потужність ковзання).

Потужність ковзання, без врахування втрат в обмотці ротора АД, випрямляча, інвертора і узгоджувального трансформатора інвертора, повертається в мережу. Регулювання швидкості здійснюється зміною значення ЕРС інвертора за допомогою кута керування  $\beta$ .

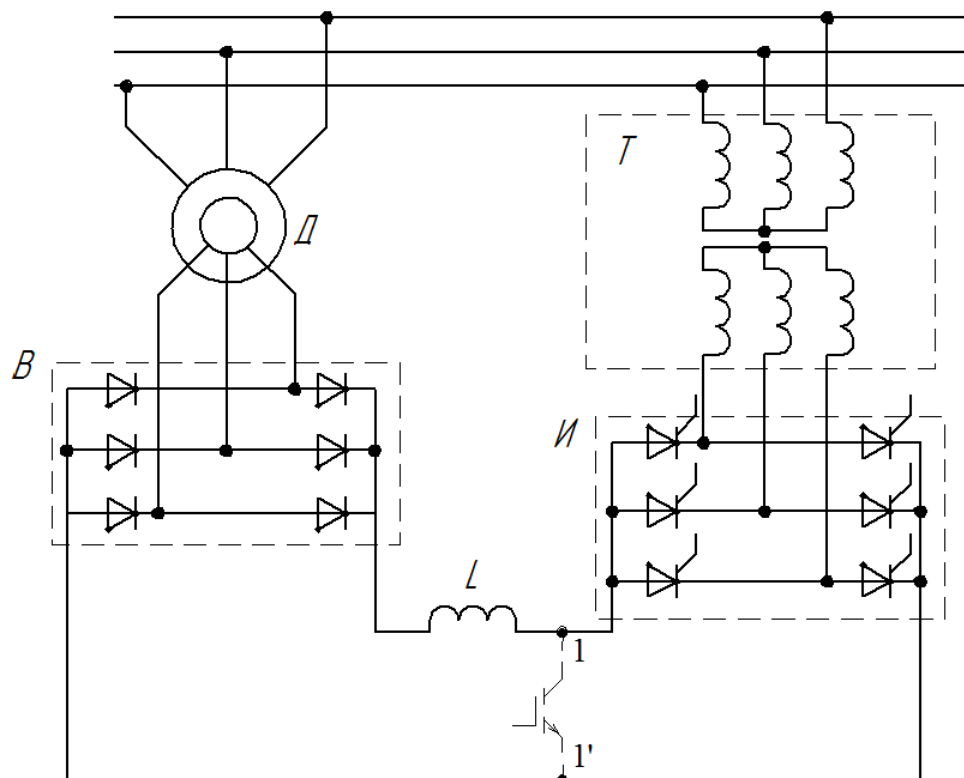


Рисунок 1.1 – Принципова схема асинхронного вентильного каскаду

Даний спосіб є оптимальним для приводу механізмів з вентиляторним характером навантаження (насосів, вентиляторів та ін.), для яких не потрібно, як правило, зниження швидкості нижче 50% від номінальної.

Тоді трансформатор і інвертор можуть мати потужність у 2 рази менше, ніж потужність асинхронного двигуна. Даний спосіб керування застосовується, головним чином, для механізмів, які працюють в тривалому режимі роботи в умовах рідкісних пусків та гальмувань [18].

До недоліків даного способу відноситься: збільшення встановленої потужності інвертора для режимів пуску і регулювання в широких межах; для неглибоких діапазонів регулювання, схема ускладнюється системою резисторного пуску; низький коефіцієнт потужності приводу при швидкостях, близьких до номінальної.

Одним із варіантів АВК є введення в роторне коло силового ключа, що підключається до точок 1-1' схеми, представленої на рис.1.1 (показано пунктиром). Таке виконання дає можливість підвищити коефіцієнт потужності приводу. Однак при цьому підвищується встановлена потужність ключів і дроселя, що є істотним недоліком такої схеми. Крім того, в ній відсутні пристрої захисту від комутаційних перенапруг, що мають місце при замиканні ключа [19].

Також існує досить велика кількість інших схемних рішень і модифікацій АВК, спрямованих на поліпшення енергетичних показників електроприводу. Одним із схемних рішень АВК є використання імпульсного способу регулювання швидкості, реалізованого схемою, представленої на рис 1.2 [20]. Він полягає в тому, що в роторне коло постійного струму паралельно перетворювальному пристрою (інвертору) П вводиться схема штучного замикання силового тиристора S. Така схема дозволяє зміною відносної тривалості включення силового тиристора регулювати швидкість обертання двигуна.

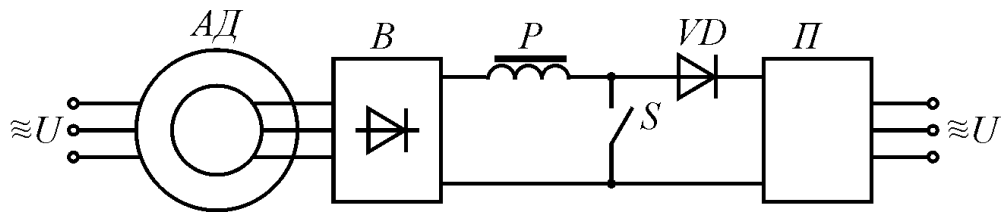


Рисунок 1.2 – Структурна схема включення АВК з імпульсним регулюванням

Застосування імпульсного регулювання дозволяє знизити габаритну потужність перетворювальних пристроїв, що особливо доцільно в електроприводах з вентиляторним навантаженням. При цьому, потужність перетворювача при будь-якому діапазоні регулювання буде незначною. Слід зазначити, що перетворювач може використовуватися для поліпшення коефіцієнта потужності і бути спільним для кількох каскадів. До недоліків даного способу відноситься поява перенапруги в роторі АД викликані частою комутацією силового ключа  $S$  [21].

Практичне використання отримала АВК за схемою машини подвійного живлення з залежним керуванням або самокеруванням, представлена на рис. 1.3. [22]. Основними елементами є мережевий (МП) і роторний (РП) перетворювачі, в яких застосовуються керовані вентиля. Для досягнення найкращого використання АД і РП у всьому діапазоні швидкості АД необхідно забезпечити найбільший фазовий кут зсуву першої гармоніки струму ротора. Для цього АВК із залежним керуванням повинен працювати поблизу точки "перекидання" при роботі РП в інверторному режимі і поблизу межі можливого "перекидання" при роботі РП в випрямному режимі. Тоді при заданих перших гармоніках векторів потокозчеплення і струму ротора АД можливо отримати найбільше середнє значення моменту, що розвивається двигуном, найменші його коливання і мінімальний вплив схеми АВК із залежним управлінням на живильну мережу.

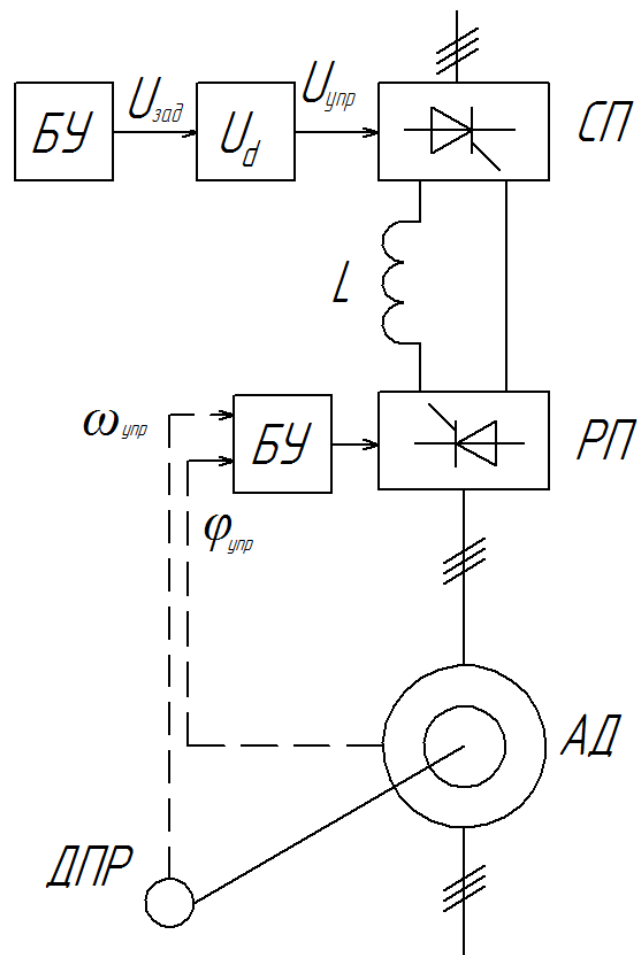


Рисунок 1.3 – Схема АВК із залежним керуванням

Основними перевагами цього способу керування є практична постійність амплітуди керуючого сигналу у всьому робочому діапазоні зміни швидкості АД, крім того, зміст вищих гармонік в цьому сигналі найменший, форма його близька до синусоїди [23].

Існує ще один варіант електроприводу за схемою АВК з параметричним стабілізатором, яка представлена на рис. 1.4 [24]. Відмінною особливістю від класичної схеми АВК полягає у тому, що в наслідок подачі напруги на обмотку статора АД 1 на вхід параметричного стабілізатора змінного струму та на вихід інвертора відомого мережею 6 в коло постійного струму через випрямлячі 3, 4 та інвертор 6 протікає стабілізований струм. При цьому ротор АД замкнено накоротко, а сам АД обертається зі швидкістю, близької до швидкості холостого ходу.

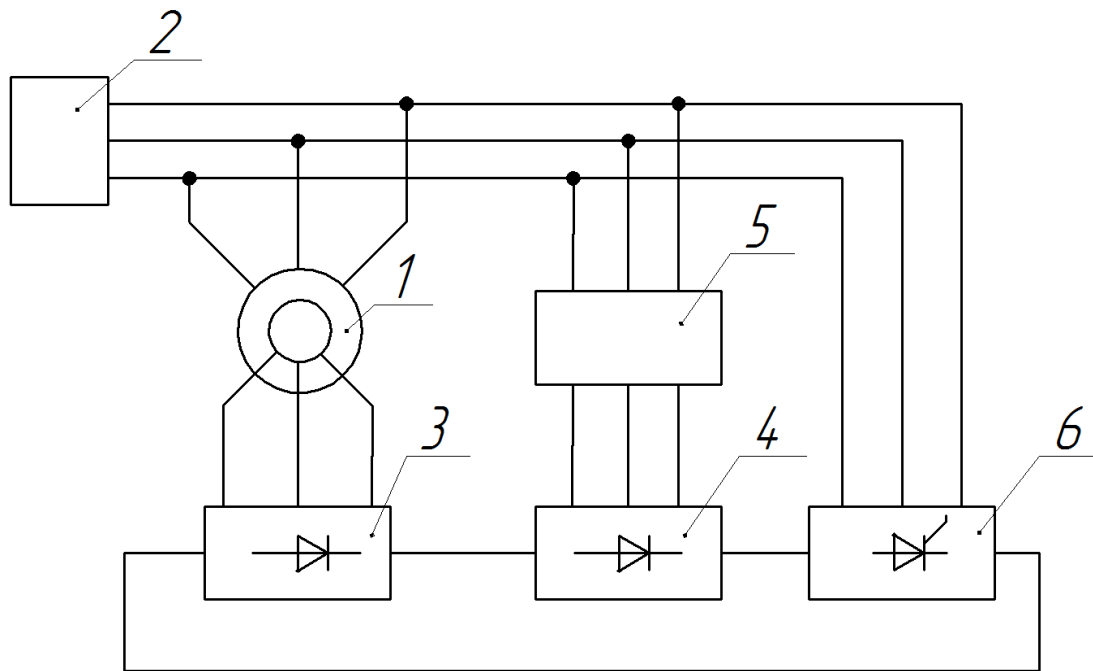


Рисунок 1.4 – Схема АВК з параметричним стабілізатором

Випрямлена напруга параметричного стабілізатора 5 на виході випрямляча 4, що зрівноважується проти-ЕРС на вході відомого мережею інвертора 6. При цьому енергія, що споживається стабілізатором струму 5, через інвертор 6 повертається у мережу.

При збільшенні моменту навантаження збільшуються ковзання ротора та збільшуються її ЕРС. Це призводить до зростання струму в роторній обмотці АД. Починаючи з величини ковзання ротора, при якій діюче значення струму в роторній обмотці стає рівним діючому значенню струму на виході параметричного стабілізатора змінного струму 5, струм в роторній обмотці стабілізується, а АД переходить в режим джерела стабілізованого моменту [25].

При збільшенні моменту навантаження збільшуються ковзання ротора та збільшуються її ЕРС. Це призводить до зростання струму в роторній обмотці АД. Починаючи з величини ковзання ротора, при якій діюче значення струму в роторній обмотці стає рівним діючому значенню струму на виході параметричного стабілізатора змінного струму 5, струм в роторній обмотці стабілізується, а АД переходить в режим джерела стабілізованого моменту [25].

Основною перевагою електроприводу, що пропонується, є також можливість отримання практично близького до одиниці коефіцієнту потужності ( $\cos \varphi$ ). У всьому заданому діапазоні зміни рівня стабільного моменту при будь-яких значеннях величини ковзання ротору величина ЕРС інвертора залишається незмінною. Це відповідає режиму роботи інвертора з фіксованим кутом керування вентилями інвертора 6. При цьому інвертор споживає постійну по значенню реактивну потужність. При незмінній напрузі статора АД струм намагнічування АД, та реактивна потужність, яка споживається ним не змінюється. Таким чином при стабілізації моменту АД зміна ковзання ротора в широкому діапазоні не призводить до зміни сумарної споживної реактивної потужності АД та інвертора. Параметричний стабілізатор на основі ІЄП, при зміні активного навантаження на його виході, а саме такою і являється послідовно з'єднані мостовий випрямляч 3 роторної обмотки та інвертор 6, генерує у мережу, або споживає з неї постійну за величиною реактивну потужність. За рахунок цього можна збільшити коефіцієнт потужності приводу [26].

Недоліком даного електроприводу зі струмопараметричним перетворювачем є наявність великої встановленої потужності реактивних елементів, яка в 2-2,5 рази перевищує встановлену потужність самого АД. Крім того відсутня можливість автоматично та наявно змінювати параметри ємності перетворювача, що на дає можливості бути універсальним змінах навантажені електропривода.

Наступним різновидом схеми електроприводу для АД з фазним ротором є система АВК з послідовним збудженням (рис. 1.5) [26]. Основними елементами схеми є: інвертор, що живить обмотку статора; нерегульований випрямляч, включений в коло обмотки ротора; додатковий живлячий регульований випрямляч, підключений до мережі через реактори (трансформатор) і згладжуючий реактор (дросель). Всі вентильні перетворювачі з'єднані послідовно й утворюють загальне коло випрямленого струму ротора АД.



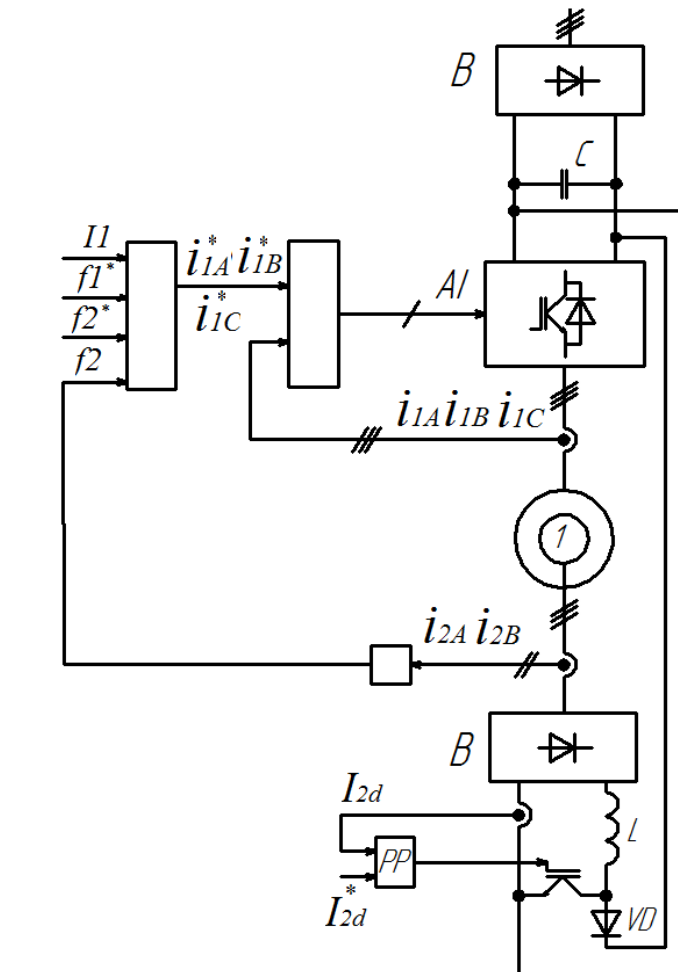


Рисунок 1.6 – Функціональна система АВК з ПЧ

Випрямлений струм роторного кола також регулюється струмом завдання за допомогою релейного регулятора (PP). Завдання на частоту струму ротора підтримується постійним на рівні 5-10 Гц, щоб випрямлена ЕРС в роторному колі була достатньо для забезпечення протікання заданого випрямленого струму ротора на всіх швидкостях обертання ротора АД. В електроприводі здійснюється підтримка кута  $\alpha$  на рівні 45 градусів, що відповідає мінімізації струму статора, тобто має місце мінімум активних втрат в обмотці статора. В області малих навантажень струм статора обмежується на рівні 20% для того, щоб в режимах холостого ходу не відбувалося повного розмагнічування двигуна.

Дана схема дозволяє здійснювати регулювання магнітного потоку асинхронного двигуна у функції навантаження на валу шляхом підтримання оптимального кута між вектором струму статора і струму намагнічування на рівні

45 градусів. Це значно підвищує ККД електроприводу при навантаженні на валу нижче номінальної. Завдяки підтримці постійної частоти струму ротора запропонований електропривод дозволяє розвивати необхідний електромагнітний момент у всьому діапазоні частот обертання ротора [28].

Недоліком цієї схеми є ускладнення реалізації схеми перетворювача. Крім того, встановлена потужність допоміжного перетворювача складає 10-20% потужності двигуна.

Відомий перетворювач за схемою струмопараметричного асинхронного вентиляного каскаду для кранового електроприводу, який досліджено у роботах [29-30] та має гарні регульовальні та енергетичні властивості. Тому дослідження системи електроприводу за зазначеною схемою є актуальною задачею. Система регулювання асинхронного електроприводу поєднує в собі позитивні властивості класичної системи імпульсного регулювання і асинхронного вентиляного каскаду (АВК) (рис.1.7).

