

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет \_\_\_\_\_  
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації  
Спеціальність 141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка»  
Форма навчання заочна

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до випускної кваліфікаційної роботи**

**магістра**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Мельніков Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Розробка системи полегшеного запуску СД перетворювального агрегату Г-Д  
екскаватора драглайна ЕШ 10/70»

(повна назва теми)

за матеріалами \_\_\_\_\_

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник \_\_\_\_\_

к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Григор'єва В.Г.

(прізвище, ініціали)

**Робота допущена до захисту в ЕК**

Протокол засідання кафедри

від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

Є.О. Модло

\_\_\_\_\_  
Наук. ступінь, вчене звання

\_\_\_\_\_  
Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Модло Є.О.

«    » 20 року

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)**

Мельніков Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Розробка системи полегшеного запуску СД перетворювального агрегату Г-Д екскаватора драглайна ЕШ 10/70»  
керівник випускної роботи Григор'єва Вікторія Георгіївна, доцент, к.техн.н.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» 10 2025  
року № 726-ст
2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи ЕШ 10/70, система Г-Д, генератор ГПЕ 85/36-6К, ном.потужність 1000 кВт, ном.напруга 900 В, ном.струм 1110 А, синхронний двигун СДН2-16-36-6, ном.потужність 1000 кВт, ном.напруга 6000 В, ном.струм 112 А, швидкість обертання ротора 1000 об/хв
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналітична частина. Основна частина. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Характеристика об'єкту. Загальні технічні дані електричних машин. Принципова схема і технічні дані системи запуску. Структурна схема моделі. Прямий пуск СД і самосинхронізація з мережею.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Григор'єва В.Г.		
2	Григор'єва В.Г.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1	Вступ	1.10.2024	
2	Аналітична частина	15.10.2024	
3	Основна частина	1.11.2024	
4	Висновки	20.12.2024	
5	Здача роботи на кафедрі	28.12.2024	
	Захист випускної роботи	22.01.2025	

Студент \_\_\_\_\_ Мельніков О. М.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Григор'єва В.Г.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

№ рядка	Формат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим
1	A3	<i>ВРМ.141.656-ст.01.Е0.1</i>	Характеристика об'єкту	1		
2						
3	A3	<i>ВРМ.141.656-ст.01.Е3.1</i>	Загальні технічні дані	1		
4			електричних машин			
5	A3	<i>ВРМ.141.656-ст.01.Е0.1</i>	Принципова схема і технічні дані системи запуску	1		
6						
7	A3	<i>ВРМ.141.656-ст.01.Е0.1</i>	Структурна схема моделі	1		
8						
9	A3	<i>ВРМ.141.656-ст.01.Е0.1</i>	Прямий пуск СД і самосинхронізація з мережею	1		
10						
11	A3					
12						
13						
14	A3					
15						
16						
17	A3					
18						
19	A4	<i>ВРМ.151.646-ст.09.ПЗ</i>	Пояснювальна записка	95		
20						
21						
22						
			<b><i>ВРМ.141.645-ст.01.ВД</i></b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Мельнико О.М.</i>			<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>
<i>Пров.</i>		<i>Григор'єва В.Г.</i>				<i>Аркушів</i>
<i>Н.контр.</i>		<i>Модло Є.О.</i>			<b>ННТІ ДУЕТ</b>	
<i>Затв.</i>		<i>Модло Є.О.</i>			<b>Каф.ЕІА</b>	
					<b>гр. ЗЕПА-24м</b>	

*Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Розробка системи полегшеного запуску СД перетворювального агрегату Г-Д екскаватора драглайна ЕШ 10/70*

*Літера* *Аркуш* *Аркушів*  
*4* *1*  
**ННТІ ДУЕТ**  
**Каф.ЕІА**  
**гр. ЗЕПА-24м**

## РЕФЕРАТ

Мельніков О.М. Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Розробка системи полегшеного запуску СД перетворювального агрегату Г-Д екскаватора драглайна ЕШ 10/70. – Магістерська робота. – Кривий Ріг, 2025. 95 с., 29 рис., 10 табл., 20 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії в системі електроприводу з потужними синхронними двигунами

Предмет дослідження – система пуску синхронних двигунів перетворювальних агрегатів Г-Д з самосинхронізацією з мережею

Метою роботи є розробка і дослідження системи пуску потужних СД агрегатів Г-Д кар'єрних екскаваторів з самосинхронізацією з мережею, що забезпечить можливість проведення необмеженої кількості пусків безпечних для обмоток СД.

В роботі проведений аналіз питання розробки систем полегшеного запуску та синхронізації, обґрунтований і здійснений вибір системи запуску та синхронізації СД з мережею. Розроблена система управління та досліджені пускові режими системи запуску на математичній моделі. Досліджені пускові режими синхронного двигуна на математичній моделі.

Розроблена система забезпечує підвищення ефективності роботи системи електроприводу екскаватора, підвищує ресурс синхронних двигунів.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, СИСТЕМА Г-Д,  
ПУСКОВА СИСТЕМА

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЕМ – електрична машина;
- ЕМС – електромеханічна система;
- ЕП – електропривод;
- ЕТК – електротехнічний комплекс;
- ПЧ –перетворювач частоти;
- СД – асинхронний двигун.
- ОЗ – обмотка збудження
- СЗ – система запуску
- ГПС – генератор постійного струму
- ДПС – двигун постійного струму

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	10
1.1 Аналіз експлуатаційних характеристик електроприводів кар'єрних екскаваторів-драглайнів .....	10
1.2 Причини зниження надійності та підвищення аварійності синхронних двигунів електроприводів кар'єрних екскаваторів .....	13
1.3 Загальна характеристика та вимоги до пускових систем.....	17
1.4 Мета і задачі дослідження .....	19
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Класифікація пускових систем .....	21
2.2 Технічна характеристика електроприводу повороту екскаватора.....	24
2.3 Розрахунок потужності системи запуску .....	29
2.4 Вибір обладнання системи запуску.....	34
2.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення електроприводу .....	36
2.6 Розрахунок двозонної системи полегшеного запуску.....	37
2.7 Розробка математичної моделі дослідження пускових режимів системи полегшеного пуску.....	39
2.8 Дослідження динаміки системи полегшеного запуску .....	42
2.9 Розробка математичної моделі для дослідження пускових режимів СД ..	48
2.10 Дослідження режимів прямого асинхронного запуску .....	54
2.11 Дослідження режимів полегшеного запуску СД .....	58
2.12 Розробка схеми силової частини .....	65
2.13 Електропостачання .....	78
2.14 Організація безпечної експлуатації установки .....	81
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88
ДОДАТКИ .....	90
Додаток А Елементна база системи запуску .....	90
Додаток Б Елементна база системи запуску.....	95

## ВСТУП

В даний час існують різні схемні рішення проблеми пуску синхронних двигунів (СД), що реалізують найбільш доцільні методи: - Прямого пуску СД; пуску за допомогою допоміжних машин та механізмів; пуску з використанням засобів, що змінюють параметри електроенергії (джерела живлення); пуску при каскадних схемах включення та ін. Дані методи мають свої переваги та недоліки. Вибір схеми, як правило, утруднений, тому що відсутні функціональні залежності, що характеризують їх якісні сторони. Це тим, що не проведено дослідження з багатофункціонального аналізу різноманітних технічних рішень однієї й тієї завдання. Отже, доцільно як проаналізувати окремі положення цього питання, а й розробити наукові підходи до вирішення проблематики загалом. Не викликає сумнівів як необхідність, і можливість вирішення завдання на етапі розвитку інформаційної техніки.

При виборі технічних рішень в електроприводі ігнорується його багатофункціональність (перетворювач потужності, джерело неякісності в системі електропостачання, джерело екологічного та іншого впливу на довкілля та персонал). Такий підхід, як правило, призводить на стадії проектування та при експлуатації до неузгодженості вимог системи електроприводу як елемента технологічного об'єкта та системи електроживлення як виробника електроенергії, що спричиняє суттєві матеріальні втрати.

Їх обсяг багаторазово зростає, якщо при аналізі схемних рішень не повністю враховуються фактори, що впливають, і режими, що виникають в окремих, навіть рідко трапляються режимах. Наприклад, за важких умов пуску СД порушення режиму напруги живлення може призвести до дуже важких наслідків на інших технологічних об'єктах.

Для екскаваторного електроприводу питання пуску СД актуальне через такі обставини.

По-перше, оскільки потужність СД велика, то при їх пуску напруга мережі живлення знижується настільки, що порушується нормальна робота іншого

технологічного обладнання. У результаті потужні екскаватори-драглайни підключають на окрему лінію, що, втім, не полегшує тяжких умов запуску СД.

По-друге, збої у запуску виключають повторне включення через небезпеку перегріву пускової обмотки. Таким чином, різноманітні аварійні ситуації вимагають створення систем, які б забезпечували можливість багаторазових повторних пусків.

По-третє, створення пускових систем СД перетворювальних агрегатів Г-Д дозволяє принагідно вирішити й інші питання: обточування колекторів електричних машин постійного струму після їх ремонту; можливість передпускового випробування електричних машин для визначення (діагностики) параметрів електрообладнання.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Аналіз експлуатаційних характеристик електроприводів кар'єрних екскаваторів-драглайнів

Сучасний кар'єрний екскаватор – складний технологічний комплекс. Його основні механізми оснащуються двигунами постійного струму, які одержують живлення від індивідуальних керованих генераторів. На екскаваторах поширена система ГД, приводним двигуном якої є високовольтний двигун змінного струму. Асинхронні двигуни з короткозамкненою ротором напругою 3-6 кВ використовуються для приводу перетворювальних агрегатів екскаваторів з об'ємом ковша до 4,6 м<sup>3</sup> включно. Перетворювальні агрегати інших одноковшових екскаваторів оснащуються виключно синхронними двигунами напругою 6-10 кВ.

Синхронні двигуни екскаваторів, режими їх роботи і живлення кар'єрної мережі, знаходяться в тісній залежності один від одного.

Пускові режими синхронних двигунів супроводжуються п'яти-семикратними струмовими перевантаженнями, зростанням несиметрії напруги, перегріванням обмоток двигунів.

Значне зниження напруги в лінії живлення помітно впливає на роботу інших приймачів, приєднаних до спільної з пускається СД ЛЕП, зокрема, до лінії, що живить потужний екскаватор, може приєднуватися ще один дрібніший, наприклад ЕКГ-4,6.

При цьому в режимах пуску мережевого двигуна потужного екскаватора може відбутися «перекидання» асинхронного мережевого двигуна екскаватора ЕКГ-4,6 в результаті значного зниження останнім моменту, що розвивається. Те саме стосується і асинхронних двигунів бурових верстатів, що живляться від пересувних трансформаторних підстанцій, приєднаних до спільної з потужним екскаватором ЛЕП. Крім того, ці двигуни можуть бути відключені власним мінімальним захистом. Внаслідок зниження напруги на трансформаторах

власних потреб можуть також відключатися пускачами та контакторами двигуни допоміжних приводів екскаватора, у якого запускається мережевий двигун, та у сусідніх екскаваторів. Негативно пусковий режим позначається на роботі освітлювальних приладів через різке зниження світлового потоку ламп, що особливо несприятливо вночі.

Протяжність окремих ліній напругою 6 кВ від головної підстанції живлення (ГПП) до екскаваторів гірських ділянок перевищує 2 км, а в окремих випадках становить 4-5 км. Забезпечення допустимої величини напруги на клеммах електродвигунів екскаваторів за такої віддаленості від ГПП досягають відповідним конструюванням кабельних або повітряних розподільних ліній. В даний час застосовувані конструкції дерев'яних або комбінованих опор зі штиревыми ізоляторами для повітряних ліній (ПЛ) допускають підвіску алюмінієвих проводів перетином до 120 мм<sup>2</sup> і сталевалюмінієвих - до 70 мм<sup>2</sup>.

Однак ПЛ 6 кВ з такими перерізами проводів довжиною 2 км і більше не забезпечують допустимого рівня напруги. Тому для живлення потужних екскаваторів та ПТП-6/0,4 кВ споруджують більш важкий ПЛ 6 кВ з наважкою дроту перетином до 240 мм<sup>2</sup>, а іноді дві одноланцюгові лінії з дроти перерізом 120 мм<sup>2</sup>.

Вплив пускових режимів на ланцюг живлення не обмежується якістю напруги. Великі кидки струму ускладнюють налаштування та умови функціонування релейного захисту.

Додаткове нагрівання при пусках зумовлює прискорене зношування ізоляції та скорочує термін її служби: зі зростанням частоти пусків термін служби ізоляції зменшується.

Ступінь впливу пускового режиму на двигун залежить також від тривалості розгону при пуску. Розрахунок і практика показують, що при довжині лінії живлення 4-5 км і потужності двигуна 1,5-2,0 тис кВт напруга на затискачах СД може знизитися до (0,6-0,7)  $U_c$ , при цьому час пуску значно зростає. Опір лінії живлення знижує напругу на затискачах пускового двигуна, при цьому пусковий струм також знижується в порівнянні з пусковим струмом при номінальній

напрузі. Зі зменшенням пускового струму знижується його щільність в обмотках, проте суттєве збільшення тривалості розгону при зниженій напрузі призводить до того, що загальне зношування ізоляції за час пуску не зменшується.