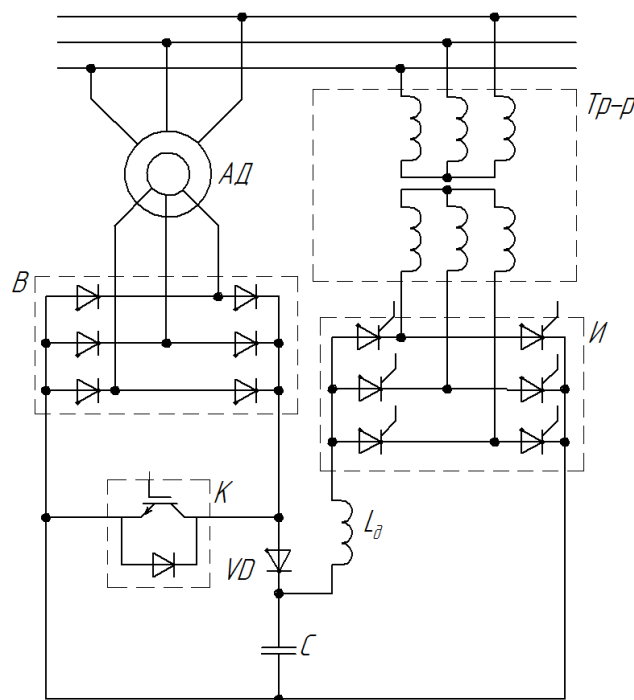


Рисунок 1.7 – Система асинхронного електроприводу вентиляторних установок

Особливістю даної системи є наявність імпульсного регулятора в колі випрямленого струму ротора, представленого у вигляді імпульсного перетворювача підвищення напруги (ППН). Наявність конденсатора ( $C$ ) забезпечує заданий рівень перенапруги в обмотці ротора викликаного частою комутацією ключа ( $K$ ). Діод ( $VD$ ) запобігає появі зворотного струму з конденсатора при замиканні ключа [30].

При розмиканні ключа, збережена енергія в обмотці ротора, а також частина енергії ковзання, в залежності від співвідношення електрорушійну силу (ЕРС) ротора і ЕРС інвертора ( $I$ ), рекуперується в мережу при постійному куті інвертування малопотужного інвертора, що забезпечує мінімальне споживання реактивної енергії з мережі і дозволить підвищити коефіцієнт потужності приводу на всьому діапазоні частоти обертання ротора.

## 2 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для проведення дослідження електромагнітних та енергетичних процесів у системі асинхронного електроприводу розроблена структура імітаційної математичної моделі комплексного дослідження асинхронного приводу на основі електромагнітної та енергетичної моделей АД та перетворювача, що зображена у вигляді блок-схеми на рис. 2.1.

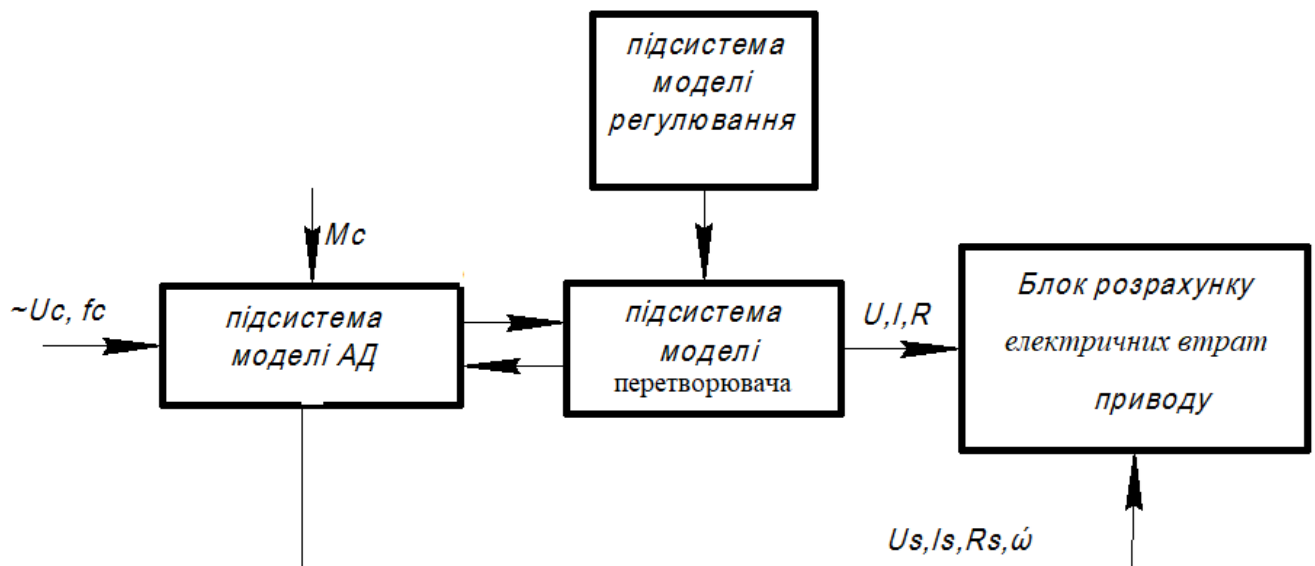


Рисунок 2.1 – Структура імітаційної моделі асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач"

Розглянемо особливості будови імітаційної моделі асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач" за складовими підсистемами моделей.

## 2.1 Підсистема моделі асинхронного двигуна

Для дослідження було обрано АД з фазними роторами 5АНК 400L-6, потужністю 480кВт, 560кВт та 630кВт. виробництва електромеханічного заводу, м. Нова Каховка, Україна. Технічні дані та параметри схеми заміщення обрані за [31].

Використання в електроприводах для шахт головного провітрювання асинхронних двигунів, які мають відкриті пази і підвищений активний опір обмотки ротора, дозволяє знехтувати зміною параметрів двигуна і прийняти їх постійними. Тому в даній роботі електромагнітна модель АД описується з урахуванням загальноприйнятих допущень [31]:

- повітряний зазор гладкий, без пазів на статорі і роторі, з обмотками у вигляді струмових шарів, що мають синусоїдальний розподіл М.Р.С;
- АД має кругове магнітне поле в повітряному зазорі;
- напруга живильної мережі має синусоїдальну форму.

Математична модель, що описується диференціальними рівняннями в двофазній системі координат  $d, q$  з синхронною швидкістю обертання магнітного поля статора. Математична модель враховує насичення магнітної системи за методом динамічної індуктивності на підставі досліджень Фільца Р. В. [32-33]. Схема заміщення АД з урахуванням насичення по Фільц Р. В наведена на рис.2.2.

За припущенням Фільца Р.В. модуль вектора потокозчеплення в повітряному зазорі  $\Psi_\delta$  залежить тільки від величини результуючої М.Р.С., або від пропорційного їй модуля вектора струму намагнічування  $i_\mu$ , при виході на нелінійну ділянку кривої намагнічування приріст струму намагнічування  $\Delta i_\mu$  по одній осі системи координат, це призводить до відповідного прирощення потокозчеплення  $\Delta \Psi_\delta$  по всім осям системи. Як наслідок, виникає потреба

введення до системи динамічних індуктивностей по осях системи та елементів зі взаємною індуктивністю між осями, що залежать від приросту модулів векторів потокозчеплення  $\Delta\psi_\delta$  та струму намагнічування  $\Delta i_\mu$ , значень самих модулів векторів  $\psi_\delta$  та  $i_\mu$ , кута, що визначається взаємним розташуванням проекцій узагальненого вектора намагнічуючого струму на відповідній осі.

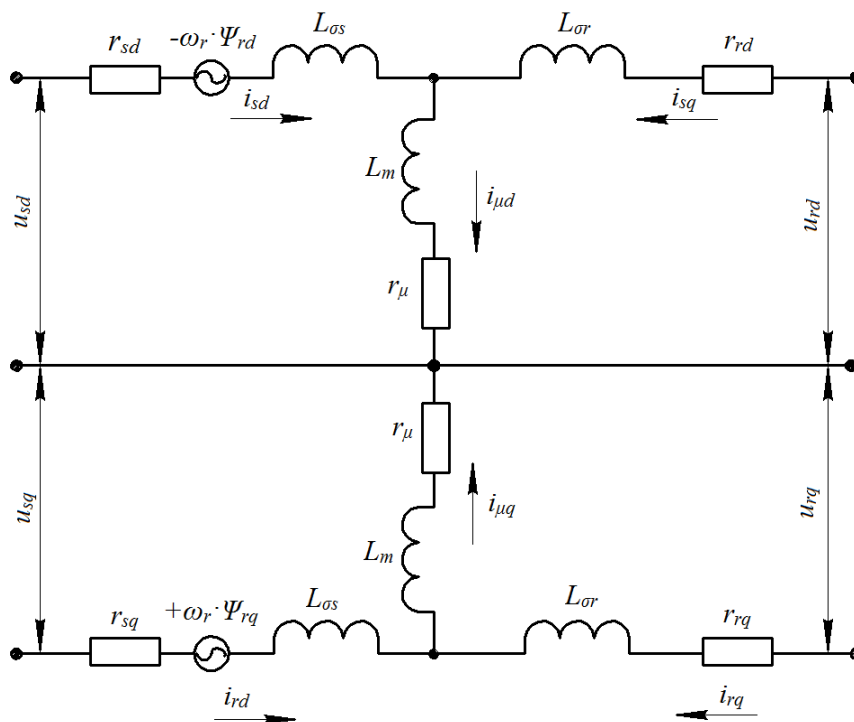


Рисунок 2.2 – Схема заміщення АД з урахуванням насичення

Система рівнянь, що визначає контури статора і ротора АД, згідно схеми заміщення (рис. 2.3) має вигляд [33]:

$$u_{sd} = i_{sd} \cdot r_{sd} + (L_{os} + L_d^\delta) \frac{di_{sd}}{dt} + M^\delta \frac{di_{sq}}{dt} + L_d^\delta \frac{di_{rd}}{dt} + M^\delta \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_r \cdot \psi_{rq} + i_{\mu d} \cdot r_\mu, \quad (2.1)$$

$$u_{sq} = i_{sq} \cdot r_{sq} + (L_{os} + L_q^\delta) \frac{di_{sq}}{dt} + M^\delta \frac{di_{sd}}{dt} + L_q^\delta \frac{di_{rq}}{dt} + M^\delta \frac{di_{rd}}{dt} -$$

$$-\omega_r \cdot \psi_{rd} + i_{\mu q} \cdot r_{\mu}, \quad (2.2)$$

$$u_{rd} = i_{rd} \cdot r_{rd} + L_d^{\delta} \frac{di_{sd}}{dt} + M^{\delta} \frac{di_{sq}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_d^{\delta}) \frac{di_{rd}}{dt} + M^{\delta} \frac{di_{rq}}{dt}, \quad (2.3)$$

$$u_{rq} = i_{rq} \cdot r_{rq} + L_q^{\delta} \frac{di_{sq}}{dt} + M^{\delta} \frac{di_{sd}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_q^{\delta}) \frac{di_{rq}}{dt} + M^{\delta} \frac{di_{rd}}{dt}, \quad (2.4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d^2\Theta}{dt^2} = \frac{p}{J} \cdot \left[ \frac{3}{2} p \cdot [\psi_{sq} \cdot i_{sd} - \psi_{sd} \cdot i_{sq}] - M_c \right], \quad (2.5)$$

$$L_d^{\delta} = \frac{\partial \psi_{rd}}{\partial i_{rd}} - L_{\sigma r}, \quad L_d^{\delta} = \frac{\partial \psi_{sd}}{\partial i_{rd}}, \quad L_d^{\delta} = \frac{\partial \psi_{rd}}{\partial i_{sd}}, \quad (2.6)$$

$$L_q^{\delta} = \frac{\partial \psi_{sq}}{\partial i_{sq}} - L_{\sigma s}, \quad L_q^{\delta} = \frac{\partial \psi_{sq}}{\partial i_{rq}}, \quad L_q^{\delta} = \frac{\partial \psi_{rq}}{\partial i_{sq}}, \quad (2.7)$$

$$M^{\delta} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{d\psi_{\delta}}{dt} - \frac{\psi_{\delta}}{i_{\mu}} \right) \cdot \sin 2\eta_{\mu}, \quad (2.8)$$

$$\eta_{\mu} = \arctg \left( \frac{i_{\mu d}}{i_{\mu q}} \right), \quad (2.9)$$

$$i_{\mu d} = i_{sd} + i_{rd} = i_{\mu} \cdot \frac{\psi_{\delta d}}{\psi_{\delta}}, \quad (2.10)$$

$$i_{\mu q} = i_{sq} \cdot i_{rq} = i_{\mu} \cdot \frac{\psi_{\delta q}}{\psi_{\delta}}, \quad (2.11)$$

$$i_{\mu} = \sqrt{i_{\mu d}^2 + i_{\mu q}^2} = \sqrt{(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2}, \quad (2.12)$$

$$\psi_{\delta} = \sqrt{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2}, \quad (2.13)$$

де  $u_{sd}, u_{sq}$ , - проєкції на відповідні осі системи координат  $(d, q)$  вектора

статорної напруги АД;

$u_{rd}, u_{rq}$  - проєкції на відповідні осі системи координат  $(d, q)$  вектора роторної напруги АД;

$i_{sd}, i_{sq}$  - проєкції на відповідні осі системи координат  $(d, q)$  вектора струму статора АД;

$i_{rd}, i_{rq}$  - проєкції на відповідні осі системи координат  $(d, q)$  вектора струму ротора АД;

$r_{sd}, r_{sq}, r_{rd}, r_{rq}$  - активний опір обмоток відповідно статора і ротора АД по осях  $(d, q)$ ;

$r_{\mu}$  - узагальнений опір, який характеризує втрати в сталі АД;

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$  - власні індуктивності обмоток відповідно статора і ротора АД;

$i_{\mu d}, i_{\mu q}$  - проєкції узагальненого вектора струму намагнічування  $i_{\mu}$  на осі системи координат  $(d, q)$ ;

$\psi_{\delta}$  - модуль просторового вектора робочого потокозчеплення;

$\psi_{\delta d}, \psi_{\delta q}$  - проєкції просторового вектору потокозчеплення в повітряному зазорі АД;

$\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$  - проєкції узагальненого вектору потокозчеплення на осі

системи координат  $(d, q)$  відповідно для обмоток статора та ротора АД, для яких мають місце співвідношення:

$$\psi_{sd} = \psi_{\sigma sd} + \psi_{\delta d}, \quad (2.14)$$

$$\psi_{sq} = \psi_{\sigma sq} + \psi_{\delta q}, \quad (2.15)$$

$$\psi_{rd} = \psi_{\sigma rd} + \psi_{\delta d}, \quad (2.16)$$

$$\psi_{rq} = \psi_{\sigma rq} + \psi_{\delta q}; \quad (2.17)$$

де  $M_c$  - момент опору АД;  
 $p$  - число пар полюсів АД;  
 $\omega_r$  - частота обертання ротора АД;  
 $\theta$  - кут між осями  $(d, q)$ .

Проекції узагальнених векторів потокозчеплення розсіювання відповідно статора та ротора на осі системи координат  $(d, q)$ ,  $\psi_{\sigma s, r(d, q)}$  пов'язані відповідно до дії сталих індуктивностей розсіювання обмоток статора  $L_{\sigma s}$  та ротора  $L_{\sigma r}$ :

$$\psi_{\sigma sd} = L_{\sigma s} \cdot i_{\sigma sd}, \quad (2.18)$$

$$\psi_{\sigma sq} = L_{\sigma s} \cdot i_{\sigma sq}, \quad (2.19)$$

$$\psi_{\sigma rd} = L_{\sigma r} \cdot i_{\sigma rd}, \quad (2.20)$$

$$\psi_{\sigma r q} = L_{\sigma r} \cdot i_{\sigma r q}. \quad (2.21)$$

Для перетворення трифазних струмів і напруги статора і ротора АД в двофазні і навпаки використовуються матриці перетворення Парка - Гурвіца ( $\Theta=0$ ,  $q = \Theta - \Theta_r$ ) [34]:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cdot \cos \Theta & \cos \Theta_r + \sqrt{3} \cdot \sin \Theta \\ 2 \cdot \sin \Theta & \sin \Theta_r - \sqrt{3} \cdot \cos \Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{abs} \\ u_{bcs} \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cdot \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \cdot \sin \beta \\ 2 \cdot \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{abr} \\ u_{bcr} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \frac{\cos \Theta}{2} & \frac{\sin \Theta}{2} \\ \frac{-\cos \Theta + \sqrt{3} \cdot \sin \Theta}{2} & \frac{-\sqrt{3} \cdot \cos \Theta - \sin \Theta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{ar} \\ \hat{i}_{br} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta}{2} & \frac{\sin \beta}{2} \\ \frac{-\cos \beta + \sqrt{3} \cdot \sin \beta}{2} & \frac{-\sqrt{3} \cdot \cos \beta - \sin \beta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha r} \\ \hat{i}_{\beta r} \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}, \quad (2.26)$$

$$\hat{i}_{cr} = -\hat{i}_{ar} - \hat{i}_{br}. \quad (2.27)$$

Підсистема моделі асинхронного двигуна виконана за допомогою програмних засобів MatLAB з використанням структури Simulink [35].

На рис. 2.3 – 2.4 наведена імітаційна модель асинхронного двигуна, що включає математичні рівняння (2.1) – (2.27).

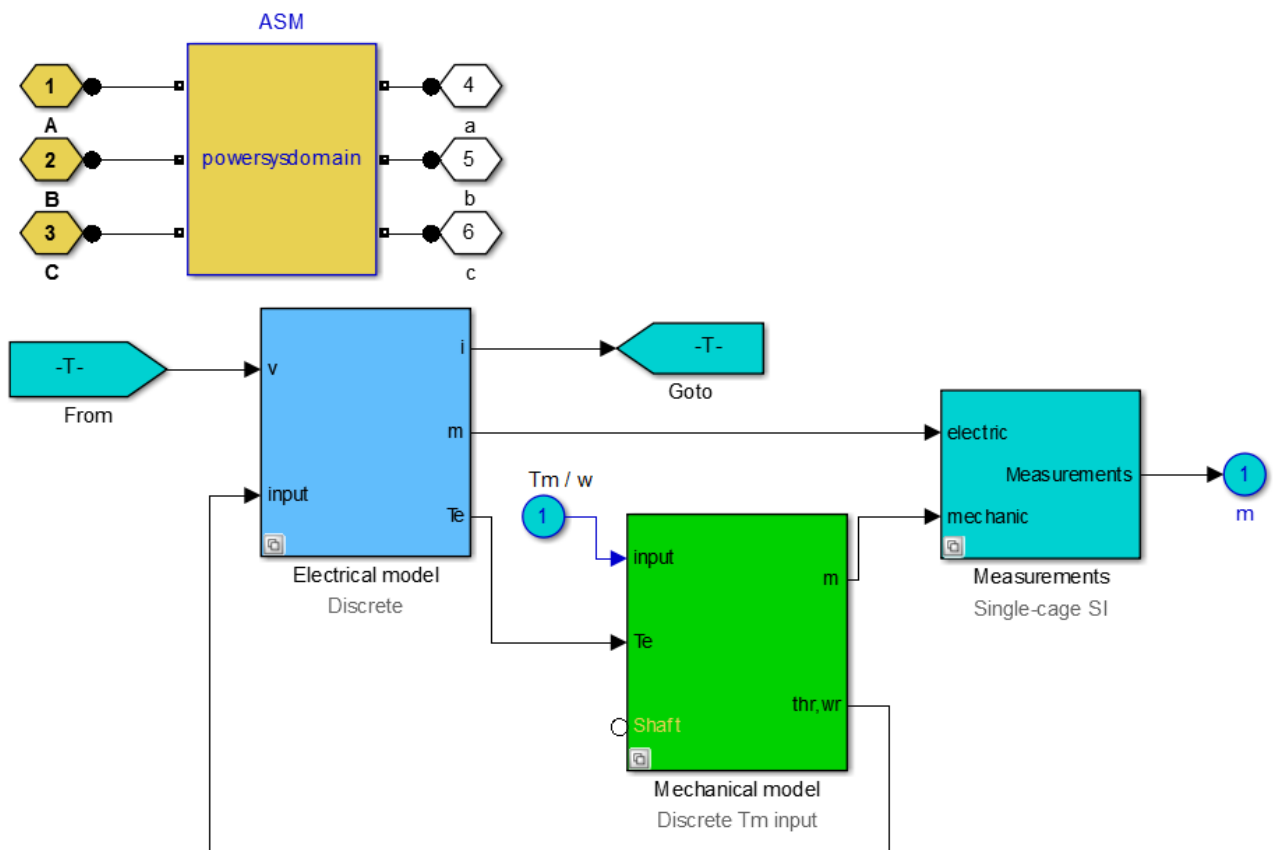


Рисунок 2.3 – Блок імітаційної моделі АД (загальний вигляд)

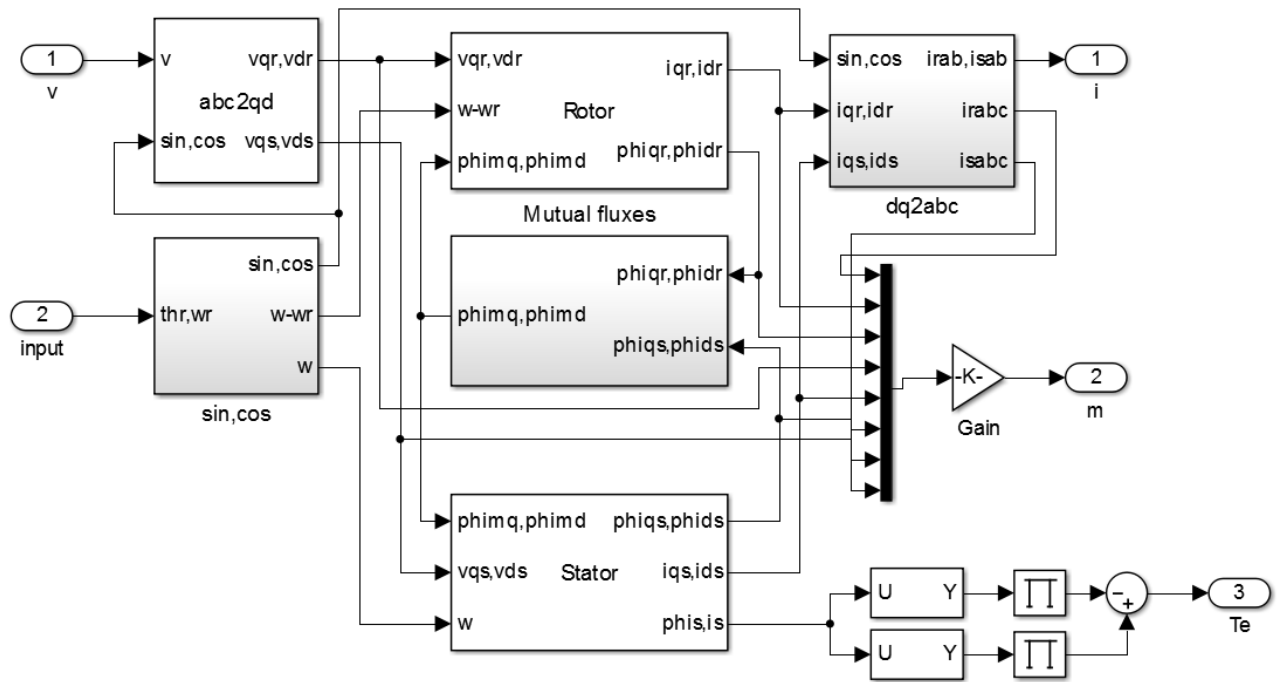


Рисунок 2.4 – Блок електромагнітної моделі АД

Математична модель (2.1 -2.5) за допомогою функцій напруги  $u_{dr}^{\prime}(t)$  і  $u_{qr}^{\prime}(t)$  описує електромагнітні процеси в АД, викликані впливом через канал ротора комутацією силових ключів перетворювача.

## 2.2 Підсистема моделі перетворювача

Підсистема моделі перетворювача включає в себе: блок некерованого випрямляча (В), виконаного у вигляді трифазного мостового діодного мосту, згладжувачого дроселя інвертора ( $L\delta$ ), силового ключа (К), діоду (VD), конденсатору (С), блоку інвертора (І), представленого у вигляді трифазного тиристорного (транзисторного) мосту, блоку узгоджувального трансформатора (Т) (див. рис. 1.7). Первинні обмотки трансформатора приєднані до мережі живлення з промисловою частотою  $f_c=50\text{Гц}$  необмеженої потужності. Синхронізація Е.Р.С інвертора з Е.Р.С. трансформатора виконується за допомогою блоку системи імпульсно-фазового керування (СІФК).

Моделювання роботи силового ключа (К) і вентилів випрямної і інверторної груп виконано за допущенням, що їх вмикання й вимикання відбувається миттєво. Опір відкритого ключа дорівнює нулю, при закритому ключі - нескінченності.

Підсистема моделі перетворювача та системи керування виконана за допомогою програмних засобів MatLAB з використанням структури Simulink [35].

На рис. 2.5 – 2.6 наведена імітаційна модель перетворювача та системи керування, що включає математичні рівняння згідно [30, 36].

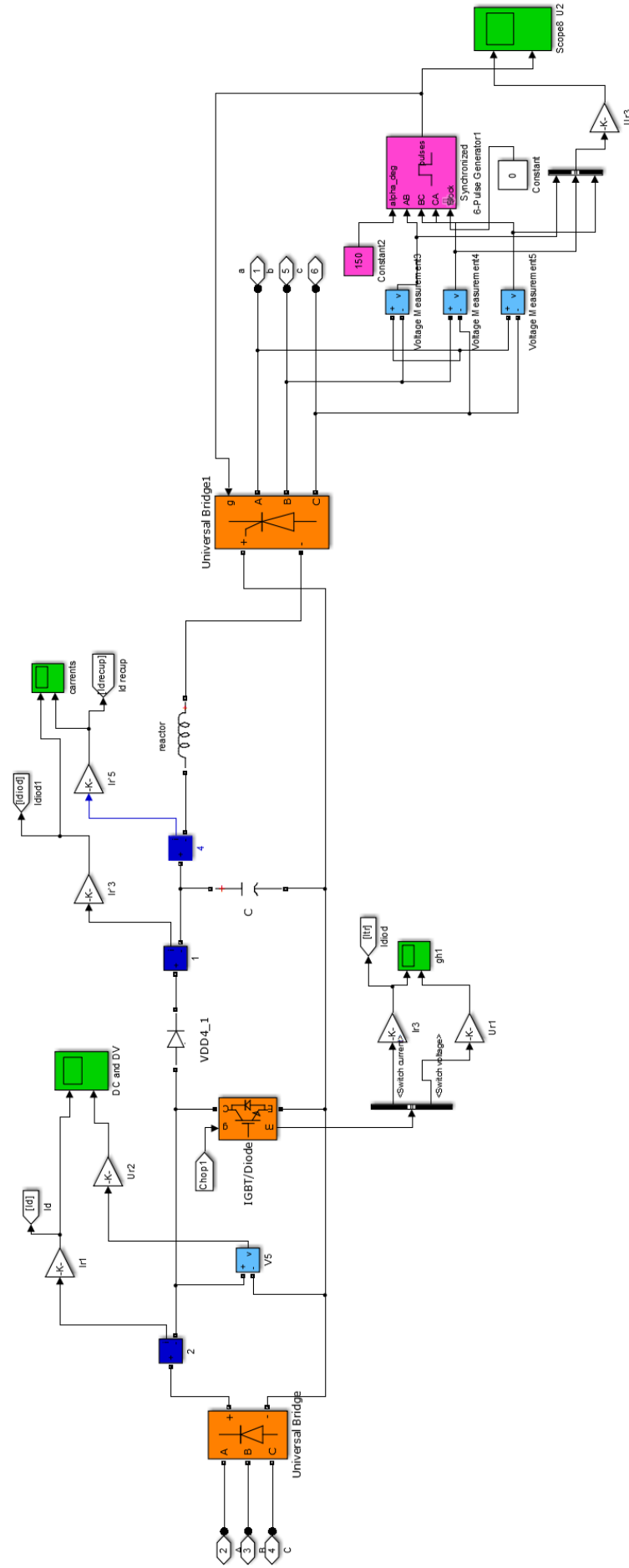
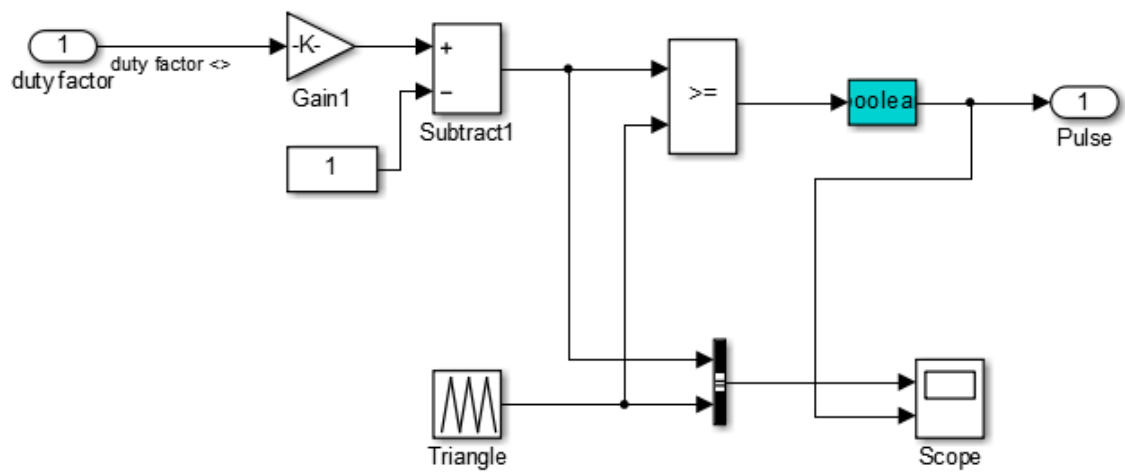


Рисунок 2.5 – Блок підмоделі перетворювача



б)

Рисунок 2.6 – Блок підмоделі формувач імпульсів на IGBT ключ перетворювача

### 2.3 Підсистема моделі електричних втрат в системі електроприводу

Для визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача доцільно оцінити кількість постійних і змінних втрат в АД, які при збільшенні частоти комутації ключів зменшуються щодо зростаючих основних і комутаційних втрат в ключах перетворювача.

Загальні втрати в АД, згідно [34] можна визначити за допомогою формули:

$$\Delta P = \frac{P_n \cdot (1 - \eta)}{\eta}, \quad (2.28)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність АД;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії АД.

Постійні втрати, з урахуванням наявності вищих гармонік струмів статора і ротора з достатньою точністю можна визначити з наступного співвідношення [34]:

$$P_{\text{пост}} = \lambda_I \cdot \Delta P - M_n \cdot \omega \cdot s_n \cdot \left( 1 + \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (2.29)$$

$$\lambda_I = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}, \quad (2.30)$$

де  $\lambda_I$  - коефіцієнт спотворення струму;

$s_n$  - номінальне ковзання ротора АД;

$M_n$  - номінальний момент АД;

$I_{rk}$  - амплітуда  $k$ -ої гармоніки струму.

Змінні втрати обмоток статора і ротора АД визначаються згідно наступного виразу [34]:

$$P_{эл} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{ls}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{lr}^2 \cdot r_2 \quad (2.31)$$

Додаткові та вентиляційні втрати в високовольтних АД зазвичай не перевищують 2% [34] і при зміні частоти комутації ключа будуть пропорційно зростати або знижуватися, тому ними можна знехтувати.

Розглянемо втрати, що виникають в колі постійного струму ІППН при періодичних комутаціях вентилів, а саме в силовому ключі, відсікаючому діоді, а також в випрямлено - інверторній групі.

Сумарні втрати в силовому транзисторі мають кілька складових:

$$P_{ст} = P_{осн} + P_{вмик} + P_{вимик} + P_{вит} + P_y, \quad (2.32)$$

де  $P_{осн}$  - основні втрати, які створюються струмом колектора у включеному стані транзистора;

$P_{вмик}$  - втрати при вмиканні транзистора;

$P_{вимик}$  - втрати при вимиканні транзистора;

$P_{вит}$  - втрати від струмів витоку;

$P_y$  - втрати в ланцюзі управління.

У більшості випадків, втратами від струмів витоку і в колі управління можна знехтувати.

Розрахунок втрат у ввімкненому стані транзистора типу IGBT можна зробити так само, як це робиться для тиристора (вольт - амперні характеристики приладів, у включеному стані, подібні) [36, 37]:

$$P_{осн} = U_o \cdot I_a \left( 1 + k_{\phi}^2 \frac{I_a R_{\partial}}{U_o} \right), \quad (2.33)$$

де  $U_o$ ,  $R_{\partial}$  - гранична напруга і динамічний опір, відповідно;

$I_a = I_{ксп}$  - середнє значення колекторного струму силового ключа;

$k_{\phi}$  - коефіцієнт форми колекторного струму.

Параметри вольтамперної характеристики IGBT у включеному стані можна визначити за відповідними характеристиками, наведених в паспортних даних по IGBT [38].

Середнє значення колекторного струму  $I_{ксп}$  визначається співвідношенням:

$$I_{ксп} = I_{вх} \cdot \gamma, \quad (2.34)$$

де  $I_{вх}$  - середнє значення вхідного струму ІППН;

$\gamma = \frac{t_i}{T}$  - коефіцієнт заповнення, рівний відношенню тривалості ввімкненого

стану транзистора до періоду повторюваності.

Оскільки вхідний струм ІППН може мати значні пульсації, то криві колекторного струму транзистора і анодного струму діода можуть мати досить складну форму. Для розрахунку діючого значення струму колектора можна зробити припущення про лінійний закон зміни цього струму на інтервалі включеного стану силового ключа. При цьому швидкість наростання вхідного струму дорівнює [37, 39]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{вх}}{L_1}, \quad (2.35)$$

де  $L_1$  - індуктивність обмоток АД.

Для розрахунку втрат в транзисторі при вмиканні, як показано в [37, 39], зручно зробити припущення про лінійний закон спаду колекторної напруги на інтервалі включення:

$$u_k = U_{k \max} \left(1 - \frac{t}{t_{cn}}\right) \approx U_{вух} \left(1 - \frac{t}{t_r}\right), \quad (2.36)$$

де  $u_k$  - миттєве значення колекторної напруги;

$U_{k \max} = U_{вух}$  - напруга на колекторі перед ввімкненням;

$t_{cn} = t_r$  - тривалість спаду колекторної напруги, приблизно, дорівнює

тривалості наростання колекторного струму при вмиканні транзистора.

Рівняння (2.34) справедливо при  $0 \leq t \leq t_{cn}$  вважаючи, що початок відліку часу, збігається з початком спаду колекторної напруги.

При зменшенні колекторної напруги і збільшенні струму колектора, зростає падіння напруги в обмотці ротора АД і, відповідно, зменшується струм діода. Так як обмотки статора і ротора мають індуктивність  $L_1$ , струм колектора при вмиканні транзистора наростає за квадратичним законом [39]:

$$i_k = \frac{U_{k \max}}{2 \cdot L_1} \cdot \frac{t^2}{t_r} = \frac{U_{вух}}{2 \cdot L_1} \cdot t_{cn} \cdot \frac{t^2}{t_r^2}. \quad (2.37)$$

Введемо величину  $I_{kp}$ , яка визначається співвідношенням:

$$I_{kp} = \frac{U_{вих}}{2 \cdot L_1} \cdot t_r. \quad (2.38)$$

Значення струму колектора, по (2.37) є величиною струму колектора в момент спаду напруги між колектором і емітером до нуля. Це значення струму використовується в якості розрахункової величини в рівнянні для розрахунку втрат при включенні [37, 39]:

$$P_{вмик} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{cn}} u_k i_k dt = \frac{1}{12} U_{вих} I_{kp} \frac{t_r}{T}. \quad (2.39)$$

Якщо припустити, що,  $I_{kp} = I_{ex}$  то рівняння з урахуванням (2.38) можна переписати у вигляді [37, 39]:

$$P_{вмик} = \frac{1}{12} U_{вих} I_{ex} \frac{t_r}{T} = \frac{1}{12} U_{вих} \cdot I_{ex} \cdot t_r \cdot f_k, \quad (2.40)$$

Аналогічні міркування можна використовувати для розрахунку втрат в транзисторі при виключенні. У цьому випадку зручно зробити припущення про лінійний закон спаду колекторного струму [37, 39]:

$$i_k = I_{k \max} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \approx I_{ex} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right), \quad (2.41)$$

де -  $t_f$  тривалість спаду струму колектора при вимиканні.

Аналогічно можна сказати про лінійний закон наростання колекторної напруги за квадратичним законом на інтервалі вимикання [37, 39]:

$$u_k = u_{cs} = \frac{I_{ex}}{2 \cdot C_s} \cdot \frac{t^2}{t_f} = \frac{I_{ex} \cdot t_f}{2 \cdot C_s} \cdot \frac{t^2}{t_f^2}, \quad (2.42)$$

$$C_s = \frac{I_{ex} \cdot t_f}{2 \cdot U_{вих}}. \quad (2.43)$$

де  $C_s$  - ємність конденсатора захисного кола тиристора.