Число пусків СД залежить від багатьох факторів: технології гірничих робіт, схеми транспорту, числа перемикачів живлячого гнучкого кабелю, інтенсивності відмов елементів системи електропостачання, потужності екскаватора та ін. збільшення витрат електроенергії за рахунок роботи двигуна вхолосту.

Статистика виходів з ладу синхронних двигунів така: екскаваторів ЕКГ-8І на гірничозбагачувальних комбінатах (ГЗК) Криворізького залізорудного басейну достовірно встановлено, що 70% від загальної кількості виходів з ладу СД відбувається внаслідок руйнування пускової обмотки та коротких замикань у обмотці статора. Так, наприклад, було відремонтовано 29% СД від загального парку екскаваторів Криворізького залізорудного басейну. Внаслідок перевантажень обмоток статора СД пусковими струмами та перегріву пускових обмоток на Покровському ГЗК. вийшло з ладу СД екскаваторів типу ЕШ 10/70 - 19 шт. (парк екскаваторів – 20), ЕШ 15/90, 15/90А – 34 шт. (10), ЕШ 20/90 - 9 (6).

В даний час для потужних синхронних двигунів знайшли застосування такі способи пуску: асинхронний-безпосередньо від мережі або при зниженій напрузі, синхронний частотний - за допомогою електромашинного або статичного перетворювача частоти; пуск за допомогою допоміжного розгінного двигуна

Вибір способу визначається такими умовами:

1. Зниження напруги під час пуску двигуна має впливати на нормальну роботу приєднаних до тієї ж мережі споживачів. Відповідно до СН-174-75 зниження напруги при пусках на шини джерела живлення в 6 кВ не повинно перевищувати 10-15% від номінального при живленні від суто силового навантаження (25% допускається при пусках 1 раз на зміну).

2. Перевантаження трансформаторів пусковими струмами не повинно перевищувати певного заданого значення, що залежить від числа пусків на добу їхньої тривалості. По динамічному впливу трансформатор допускається 3 пуску

на добу при 4-кратному струмі перевантаження для трансформаторів потужністю до 25 МВ·А включно.

У табл.1.1 наведено максимальну довжину повітряної лінії (км) для забезпечення допустимої напруги на клеммах СД у пусковому режимі.

Таблиця 1.1 Дані ліній живлення для кар'єрних екскаваторів

Тип екскаватора	Число ліній	Перетин дроту марки А, мм <sup>2</sup>							
		35	50	70	95	120	150	185	240
ЕКГ-8І	1	1,49	2,00	2,53	2,98	3,35	3,67	3,94	4,25
ЕКГ-12,5	1	0,84	1,12	1,42	1,67	1,88	2,06	2,21	2,39
ЕКГ-15	1	0,83	1,11	1,41	1,66	1,86	2,04	2,19	2,37
ЕШ-10/70	1	0,84	1,12	1,42	1,67	1,88	2,06	2,21	2,39
ЕШ-15/90	1	0,56	0,76	0,96	1,13	1,27	1,39	1,49	1,61
	2	1,13	1,52	1,92	2,26	2,54	2,78	2,98	3,22
ЕШ-15/90А	1	0,51	0,69	0,86	1,01	1,13	1,24	1,34	1,44
	2	1,01	1,36	1,72	2,02	2,27	2,49	2,67	2,89
ЕШ-20/90	1	0,40	0,53	0,67	0,79	0,89	0,97	1,04	1,13
	2	0,79	1,06	1,34	1,58	1,77	1,94	2,09	2,25

Сучасні вимоги, які пред'являються пусковим режимам потужних СД, зумовлюють необхідність критичного аналізу застосовуваних способів пуску з метою оцінки їх схемного рішення, виявлення їх переваг і недоліків, а також стану їх теоретичного дослідження.

## 1.2 Причини зниження надійності та підвищення аварійності синхронних двигунів електроприводів кар'єрних екскаваторів

Сучасне електромашинобудування розвивається у напрямі підвищення рівня використання машин, збільшення навантажень активних матеріалів та зниження маси машини на одиницю потужності. Однак запас міцності, а

водночас і стійкість до перевантажень поступово знижується. Внаслідок цього намітилася тенденція загального зниження надійності електричних машин.

Факторами, що визначають надійність приводного СД, є часті пуски та зупинки. При транспортуванні гірничої маси екскаватор працює послідовно на завантаженні складу, очищенні габариту, підготовці забою та очікуванні порожняку. На різних ГЗК співвідношення часу цих процесів по-різному. Найчастіше дані процеси становлять 50-60% від часу загального циклу роботи. При такому режимі приводні СД працюють у несприятливих умовах. При тривалому очікуванні залізничного складу (особливо для екскаватора ЕКГ-8І) з метою скорочення холостої роботи агрегату більшість екскаваторів відключається від електромережі. При цьому пуск та зупинка агрегатів екскаваторів ЕКГ-8І, ЕКГ-12,5 досягає 6 разів на зміну, а драглайнів ЕШ 15/90, ЕШ 20/90 – 3 рази на добу. Така частота комутаційних оперативних відключень призводить до швидкого виходу з ладу двигуна.

Відмови СД відбуваються внаслідок пошкодження обмотки статора та руйнування пускової (демпферної) обмотки.

Відмовлення СД через пошкодження обмотки статора, як правило, відбувається в результаті пробою ізоляції обмотки. Ділянки зниженої електричної міцності в ізоляції можуть з'являтися внаслідок дефектів виготовлення, пошкоджень під час монтажу або в процесі експлуатації, включаючи ремонтні роботи.

На руйнування ізоляції прискорюючий вплив надають концентрації навантажень при пусках: підвищені механічні зусилля, перевантаження по струму, перенапруги, вібрації та ін.

На старіння ізоляції значною мірою впливають механічні та термомеханічні фактори. Термомеханічні навантаження виникають у результаті періодичного нагріву та охолодження обмоток. Механічні – є наслідком електродинамічних сил, що виникають у машині, зусиль, ударів та поштовхів.

Зазвичай при обчисленні сил, що діють на лобові частини обмотки, вважають, що лобові частини нерухомі, а струми незмінні та дорівнюють

максимальним амплітудним значенням. Ці припущення характеризують статичний метод розрахунків.

Реально струм безперервно змінюється, а обмотки та його елементи під впливом змінних у часі сил переміщуються. При цьому динамічні сили, які змінюються в часі ще складнішими законами, що залежать від різних поєднань електромагнітних сил і сил інерції, що виникають при прискоренні елементів лобових частин обмоток в процесі коливальних переміщень, можуть істотно перевищувати сили, значення яких отримано в статичному розрахунку. Динамічні сили значною мірою залежать від механічних властивостей ізоляційних матеріалів, сил інерції, пружності та тертя. Взаємодія пружних елементів конструкції обмоток з електродинамічних сил може створити своєрідні електродинамічні процеси.

Усі викладені вище чинники, що впливають термін служби ізоляції (температура обмотки, вплив електричного поля, механічні зусилля тощо.), мають місце при пусках СД. У багатьох випадках домінуючим фактором є температура, додаткове нагрівання при пусках обумовлює прискорене зношування ізоляції (теплове старіння).

Як видно з роботи, загальний знос ізоляції за час пуску та охолодження обмотки двигуна може бути визначений за формулою

$$z = \frac{Te^{b\theta}}{\alpha} \left[ 4e^{\alpha/2} + e^{\alpha} \left( 1 + \frac{t_n}{T} \right) - 5 - \frac{t_n}{E} \right], \quad (1.1)$$

де  $\alpha = \frac{b\Delta\theta_n(k^2-1)t_n}{T}$ ;  $T$  - постійна часу нагрівання обмотки двигуна, с;  $\theta_n$  - температура нагрівання обмотки під час роботи двигуна з номінальним навантаженням, °С;  $\Delta\theta_n$  - перевищення температури обмотки над температурою повітря, що охолоджує, при номінальному струмі, °С;  $do = I/In$ ;  $do$  - кратність струму навантаження;  $tn$  - час навантаження, с;  $b = 0,088$ . В середньому для обмоток двигунів, що працюють до перевантаження з номінальним

навантаженням, можна прийняти: температуру повітря, що охолоджує,  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_n = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $\Delta\theta_n = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для екскаваторних електроприводів (на прикладі СД екскаватора ЕШ 10/70) за рахунок пускових режимів за умови, що пуск здійснюється один раз за зміну і тривалість його становить 5 с, кратність пускового струму 5,6, постійна обмотки часу  $T = 150\text{ с}$ , за один рік експлуатації термін служби ізоляції зменшується на . Зі збільшенням частоти пусків двигунів термін служби ізоляції зменшується переважно.

Число пусків мережевих двигунів екскаваторів залежить від багатьох факторів: технології гірничих робіт, схеми транспорту, числа перемикань живлячого гнучкого кабелю, інтенсивності відмов елементів системи електропостачання, потужності екскаватора та ін.

Ступінь впливу пускового режиму на двигун залежить також від тривалості розгону двигуна при пуску. Опір лінії знижує напругу на затискачах пускового двигуна. При цьому пусковий струм також знижується в порівнянні з пусковим струмом при номінальній напрузі пропорційно напрузі при пуску. Зменшення пускового струму знижує щільність струму в обмотках двигуна. Однак суттєве збільшення тривалості розгону при зниженій напрузі призводить до того, що загальне зношування ізоляції за час пуску не зменшується в порівнянні з пуском при номінальній напрузі. Зниження напруги на затискачах СД і суттєве збільшення тривалості розгону призводить до збільшення втрат в роторі двигуна і перегріву пускової обмотки. Внаслідок витіснення струму з поверхні ротора момент двигуна є складною функцією ковзання та струму.

Оскільки момент двигуна пропорційний потужності втрат у роторі (втрат від першої гармоніки), поділеної на ковзання:  $M = \int_p^2 r / S$  втрати в роторі за час пуску мають вигляд

$$\Delta P = \int_0^{t_n} MS dt, \quad (1.2)$$

де  $M = f(I, S)$  із рівняння рівноваги моментів на валу -  $dS/(dt) = M - M_c$  ( $M_c$  - статичний момент).

Замінивши в (1.1) змінну  $t$  на  $S$ , запишемо

$$\Delta P = \int_{S_x}^{S_y} \frac{MS}{M - M_c} dS, \quad (1.3)$$

де  $S_H, S_K$  – початкове та кінцеве ковзання відповідно,  $S_H=1, S_K=0$ .

Знайдемо залежність між втратами та струмом ротора  $I_p$ . Із похідної

$$\frac{d}{dI_p} \left( \frac{MS}{M - M_c} \right) = \frac{\frac{-dM}{dI_p} S M_c}{(M - M_c)^2} \quad (1.4)$$

видно, що за  $M_c > 0$  знак похідної  $\frac{d}{dI_p} \left( \frac{MS}{M - M_c} \right)$  протилежний знаку похідної від моменту струму  $dM/(dI_p)$ . Але для всіх можливих роторів з урахуванням залежності магнітної проникності від струму  $dM/(dI_p) > 0$ , отже  $d(dI_p) \left( \frac{MS}{M - M_c} \right) < 0$ .

Виходячи зі сказаного вище, для пускається СД втрати в пусковий обмотці (основні втрати без урахування втрат від вищих гармонік) при зниженні напруги зростають. Потужність втрат, звісно, зменшується, але час розгону істотно збільшується і нагрівання пускової обмотки підвищується, незважаючи на зниження роторного струму. Так як струм ротора при зниженні напруги змінюється, можна зробити висновок, що втрати в роторі підвищуються, це сприяє перегріву обмотки пускової.

### 1.3 Загальна характеристика та вимоги до пускових систем

У промислових системах за наявності обмежень на витрати на регульований електропривод, першорядну важливість набувають системи управління з пуску електроприводів.

Складним завданням є створення пристроїв запуску для потужних високовольтних СД та АТ.

Вибір способу пуску високовольтних електродвигунів визначається такими умовами:

зниження напруги у мережі під час пуску двигуна має впливати на нормальну роботу приєднаних до тієї ж мережі споживачів. Відповідно до СН 174-75 зниження напруги при пуску на шинах 6-10 кВ джерела живлення не повинно перевищувати 10-15% від номінального при живленні освітлювального та змішаного навантажень і 20-25% при живленні чисто силового навантаження (25% допускається при рідких пусках) - один;

перевантаження трансформаторів пусковими струмами має перевищувати певного наперед заданого значення, залежить від кількості пусків на добу та його тривалості.

Найбільш доцільним є прямий пуск, а для синхронних двигунів (СД) прямий асинхронний пуск. За впливом на мережу прямий пуск допускається за умови, що напруга на шинах джерела живлення не буде нижчою за межу, обумовлену СН 174-75. Однак для широкого ряду типорозмірів високовольтних двигунів такий вид пуску неприйнятний.