Відповідно, втрати при вимиканні транзистора визначаються співвідношенням [37, 39]:

$$P_{вим} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} u_k i_k dt = \frac{1}{12} U_{вих} I_{ex} \frac{t_f}{T} = \frac{1}{12} U_{вих} I_{ex} \cdot t_f \cdot f_k. \quad (2.44)$$

Втрати в діоді від зворотного потоку VD, згідно [37], мають теж кілька складових, найбільш істотними з яких є втрати від прямого струму (основні) і втрати при вимкненні діода. Втрати від прямого струму можна обчислити за допомогою формули (2.33).

Згідно [37, 39] потужності втрат при вимиканні діода можна визначити з наступного виразу:

$$P_{вим} = \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau f_k, \quad (2.45)$$

де  $I_{bm}, U_{bm}$  - амплітуда зворотного струму і напруги, відповідно;

$T_k$  - період частоти комутації;

$f_k$  - частота комутації;

$\tau$  - - тривалість спаду зворотного струму діода.

Таким чином, сумарні втрати в обмежувальному діоді:

$$P_{vd} = U_o \cdot I_d \left( 1 + k_\phi^2 \frac{I_d R_d}{U_o} \right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left( \frac{\tau_{ib}^2}{\tau_{ib} + \tau_{ub}} \right) + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k. \quad (2.46)$$

Втрати в випрямно - інверторній групі можуть бути досить точно визначені, як і в силовому транзисторі (діод) відповідно до виразу (2.32). Також, як і у випадку транзистора, втратами від струмів витоку і в колі управління можна знехтувати. В даному випадку можна знехтувати також і втратами при включенні і виключенні тиристора (діода).

Таким чином, сумарні втрати в тиристорі випрямляча будуть відповідати основним втратам [37, 39]:

$$P_T = P_{осн} = U_0 I_{cp} \left( 1 + k_\phi^2 \frac{I_{cp} R_d}{U_0} \right), \quad (2.47)$$

де  $U_0$ ,  $R_d$  – гранична напруга і динамічний опір тиристора (діода), відповідно;

$I_{cp}$  – середнє значення анодного струму тиристора (діода);

$k_\phi$  – коефіцієнт форми струму тиристора (діода).

Середнє значення анодного струму тиристора для трифазної мостової схеми [37]:

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{д}}/3, \quad (2.48)$$

Сумарні втрати випрямляча будуть визначатися кількістю вентиляльних плечей  $n$  в схемі [37]:

$$P_{\text{випр}} = n \cdot P_{\text{осн}}. \quad (2.49)$$

Для трифазної мостової схеми  $n = 6$ .

Підсистема розрахункової моделі електричних втрат в елементах перетворювачі виконана за допомогою програмних засобів MatLAB з використанням структури Simulink [35].

На рис. 2.7 – 2.11 наведені імітаційні розрахункової моделі втрат в елементах перетворювача, що включає математичні рівняння згідно (2.28) – (2.49).

На рис. 2.12 наведена імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач".

Завдяки розробленим підсистем моделей асинхронного двигуна, перетворювача та системи керування та розрахункової моделі втрат в елементах перетворювача створено імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач", яка дозволяє враховувати постійні та змінні втрати в асинхронному двигуні, втрати в напівпровідникових елементах перетворювача та енергії ковзання ротора, що інвертується у мережу, в залежності від частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача.

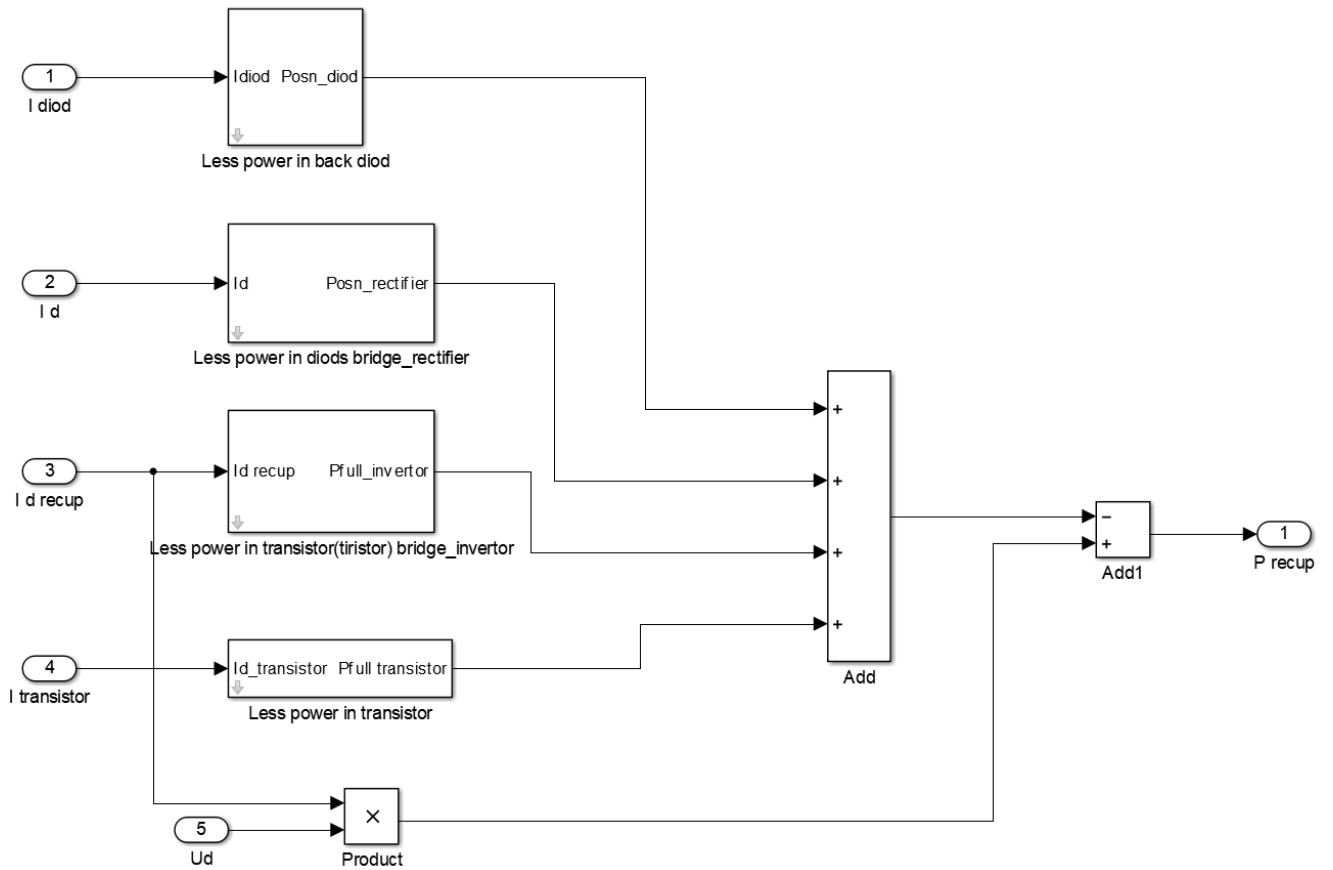


Рисунок 2.7 – Блок підмоделі електричних втрат в перетворювачі

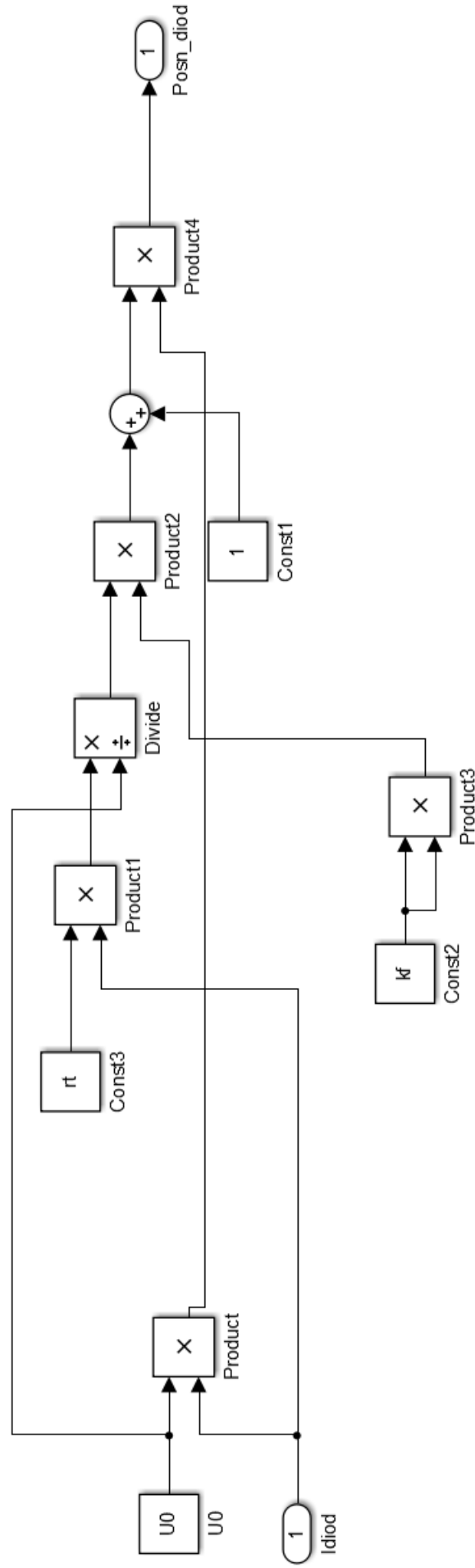


Рисунок 2.8 – Блок підмоделі електричних втрат в зворотньому діоді

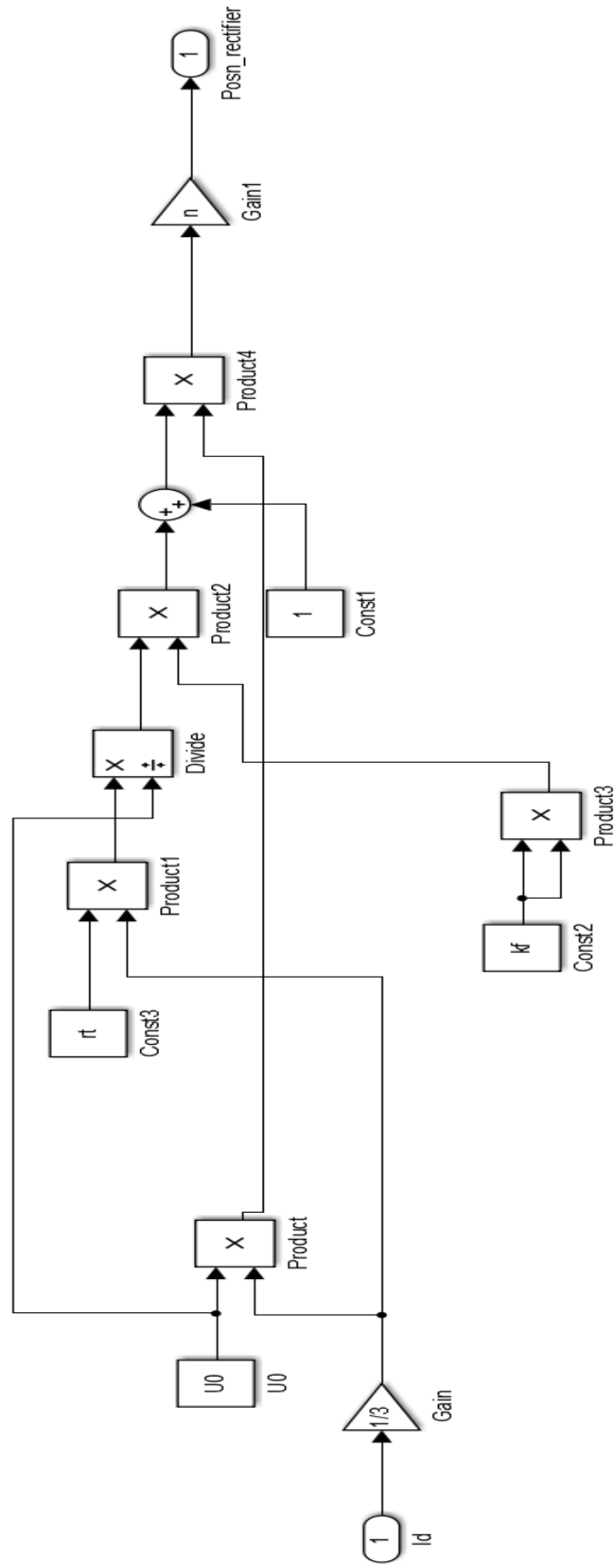


Рисунок 2.9 – Блок підмоделі електричних втрат в діодному мосту трифазного випрямляча





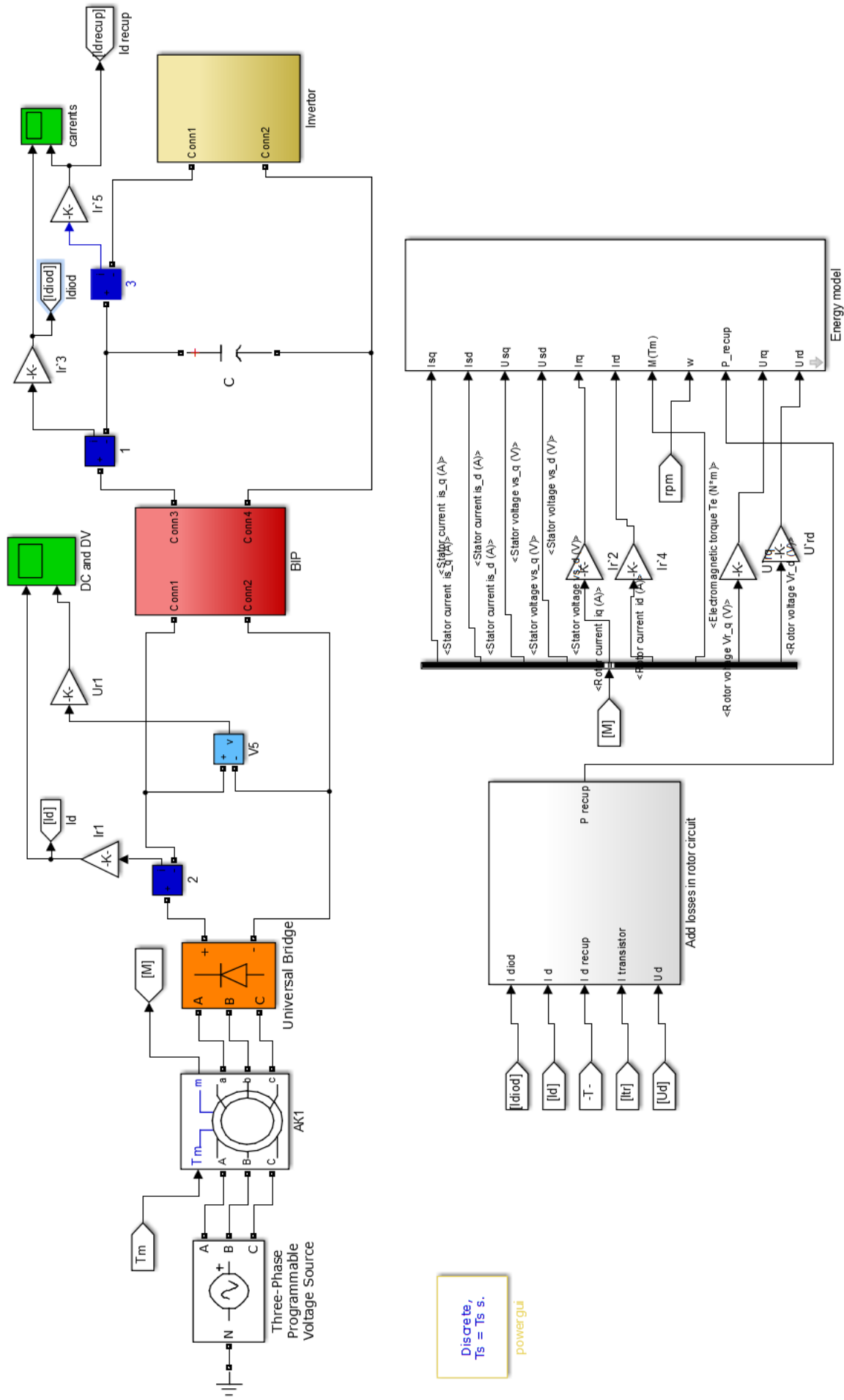


Рисунок 2.12 – Імітаційна модель асинхронного привоу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач"

### 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В СИСТЕМІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Методика розрахунку втрат в двигуні, і в силових елементах перетворювача передбачає формування цільової функції сумарних втрат в асинхронному електроприводі в залежності від частоти комутації силових ключів. Визначення оптимального значення енергоефективності систем асинхронного електроприводу виконується шляхом визначення оптимального значення регульовального параметра перетворювача, що забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії всієї системи електроприводу.

У другому розділі наведена метода та розроблена імітаційна модель, що враховує всі втрати в системі електроприводу і залежності від параметрів регулювання ( цільності імпульсу керуючого сигналу).

Цільова функція сумарних втрат в асинхронному електроприводі є додатком цільової функції втрат в АД та цільової функції в перетворювачі.

Використовуючи рівняння (2.28) – (2.31) цільова функція сумарних втрат в АД в залежності від коефіцієнта спотворення струму має вигляд:

$$\Delta P_{\text{дв}}(\lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) = 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{Is}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{Ir}^2 \cdot r_2 + \lambda_{Is} \cdot \Delta P - M_n \cdot \omega \cdot s_n \cdot \left( 1 + \frac{r_1}{r_2} \right). \quad (3.1)$$

Згідно рівнянь (2.32), (2.46) і (2.49) можна остаточно записати цільову функцію втрат в силових елементах перетворювача від частоти комутації в наступному вигляді:

$$P_{\Sigma III}(f_k) = U_o \cdot I_a \left( 1 + k_{\phi}^2 \frac{I_a R_{\delta}}{U_o} \right) + \frac{1}{12} U_{\text{вух}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot t_r \cdot f_k + \frac{1}{12} U_{\text{вух}} I_{\text{вх}} \cdot t_f \cdot f_k +$$

$$\begin{aligned}
& +U_o \cdot I_d \left( 1 + k^2 \frac{I_d R_\partial}{\phi U_o} \right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left( \frac{\tau_{ib}}{2} \right) + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k + \\
& + 6 \cdot U_o I_{cp} \left( 1 + k^2 \frac{I_{cp} R_\partial}{\phi U_o} \right) + 6 \cdot U_o I_{inv} \left( 1 + k^2 \frac{I_{inv} R_\partial}{\phi U_o} \right) \quad (3.2)
\end{aligned}$$

Використовуючи вирази (3.1) і (3.2) можна виразити загальну функцію втрат в електроприводі:

$$P_\Sigma (f_k, \lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) = P_{\Sigma III} (f_k) + P_{\partial e} (\lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) \quad (3.3)$$

З (3.3) випливає, що для визначення оптимальної частоти комутації силового ключа необхідно ставити задачу оптимізації для трьох змінних: коефіцієнтів спотворення струмів статора  $\lambda_{Is}$ , ротора  $\lambda_{Ir}$  і від частоти комутації ключа  $f_k$ . Рішення завдання досить складне і громіздке і потрібно визначення самих коефіцієнтів  $\lambda_{Is}$  і ротора  $\lambda_{Ir}$ , що залежать від частоти комутації ключа. Тому необхідно привести цільову функцію до виду від однієї змінної, тобто від  $f_k$ .