Важливорозуміти, що пускові системи, за своєю суттю, є новим класом енергозберігаючого обладнання. Розуміння цього тісно пов'язане із загальним та приватним завданням реального енергозбереження. Невиправдано, в усьому, робити односторонню орієнтацію на регульований електропривод. Багато завдань енергозбереження можуть бути вирішені з використанням пускових пристроїв, що забезпечують розгін двигуна, обмеження струмових, механічних та теплових навантажень. Основні вимогами до таких систем:

- можливість необмеженої кількості запусків без небезпеки перегріву обмоток двигуна;
- обмеження динамічних моментів та струмового навантаження;

- можливість тривалої роботи знижених швидкостях (для прогріву деяких технологічних механізмів);
- достатню величину пускового моменту для створення підвищеного моменту під час торкання;
- низьку (порівняно з регульованим приводом) вартість;
- можливість послідовного запуску кількох двигунів.

У даний час існують різні схемні рішення проблеми пуску високовольтних двигунів, що реалізують найбільш доцільні методи: - Прямого пуску; пуску за допомогою допоміжних машин та механізмів; пуску з використанням засобів, що змінюють параметри електроенергії (джерела живлення). Для перерахованого класу систем електроприводів можуть бути розроблені комплексні та багатофункціональні системи запуску потужних високовольтних електродвигунів. Такі системи можуть бути непрямыми - для електроприводів Г-Д при запуску з боку іншої електричної або робочої машини на одному валу з СД або безпосередніми при живленні високовольтного електродвигуна під час запуску безпосередньо від пускової системи (ТРН-СД або ТРН-АТ).

#### 1.4 Мета і задачі дослідження

Метою роботи є розробка і дослідження системи пуску потужних СД агрегатів Г-Д кар'єрних екскаваторів з самосинхронізацією з мережею, що забезпечить можливість проведення необмеженої кількості пусків безпечних для обмоток СД.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії в системі електроприводу з потужними синхронними двигунами

Предмет дослідження – система пуску синхронних двигунів перетворювальних агрегатів Г-Д з самосинхронізацією з мережею

Для досягнення мети в роботі поставлені і вирішені наступні задачі.

1. Провести аналіз питання розробки систем полегшеного запуску та синхронізації.
2. Обґрунтувати і здійснити вибір системи запуску та синхронізації СД з мережею.
3. Розробити систему управління та дослідити пускові режими системи запуску на математичній моделі.
4. Дослідити пускові режими синхронного двигуна на математичній моделі

## 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Класифікація пускових систем

Пускові системи СД перетворювальних агрегатів ГД потужних кар'єрних екскаваторів є непрямими системами (за класифікаційною таблицею). Схеми цих систем можуть бути різноманітними, але принцип їхньої роботи однаковий і полягає в наступному. Варіант 1: відключений від мережі незбуджений СД розганяється за допомогою одного з генераторів постійного струму (ГПТ), що працює в руховому режимі. ДПТ на час розгону СД підключається до окремого джерела живлення. При досягненні швидкості рівної підсинхронної швидкості СД пускова система відключається, а СД підключається до мережі методом самосинхронізації з подальшою подачею збудження. Варіант 2: аналогічний варіанту 1, але розганяється попередньо збуджений СД, і за досягнення швидкості рівної підсинхронної швидкості СД пускова система виробляє точну синхронізацію СД з мережею.

Пускові системи виконані за першим варіантом відрізняються більшою простотою виконання, але в залежності від потужності ГПТ як елементи використовуються пускові опори, що включаються в якірний ланцюг на час пуску (резисторні пускові системи), або керовані тиристорні перетворювачі (тиристорні пускові системи).

Для синхронних двигунів потужністю до 630 кВт, включно застосовуються резисторні пускові системи. Функціональна схема таких систем представлена рис. 2.1.

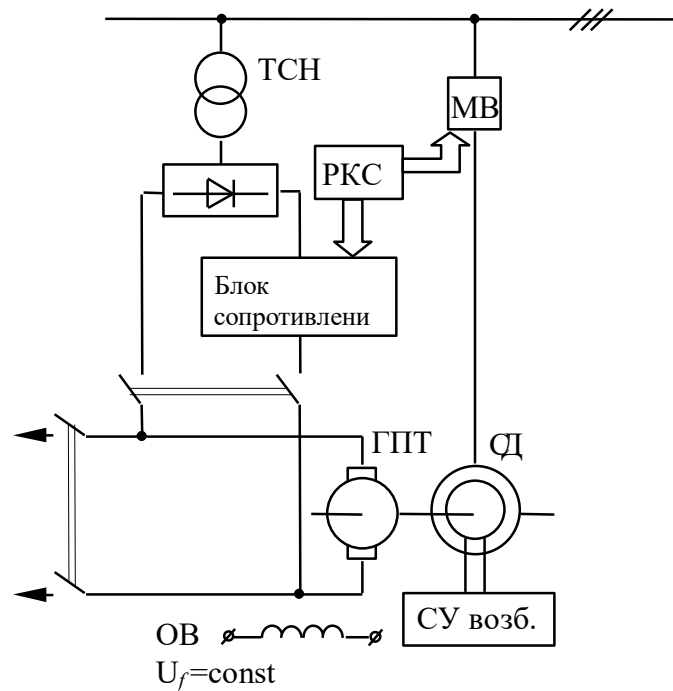


Рисунок 2.1 Функціональна схема резисторної пускової системи з точною синхронізацією

#### 1. Порядок роботи:

- Розгін невідключеного до мережі та незбудженого СД головного перетворювального агрегату екскаватора до підсинхронної (синхронної) швидкості за допомогою допоміжного розгінного двигуна (ВРД), як використовується генератор напору і ходу агрегату ПЕМ-2000.
- Самосинхронізація СД із мережею.

Основним критерієм визначальним схему тиристорної пускової системи є потужність і параметри ГПТ. Якщо номінальна напруга якоря генератора не перевищує випрямлену напругу тиристорного перетворювача, застосовні однозонні пускові системи, в іншому випадку необхідно застосовувати двозонні з ослабленням магнітного потоку.

*Однозонні.* Функціональна схема системи наведено рис. 2.1.



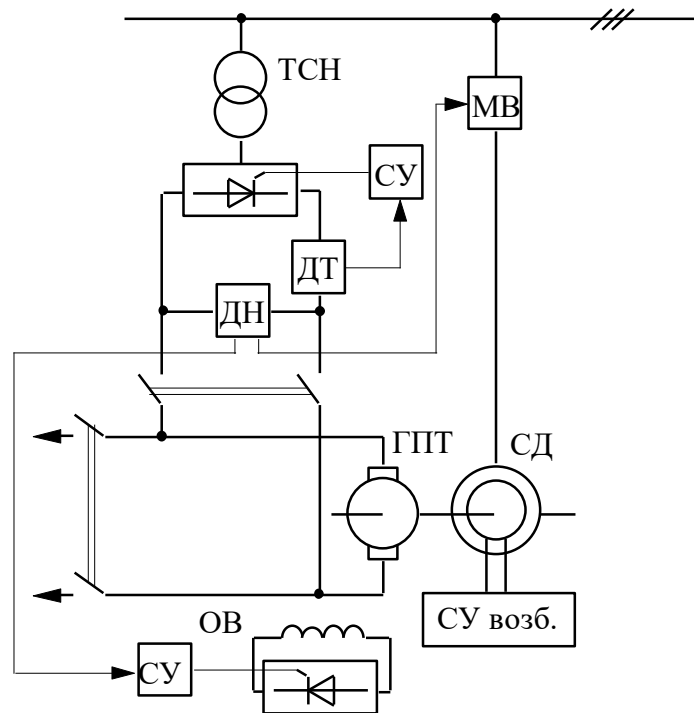


Рисунок 2.2 Функціональна схема тиристорної двозонної пускової системи

### 1.Порядокроботи

- Розгін невідключеного до мережі та незбудженого СД головного перетворювального агрегату екскаватора до підсинхронної (синхронної) швидкості за допомогою допоміжного розгінного двигуна (ГПТ), в якості якого використовується генератор напору та ходу агрегату.
- Самосинхронізація СД із мережею.
- Перехід дивлення ОВ СД.

### 2.2 Технічна характеристика електроприводу повороту екскаватора

Електропривод повороту та крокування екскаватора ЕШ 10/70 обраний як електропривод використовуваного для полегшеного запуску СД з тієї причини, що в силовій схемі є силові контактори КШ та КВ. Контактор КШ забезпечує перемикання живлення від генератора на привід крокування, КВ - на поворотний привід.

Технічні дані генератора, що використовується для непрямого запуску СД, наведені в таблиці.

Таблиця. 2.2 Клієнтський формуляр ГПЕ 85/36-6К

Номинальні режими		Перевантаження струмом, в частках від номінального				
				Режими при		
				Ном. напрузі	перевантаження 25% від ном.	
$n$ , об/хв	1000	Робоча		2.0	2.5	
$U$ , В	900	Відсічка		2.75	2.75	
$I$ , А	1110					
$P$ , кВт	1000					
Дані обмоток				Збудження		
Обмотка	витків на полюс	з'єднання	опір при Ом при 150С	Параметр	шунтов а	незалежна
Якоря	54	ОДЗ	0.00825	Струм возб., А	5.2	100
Самозбудження	900	послідовне	43.2	Напряження на обмотці зб.	255	34
Додаткові полюси	6		0.00185	Потік обного полюса, МХС	8.53 x 1.18	
Компенсаційна	55		0.00444			

Додатков а	90		27.0						
Незалежного збудження	160	послідовне	2.6						
Число полюсів									2p = 6
Діаметр якоря, мм									850
Число пазів якоря									81
Маховий момент якоря, тм <sup>2</sup>									0.75
Примусова вентиляція, кількість повітря м <sup>3</sup> /с									3
Максимально допустима температура повітря, що охолоджує, 0С									40
ККД при номінальному навантаженні без урахування втрат на збудження та примусову вентиляцію, %									94.6
Характеристика холостого ходу під час зазору під головними полюсами 5.0 мм									
Струм збудження, А *	0	1	2	3	4	5	6	8	10
ЕРС генератора,	0	200	380	570	725	825	900	980	1050

\*) при струмі в незалежній обмотці збудження рівному 0.

Привідний синхронний двигун агрегату СДН2-16-36-6 з технічними даними, наведеними у таблиці 2.3

Таблиця. 2.3 Технічні дані В

Номінальні дані		
Номінальна потужність	кВт	1000
Номінальна напруга	В	6000
Номінальний струм	А	112
$\cos \varphi$		0.9
Число полюсів	2р	6
Полюсний поділ, $\tau$	см	42.2
Число фаз		3
Частота живлення	Гц	50
Номінальна швидкість	про/хв	1000
Кратність максимального моменту		1.85
ОКЗ		0.79
Обмотка статора		
Число провідників у пазу		1
Перетин провідника	мм <sup>2</sup>	16
Число витків		192
Лінійне навантаження,	А/мм	506
Номінальна щільність струму	А/мм <sup>2</sup>	5.07
Довжина провідника	мм	2065
Активний опір, 20/750	Ом	0.322/0.396
Активний опір, 750	%	1.2
Обмотка збудження		
Перетин провідника	мм	2.44 x 32
Довжина провідника	мм	1265
Число витків		43.5
Активний опір, 20/75/1150	Ом	0.0767/ 0.0936/

		0.1075
Демпферна обмотка		
Число стрижнів		10
Діаметр стрижня	мм	14
Індуктивності та постійні часу		
$x_c$	о.	0.133
$x_p$	о.	0.24
$x_{ad}, x_{aq}$	о.	1.372, 0.696
$x_d, x_q$	о.	1.505, 0.829
$x_f$	о.	0.169
$x'_d$	о.	0.285
$x_{kd}, x_{kq}$	о.	0.073, 0.0546
$x''_d, x''_q$	о.	0.183, 0.1837
$x_2, x_0$	о.	0.183, 0.0665
$r_f$	о.	0.00238
$r_{kd}, r_{kq}$	о.	0.0435, 0.0355
$T'_{do}$	с	2.05
$T'_{co}$	с	0.1058
$T'_{qo}$	с	0.0673
$T'_d$	с	0.388
$T''_{d0}$	с	0.01635
$T''_q$	с	0.0149
$T_a$	с	0.486
Втрати та ККД		
Номінальний ККД	%	95.64

Втрати у міді статора	кВт	14.896
Втрати у міді ротора	кВт	9.053
Сумарні втрати у сталь	кВт	6.03
Втрати на збудження	кВт	5.959
Сумарні втрати	кВт	45.758

### 2.3 Розрахунок потужності системи запуску

Розрахунок потужності системи запуску виконаємо з умови забезпечення торкання з місця та за величиною динамічного моменту, що перевищує момент опору.

Для підшипників ковзання залежність моменту опору  $M_{cm}$  можна записати взагалом вигляді:

$$M_{cm} = M_{зр} + M_{\mu} + M_Q + M_v, \quad (2.1)$$

де  $M_{зр}$  - момент рушання;  $M_v$  - момент, зумовлений в'язкістю мастила;  $M_Q$  - момент, зумовлений тертям о повітря;  $M_{\mu}$  - статичного навантаження на підшипник.

$M_{зр}$  - обумовлений нерівномірністю розподілу мастила після зупинки. Мастильна олія спливає в нижню частину та загусає або застигає за низьких температур.

$$M_{зр} = t\varepsilon v^{\frac{2}{3}} (\varphi + 1)^{-1}, \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon = 45.56$  - коефіцієнт, що залежить від конструкції підшипника та його типорозмірів;  $v$  - кінематична в'язкість мастила (сст);  $\varphi$  - кількість оборотів з моменту початку обертання;  $t = 8$  - Кількість підшипників агрегату.

Вид залежності моменту рушання  $M_{зр}$  від кількості оборотів  $\varphi$  наведено на рис.2.3.

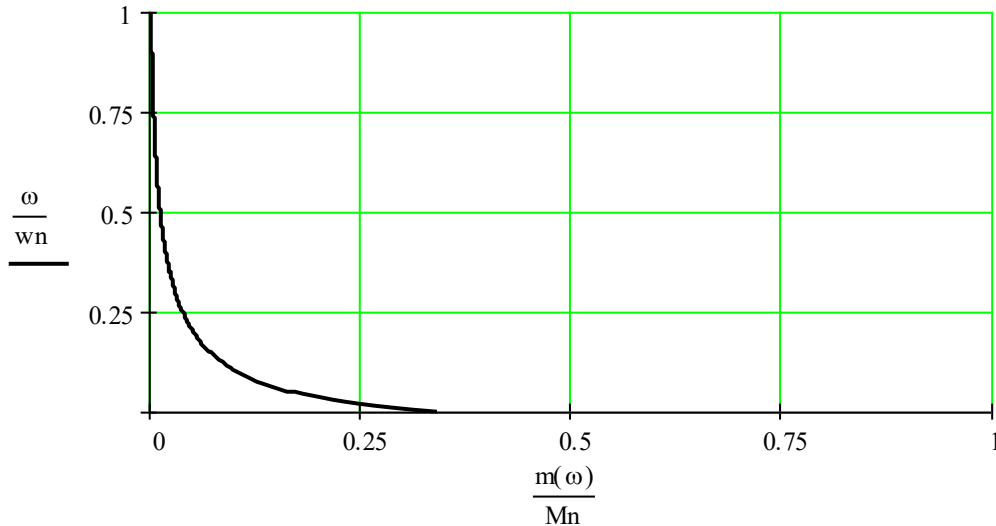


Рисунок 2.3. Залежність моменту опору торкання

Залежність моменту опору від в'язкості змащення може бути виражена формулою Стокса:

$$M_v = 6\pi\nu r\omega, \quad (2.3)$$

де  $r$  - радіус кульки у підшипнику (м);  $\omega$  - Кутова швидкість.

Величина статичної в'язкості мастила є складною функцією і залежить від температури та швидкості обертання. Апроксимація характеристик мастил отримана усереднена залежність їх в'язкості від температури навколишнього середовища  $t^{\circ}C$ . Зобліком отриманого рівняння графічна залежність моменту від в'язкості мастила при різних температурах має вигляд наведено на рисунку.2.4.

$$\lg(\nu) = (\alpha_1\omega - \beta_1)t^{\circ} + (-\alpha_2\omega + \beta_2), \quad (2.4)$$

де  $\alpha_1 = 6.6 \cdot 10^{-5}$ ;  $\alpha_2 = 0.0111$ ;  $\beta_1 = 0.02334$ ;  $\beta_2 = 3.24165$ .

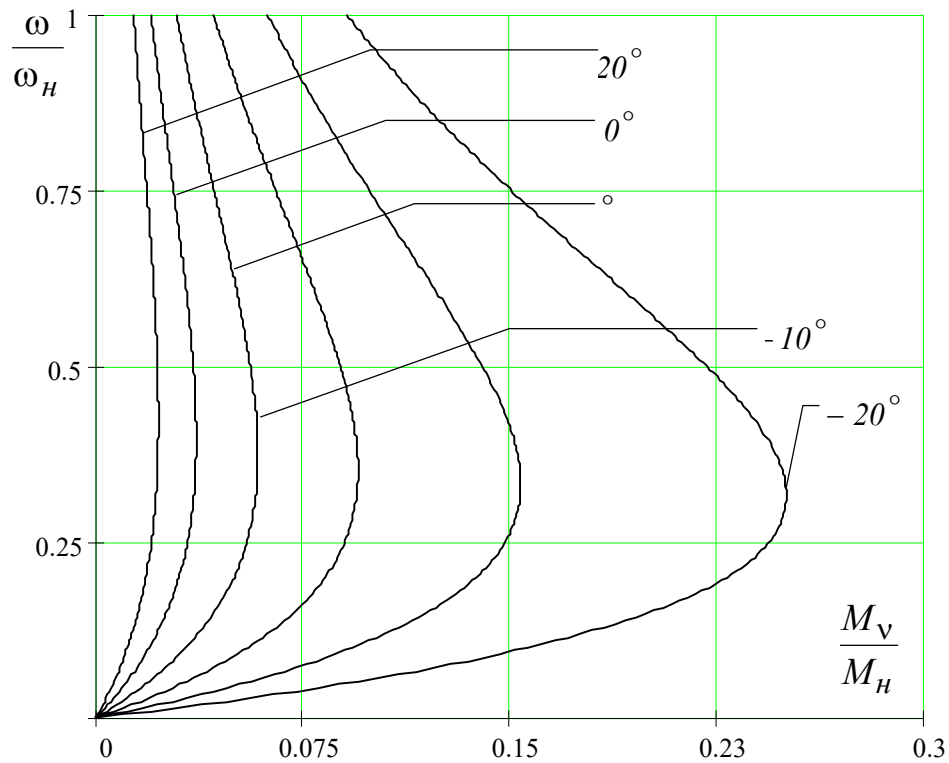


Рисунок 2.4 –Залежність моменту опору від в'язкості мастила

Момент, що залежить від статичного навантаження на підшипник, може бути представлений виразом, що враховує як вага ротора, так і швидкість обертання:

$$M_{\mu} = \mu_0 g G r (1 - e^{-\xi \omega}), \quad (2.5)$$

де  $\mu_0$  - наведений коефіцієнт тертя ( $\mu_0 = 0.001 \div 0.0015$  для тертя типу сталь по сталі);  $G = 2805$  - вага ротора, кг;  $r = 0.2$  - радіус вала, м;  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup>;  $\xi = 0.04$  - емпіричний коефіцієнт. Залежність статичного моменту навантаження наведена на рис.2.5.

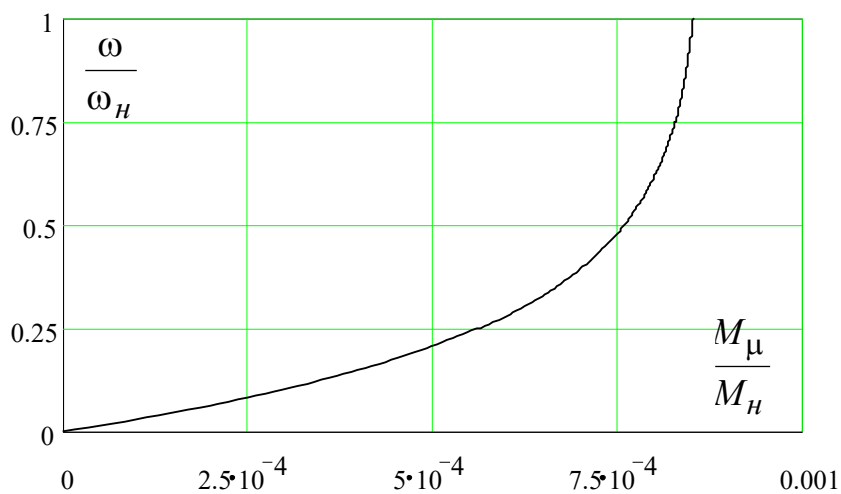


Рисунок 2.5.. Залежність моменту опору від статичного навантаження на підшипник

Момент тертя ротора електричного двигуна об повітря:

$$M_Q = 4.665 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^{1.7} \left( 1 + 4.4 \frac{l}{d} \right)^{4.4}, \quad (2.6)$$

де  $l = 0.7$  - Довжина ротора, м;  $d = 0.425$  - Діаметр ротора, г.

Залежність моменту тертя о повітря має вигляд наведений на рис.2.6:

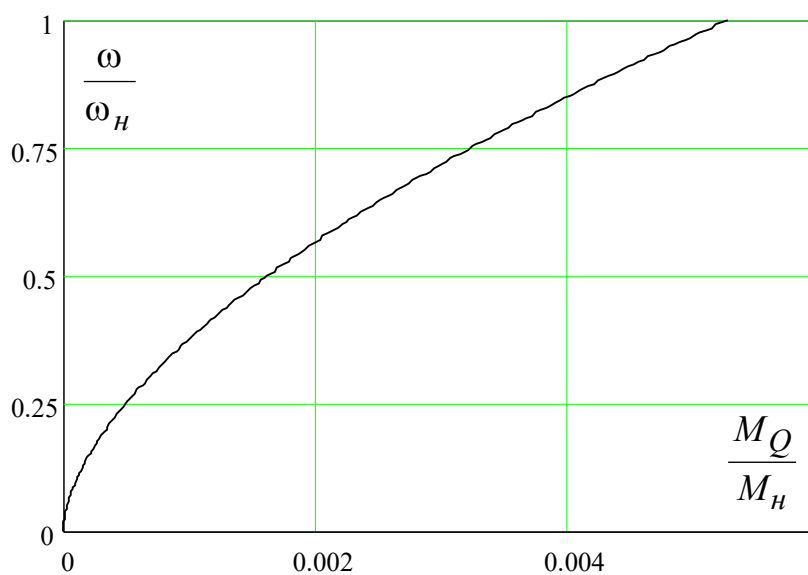


Рисунок 2.6. Залежність моменту опору від тертя повітря

Сумарна залежність  $M_{cm} = f(\omega)$  наведена на рис. 2.7.

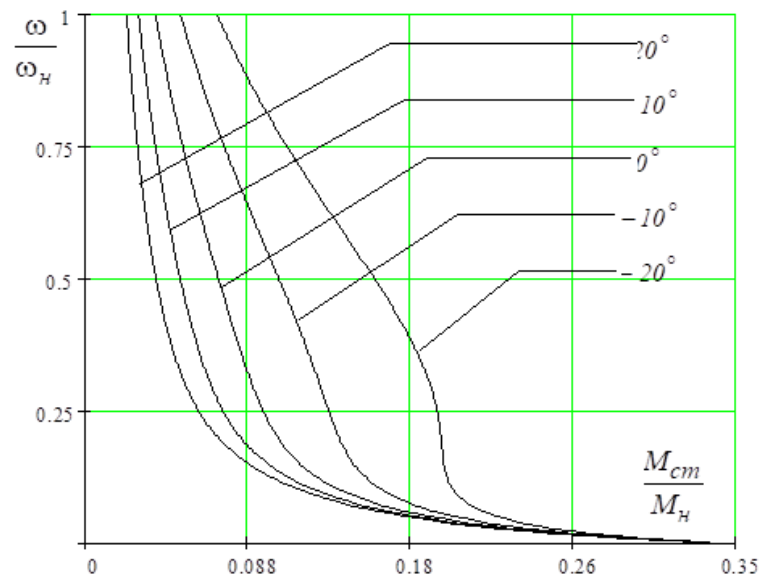


Рисунок 2.7. Сумарна залежність статичного моменту

Як видно з розрахунків при торканні величина моменту опору складає  $0.35M_H$ . Отже, система запуску повинна забезпечувати при торканні цю величину моменту двигуна. Відповідно до цієї величини виконаємо розрахунок потужності системи.

Специфіка роботи головних перетворювальних агрегатів Г-Д пред'являє жорсткі вимоги до електроприводу системи запуску, що застосовується, і особливо до визначення необхідної потужності. При запуску двигуна та здійсненні багаторазових повторних пусків потужність пускової системи має бути необхідною та достатньою для забезпечення пуску.

З основного рівняння динаміки електроприводу момент необхідний для розгону агрегату

$$M \approx J_{\Sigma} \frac{\omega_0}{\Delta t} + M_c, \text{ Нм} \quad (2.7)$$

де  $\omega_0$  - Синхронна частота обертання агрегату;  $\Delta t$  - час досягнення синхронної частоти обертання;  $J_{\Sigma}$  - Сумарний момент інерції 4-х машинного агрегату.

Припустимо, що час розгону агрегату складає 60 с.

$$M \approx 843.75 \frac{105}{60} + 0.35 \cdot 9523.81 = 4809.9 \text{ Нм}$$

Тоді струм розгону, А

$$I = \frac{M}{k\phi_{ген}} = \frac{M \cdot \omega_0}{U_n - I_n \cdot R_{я}} \quad (2.8)$$

$$I = \frac{4809.9 \cdot 105}{900 - 1110 \cdot (0.00825 + 0.00185 + 0.00444)} = 571.4$$

Або при  $\Delta t = 120$  з

$$M \approx 843.75 \frac{105}{120} + 0.35 \cdot 9523.81 = 4071.61 \text{ Нм}$$

$$I = \frac{4071.6 \cdot 105}{900 - 1110 \cdot (0.00825 + 0.00185 + 0.00444)} = 483.7 \text{ А}$$

Прийmemo, що розгін генератора відбувається за струму 500 А.