На рис. 2 наведені залежності коефіцієнтів гармонік для струму статора і ротора на прикладі дослідних АД 480кВт від частоти комутації силового ключа перетворювача, отримані за допомогою імітаційного моделювання при роботі електропривода з постійним навантаженням в діапазоні робочих ковзань  $s = 0,5 \div 0,1$ .

Визначити коефіцієнти гармонійних спотворень також можна на практиці в процесі налаштування перетворювача, використовуючи сучасні вимірювальні прилади, які можуть виконувати спектральний аналіз струмів або напруги, і самостійно розраховувати коефіцієнт гармонійних спотворень.

Для приведення цільової функції (3.3) до виду від однієї змінної ( $f_k$ ) була проведена апроксимація залежності коефіцієнта гармонійних спотворень струму статора (рис. 3.1) і ротора (рис. 3.2) АД від частоти комутації силових ключів перетворювача для робочих ковзань  $s = 0,5 \div 0,1$ .

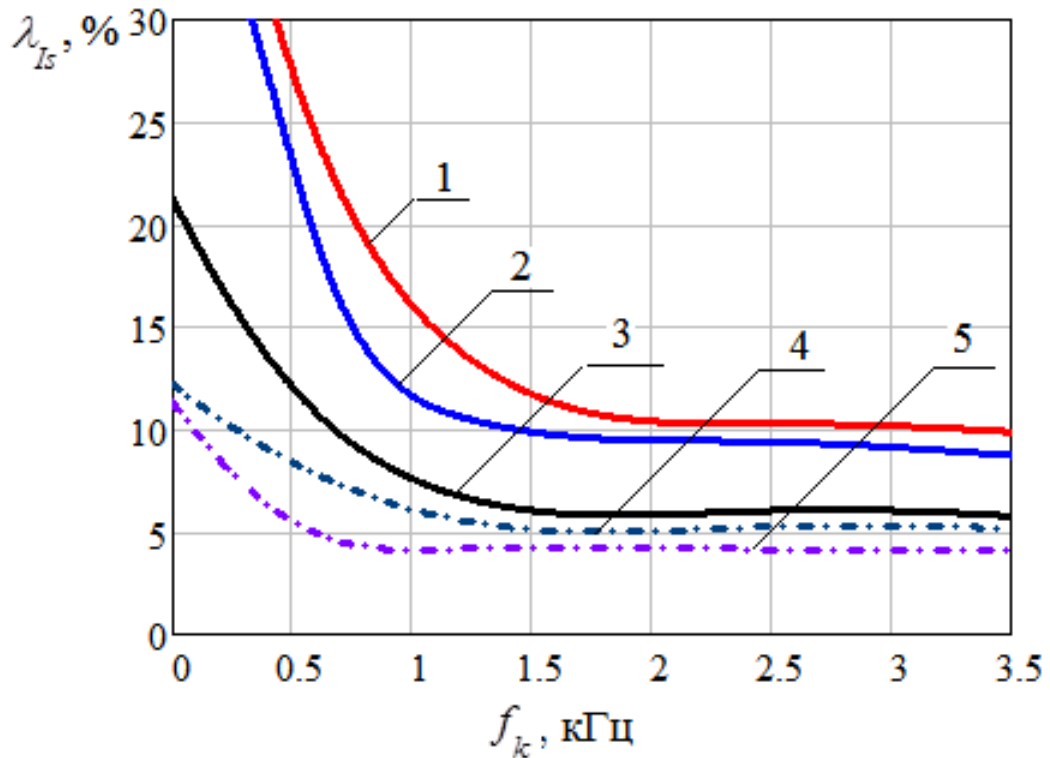


Рисунок 3.1 - Залежності коефіцієнтів гармонік струму статора АД типу 5АНК 400L-6 від частоти комутації силового ключа перетворювача

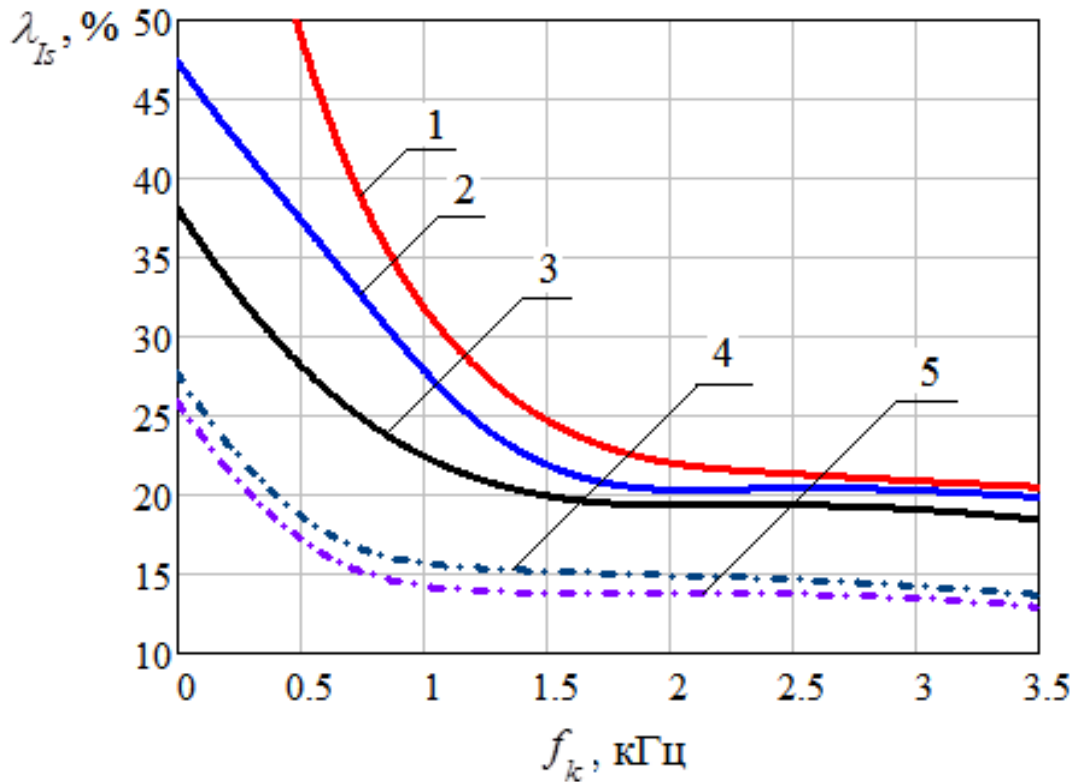


Рисунок 3.2 - Залежності коефіцієнтів гармонік струму ротора АД типу 5АНК 400L-6 від частоти комутації силового ключа перетворювача

Рівняння, що описує залежність коефіцієнта гармонійних спотворень від частоти комутації для струму статора АД має вигляд:

$$\lambda_{I_s}(f_k) = 0,529 - 0,701 \cdot f_k + 0,445 \cdot f_k^2 - 0,126 \cdot f_k^3 + 0,013 \cdot f_k^4 \quad (3.4)$$

Рівняння, що описує залежність коефіцієнта гармонійних спотворень від частоти комутації для струму ротора АД:

$$\lambda_{I_r}(f_k) = 0,857 - 0,999 \cdot f_k + 0,614 \cdot f_k^2 - 0,172 \cdot f_k^3 + 0,018 \cdot f_k^4 \quad (3.5)$$

Залежність (3.3) з урахуванням (3.4) і (3.5) можна привести до виду від однієї змінної  $P_{\Sigma}(f_k)$ . Отже, для визначення оптимальної частоти комутації силового ключа, при якій виконується мінімізація втрат в електроприводі, необхідно цільову функцію привести до виду:

$$\frac{d}{df_k} P_{\Sigma}(f_k) = 0$$

В остаточному вигляді вираз визначення оптимальної частоти комутації виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} & \left(1,35 \cdot 10^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^7 - \left(22,94 \cdot 10^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 43,34 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^6 + \\ & + \left(0,165 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 0,31 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^5 - \left(0,652 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 1,236 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^4 + \\ & + \left(1,554 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 3,006 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^3 - \left(2,271 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,565 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^2 + \\ & + \left(1,924 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,101 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k - \left(0,742 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 1,712 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) + \\ & + \Delta P + \frac{1}{12} U_{\text{вух}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot t_r + \frac{1}{12} U_{\text{вух}} I_{\text{вх}} \cdot t_f + \frac{1}{2} I_{\text{bm}} U_{\text{bm}} \tau_{\text{ib}} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) не важко вирішити за допомогою математичних пакетів.

Згідно (3.6) для асинхронного електроприводу потужністю 480кВт при роботі АД на робочому ковзанні  $s=0,5$  отримано оптимальне значення частоти комутації силового ключа за умови мінімізації втрат відповідно  $f_k^{opt} = 0,626$  кГц,

Таким чином отриманий аналітичний вираз (3.6) може бути використано при визначенні ефективної частоти комутації силових ключів, що забезпечує мінімальний рівень втрат, що виділяються в електроприводі. Для розрахунку ефективної частоти комутації силових ключів при інших значеннях робочого ковзання необхідно приводити апроксимуючі вирази (3.4) і (3.5) для власних значень коефіцієнтів гармонік струмів статора і ротора АД.

Для підтвердження адекватності наведеного методу визначення ефективної частоти комутації вентилів перетворювача, за допомоги розробленої імітаційної моделі отримані розрахункові залежності сумарних втрат в електроприводі від частоти комутації ключів перетворювача відповідно для АД потужністю  $P_H = 480$  кВт, при робочому ковзанні  $s = 0,5$ .

На рис. 3.2 наведено результати моделювання у вигляді залежності загальних втрат в електроприводі від частоти комутації ключів перетворювача для асинхронного електроприводу потужністю  $P_H = 480$  кВт, при робочому ковзанні  $s = 0,5$ .

На рис. 3.3 наведено результати моделювання у вигляді залежності коефіцієнта корисної дії електропривода від частоти комутації ключів перетворювача для асинхронного електроприводу потужністю  $P_H = 480$  кВт, при робочому ковзанні  $s = 0,5$ .

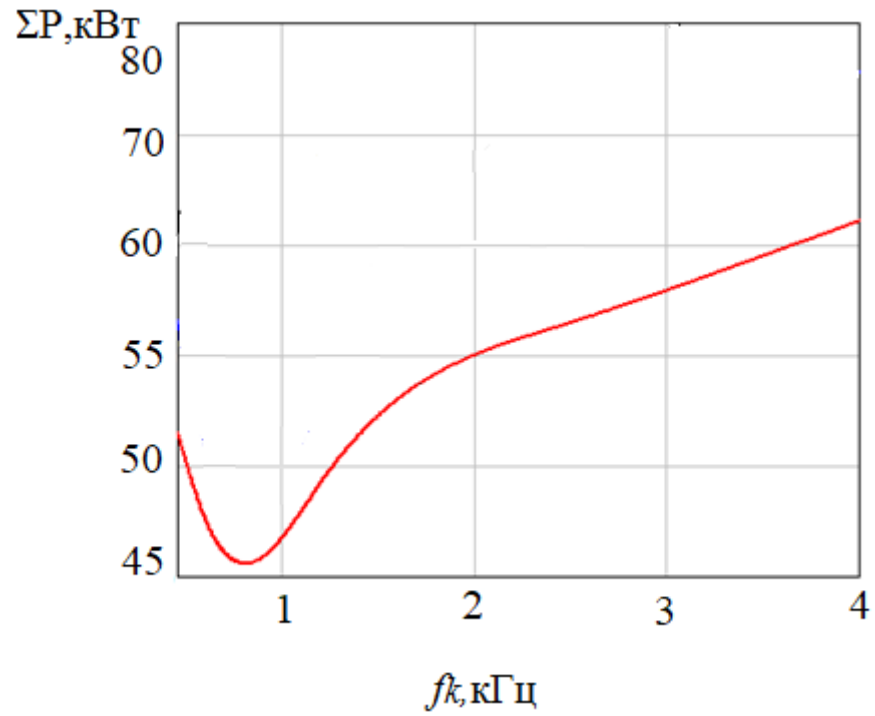


Рисунок 3.2 - Розрахункові залежності загальних втрат в асинхронному електроприводі ( $P_H = 480$  кВт) від частоти комутації силових ключів перетворювача для робочого ковзання АД  $s = 0,5$

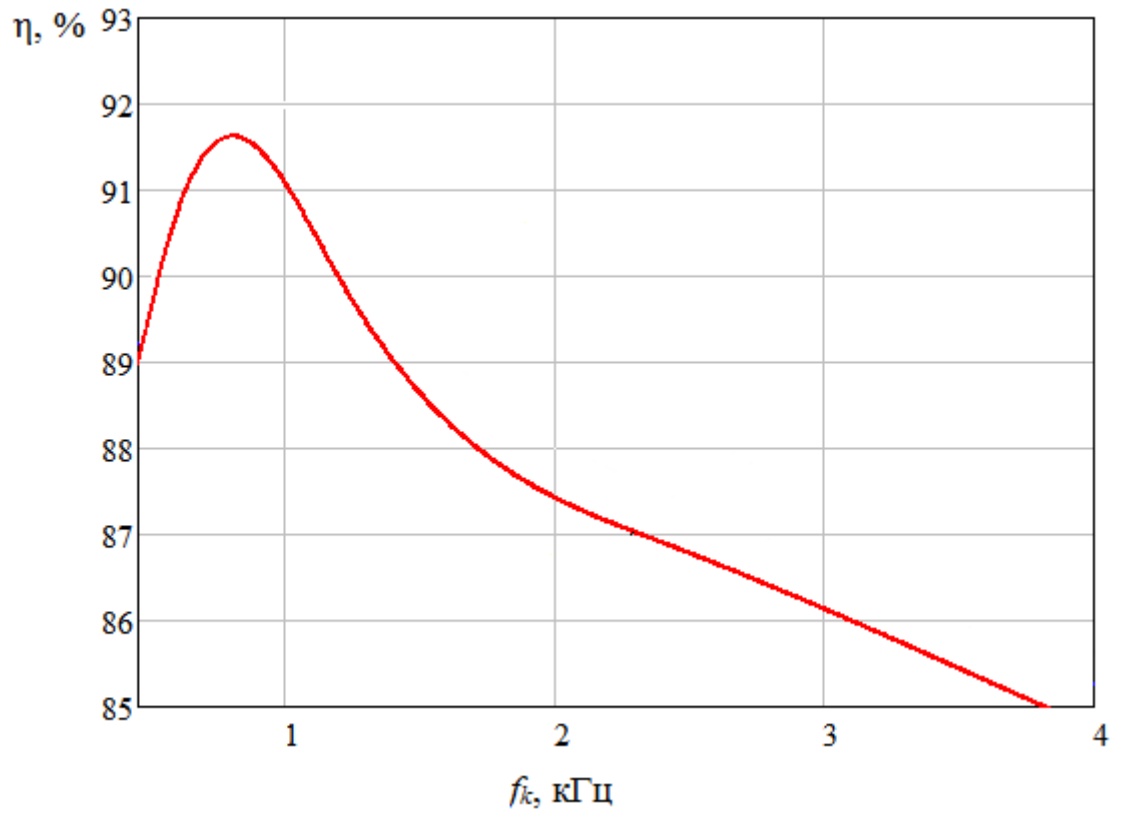


Рисунок 3.2 - Розрахункові залежності коефіцієнту корисної дії в асинхронному електроприводі ( $P_n=480$  кВт) від частоти комутації силових ключів перетворювача для робочого ковзання АД  $s = 0,5$

Аналіз залежностей показує, що мінімізація загальних втрат в асинхронному електроприводі виконується при частотах комутації для АД:  $P_H = 480 \text{ кВт}$  -  $f_k = 0,643 \text{ кГц}$ . Необхідно відзначити, що для АД з різними номінальними потужностями в системі асинхронного електроприводу оптимальне значення частоти комутації практично не змінюється.

На рис. 3.3 наведено результати моделювання у вигляді залежності коефіцієнта корисної дії електропривода від частоти комутації ключів перетворювача для асинхронного електроприводу потужністю  $P_H = 480 \text{ кВт}$ , при робочому ковзанні  $s = 0,5$ .

Отриманий аналітичний вираз (3.6) має прийнятну похибку при визначенні ефективної частоти комутації силових ключів, що забезпечує мінімальний рівень втрат в електроприводі. Однак запропонований метод вимагає визначення коефіцієнтів гармонік для струмів статора і ротора АД, значення яких залежать як від його робочого ковзання, так і від режиму роботи електроприводу. Тому для кожного випадку необхідно приводити апроксимуючі вирази (3.4) і (3.5) для власних значень коефіцієнтів гармонік струмів статора і ротора АД. Запропонована методика визначення оптимальної частоти комутації силового ключа може бути застосована при інженерному проектуванні, а також при налагоджувальних роботах перетворювачів в залежності від класу і способу роботи електроприводу.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Економічна оцінка спроектованого асинхронного електроприводу 480 кВт проводиться після кінцевої розробки його конструкції та технології виготовлення на основі використання повної калькуляції собівартості з урахуванням реальних витрат на освоєння та розвиток його виробництва.

### 4.1 Розрахунок собівартості та ціни виробу

Собівартість є основою ціни. Ціна електротехнічної продукції представляє собою грошове вираження вартості. Згідно місця виникнення витрат собівартість поділяється на цільову, виробничу та повну. В цільову собівартість враховуються витрати даного цеху на виробництво продукції: витрати на матеріали, паливо, енергію, оплату праці виробничих працівників, на утримання та експлуатацію устаткування, а також управлінські витрати по управлінню підприємством[41].

Повна собівартість складається з суми виробничої собівартості та не виробничих витрат. При визначенні оптової ціни на виріб використовується повна собівартість та прибуток. Виходячи з вище сказаного повна собівартість визначається за формулою[42]

$$Ц = С + П, \quad (4.1)$$

де Ц - ціна виробу, грн.;

С - повна собівартість, грн.;

П - прибуток, грн.

В свою чергу, для визначення повної собівартості використовуємо витратний метод

$$C = M + K + 3O + 3Д + BC + 3ВВ + АВ + ВЗ , \quad (3.2)$$

де М - вартість сировини і основних матеріалів, грн.;

К - вартість купівельних комплектуючих виробів та напівфабрикатів, грн.;

3O - основна заробітна плата основних виробничих робітників, грн.;

3Д - додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, грн.;

BC - відрахування на єдиний соціальний внесок з заробітної плати основних виробничих робітників, грн.;

3ВВ - загально виробничі витрати, грн.;

АВ - адміністративні витрати, грн.;

ВЗ - витрати на збут, грн.

Витрати, що формують собівартість виробів електротехнічної продукції, групуються в двох напрямках - по економічним елементам та калькуляційним статтям. Оскільки вивчення витрат на виробництві по економічним характеристикам не дозволяє визначити собівартість конкурентних виробів та встановити ціни на окремі види продукції, застосуємо групування витрат по калькуляційним статтям витрат[41-43].

Калькуляція являє собою науково-обґрунтоване вивчення собівартості одиниці продукції підприємства, його структурних підрозділів та процесів. Під калькуляцією розуміють врахування всіх елементів собівартості продукції.

Калькуляційні статті складаються з сировини та основних матеріалів, придбаних комплектуючих виробів, заробітна плата виробничих працівників, транспортно-заготівельні витрати (у розмірі 3% від вартості всіх матеріалів), відрахування на єдиний соціальний внесок з заробітної плати основних виробничих робітників, загально виробничі витрати, адміністративні витрати та

витрати на збут.

Сума вказаних статей витрат складає виробничу собівартість. Після включення сюди невиробничих витрат, отримуємо повну собівартість.

Витрати групуються по ряду ознак. Залежно від способу відрахування на собівартість окремих видів продукції відрізняють прямі та непрямі витрати.

Прямі витрати пов'язані з виготовленням продукції можуть бути віднесені напряму в окремі її види. Прямі статті витрат включають основні матеріали, комплектуючі вироби, паливо та енергію на технічні цілі, основну заробітну плату виробничих працівників. Такого характеру витрати нормуються, як правило, на одиницю виготовленої продукції.

Під не прямими розуміють такі витрати які пов'язані з виробництвом декількох видів продукції та не можуть бути напряму віднесені на кожен виріб. Саме цьому вони розділяються непрямим шляхом. В електротехнічній промисловості ці затрати встановлюються пропорційно сумі основної заробітної плати виробничих працівників та витрат на утримання та експлуатацію устаткування[43].

Відрізняють умовно-змінні та умовно-постійні витрати. До умовно-змінних (пропорційних) відносять витрати: абсолютна величина яких змінюється в залежності від об'єму виробництва. Сюди входять витрати на сировину та матеріали, придбані вироби, основна заробітна плата виробничих працівників та інші. В той самий час їх величина на одиницю продукції не змінюється, якщо не змінюється норма витрат матеріалів та норма праці.

До умовно-постійних відносяться такі витрати, абсолютна величина яких не змінюється чи змінюється в незначному розмірі при зміні об'ємів виробництва. Вони включають заробітну плату управлінського персоналу, амортизацію будівель, витрати на опалення та освітлення приміщень та інші. При збільшенні об'ємів виробництва умовно-постійні витрати (на одиницю продукції) зменшуються.

Вартість сировини та основних матеріалів, з яких виготовлений спроектований двигун, розраховується виходячи з норм витрат на одиницю

продукції та оптових цін. Кількість матеріалів встановлюємо згідно норм витрат та помножуємо на оптові ціни одиниці матеріалу згідно діючим прейскурантам. Вартість матеріальних витрат визначаємо з урахування транспортно-заготовчих витрат, які складають 3 % їх вартості. При цьому сума витрат на основні матеріали зменшується на суму повернених відходів з урахуванням коефіцієнта їх використання. Розрахунок вартості сировини матеріалів спроектованого двигуна наведений в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Розрахунок вартості сировини та основних матеріалів

Матеріали	Норма витрат		Ціна, грн./од.	Вартість, грн.	
	база	проект		база	проект
Електротехнічна сталь, кг	87	85	37	3219	3145
Алюміній, кг	8,7	8,5	49	426,3	416,5
Чавун, кг	65	65	19,5	1267,5	1267,5
Ізоляційні матеріали:	0,9	0,9	14,9	13,41	13,41
Дріт ПЕТ-155, кг	18	17,2	97	1746	1668,4
Метали чорні	31	31	8	248	248
Лак	1,3	1,3	56	72,8	72,8
Фарба	0,7	0,7	35	24,5	24,5
Всього:				7017,51	6856,11
Транспортно-заготівельні витрати				98,8	93,2
Усього:				7116,31	6949,31

Розрахунок вартості придбаних комплектуючих виробів та напівфабрикатів наведено у табл.4.2.

Наступний етап розрахунку витрат на виробництво спроектованого електродвигуна приведений у табл. 4.3. По статті «Заробітна плата виробничих працівників» враховується її величина, яка нараховується за працю по виготовленню електротехнічних виробів. В неї входять заробітна плата

працівникам по годинам, доплати згідно преміальної системи оплати праці, доплати за шкідливі умови праці.

Таблиця 4.2 - Розрахунок вартості придбаних комплектуючих виробів

Найменування виробу	Норма		Ціна, грн./од	Вартість, грн.	
	база	проект		база	проект
Болт М: 6-16	24 шт.	24шт	0,95	22,8	22,8
Підшипник 32316Л1	1шт.	1шт	425	425	425
Підшипник 92316Л1	1шт.	1шт.	585	585	585
Вентилятор	1шт.	1шт.	325	325	325
Всього:				1357,8	1357,8

Таблиця 4.3 - Розрахунок заробітної плати виробничих робітників, для спроектованого двигуна

Найменування операції	Трудомісткість, н/год.	Розряд роботи	Тариф	Шкідливість (10%)	Премія (10%)	Сума, грн.
Заготовчі операції	9	4	15	14,6	17	166,6
Складання статора	5	5	17	7,3	9	101,3
Складання ротора	3,5	5	16,3	7,5	7,4	71,95
Заливка ротора	3	5	15,5	5	4,5	56
Намотування обмотки	6,5	5	17,3	12,4	13,5	138,35
Просочування, сушка	6	5	15,8	9,7	10,6	117,3
Складання двигуна	6	5	16,3	9,8	10,8	118,6
Випробування	2	5	15,8	3,2	3,5	38,7
Погодинні роботи	5	4	13,5	8,5	8,5	84,5
Всього:					84,8	796,1

Відрахування в єдиний соціальний внесок розраховуються у відсотках від суми основної та додаткової зарплатні, а також премії з прибутку. Величина відсотку складає 39,5%.

Витрати на утримання та експлуатацію устаткування займають значну питому вагу в загальній сумі комплексних витрат. У їх склад включаються витрати, пов'язані з роботою устаткування, тобто витрати на утримання, амортизацію, поточний ремонт виробничого і підйомно-транспортного устаткування, цехового транспорту, обслуговування робочих місць, а також на амортизацію і відшкодування зносу інструментів і пристосувань та ін.

Виробнича собівартість розраховується за формулою

$$C_v = M + K + 3O + 3Д + BC + 3BB, \quad (4.3)$$

Додаткова заробітна платня для даного виробництва складає 40% від основної зарплатні ( $3O = 2500$  грн) й, відповідно, дорівнює:

$$3Д = (3O \cdot K_D) / 100 \quad (4.4)$$

де  $K_D$  - процент додаткової заробітної плати,

$$3Д = (796,1 \cdot 40) / 100 = 500 \text{ грн.}$$

Відрахування в єдиний соціальний внесок розраховуються у відсотках від суми основної та додаткової зарплатні, а також премії з прибутку.

Величина відсотку складає 39,5%, що розраховується по формулі

$$BC = (3O + 3Д + ПП) \cdot K_{BC} / 100, \quad (4.5)$$

де ПП - премії з прибутку, грн.;

$K_{BC}$  - % коефіцієнт відрахування в єдиний соціальний внесок;

$$BC = (2500+500+81,15) \cdot 39,5/100=545,45 \text{ грн.}$$

Величина загальновиробничих витрат в середньому складає 400% від величини основної заробітної платні

$$ЗВВ = ЗО \cdot \alpha / 100, \quad (4.6)$$

де  $\alpha$  - загально виробничих витрат, %;

$$ЗВВ = 796,1 \cdot 400/100=3184,4 \text{ грн.}$$

Виробнича собівартість

$$C_b = 69,49,31+13,57,8+796,1+500+3184,4= 12786,84 \text{ грн.}$$

Величина адміністративних витрат складає 500% від основної заробітної платні основних виробничих робітників

$$AB = 3O \cdot \beta / 100 \quad (4.7)$$

де  $\beta$  - величина відсотку адміністративних витрат, %;

$$AB = 796,1 \cdot 500/100=3980,5 \text{ грн.}$$

Витрати на збут складаються з витрат, пов'язаних з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції та ін.

Величина витрат на збут складає 2% від виробничої собівартості

$$B3 = C_b \cdot \gamma / 100 \quad (4.8)$$

де  $\gamma$  - % величина витрат на збут;

$C_v$  - собівартість виробнича,

$$BЗ = 12786 \cdot 2/100 = 255,72 \text{ грн.}$$

Повна собівартість розраховується за формулою (3.2)

$$C = 6949,31 + 1357,8 + 796,1 + 500 + 545,45 + 3184,4 + 255,72 = 13587,98 \text{ грн.}$$

На підставі отриманих величин розраховується прибуток виробництва, величина якого складає 30% від повної собівартості.

$$\Pi = C \cdot P/100 \quad (4.9)$$

де  $P$  - рентабельність виробу %,

$$\Pi = 13587,98 \cdot 30/100 = 4076,394 \text{ грн.}$$

Ціна виробу визначається за формулою

$$\text{Ц} = C + \Pi \quad (4.10)$$

$$\text{Ц} = 13587,98 + 4076,934 = 17664,374 \text{ грн.}$$

Податок на додану вартість згідно законодавства становить 20% від оптової ціни і розраховується за формулою

$$\text{ПДВ} = \text{Ц} \cdot N_{\text{пдв}}/100, \quad (4.11)$$

де  $N_{\text{пдв}}$  - норматив податку на додану вартість %,

$$\text{ПДВ} = 17664,374 \cdot 20 / 100 = 3532,88 \text{ грн.}$$

Ціна продажу асинхронного двигуна

$$C_{\text{прод}} = C + \text{ПДВ}, \quad (4.12)$$

$$C_{\text{прод}} = 17664,374 + 3532,88 = 21197,22 \text{ грн.}$$

На підставі цих отриманих розрахунків складають калькуляцію собівартості та ціни виробу (табл.4.4).

Таблиця 4.4 - Калькуляція собівартості та цін (базового та спроектованого) асинхронного двигуна

№ п/п	Найменування статті затрат	%	Сума, грн.	
			База	Проект
1	2	3	4	5
1	Матеріали, сировина		7116	6949,31
2	Купівельні комплектуючі вироби		1357,8	1357,8
3	Основна заробітна плата виробничих робітників		796,1	796,1
4	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	40	500	500
5	Відрахування в єдиний соціальний внесок	39,5	545,45	545,45
6	Загальновиробничі витрати	400	3184,4	3184,4
7	Виробнича собівартість		12990,81	12786,81
8	Адміністративні витрати	500	4551,5	3980,5
9	Витрати на збут	2	265,5	255,72
10	Повна собівартість		14100,7	13857,98

Кінець табл. 4.4

1	2	3	4	5
11	Прибуток	30	4101,4	4076,39
12	Оптова ціна		17991,2	17664,37
13	ПДВ	20	3741,25	3532,88
14	Ціна продажу		21553,2	21197,22

#### 4.2 Економічна ефективність асинхронного двигуна

Розраховуємо питомі витрати на одиницю потужності

$$K1 = C/P, \quad (4.13)$$

де  $C$  - оптова ціна, грн.;

$P$  - номінальна потужність виробу, кВт,

$$K1(\Pi) = 17664,37/45 = 392,5 \text{ грн./кВт.}$$

$$K1(\text{б}) = 21197,22/45 = 471,05 \text{ грн./кВт.}$$

Розрахуємо питомі витрати на одиницю маси

$$K2 = C/M, \quad (4.14)$$

де  $M$  - маса виробу, кг;

$$K2(\text{б}) = 17664,37/1700 = 10390 \text{ грн./кг.}$$

$$K2(\Pi) = 21197,22/1700 = 1246,3 \text{ грн./кг.}$$

Економічна ефективність двигуна досягається при виробництві на заводі-виробнику та при експлуатації у споживача. На виробництві економічний ефект досягається за рахунок зменшення маси двигуна, економії матеріалів, зниження витрат від браку, трудомісткості. В експлуатації економічний ефект досягається за рахунок економії електроенергії у зв'язку зі зменшенням сумарних втрат в двигуні та збільшення його ККД.

Економія електроенергії у споживача при однозмінній праці (8 годин) за 1 год (252 робочих днів) складає для одного двигуна

$$E_e = P \cdot T_2 \cdot C_{ен} \cdot K, \quad (4.15)$$

де  $P$  - номінальна потужність двигуна, кВт;

$T_2$  - дійсний річний фонд часу експлуатації двигуна, год.;

$C_{ен}$  - ціна електроенергії,  $C_{ен} = 1.9$  грн./кВт·год.;

$K$  - коефіцієнт враховуючий збільшення ККД двигуна,  $K = 0,08$ .

$$E_e = 18,5 \cdot 8 \cdot 252 \cdot 1,9 \cdot 0,08 = 3290,1 \text{ грн.}$$

Економія грошових коштів на сплату електроенергії за весь строк експлуатації двигуна складає

$$E_{ен} = E_e \cdot T, \quad (4.16)$$

де  $T$  - строк служби двигуна,  $T = 15$  років при напрацюванні 4000 год;

$$E_{ен} = 3290,1 \cdot 15 = 49350,7 \text{ грн.}$$

Економія грошових ресурсів при експлуатації у споживача за весь термін експлуатації складає 49350,7 грн., за рік - 3290,1 грн.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оскільки тема магістерської роботи – «Моделювання та дослідження енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу 480 *кВт* в умовах тривалого режиму роботи», передбачає проведення досліджень та розрахунків у приміщенні дослідницького центру обладнаному персональними комп'ютерами (далі – ПК) з екранними пристроями (далі – ЕП), тому нижче розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії і гігієни праці для робочих місць приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП, а також заходи з пожежної безпеки та цивільного захисту, у відповідності з методичними вказівками [44].

### 5.1 Аналіз потенційних небезпек

Ідентифікацію небезпек здійснюють згідно принципу, що «усе впливає на усе», тобто все може бути як джерелом небезпеки, так і зазнати небезпеки.

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і технологічних процесів у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП, згідно ГОСТ 12.0.003-74\* «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [46], виявлені наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, здатні привести до травм або ушкодження здоров'я працівників:

- оскільки приміщення обладнане електротехнічними приладами та пристроями, тому, у разі порушення ізоляції або необережного поводження осіб, що працюють з комп'ютерами існує можливість ураження електричним струмом;

- механічне травмування в наслідок не раціонального розташування, устрою та обладнання робочих місць, тобто з порушенням ергономічних вимог до компонування робочого місця та до робочої пози;

- порушення основних вимог до ергономічних характеристик моніторів може негативно позначитися на здоров'ї осіб, що працюють з комп'ютерами;

- незадовільні технічні характеристики моніторів, або неправильне його встановлення, можуть негативно вплинути на зір та на здоров'я загалом;

- незадовільні параметри мікроклімату в робочих приміщеннях, у зв'язку із відсутністю приладів, що забезпечують необхідний повітрообмін та опалювальних систем, які можуть викликати загальні захворювання;

- недостатнє або надмірне освітлення робочих місць, в зв'язку з несправністю, або хибним вибором освітлювальних приладів, в зв'язку з неправильним розташуванням робочих місць по відношенню до джерел природного та штучного освітлення, що призводить до погіршення зору або ефекту засліплення;

- підвищений рівень шуму на робочому місці при неправильному або нераціональному розміщенні робочих місць і обладнання, при використанні неякісного обладнання або нераціональних режимів його роботи може бути причиною зниження працездатності, а також порушення слуху осіб, що працюють з комп'ютерами;

- неправильне положення роботи за комп'ютером, робота користувача вимагає тривалого статичного напруження м'язів спини, шиї, рук і ніг, що може привести до кістково-м'язових порушень;

- порушення вимог до режимів праці та відпочинку користувачів ПК, а саме неякісне або нераціональне розроблення внутрішньо-змінного режиму праці та відпочинку, відсутність або недотримання регламентованих перерв для відпочинку є причиною підвищення нервово-емоційного напруження, втоми зорового аналізатора, погіршення мозкового кровообігу, проявів несприятливих наслідків гіподинамії, підвищення втоми;

- відсутність або неправильний вибір типу та необхідної кількості первинних засобів гасіння пожеж (вогнегасників) у результаті помилок у розрахунках, може стати причиною поширення пожежі, а як наслідок причиною термічних опіків різного ступеню важкості.

Також необхідно враховувати, що різні по природі своєї дії небезпечні і шкідливі виробничі фактори можуть проявлятися одночасно.

## 5.2 Заходи з охорони праці

### 5.2.1 Заходи по забезпеченню безпеки

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов'язані з моделюванням та дослідженням енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу 480 *кВт* в умовах тривалого режиму роботи, є спеціалізованим приміщенням дослідницького центру яке обладнане ПК з ЕП.

Приміщення дослідного центру, що обладнане ПК з ЕП відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55], «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ») [47], ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом» [48], НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [?], НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [64].

Обладнання та пристрої, що розташовані в приміщенні будуть експлуатуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ») [50], НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») [?] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [54].

У приміщенні обладнане вісім робочих комп'ютеризованих місць, до складу яких входять вісім рідкокристалічних моніторів Samsung Curved

LC27JG50Q (LC27JG50QQIXCI), офісні меблі та стенди. Розміри приміщення:  $8,5 \times 6 \times 3,2$  м., тобто його площа –  $51$  м<sup>2</sup>, а об'єм –  $163,2$  м<sup>3</sup>, покриття підлоги – паркет. Живлення електрообладнання приміщення здійснюється від мережі змінного струму напругою  $220$  В і частотою  $50$  Гц.

Згідно «ПУЕ» [47], за ступенем небезпеки ураження електрострумом, приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ» [47], обладнання приміщення дослідного центру з ПК, для захисту від ураження електричним струмом при прямому дотику до струмовідних частин має основну та подвійну ізоляцію, яка складається з основної і додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до п. 6.7.1 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [51] ПК з ЕП, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК по способу захисту людини від ураження електричним струмом, належать до I класу, оскільки мають основну і подвійну ізоляцію, елемент для заземлення та провід для приєднання до джерела живлення, що має заземлюючу жилу і вилку з заземлюючим контактом.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [51] усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні дослідного центру з ПК, яке може опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Згідно «ПУЕ» [47] електрообладнання приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП характеризується як електроустановки до  $1$  кВ, тому для забезпечення безпеки персоналу відповідно до вимог глави 1.7 «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ» [47], все електрообладнання заземлене. Величина опору контуру захисного заземлення, у будь-яку пору року, не перевищує –  $4$  Ом.