Тиристорний перетворювач забезпечує номінальну напругу 460 В.

Тоді потужність пускової системи становитиме:

$$P_{nc} = I_{разг} \cdot U_{д.н} \quad (2.9)$$

$$P_{nc} = 500 \cdot 460 = 230 \text{ кВт.}$$

## 2.4 Вибір обладнання системи запуску

Як впливає з проведеного вище аналізу, система запуску повинна бути двозонною з тиристорними перетворювачами, які працюють на якірний ланцюг і обмотку збудження.

Потужність тиристорного перетворювача якірного ланцюга становить 230 кВт, з номінальним струмом 500 А. Як такий перетворювач виберемо перетворювач типу АТ 250/500.

Таблиця 2.4 Технічні дані тиристорного перетворювача

Тип	АТ 250/500
Номінальна випрямлена напруга,	460
Номінальний випрямлений струм, А	500

Як живильний трансформатор буде використовувати трансформатор власних потреб екскаватора ТМЕ-400/10, технічні дані трансформатора наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 Технічні дані трансформатора

Тип	ТМЕ-400/10
Номінальна потужність, кВА	400
Номінальна напруга первинної обмотки,	6000
Номінальна напруга вторинної обмотки,	400
Напруга короткого замикання, %	5.5
Втрати холостого ходу, Вт	1300
Втрати короткого замикання, Вт	5400
Струм холостого ходу, %	3.0

Як дросель приймемо реактор, що згладжує, дані якого наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 Технічні дані реактора, що згладжує

Тип	ФРОС-125/0.5УЗ
Номінальний струм, А	500
Індуктивність, Гн	0,00075
Активний опір, Ом	0,003
Номінальні втрати у міді, Вт	750

## 2.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення електроприводу

Розрахунок параметрів трансформатора

Номінальний струм трансформатора:

$$I_2 = \frac{P_n 10^3}{\sqrt{3}U_2} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577 \text{ А} \quad (2.10)$$

Активний опір фази трансформатора

$$R_m = \frac{\Delta P_{кз}}{3I_2^2} = \frac{5400}{3 \cdot 577^2} = 0.0054 \text{ Ом} \quad (2.11)$$

Повний опір фази трансформатора

$$z_m = \frac{U_k \% U_2}{100I_2} = \frac{5.5 \cdot 400}{100 \cdot 577} = 0.038 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Індуктивний опір фази трансформатора

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{0.038^2 - 0.0054^2} = 0.0376 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Індуктивність фази трансформатора

$$L_m = \frac{x_m}{100\pi} = 0.00012 \text{ Гн} \quad (2.14)$$

Комутаційний опір тиристорного перетворювача

$$R_\gamma = \frac{m \cdot x_m}{2\pi} = \frac{3 \cdot 0.0376}{\pi} = 0.0359 \text{ Ом} \quad (2.15)$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення якірного ланцюга

Номінальна частота обертання

$$\omega_{nd} = 104.72 \quad (2.16)$$

Номінальний магнітний потік:

$$\begin{aligned} k\Phi_H &= \frac{U_H - I_H (R_\gamma + R_{\partial n} + R_{ко})}{\omega_H} = \\ &= \frac{900 - 1110 \cdot (0.00825 + 0.00185 + 0.00444)}{104.72} = 8.44 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{я} = \frac{U_H}{I_H \omega_H p} k = 0.25 \frac{900}{1110 \cdot 104.72 \cdot 3} = 0.000645 \text{ Гн} \quad (2.18)$$

Еквівалентний опір якірного ланцюга

$$R_e = R_{я} + R_{\partial n} + R_{\kappa o} + 2R_m + R_{\partial p} + R_{\gamma} \quad (2.19)$$

$$R_e = 0.00825 + 0.00185 + 0.00444 + 2 \cdot 0.0054 + 0.003 + 0.0359 = 0.06424 \text{ Ом}$$

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга

$$\begin{aligned} L_e &= L_{я} + 2L_m + L_{\partial p} = \\ &= 0.000645 + 2 \cdot 0.00012 + 0.00075 = 0.001635 \text{ Гн} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Електромагнітна постійна часу

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0.001635}{0.06424} = 0.02545 \text{ с} \quad (2.22)$$

Електромеханічна постійна часу

$$T_m = J_{\Sigma} \frac{R_e}{(k\phi)^2} = 843.75 \frac{0.06424}{8.44^2} = 0.761 \text{ с} \quad (2.23)$$

Номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1000 \cdot 10^3}{104.72} = 9549.27 \text{ Нм} \quad (2.24)$$

## 2.6 Розрахунок двозонної системи полегшеного запуску

Система регулювання пуском електроприводу має бути побудована за принципом підлеглого регулювання. Проте відсутність датчика швидкості накладає обмеження структуру системи. Технічно можна продати тільки контур швидкості. Регулювання у другій зоні має бути дискретним.

Пускдвигуна здійснюється за максимального магнітного потоку при заданому рівні струмообмеження для забезпечення необхідного моменту торкання. Релейний датчик напруги на якорі включає ступінь ослаблення магнітного потоку при досягненні максимальної напруги перетворювача. Двигун

стає на відсікання, напруга на якорі знижується і розгін продовжується до заданої швидкості.

Зробимо розрахунок ПІ-регулятора струму.

Структурну схему контуру регулювання струму наведено на Рис. 2.8:

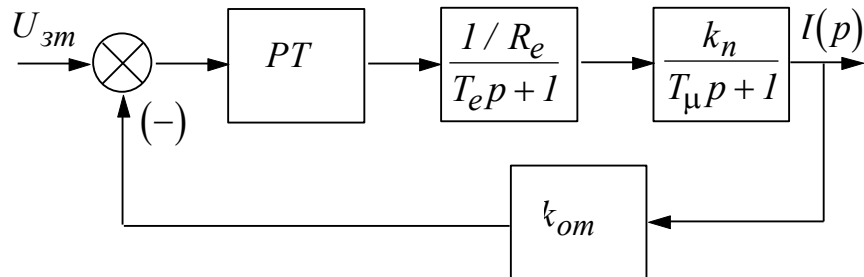


Рисунок 2.8. Структурна схема контуру регулювання струму

Відповідно до структурної схеми передавальна функція якорного ланцюга:

$$W_I(p) = \frac{k_n / R_e}{(T_\mu p + 1)(T_e p + 1)}, \quad (2.25)$$

де  $k_n = \frac{U_{d.n}}{U_{z.max}} = \frac{460}{10} = 46$  - Коефіцієнт посилення перетворювача,

$k_{om} = \frac{U_{z.max}}{I_{max}} = \frac{10}{500} = 0.02$  - Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

Використовуємо ПІ-регулятор із передавальною функцією

$$W_{p.m}(p) = \frac{T_0 p + 1}{T_{01} p}. \quad (2.26)$$

Тоді передатна функція розімкнутого контуру струму

$$W_{p.k}(p) = W_{p.m}(p) \cdot W_I(p) = \frac{k_n (T_0 p + 1) / R_e}{(T_\mu p + 1)(T_e p + 1) T_{01} p}. \quad (2.27)$$

Прийmemo  $T_0 = T_e$  - Постійна часу, яку необхідно компенсувати. Тоді

$$W_{p.k}(p) = W_{p.m}(p) \cdot W_I(p) = \frac{k_n / R_e}{(T_\mu p + 1) T_{01} p}. \quad (2.28)$$

Передатна функція замкнутого контуру

$$W_{z.k}(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot k_{om}} = \frac{1 / k_{om}}{\frac{T_\mu T_{01} R_e}{k_{om} k_n} p^2 + \frac{T_{01} R_e}{k_{om} k_n} p + 1}, \quad (2.29)$$

тобто. замкнутий контур є системою другого порядку.

Для забезпечення оптимального перехідного процесу необхідно, щоб коефіцієнт демпфування дорівнював 0.707. Це можливо якщо коефіцієнт при  $p$  дорівнюватиме:

$$\frac{T_{01} R_e}{k_{om} k_n} = 2T_\mu, \quad (2.30)$$

звідки

$$T_{01} = \frac{2T_\mu k_{om} k_n}{R_e}. \quad (2.31)$$

Передатна функція регулятора струму набуде вигляду:

$$W_{p.m}(p) = \frac{(T_e p + 1) R_e}{2T_\mu k_{om} k_n p}. \quad (2.32)$$

$$W_{p.m}(p) = \frac{(0.02545 p + 1) 0.06424}{2 \cdot 0.01 \cdot 0.02 \cdot 46} = 0.0888 + 3.491 \frac{1}{p}.$$

## 2.7 Розробка математичної моделі дослідження пускових режимів системи полегшеного пуску

Згідно з розробленим алгоритмом проведення запуску в два ступені, з ослабленням магнітного потоку на 2-му ступені, розробимо математичну модель для дослідження пускових режимів.

Система диференціальних і лінійних рівнянь алгебри повної математичної моделі має вигляд:

- рівняння підсумовуючого вузла

$$U_{y.m} = U_{z.m} - I \cdot k_{om}; \quad (2.33)$$

- рівняння інтегральної складової регулятора струму

$$\frac{dU_{3.u}}{dt} = \frac{R_e}{2T_\mu k_{om} k_n} U_{y.m}; \quad (2.34)$$

- рівняння пропорційної складової регулятора струму

$$U_{3.n} = \frac{T_e R_e}{2T_\mu k_{om} k_n} U_{y.m}; \quad (2.35)$$

- рівняння напруги завдання на тиристорний перетворювач

$$U_3 = U_{3.n} + U_{3.u}; \quad (2.36)$$

- рівняння для напруги на виході тиристорного перетворювача

$$\frac{dU_d}{dt} = U_3 k_n - U_d; \quad (2.37)$$

- рівняння струму якірного ланцюга генератора

$$L_e \frac{dI}{dt} = U_d - I \cdot R_e - k\phi_\Sigma \cdot \omega; \quad (2.38)$$

- Рівняння сумарного магнітного потоку генератора

$$k\phi_\Sigma = k\phi_{c.o} + k\phi_{ш} + k\phi_{н.в}; \quad (2.39)$$

- Рівняння магнітного потоку обмотки самозбудження

$$k\phi_{c.o} = f(I); \quad (2.40)$$

- рівняння для струму шунтової обмотки збудження

$$L_{ш.o} \frac{dI_{ш.o}}{dt} = U_d - I_{ш.o} R_{ш.o}; \quad (2.41)$$

- Рівняння для магнітного потоку шунтової обмотки збудження

$$k\phi_{ш.o} = f(I_{ш.o}); \quad (2.42)$$

- Рівняння для струму незалежної обмотки збудження

$$L_{н.в} \frac{dI_{н.в}}{dt} = U_{н.в} - I_{н.в} R_{н.в}; \quad (2.43)$$

- Рівняння для магнітного потоку незалежної обмотки збудження

$$k\phi_{н.в} = f(I_{н.в}); \quad (2.44)$$

- рівняння руху електроприводу

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = I \cdot k\phi_{\Sigma} - M_c \cdot \text{sign}(\omega); \quad (2.45)$$

- рівняння моменту опору у функції швидкості

$$M_c = f(\omega). \quad (2.46)$$

Рівняння для складових магнітного потоку можна спростити з огляду на співвідношення їх розподілу. Номінальна величина магнітного потоку обмотки самозбудження становить  $k\phi_{c.o.n} = 0.6 \cdot k\phi_n = 5.064$ , номінальна величина магнітного потоку шунтового збудження становить  $k\phi_{ш.o.n} = 0.2 \cdot k\phi_n = 1.688$  номінальна величина магнітного потоку незалежної обмотки збудження становить  $k\phi_{н.в.н} = 0.2 \cdot k\phi_n = 1.688$ .

Прирішенні рівнянь необхідно врахувати нелінійну залежність магнітного потоку від струму відповідно до кривої намагнічування. Для моделювання зручно прийняти криву намагнічування у відносних одиницях. Дані кривої намагнічування наведені у таблиці. При моделюванні зручно використовувати аналітичний вираз кривої намагнічування виду:

$$k\phi^* = 0.997 \arctg(1.34 \cdot I^*), \quad (2.47)$$

де значення магнітного потоку та струму використовуються у відносних

одиницях:  $k\phi^* = \frac{k\phi}{k\phi_{\Sigma}}$ ;  $I^* = \frac{I}{I_n}$ .

Таблиця 2.7 Універсальна крива намагнічування

$I^*$ , о.	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$k\phi^*$ , о.	0.58	1.0	1.21	1.33	1.4	1.46	1.51

Вигляд кривої намагнічування наведено на Рис. 2.9.

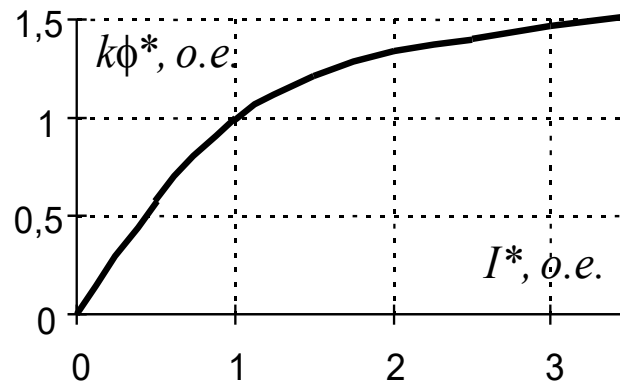


Рисунок 2.9 – Універсальна крива намагнічування.

Відповідно до наведеної системи рівнянь складемо структурну схему для моделювання з використанням сучасних інструментальних засобів.

## 2.8 Дослідження динаміки системи полегшеного запуску

Дослідження динамічних режимів здійснимо за допомогою математичного пакета для моделювання Matlab.

Налаштування системи забезпечують зниження напруги на незалежній обмотці збудження у 2 рази. Такий рівень обраний з тієї причини, що перетворювач забезпечує напругу 460, тогтя як номінальна напруга генератора 900 В. На рис. наведено залежності струму якірного ланцюга, кутової швидкості, моменту опору, напруги на якорі, магнітного потоку при розгоні генератора.

Час розгону відповідає розрахунковому – 60 с.

З отриманих залежностей видно, що розгін відбувається плавно при струмі 500 А. На 25 секунді напруга на якорі генератора досягає 450 В і релейно-контакторна система управління забезпечує зниження напруги збудження. Триває розгін за ослабленого потоку до номінальної швидкості.

Розмір сумарного магнітного потоку вбирається у номінального, т.к. напруга на якорі нижче від номінального в 2 рази, що не забезпечує номінального потоку на шунтовій обмотці, струм якоря при розгоні нижче за номінальний в 2 рази, що не забезпечує номінального потоку обмотки самозбудження.

Магнітний потік незалежної обмотки форсований значення 1.2 номінального. Однак величина форсування обмежена нелінійними властивостями кривої намагнічування.

При дослідженні пускових режимів враховано розподіл магнітних потоків за обмотками. У моделі ця пропорційність зберігається.

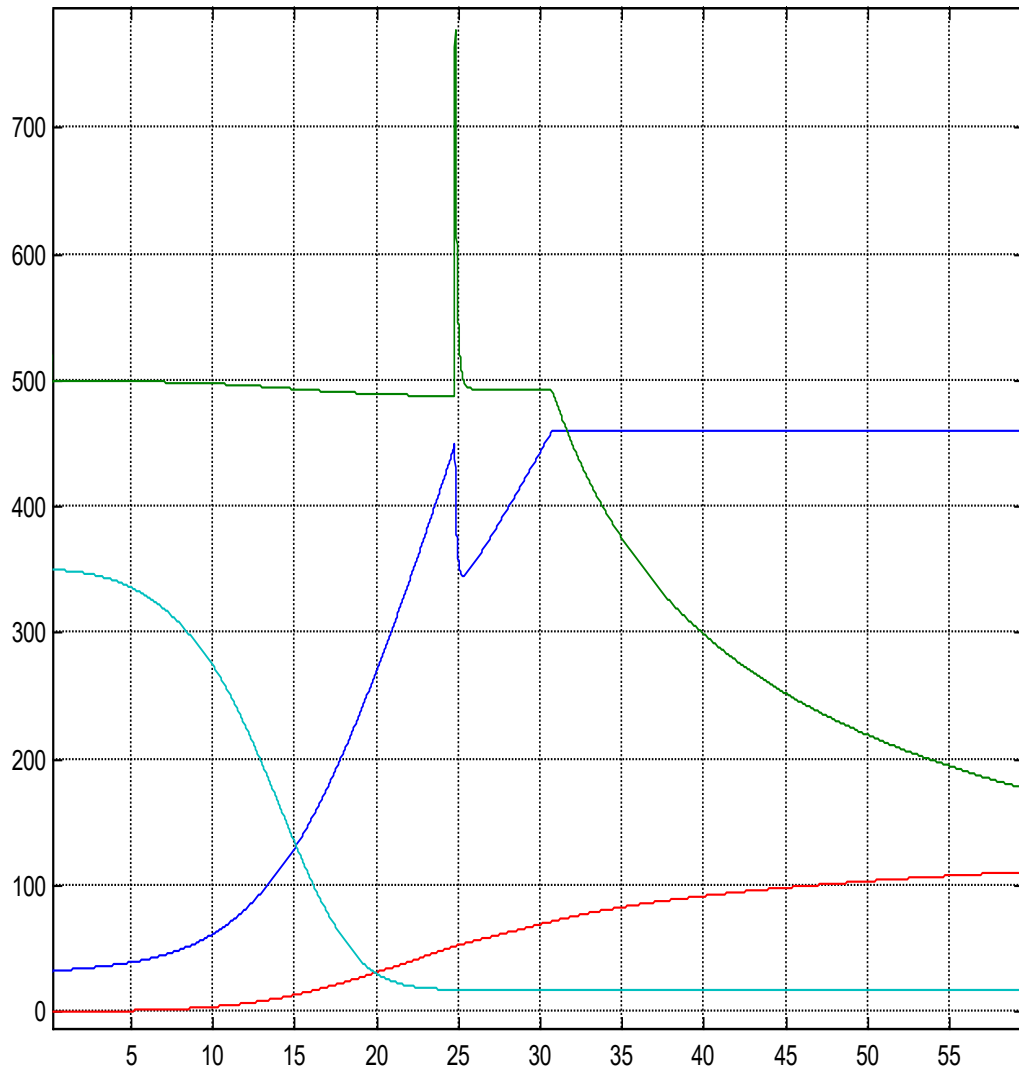


Рисунок 2.10 Зміна струму якорного ланцюга, кутової швидкості, моменту опору, напруги на якорі, магнітного потоку при розгоні генератора.