Оскільки приміщення дослідного центру з ПК за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому згідно вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [51] та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» [?] користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають I групу з електробезпеки.

До оперативного обслуговування електромереж та електрообладнання у приміщенні дослідного центру, згідно пунктів 5.1.1, 5.1.2 и 6.1.7 НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» [50] та пунктів 2.2.3 і 3.2.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [51], допускаються працівники зі складу оперативних або оперативно-виробничих працівників, які знають його схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань. Працівники що одноосібно обслуговують електромережі та електрообладнання у приміщенні дослідного центру мають III групу з електробезпеки.

Відповідно до вимог глави 1.3 «Вибір провідників за нагрівом» – «ПУЕ» [47] усі електричні мережі та електроустаткування приміщення з ПК захищено від струмів короткого замикання та струмів перевантаження, а також перенапруги на ділянках цепі. В якості апаратів захисту застосовано автоматичні вимикачі. Які мають у своєму складі електромагнітний (для захисту від струмів короткого замикання) та тепловий (для захисту від перевантаження за струмом) роз'єднувачі, струми уставок яких (так як і запобіжників) обрані найменшими за розрахованими струмами для забезпечення вимог швидкодії, чутливості та селективності захисту.

Згідно вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЄС 90/270/ЄЕС [?] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [54] виконано такі п'ять основних вимог до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;

- екрани вільні від відблисків і відбиття;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Також врахований такий важливий чинник загальної ергономіки монітора, як можливість його регулювання. Тому у приміщенні встановлені сучасні монітори які дозволяють працювати з різними відео адаптерами і в різних режимах. Також можливе інколи необхідне ручне регулювання геометричних розмірів і положення зображення на екрані, а також корекція спотворень.

### 5.2.2 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці для приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [53], ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55] і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [54].

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [56] і ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [57]. Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21-23°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

- у теплий період року: температура 22-24°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [58], з метою забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні обладнаному ПК з ЕП передбачена система централізованого водяного опалення з радіаторами, а на теплий період, зважаючи на те, що площа приміщення становить 51 м<sup>2</sup> передбачений побутовий кондиціонер типу Zanussi ZACS/I-24 HE/A15/N1. Виходячи з того, що один кондиціонер розрахований на приміщення площею – 60 м<sup>2</sup>.

З метою забезпечення необхідного повітрообміну у приміщенні обладнаному ПК з ЕП, зважаючи на те, що об'єм приміщення становить 163,2 м<sup>3</sup>, передбачена система механічної припливно-витяжної вентиляції – методом рекуперації, за допомогою рекуператора типу Prana-340A. Який забезпечує 3-кратний обмін повітря за годину, виходячи з того, що він забезпечує наступний повітрообмін: приплив – 540 м<sup>3</sup>/год, витяг – 520 м<sup>3</sup>/год.

Оптимальні рівні позитивних ( $n+$ ) і негативних ( $n-$ ) іонів у повітрі приміщення з ЕП відповідають вимогам додатку 3 ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і становить:  $n+$  = 1500-30000 (шт. на 1 см<sup>3</sup>);  $n-$  = 3000-5000 (шт. на 1 см<sup>3</sup>). Підтримку оптимального рівня легких позитивних і негативних аероіонів у повітрі на робочих місцях забезпечують за допомогою біполярних коронних аероіонізаторів.

У приміщенні з ПК згідно вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55] та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [59] передбачено природне і штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, що створюють прямі та відбиті

відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачені сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Штучне освітлення в приміщенні, забезпечено системою загального рівномірного освітлення. Значення освітленості на поверхнях столів в зоні розміщення документів становить 300-500 лк. Як джерела штучного освітлення використовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ. Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50° до 90° з вертикаллю в повздовжній і поперечній площинах і складає не більше 200 кд/м<sup>2</sup>, захисний кут світильників – не менше 40°. Показник осліпленості для джерел загального штучного освітлення в приміщенні не перевищує 20, а показник дискомфорту, відповідно 40.

У приміщенні обмежена можливість прямих і відбитих відблисків від джерел природного та штучного освітлення на робочих поверхнях (екран, стіл, клавіатура). Яскравість світлових поверхонь (вікон, джерел штучного освітлення), розташованих в полі зору, не перевищує 200 кд/м<sup>2</sup>. Яскравість відблисків на дисплеях не перевищує 40 кд/м<sup>2</sup>, а яскравість стелі при застосуванні системи відбитого освітлення не перевищує 200 кд/м<sup>2</sup>.

Захистом від прямих відблисків є зниження яскравості видимої частини джерел світла шляхом застосування спеціальних розсіювачів, відбивачів та інших світлозахисних пристроїв, а також правильне розміщення робочих місць відносно джерел світла; від відображених відблисків – правильне розміщення предметів, використання матових поверхонь предметів в приміщенні.

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приміщення відповідають вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55] і ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [60]. Зниження рівня шуму в приміщенні з ПК здійснюється за рахунок:

- використання блоків живлення ПК з вентиляторами на гумових підвісках;

- використання ПК, в яких вентилятор на процесорі встановлений виробником (BOX-процесор);
- CD-DVD пристрої взагалі не використовуються;
- розташування принтерів та БФП колективного користування на значній відстані від більшості робочих місць користувачів ПК.
- встановлено спеціальні облицювання що поглинають звук;
- використовуються SSD накопичувачі.

Під час виконання робіт з ПК, значення характеристик вібрації на робочих місцях не перевищують допустимого рівню, які відповідають вимогам ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [56]. Персонал не має потреби в додатковому захисті від вібрації, яку виробляють ПК. Оскільки ПК установлені на спеціальний комп'ютерних столах, які поглинають залишкову вібрацію.

У приміщенні з ПК в якості екранних пристроїв встановлені рідкокристалічні монітори, які не є джерелами шкідливого рентгенівського та електромагнітного випромінювання. Рівень їх випромінювань цілком відповідає вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [54] і ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55], тому спеціальні заходи для захисту персоналу не передбачені.

Розташування робочих місць з ПК у приміщенні виконано згідно вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55]. Розміри приміщення:  $8,5 \times 6 \times 3,2$  м., тобто його площа –  $51$  м<sup>2</sup>, а об'єм –  $163,2$  м<sup>3</sup>, з урахуванням розміщення в ньому восьми комп'ютеризованих робочих місць, відповідають нормативним вимогам. Оскільки на одне комп'ютеризоване робоче місце доводиться більше  $6$  м<sup>2</sup> площі й  $20$  м<sup>3</sup> об'єму приміщення. Покриття підлоги є матовим з коефіцієнтом відбиття  $0,3-0,5$ . Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями. Для внутрішнього оздоблення

приміщень з ПК використані дифузно-відбивні матеріали з коефіцієнтами відбиття для стелі 0,7-0,8; для стін 0,5-0,6.

Обладнання та організація всіх елементів робочих місць приміщення з ПК забезпечена з урахуванням їх взаємного розташування, ергономічних вимог, характером і особливостями трудової діяльності, відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55].

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК були враховані: робоча поза користувача, простір для розміщення користувача, можливість огляду елементів робочого місця, можливість ведення записів, розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

Конструкція робочого місця користувачів ПК забезпечує підтримання оптимальної робочої пози. Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм. Поверхня сидіння і спинки стільця напівм'яка з нековзним покриттям, що легко чиститься і не електризується.

Вимоги до режимів праці та відпочинку користувачів ПК визначаються роботою, яку виконує користувач відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [55] та ДК 003:2010 «Класифікатор професій» [63].

Розробники програм – виконують роботу переважно з ПК та документацією. При цьому відбувається інтенсивний обмін інформацією з ПК і висока частота прийняття рішень. Робота виконується у вільному темпі і пов'язана з періодичним пошуком помилок в умовах дефіциту часу, характеризується інтенсивною розумовою творчою працею з підвищеним

напруженням зору, концентрацією уваги, нервово-емоційним напруженням, статичною робочою позою, періодичним навантаженням на кисті верхніх кінцівок. Для них встановлено внутрішньо-змінні режими праці та відпочинку при роботі з ПК при 8-годинній денній робочій зміні, для розробників програм із застосуванням ПК призначені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години. З метою зменшення негативного впливу монотонності на працюючого деякі операції чергуються, наприклад, введення тексту за допомогою клавіатури та редагування тексту тощо.

Для зниження нервово-емоційного напруження, втоми зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі деякі перерви використовуються для виконання комплексу вправ.

Передбачений для приміщення дослідницького центру обладнаного персональними комп'ютерами з екранними пристроями комплекс заходів по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці забезпечує безпечні та комфортні умови праці персоналу.

### 5.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

#### 5.3.1 Заходи з пожежної безпеки

Комплекс заходів з пожежної безпеки для приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП, розроблений відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [64].

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні обладнаному ПК з ЕП:

- згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» [65] у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП можлива пожежа класів – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

- відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [66], приміщення дослідного центру належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення дослідного центру що обладнане ПК з ЕП належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [67], воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ЕП для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [67] передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания» [62], відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Обладнання, силові та освітленні мережі приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [49], та мають ступінь захисту оболонок (ізоляції) обладнання IP44 яка відповідає класу пожежонебезпечної зони П-Па до якої належить приміщення.

З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ЕП передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог

пункту 3.1.8 та глави 1.3 «Вибір провідників за нагрівом» – «ПУЕ» [47], встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [68], у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ЕП встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення дослідного центру що обладнане ПК з ЕП має площу  $51 \text{ м}^2$ , тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників» [69], для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 3 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на  $20 \text{ м}^2$  площі приміщення). Додатково, на кожному поверсі будівлі, в якій розміщене приміщення обладнане ПК з ЕП, передбачене два переносних порошкових вогнегасника – ВП-5. Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

### 5.3.2 Повноваження місцевих державних адміністрацій і органів місцевого самоврядування у сфері цивільного захисту

Згідно вимог глави 2, «Кодексу цивільного захисту України» [70] до повноважень місцевих державних адміністрацій у сфері цивільного захисту (далі – ЦЗ) належить:

- забезпечення ЦЗ на відповідній території;
- забезпечення виконання завдань створеними ними територіальними підсистемами та їх ланками;

- забезпечення реалізації вимог техногенної безпеки на потенційно небезпечних об'єктах та інших суб'єктах господарювання, які можуть створити реальну загрозу виникнення аварії, що належать до сфери їх управління;

- розроблення та забезпечення реалізації регіональних, місцевих програм та планів заходів у сфері ЦЗ, зокрема спрямованих на захист населення і територій від надзвичайних ситуацій (далі – НС) та запобігання їх виникненню, забезпечення техногенної та пожежної безпеки;

- керівництво створеними ними аварійно-рятувальними службами, формуваннями та спеціалізованими службами ЦЗ, місцевою та добровільною пожежною охороною, забезпечення їх діяльності та здійснення контролю за готовністю до дій за призначенням;

- створення за погодженням з Державною службою України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС України), та підтримання у постійній готовності територіальної системи централізованого оповіщення, здійснення її модернізації та забезпечення функціонування;

- забезпечення оповіщення та інформування населення про загрозу і виникнення НС, у тому числі в доступній для осіб з вадами зору та слуху формі;

- організація аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, робіт з ліквідації наслідків НС на відповідній території, а також радіаційного, хімічного, біологічного, медичного захисту населення та інженерного захисту територій від наслідків таких ситуацій;

- організація та керівництво проведенням відновлювальних робіт з ліквідації наслідків НС;

- організація та здійснення евакуації населення, майна у безпечні райони, їх розміщення, створення служб медицини катастроф, необхідних для надання екстреної медичної допомоги та життєзабезпечення населення;

- контроль за станом навколишнього природного середовища, санітарно-гігієнічною та епідемічною ситуацією, за місцями захоронення біологічних матеріалів, заражених активними формами бактерій;

- розроблення та здійснення на відповідній території заходів, спрямованих на забезпечення сталого функціонування суб'єктів господарювання, що належать до сфери їх управління, в особливий період;

- підготовка пропозицій щодо віднесення міст до груп ЦЗ та подання їх до ДСНС України;

- віднесення відповідно до основних показників суб'єктів господарювання, що належать до сфери їх управління, до категорії ЦЗ та затвердження їх переліку у порядку, встановленому Кабінетом Міністрів України;

- створення і використання матеріальних резервів для запобігання та ліквідації наслідків НС;

- завчасне накопичення і підтримання у постійній готовності засобів індивідуального захисту для населення, яке проживає у прогнозованих зонах хімічного забруднення і зонах спостереження суб'єктів господарювання радіаційної небезпеки I і II категорій, та формувань ЦЗ, а також приладів дозиметричного і хімічного контролю та розвідки;

- взаємодія з ДСНС України, щодо виконання завдань ЦЗ;

- організація та забезпечення життєдіяльності постраждалих від НС, а також під час ведення воєнних (бойових) дій або внаслідок таких дій;

- забезпечення соціального захисту постраждалих внаслідок НС, зокрема виплати матеріальної допомоги;

- створення на регіональному та місцевому рівнях комісій з питань техногенно-екологічної безпеки і НС, а в разі виникнення НС – спеціальних комісій з їх ліквідації (за потреби), забезпечення їх функціонування;

- забезпечення навчання з питань ЦЗ, техногенної та пожежної безпеки посадових осіб місцевих державних адміністрацій, суб'єктів господарювання, що належать до сфери їх управління, керівників та їх заступників, здійснення підготовки населення до дій у НС;

- організація виконання вимог законодавства щодо створення, використання, утримання та реконструкції фонду захисних споруд ЦЗ;

- визначення потреби фонду захисних споруд ЦЗ;

- планування та організація роботи з дообладнання або спорудження в особливий період підвальних та інших заглиблених приміщень для укриття населення;

- прийняття рішень про подальше використання захисних споруд ЦЗ державної та комунальної власності;

- організація обліку фонду захисних споруд ЦЗ;

- здійснення контролю за утриманням та станом готовності захисних споруд ЦЗ;

- організація проведення технічної інвентаризації захисних споруд ЦЗ, виключення їх за погодженням з ДСНС України, з фонду таких споруд;

- розроблення та здійснення комплексу заходів, спрямованих на поліпшення пожежної безпеки суб'єктів господарювання, що належать до сфери їх управління;

- здійснення інших повноважень у сфері ЦЗ, передбачених Кодексом ЦЗ України та іншими законодавчими актами.

До повноважень органів місцевого самоврядування у сфері ЦЗ належить:

- забезпечення ЦЗ на відповідній території;

- забезпечення виконання завдань створеними ними ланками територіальних підсистем;

- забезпечення реалізації вимог техногенної та пожежної безпеки на суб'єктах господарювання, що належать до сфери їх управління, які можуть створити реальну загрозу виникнення аварії;

- розроблення та забезпечення реалізації програм та планів заходів у сфері ЦЗ, зокрема спрямованих на захист населення і територій від НС та запобігання їх виникненню, забезпечення техногенної та пожежної безпеки;

- керівництво створеними ними аварійно-рятувальними службами, формуваннями та спеціалізованими службами ЦЗ, місцевою та добровільною пожежною охороною, забезпечення їх діяльності та здійснення контролю за готовністю до дій за призначенням;

- створення за погодженням з ДСНС України, та підтримання у постійній готовності місцевої системи централізованого оповіщення про загрозу або виникнення НС, здійснення її модернізації та забезпечення функціонування;
- забезпечення оповіщення та інформування населення про загрозу і виникнення НС, у тому числі в доступній для осіб з вадами зору та слуху формі;
- організація робіт з ліквідації наслідків НС на відповідній території міст, селищ та сіл, а також радіаційного, хімічного, біологічного, медичного захисту населення та інженерного захисту територій від наслідків таких ситуацій;
- організація та керівництво проведенням відновлювальних робіт з ліквідації наслідків НС;
- організація та здійснення евакуації населення, майна у безпечні райони, їх розміщення та життєзабезпечення населення;
- контроль за станом навколишнього природного середовища, санітарно-гігієнічною та епідемічною ситуацією;
- розроблення та здійснення заходів, спрямованих на забезпечення сталого функціонування суб'єктів господарювання в особливий період, що належать до сфери їх управління;
- підготовка пропозицій щодо віднесення міст до груп ЦЗ та подання їх відповідним обласним державним адміністраціям;
- віднесення суб'єктів господарювання, що належать до сфери їх управління, до категорій ЦЗ відповідно до основних показників та затвердження їх переліку;
- створення і використання матеріальних резервів для запобігання та ліквідації наслідків НС;
- завчасне накопичення і підтримання у постійній готовності засобів індивідуального захисту для населення, яке проживає у прогнозованих зонах хімічного забруднення і зонах спостереження суб'єктів господарювання радіаційної небезпеки I і II категорій, та формувань ЦЗ, а також приладів дозиметричного і хімічного контролю та розвідки;
- взаємодія з ДСНС України, щодо виконання завдань ЦЗ;

- організація та забезпечення життєдіяльності постраждалих від НС, а також під час ведення воєнних (бойових) дій або внаслідок таких дій;
- забезпечення складення довідок про визнання особи постраждалою внаслідок НС, списків (реєстрів) постраждалих внаслідок НС, відповідно до яких надається матеріальна допомога, списків загиблих осіб на підставі їх ідентифікації;
- забезпечення соціального захисту постраждалих внаслідок НС, зокрема виплати матеріальної допомоги;
- створення у містах комісій з питань техногенно-екологічної безпеки і НС, а в разі виникнення НС – спеціальних комісій з їх ліквідації (за потреби), забезпечення їх функціонування;
- забезпечення навчання з питань ЦЗ посадових осіб органів місцевого самоврядування та суб'єктів господарювання комунальної власності, здійснення підготовки населення до дій у НС;
- організація виконання вимог законодавства щодо створення, використання, утримання та реконструкції фонду захисних споруд ЦЗ;
- визначення потреби фонду захисних споруд ЦЗ;
- планування та організація роботи з дообладнання або спорудження в особливий період підвальних та інших заглиблених приміщень для укриття населення;
- прийняття рішень про подальше використання захисних споруд ЦЗ державної та комунальної власності у разі банкрутства (ліквідації) суб'єкта господарювання, на балансі якого вона перебуває, та безхазяйних захисних споруд;
- організація обліку фонду захисних споруд ЦЗ;
- здійснення контролю за утриманням та станом готовності захисних споруд ЦЗ;
- організація проведення технічної інвентаризації захисних споруд ЦЗ, виключення їх за погодженням з ДСНС України, з фонду захисних споруд ЦЗ;

- реалізація заходів, спрямованих на поліпшення пожежної безпеки суб'єктів господарювання комунальної форми власності;

- здійснення інших повноважень у сфері ЦЗ, передбачених Кодексом ЦЗ України та іншими законодавчими актами.

Організація заходів ЦЗ в територіальних підсистемах здійснюється місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування.

### 5.3.3 Дослідження захисної споруд цивільного захисту за місткістю

З метою захисту населення, зменшення втрат і шкоди економіці у випадку виникнення НС плануються та проводяться в комплексі три основних способи захисту населення[71]:

1. Укриття населення в захисних спорудах.

2. Розосередження в заміській зоні робітників та службовців об'єктів, що продовжують свою діяльність у місті в період НС, а також евакуація населення із цих міст.

3. Використання населенням засобів індивідуального захисту.

Захисні споруди класифікуються за наступними ознаками:

- за захисними властивостями;
- за місткістю (малі – 150-600; середні – 600-2000; великі – більше 2000 укриваємих);

- за призначенням;

- за розташуванням (вбудовані або окремо розташовані);

- за термінами будівництва.

Сховище складається з основних та допоміжних приміщень.

Основні: приміщення для укриваємих осіб, тамбури та шлюзи.

Допоміжні: фільтровентиляційні камери, санітарні вузли, захищені дизельні електростанції, медичний пункт та приміщення для зберігання води і продуктів.

Приміщення для укриття осіб при установці 2-х ярусних нар розраховуються із розрахунку  $0,5 \text{ м}^2$ , а 3-х ярусних -  $0,4 \text{ м}^2$  площі та  $1,5 \text{ м}^3$  об'єму на одного укритого.

Мінімальна висота приміщень сховищ –  $2,2 \text{ м}$ .

У приміщенні обладнаються 2-х або 3-х ярусні нари з розрахунку: місця для сидіння –  $0,45 \times 0,45 \text{ м}$  на людину, верхні для лежання –  $0,55 \times 1,8 \text{ м}$  – 20% при двох ярусному розміщенні і 33% при трьох ярусному від загального числа укритих.

Місткість захисної споруди ЦЗ об'єкту визначають відповідно до норм об'ємно-планувальних рішень. Для чого, по кількості місць оцінюють можливість укриття найбільшої працюючої зміни.

Вихідні дані:

1. На об'єкті одне сховище, у якому:

- приміщення для укритих має площу  $S_1 = 618 \text{ м}^2$ ;

- тамбур –  $S_2 = 48 \text{ м}^2$ ;

- місце для санітарного поста –  $S_3 = 4,4 \text{ м}^2$ ;

- фільтровентиляційна камера та санвузол –  $S_4 = 64 \text{ м}^2$ .

2. Висота приміщень  $h = 3,1 \text{ м}$ .

3. Чисельність найбільшої працюючої зміни об'єкта  $N_{max} = 1400 \text{ осіб}$ .

Визначення місткості захисної споруди ЦЗ об'єкту:

1. Визначаємо кількість місць для розміщення укритих.

З урахуванням того, що висота приміщень сховища ( $h = 3,1 \text{ м}$ .) дозволяє установити трьохярусні нари, приймаємо в якості розрахункової норми площі на одного укритого  $S_0 = 0,4 \text{ м}^2/\text{люд}$ .

Тоді розрахункову кількість місць у сховищі ( $M$ ) визначаємо за формулою:

$$M = \frac{S_{\Sigma}}{S_0} = \frac{618 + 4,4 + 64}{0,4} = 1716 \text{ місць} \quad (5.1)$$

Знайдене число визначає місткість сховища без урахування установленого об'єму приміщень на одного укритого ( $V_0$ ).

Перевіряють відповідність об'єму приміщень у зоні герметизації на одного укриваємого, згідно з установленою нормою (не менше  $1,5 \text{ м}^3$  на одного укриваємого):

$$V_1 = \frac{V_\Sigma}{M} = \frac{S_\Sigma \cdot h}{M} = \frac{(618 + 4,4 + 64) \cdot 3,1}{1716} = 1,24 \text{ м}^3 / \text{люд}, \quad (5.2)$$

де  $h$  – висота приміщень,  $\text{м}$ ;

$S_\Sigma$  – загальна площа всіх приміщень у зоні герметизації (крім приміщень захищених дизельних електростанцій, тамбурів та шлюзів).

Таким чином місткість сховища не відповідає розрахунковій загальній кількості місць. Тому, уточнюємо його розрахункову місткість ( $M_{\text{уточ}}$ ), й приймаємо її за фактичну:

$$M_{\text{уточ}} = \frac{V_\Sigma}{V_0} = \frac{(618 + 4,4 + 64) \cdot 3,1}{1,5} = 1419 \text{ місць} \quad (5.3)$$

Тобто, з урахуванням  $V_0$ , розрахункова місткість сховища становить 1419 осіб.

2. Визначаємо необхідну кількість нар для розміщення укриваємих у сховищі. Висота приміщень ( $h = 3,1 \text{ м}^2$ ) дозволяє установити трьохярусні нари. При довжині нар 180  $\text{см}$  (33% місць для лежання, від загального числа укриваємих, тобто на 6 укриваємих одні нари) необхідно установити:

$$H = \frac{M_{\text{уточ}}}{6} = \frac{1419}{6} = 236 \text{ нар} \quad (5.4)$$

3. Визначаємо показник, що характеризує захисні споруди за місткістю, тобто можливість укриття найбільшої працюючої зміни:

$$K_{\text{вм}} = \frac{M_{\text{уточ}} \cdot 100}{N} = \frac{1419 \cdot 100}{1400} = 101 \% \quad (5.5)$$

**Висновки:**

- за місткістю сховище, що розглядалося, належить до середніх захисних споруд цивільного захисту;

- об'ємне-планувальні рішення сховища відповідають вимогам нормативних документів;

- сховище дозволяє прийняти 100% робітників та службовців найбільшої працюючої зміни;

- для розміщення укритих в сховищі необхідно установити 236 трьохярусних нар, які забезпечують 33% місць для лежання та 67% для сидіння.

Повне, системне та якісне виконання своїх повноважень місцевими державними адміністраціями і органами місцевого самоврядування у сфері цивільного захисту забезпечують стійку роботу об'єктів та безпеку персоналу та населення в умовах пожеж та інших надзвичайних ситуацій.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі розглянуті особливості застосування асинхронних двигунів, та аналіз сучасного електроприводу з асинхронним двигуном з фазним ротором.

У другому розділі розроблено підсистеми моделей асинхронного двигуна, перетворювача та системи керування та розрахункову модель втрат в елементах перетворювача. Створено імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач", яка дозволяє враховувати постійні та змінні втрати в асинхронному двигуні, втрати в напівпровідникових елементах перетворювача та енергії ковзання ротора, що інвертується у мережу, в залежності від частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача.

У третьому розділі проведено дослідження та запропоновано підхід щодо визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача, який полягає в формуванні цільової функції залежності сумарних втрат в електроприводі від частоти комутації силових ключів перетворювача. Для АД потужністю = 480 кВт оптимальна частота комутації розрахована за допомогою аналітичного виразу становить = 0,626 кГц, за допомогою імітаційного моделювання - = 0,621 кГц. Таким чином похибка розрахунку не перевищує 3,5%.

Запропонований підхід визначення оптимальної частоти комутації силового ключа може бути застосовано при інженерному проектуванні, а також при налагоджувальних роботах перетворювачів в залежності від класу і способу роботи електроприводу.

У четвертому розділі розглянуті питання економічної оцінки асинхронного двигуна з фазним ротором.

У п'ятому розділі розглянуті питання охорони праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

**Наукова новизна:**

Удосконалено імітаційну модель асинхронного приводу для комплексного дослідження електромагнітних та енергетичних процесів "двигун-перетворювач", яка дозволяє враховувати постійні та змінні втрати в асинхронному двигуні, втрати в напівпровідникових елементах перетворювача та енергії ковзання ротора, що інвертується у мережу, в залежності від частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача.

**Практична цінність:**

Запропоновано підхід щодо визначення оптимальної частоти комутації силових ключів перетворювача, який полягає в формуванні цільової аналітичної функції залежності сумарних втрат в електроприводі від частоти комутації силових ключів перетворювача. Похибка розрахунку за аналітичним виразом та за результатами моделювання не перевищує 3,5%.

Запропонований підхід визначення оптимальної частоти комутації силового ключа може бути застосовано при інженерному проектуванні, а також при налагоджувальних роботах перетворювачів в залежності від класу і способу роботи електроприводу.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Крановое электрооборудование [Текст]: Справочник / Ю.В. Алексеев, А.П. Богословский, Е.М. Певзнер и др.; под общ. ред. А.А. Рабиновича; - М.: Энергия, 1979 - 240 с.
2. Баталов, Н.М. Краново-металлургические электродвигатели [Текст] / Н.М. Баталов, В.А. Белый, А.Б. Иоффе и др.; - М.: Энергии, 1967. 238 с.
3. Краново-металлургическое электрооборудование [Текст] / А.И. Бертинова, Л.А. Капустина и др.; под общ. ред. А.И. Бертинова. - М.: Государственное Энергетическое Издательство, 1961. — 247 с.
4. Башарин, А.В. Управление электроприводами [Текст]: Учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский; – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с .
5. Онищенко, Г. Б. Асинхронный вентильный каскад [Текст] / О. Б. Онищенко; - М., Энергия, 1967. – 152 с.
6. Башарин, А. В. Управление электропроводами [Текст] / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский; - Л.: Энергоиздат, 1982. —392 с.
7. Бычков, В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства [Текст] / В. П. Бычков; - М.: Высшая школа, 1977. –392 с.
8. Василевский, М.Н. Автоматизация шахтных подъемных машин с асинхронным приводом [Текст] / М.Н. Василевский, Е.С. Траубе, К.Г. Вейсберг; - М.: Госгортехиздат, 1962. – 240 с.
9. Волков, И. В. Принципы построения и оптимизации индуктивно-емкостных преобразователей [Текст] / И.В. Волков, В.Н. Губаревич, В.Н. Исаков, В.П. Кабан; – Киев: Наукова думка, 1981. –176 с.
10. Милях, А. Н. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей [Текст] / А.Н. Милях, И.В. Волков; - Киев: Наукова думка, 1974. –216 с.

11. Милях, А. Н. Индуктивно-емкостные преобразователи [Текст] / А.Н. Милях, Б. Е. Кубышин, И. В. Волков; - Киев: Наукова думка, 1964. –304 с.

12. Казаков, В. А. Нагрузочные характеристики индуктивно-емкостных преобразователей с мощными выпрямительными агрегатами. Расчет и оптимизация систем стабилизированного тока [Текст] / В. А. Казаков, А. Е. Ладыгин; - Киев: Наукова думка, 1978. – 281 с.

13. Исаков, В. Н. Анализ рабочих характеристик асинхронной машины, питаемой от источника неизменного тока. Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой [Текст] / В. Н. Исаков, А. П. Плугатарь; - Киев: Наукова думка, 1984. – 139 с.

14. Исаков, В. Н. Система регулирования частоты вращения и электромагнитного момента асинхронного электропривода со свойствами источника момента [Текст] / В. Н. Исаков, А. П. Плугатарь, В. П. Стяжкин // Технич. электродинамика. – 1985. – № 6. – С. 49–55.

15. Соколов, М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов [Текст] / М. М. Соколов; - М.: Энергия, 1976. – 448 с.

16. Сандлер, А. С. Динамика каскадных асинхронных электроприводов [Текст] / А. С. Сандлер, Л. М. Тарасенко; - М.: Энергия, 1977. – 200 с.

17. Соколов, М. М. Приближенные расчеты переходных процессов в автоматизированном электроприводе [Текст] / М. М. Соколов, В. М. Терехов. - М.: Энергия, 1967 – 136 с.

18. Хватов, С. В. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада [Текст] / С. В. Хватов, В. Г Титов; - Горький: Горьк. гос. ун-т, 1977. –92 с.

19. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер; - М.: Энергия, 1979. –616 с.

20. Swati, Rani. Slip power recovery system in three-phase slip ring induction motor [Text] / Rani Swati // IEEE: Trans on Energy Conversion. – 2014. – No. 4. – P. 22 – 43.

21. Зайцев, А.И. Асинхронный вентильный каскад с импульсным управлением [Текст] / А.И. Зайцев, Ю.П. Костюков. // Известия Томского Ордена Трудового Красного Знамени политехнического института. - 1965. – №5. – С. 36–42.

22. Leonharn, W. Control of electrical drives [Text] / W. Leonharn // IEEE: Trans. on Energy Conversion. – 1990. – Vol. 5. – No. 1. – 1985. – P. 245-259.

23. Дементьев, Ю. Н. Регулируемый электропривод переменного тока по схеме надсинхронного вентильного каскада [Текст] / Ю. Н. Дементьев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т.321. – №4. – С.116–121.

24. Saadat, H. Power system analysis, basic principles complex power [Text] / H. Saadat // The McGraw-Hill Companies: International Sci. and Tech. Conf., 3<sup>th</sup> October 1999: abstracts – Attava, 1999.– P. 30 – 36.

25. АС 1272463 СССР, МКИ H02 P 7/62, 1984. Электропривод переменного тока [Электронный ресурс] / В.Н. Исаков, В.П. Аркушин, В.А. Бирик, И.В. Волков, В.А. Мелещук, А.А. Носко, Ю.М. Осецкий (СССР); заявл. 03.07.85; опубл. 23.11.86, Бюл. №43. Режим доступа: <http://patents.su/4-1272463-ehlektroprivod-peremennogo-toka.html>.

26. Barry, D. New technology for speed control of wound rotor motors [Text] / D. Barry // IEEE: Trans. on Power Electronics, 2006. – Vol. 1. – No. 4. – P. 111 – 112.

27. Шулаков, Н. В. Асинхронный вентильный каскад с последовательным возбуждением двигателя [Текст] / Н.В. Шулаков, Е.Н. Медведев // Известия вузов. Электромеханика. – 1988. – № 1. – С. 47–54.

28. Ping, J. Simulation of a new method in double closed loop for slip power recovery motor with chopper proceedings [Text] / J. Ping, W. Bingshu , Z. Junwei // IEEE: Trans. on Power Electronics.- 2009. – Vol. 1. – No. P. 6. – 66.

29. Пат. Україна 64126, МПК H02P 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андрієнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл.25.10.2011, Бюл. №20, 2011р. – Режим доступу: <http://www.uipv.org/>

30. Коцур, М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андренко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – 2013. - № 4-2. – С.114-120.

31. Животченко О.В. Дослідження енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу в умовах тривалого режиму роботи механізму [Текст] / О. В. Животченко, Коцур М.І. // Тиждень науки-2020. Електротехнічний факультет: наук. – практ. конф., 13-17 квітня 2020 р.: Запоріжжя, 2020. – С. 87-88.

32. Каталогні данні асинхронних двигунів з фазними роторами [Електронний ресурс]: електромеханічний завод, м. Нова Каховка. – Режим доступу: <https://emz-ua.com/elektrodvig-2/fr/19-fr.html>

33. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл [Текст] / Д. О. Кулагін // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110.

34. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення [Текст] / Д. О. Кулагін // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49-55.

35. Копылов, И.П. Электрические машины [Текст] / И.П. Копылов; -М.: Логос. 2000. - 607 с.

36. Герман-Галкин, С.Г. Matlab& Simulink проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г Герман-Галкин; - Спб: КОРОНА-ВЕК, 2008. - 368 с.

37. Соколов, М.М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М.М. Соколов, П.Е. Данилов; - М.: Энергия, 1972. - 72 с.

38. Чебовский, О. Г. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник [Текст] / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин; - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 400 с.

39. WESTCODE. Каталог продукції. Режим доступу: <http://www.westcode.com/products.html>

40. Розробка та дослідження напівпровідникових перетворювачів для електроприводу за схемою струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду [Текст]: звіт з НДР (заключний): Запорізький національний технічний університет; рук. Андриєнко П.Д.; исполн. Коцур М.І. – Запоріжжя, 2015: 147с. - 0115U002566.

41. Тарасюк Г.М. Планування діяльності підприємства [Текст] / Г. М. Тарасюк, Л. І. Шваб – К.: Каравела, 2003. – 432с.

42. Економіка підприємства [Текст] / За ред.. С.Ф. Покропивного. Видання друге, перероблене та доповнене. – К.: КНЕУ, 2001 – 528с.

43. Примак Т.О. Економіка підприємства [Текст] / Т. О. Примак. – К.: Вікар, 2001 – 178с.

44. Журавель М. О. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) : зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами (спеціалізаціями) – «Електротехнічні системи електроспоживання», «Електричні машини і апарати», «Електромеханічні (електротехнічні) системи та комплекси», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні та електронні апарати», «Електромеханічне обладнання електроємних виробництв» : Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. 35 с.

45. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с. + 1 ел. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-617-07-0134-3

46. ГОСТ 12.0.003-74\* Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Введ. 1976-01-01]. М. : Госстандарт СССР, 1974. 4 с. (Межгосударственный стандарт)

47. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

48. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Державний

Стандарт України)

49. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устройства электроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. – К. : Мінпраці України, 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>.

50. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. К. : Держнагляд охорони праці, 1997. 97 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

51. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. К. : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

52. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [На заміну ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 ; чинний від 2014-05-30]. К. : МОЗ України, 2014. 37 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14>. (Державні санітарні норми та правила)

53. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. Режим доступу: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>. (Директива)

54. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. К. : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

55. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. К. : МОЗ України, 1998. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. (Державні санітарні правила та норми)

56. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. (Державні санітарні норми)

57. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартів безпеки праці. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [На заміну ГОСТ 12.1.005-76 ; чинний з 1989-01-01]. М. : МОЗ СРСР, 1988. 50 с. (Міждержавний стандарт)

58. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Державні будівельні норми України)

59. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Державні будівельні норми України)

60. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99>. (Державні санітарні норми)

61. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>. (Державні санітарні норми)

62. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. [На заміну СНиП 2.09.04-87 ; чинний з 2011-10-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 31 с. (Державні будівельні норми України)

63. ДК 003:2010. Класифікатор професій. [На заміну ДК 003:2005 ; чинний від 2010-01-11; станом на 15.02.2019]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10>.

64. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. К. : МВС України, 2014. 91 с. (Нормативний акт пожежної безпеки)

65. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004,

IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87 ; чинний з 01.01.2016]. К. : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Державний Стандарт України)

66. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Державний Стандарт України)

67. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми)

68. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. К. : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Державні будівельні норми)

69. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. К. : МВС України, 2018. 23 с. (Правила)

70. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Редакція від: 03.07.2020. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>. (Закон України)

71. Журавель М. О., Курков О. Б. Дослідження захисних споруд цивільного захисту за місткістю : методичні вказівки до лабораторного заняття з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі» : для студентів усіх спеціальностей та форми навчання : Запоріжжя : Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. 18 с.