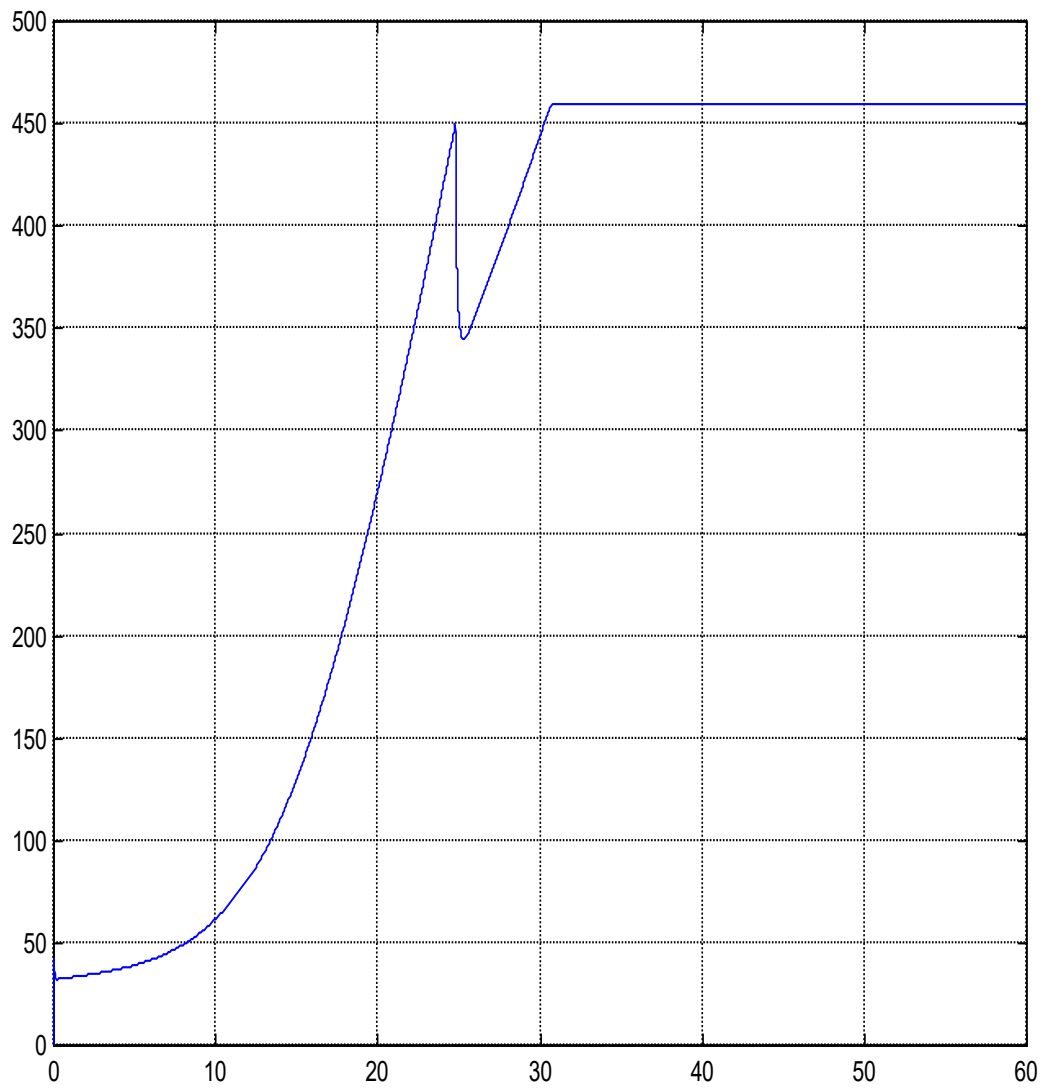


Рисунок 2.11 Зміна напруги на якорі генератора під час його розгону

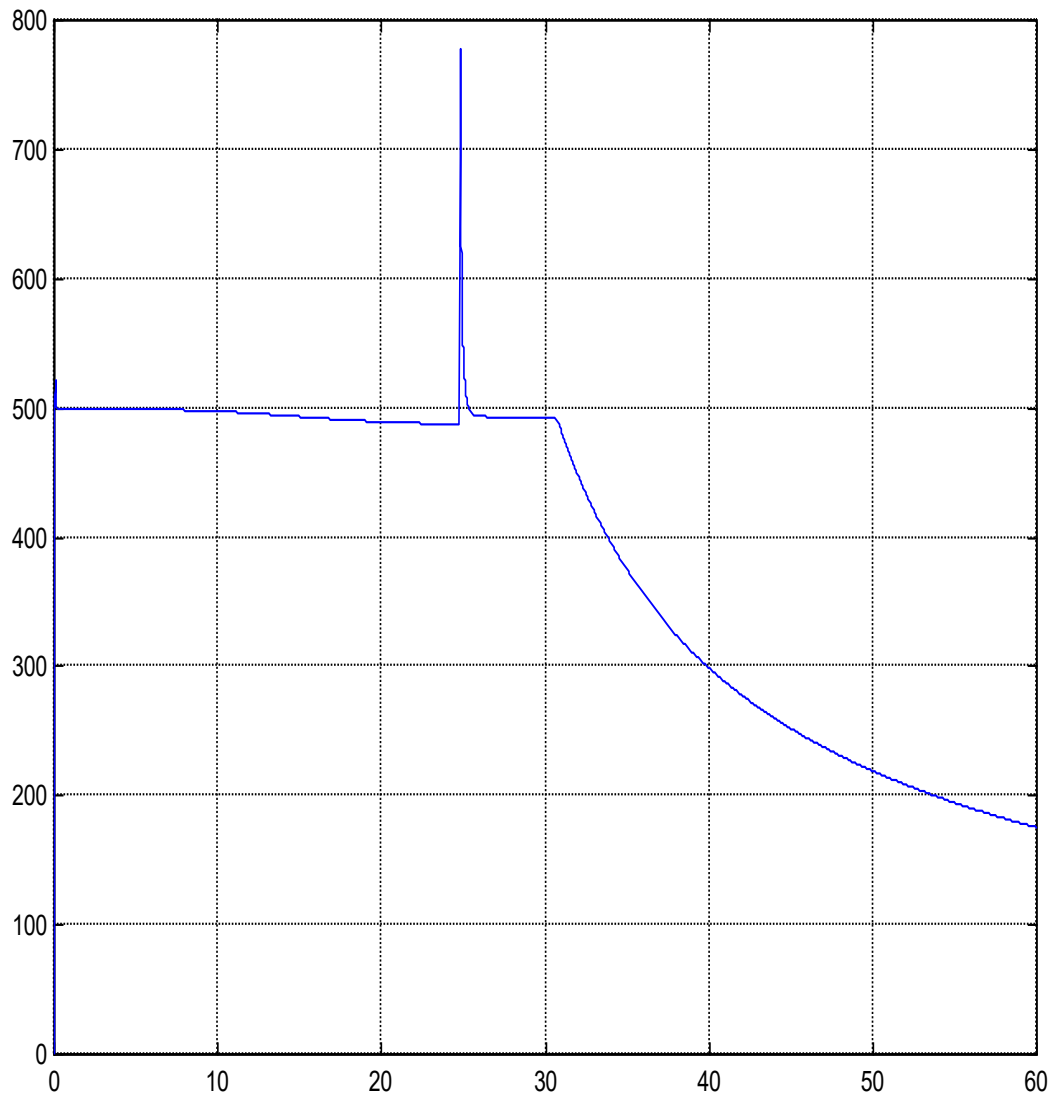


Рисунок 2.12. Зміна струму якоря генератора під час його розгону

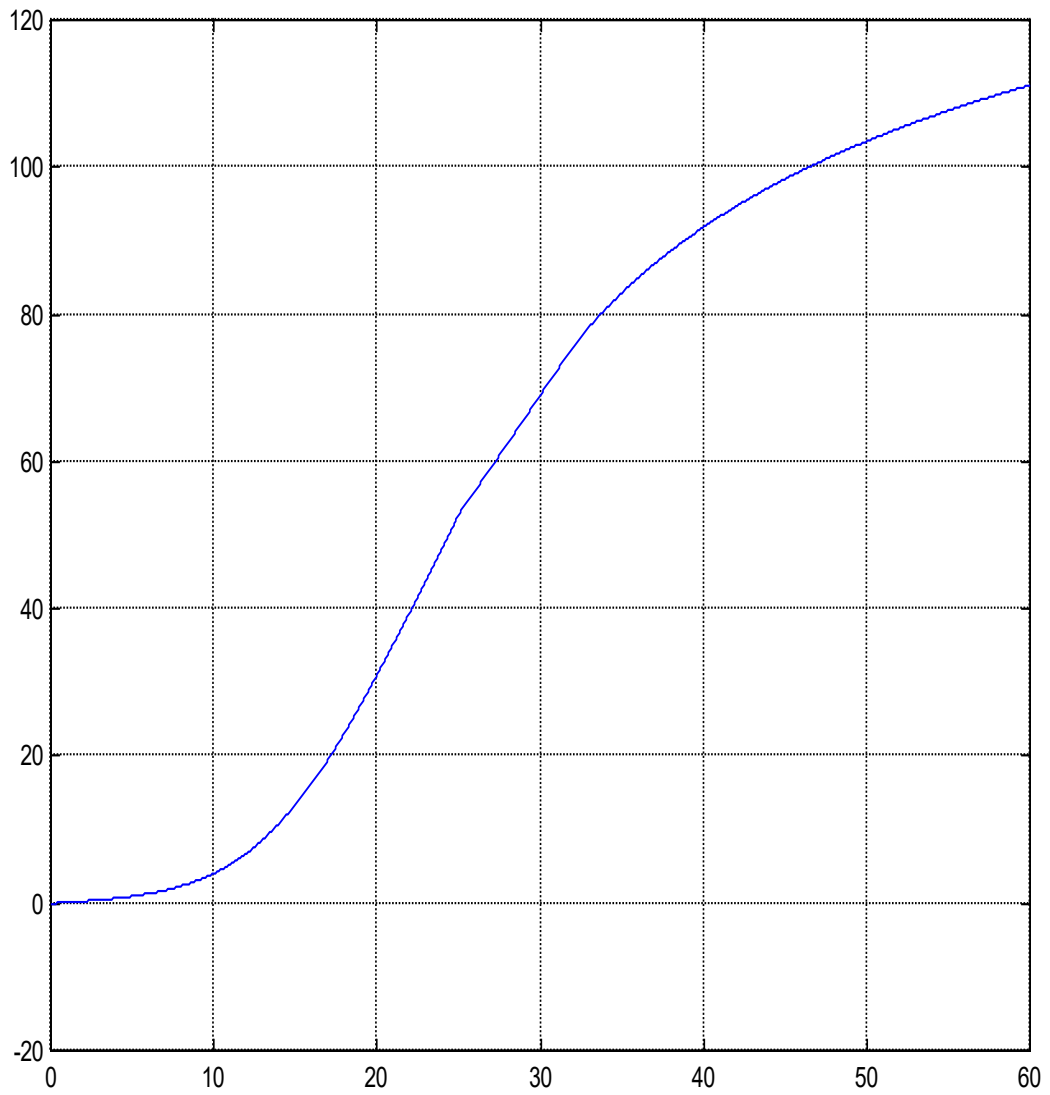


Рисунок 2.13. Зміна кутової швидкості генератора під час його розгону

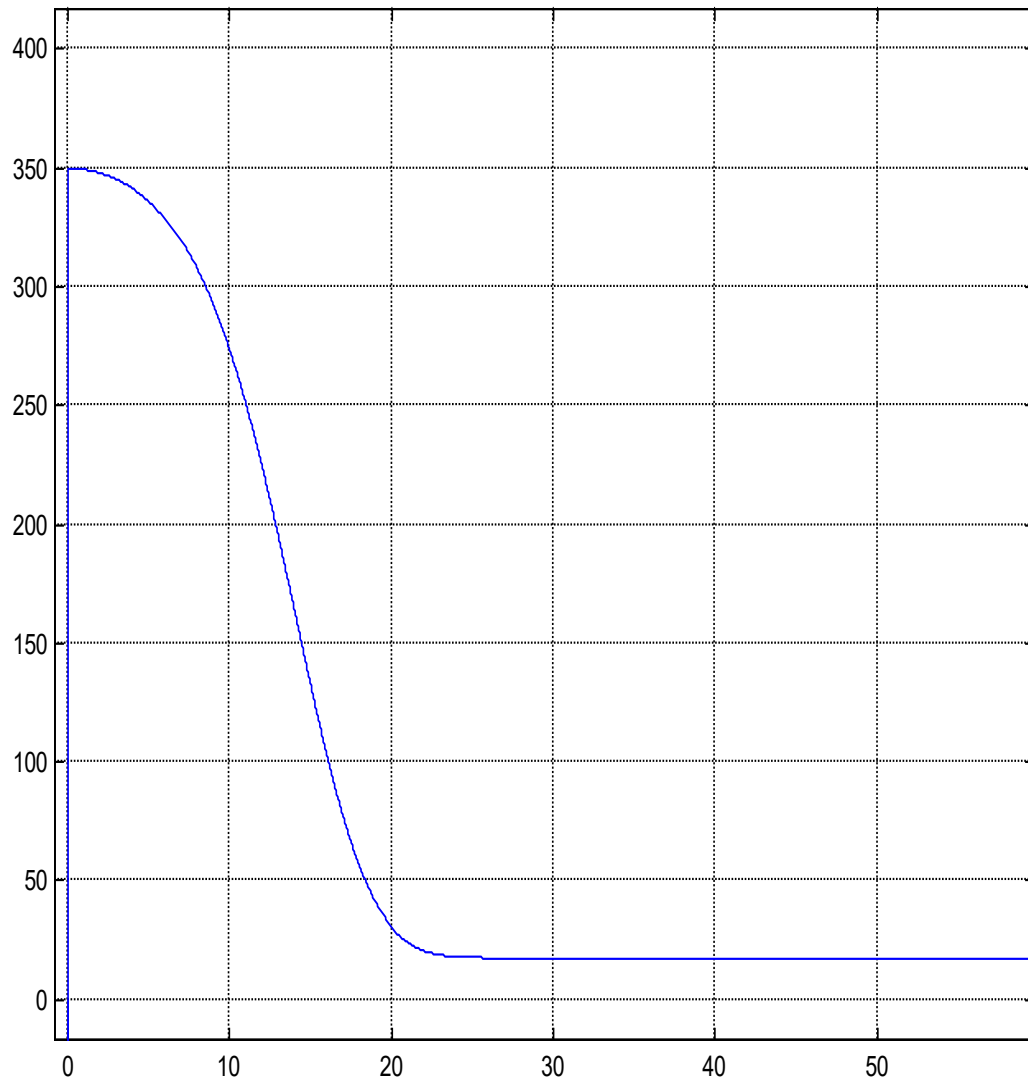


Рисунок 2.14. Зміна моменту опору на валу генератора під час його розгону

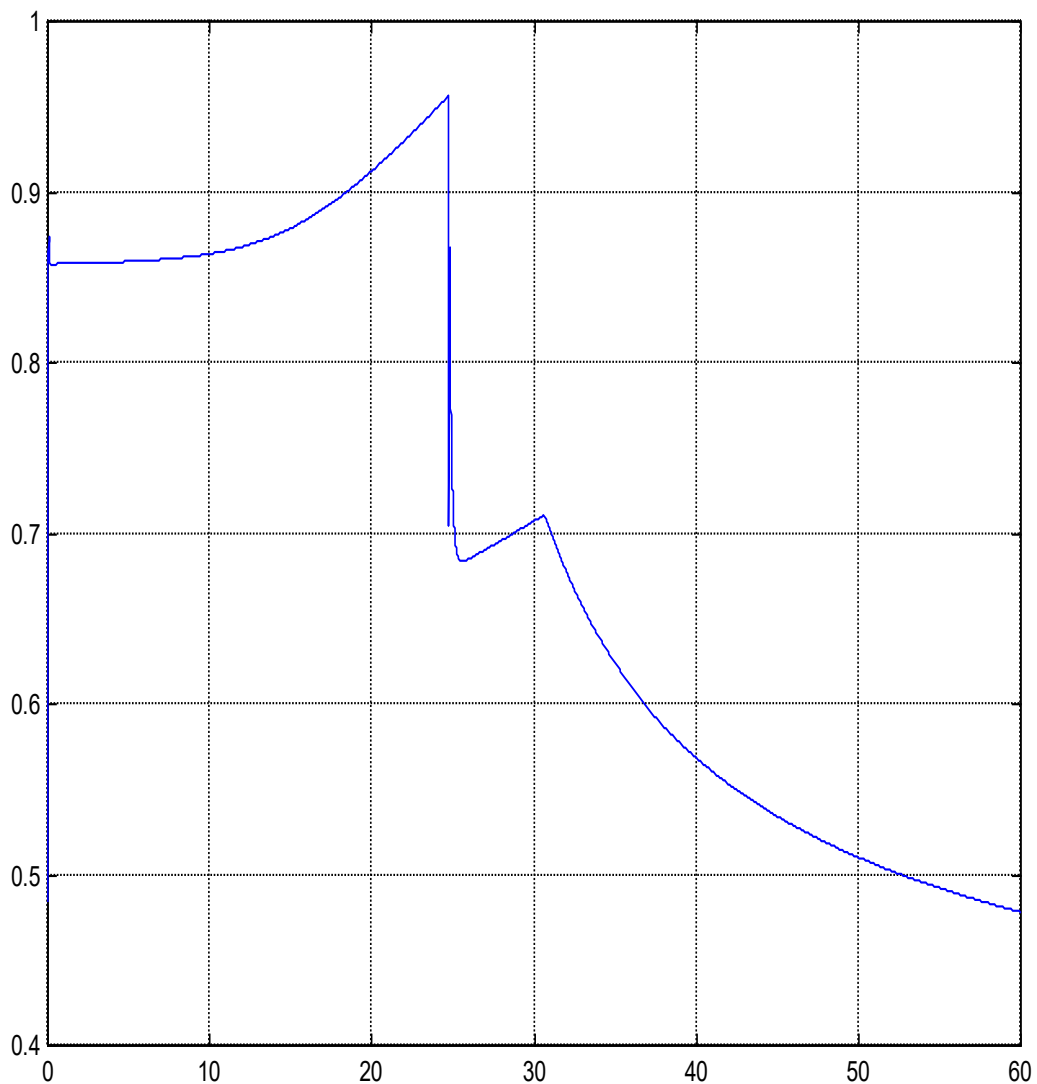


Рисунок 2.15. Зміна сумарного магнітного потоку генератора під час його розгону

## 2.9 Розробка математичної моделі для дослідження пускових режимів СД

Математичний аналіз процесів у системі пуску синхронного двигуна у випадку дуже складне завдання, обумовлена зміною електромагнітного стану двигуна у широкому діапазоні.

Нині існує низка методів вирішення завдання. Найчастіше синхронні машини моделюються з урахуванням рівнянь, записаних в осях, нерухомих щодо ротора даної машини (система  $d,q$ ). СД, що розглядається, - явнополюсна трифазна синхронна машина, нормального виконання. Обмотка якоря розміщується на статорі, основне поле створюється обмоткою збудження, розташованої на роторі. Магнітопровід машини має дві осі симетрії – поздовжню та поперечну. Ротор машини має демпферну систему.

Диференціальні рівняння синхронної машини, вперше складені Парком, описують процеси, що відбуваються у такій машині.

Врахувати всі фактори при аналізі процесів, що відбуваються в СД, можна за допомогою складних систем рівнянь, рішення та аналіз яких представляють відомі труднощі. Доцільно прийняти деякі ідеальні умови, у яких простіше розглянути процеси, які у двигуні, без істотного спотворення загальної картини явищ.

Зазначимо основні припущення, що стосуються розподілу полів та характеру процесів у машині.

1. Магнітне поле у повітряному зазорі. Тривимірне магнітне поле в повітряному зазорі сприймається як плоскопаралельне. Замінити реальне поле розрахунковим можна, виходячи з того, що ЕРС будь-якого провідника якоря та електромагнітне зусилля, що діє на провідник, визначаються лише інтегральним значенням поля вздовж провідника машини.

2. Магнітне поле обмотки збудження. Якір машини приймається гладким. Під час дослідження не враховується спотворення поля, обумовлене зубцями якоря. Крива поля вважається синусоїдальною. Магнітна вісь обмотки збудження збігається з поздовжньою віссю машини.

3. Магнітне поле статора обмотки. Магнітні осі фазних обмоток зрушені один щодо одного на  $120^\circ$ . Магнітна провідність змінюється вздовж кола статора внаслідок змінного зазору з періодом  $180^\circ$ . Полями вищих просторових гармонійних складових, обумовлених основною гармонічною силою, що намагнічує, можна знехтувати, так як вони дають невеликі потягосцеплення. У

синхронних машинах нормального виконання обмотувальні коефіцієнти ряду вищих гармонічних сил статора, що намагнічують, малі. Тому можна знехтувати асинхронними моментами, які створюють найвищі просторові гармонійні поля. Магнітне поле, створене струмами обмоток статора, розподілене в повітряному зазорі вздовж кола статора і змінюється за синусоїдальним законом з періодом, що дорівнює подвійному полюсному поділу.

4. Магнітне поле демпферних контурів. Розподіл контурів у стрижнях демпферної обмотки реальної машини має складний характер. В ідеалізованій машині розподіл струмів демпферної обмотки в повітряному зазорі приймається синусоїдальним.

5. Вплив вихрових струмів та гістерези не враховується.

6. Вплив насичення сталі також не враховується.

Дані умови, хоч і є ідеальними, не є значним відхиленням від реальності. У реальних умовах синхронний двигун працює зазвичай на згинанні характеристики холостого ходу, і насичення сталі невеликим. Спеціальна форма полюсного наконечника у явнополюсній машині робить форму поля в розточуванні статора практично синусоїдальною, тобто основної форми. Відхилення від синусоїдальної форми згідно з нормами не перевищує 5%. Фази обмотки мають рівні параметри.

Електромеханічні перехідні процеси синхронного двигуна розраховують за системою рівнянь Парку-Горьова у прямокутній жорстко пов'язаній з ротором координатній системі осей  $d, q, o$ , записаної у відносних одиницях у системі  $Xad$ .

В основу електронної моделі покладено систему з попередньо вирішеною системою рівнянь поточозчеплень :

Повна система рівнянь Парку-Горьова має вигляд:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = U_d - i_d \cdot r + \omega \cdot \psi_q; \quad (2.48)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = U_q - i_q \cdot r - \omega \cdot \psi_d; \quad (2.49)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = U_f - i_f \cdot r_f; \quad (2.50)$$

$$\frac{d\psi_{ed}}{dt} = -i_{ed} \cdot r_{ed}; \quad (2.51)$$

$$\frac{d\psi_{eq}}{dt} = -i_{eq} \cdot r_{eq}; \quad (2.52)$$

$$\Psi_d = i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{\Delta d} x_{\Delta d}; \quad (2.53)$$

$$\Psi_f = i_d x_{ad} + i_f x_f + i_{\Delta d} x_{\Delta d}; \quad (2.54)$$

$$\Psi_{\Delta d} = i_d x_{ad} + i_f x_{ad} + i_{\Delta d} x_{\Delta d}; \quad (2.55)$$

$$\Psi_q = i_q x_q + i_{\Delta q} x_{\Delta q}; \quad (2.56)$$

$$\Psi_q = i_q x_{aq} + i_{\Delta q} x_{\Delta q}; \quad (2.57)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H_j} \cdot (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d - M_c). \quad (2.58)$$

$$\text{де } H_j = \frac{J\omega_0^3}{P_0 \cdot p^2}. \quad (2.59)$$

Тут  $r_a$ ,  $r_f$ ,  $r_{ed}$ ,  $r_q$  – активні опори відповідно фази статора, обмотки збудження, демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осях;  $X_d$ ,  $X_q$  – індуктивні опори обмотки статора по поздовжній та поперечній осях;  $X_{ed}$ ,  $X_{\Delta q}$ ,  $X_f$  – індуктивні опори демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осях та обмотки збудження відповідно;  $U_d$ ,  $U_q$ ,  $U_f$  – відносні значення напруг статора та обмотки збудження;  $x_d$ ,  $x_{\Delta q}$ ,  $x_f$ ,  $x_{ed}$ ,  $x_{\Delta q}$  – відносні значення потокозчеплень відповідно статора, обмотки збудження та демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осях;  $H_j$  – Постійна інерційна ротора.

У системі рівнянь прийнятої для моделювання, введені такі позначення:

$$k_{11} = \frac{X_f X_{\Delta d} - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.60)$$

$$k_{12} = \frac{X_{ad}(X_f - X_{ad})}{D}; \quad (2.61)$$

$$k_{21} = \frac{X_{ad}(X_{\varepsilon d} - X_{ad})}{D}; \quad (2.62)$$

$$k_{22} = \frac{X_d X_{\varepsilon d} - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.63)$$

$$k_{23} = \frac{X_{ad}(X_d - X_{ad})}{D}; \quad (2.64)$$

$$k_{31} = \frac{X_{ad}(X_f - X_{ad})}{D}; \quad (2.65)$$

$$k_{32} = \frac{X_{ad}(X_d - X_{ad})}{D}; \quad (2.66)$$

$$k_{33} = \frac{X_f X_d - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.67)$$

$$k_{41} = \frac{X_{\varepsilon q}}{Q}; \quad (2.68)$$

$$k_{42} = \frac{X_{aq}}{Q}; \quad (2.69)$$

$$k_{51} = \frac{X_{aq}}{Q}; \quad (2.70)$$

$$k_{52} = \frac{X_q}{Q}; \quad (2.71)$$

$$D = X_d X_f X_{\varepsilon d} - X_{ad}^2 (X_d + X_f + X_{\varepsilon d}) + 2X_{ad}^3; \quad (2.72)$$

$$Q = X_q X_{\varepsilon q} - X_{aq}^2. \quad (2.73)$$

Використовуючи рівняння слід враховувати такі параметри, що входять до них. Для розрахунку параметрів, що входять до системи рівнянь струмів, використовуємо вирази, які впливають із схеми заміщення СД.

Індуктивний опір обмотки збудження

$$x_f = x_{cf} + x_{ad}, \quad (2.74)$$

де  $x_{cf}$  - індуктивний опір розсіювання обмотки збудження.

Індуктивний опір демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осі

$$x_{ed} = x_{ad} + x_{ced}; \quad (2.75)$$

$$x_{eq} = x_{aq} + x_{ceq}, \quad (2.76)$$

де індуктивний опір розсіювання демпферної обмотки:

$$x_{ceq} = \frac{x_{ad}(x'_q - x_c)}{x_{aq} - x'_d + x_c}; \quad (2.77)$$

$$x_{ced} = \frac{x_{ad}x_f(x'_d - x_c)}{x_{ad}(x_f - x'_d + x_c) - x_f(x'_d - x_c)}. \quad (2.78)$$

Активний опір контурів демпферної обмотки:

$$r_{ed} = 2\omega_0 T'_d \left( x_{ced} + \frac{x_{ad}x_c x_f}{x_{ad}x_c + x_{ad}x_f + x_c x_f} \right); \quad (2.79)$$

$$r_{eq} = r_{ed} \frac{2l}{5l}. \quad (2.80)$$

При проведенні досліджень виникла необхідність враховувати вплив мережі живлення. Це може бути здійснено введенням опором мережі рівняння електричного балансу статорних ланцюгів. У цьому випадку опори, що входять до рівнянь СД, будуть сумою опорів ліній і самої машини.

У даному випадку слід знати напругу на затискачах двигуна. Тоді лінію можна уявити окремими рівняннями, які в осях  $d$  і  $q$  у відносних одиницях при синхронній швидкості мають такий вигляд:

$$U_d = I - (R_p \cdot i_d - x_p \cdot i_q); \quad (2.81)$$

$$U_q = I - (R_p \cdot i_q + x_p \cdot i_d). \quad (2.82)$$

Зв'язок між струмами та напругимиу двох координатних системах виражається так:

- модуль зображуючого вектора напруги

$$U^2 = (U_q)^2 + (U_d)^2; \quad (2.83)$$

- модуль зображуючого вектора струму

$$I_2 = (I_q)^2 + (I_d)^2; \quad (2.84)$$

- активна потужність

$$P = U_d I_d + U_q I_q; \quad (2.85)$$

- Реактивна потужність

$$Q = -U_d I_q + U_q I_d \quad (2.86)$$

## 2.10 Дослідження режимів прямого асинхронного запуску

Для дослідження пускових режимів згідно з наведеними вище виразами та розрахунками розроблено програм мовою PASCAL. Використання програмної розробки пояснюється тим, що всі математичні пакети не забезпечують всіх логічних зв'язків та умов, які мають місце під час моделювання СД. Програму розрахунку динамічних режимів наведено у додатку А.

За допомогою розробленої програми виконані розрахунки прямого асинхронного пуску СД екскаватора ЕШ 10/70 без урахування лінії живлення та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

Розрахунки режимних параметрів при прямому асинхронному пуску СД без урахування лінії живлення (припускаємо, що система електропостачання нескінченної потужності) та з урахуванням наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 Результати розрахунку параметрів прямого асинхронного запуску СД

Параметри СД під час пуску	Прямий асинхронний пуск	
	без лінії	з лінією
Час розгону, з	2.5	16
Кратність пускового моменту, о.	2.7	0.48
Кратність струму статора, о.	6.4	1.9
Кратність струму демпферної обмотки, о.	4.7	1.6
Напруга на статорі, о.	1.0	0.45

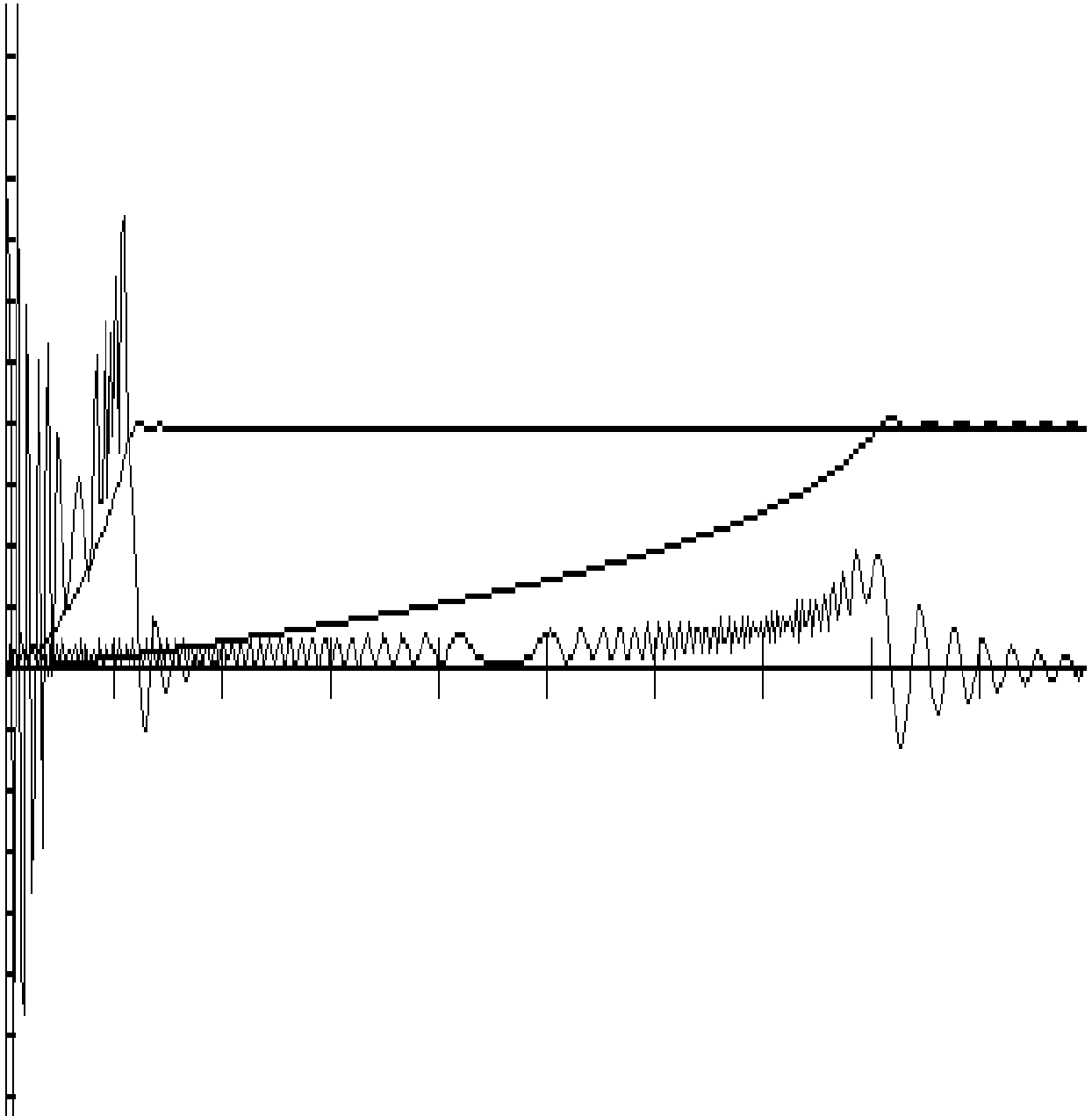


Рисунок 2.16. Залежність швидкості та електромагнітного моменту СД при пуску без живильної лінії та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

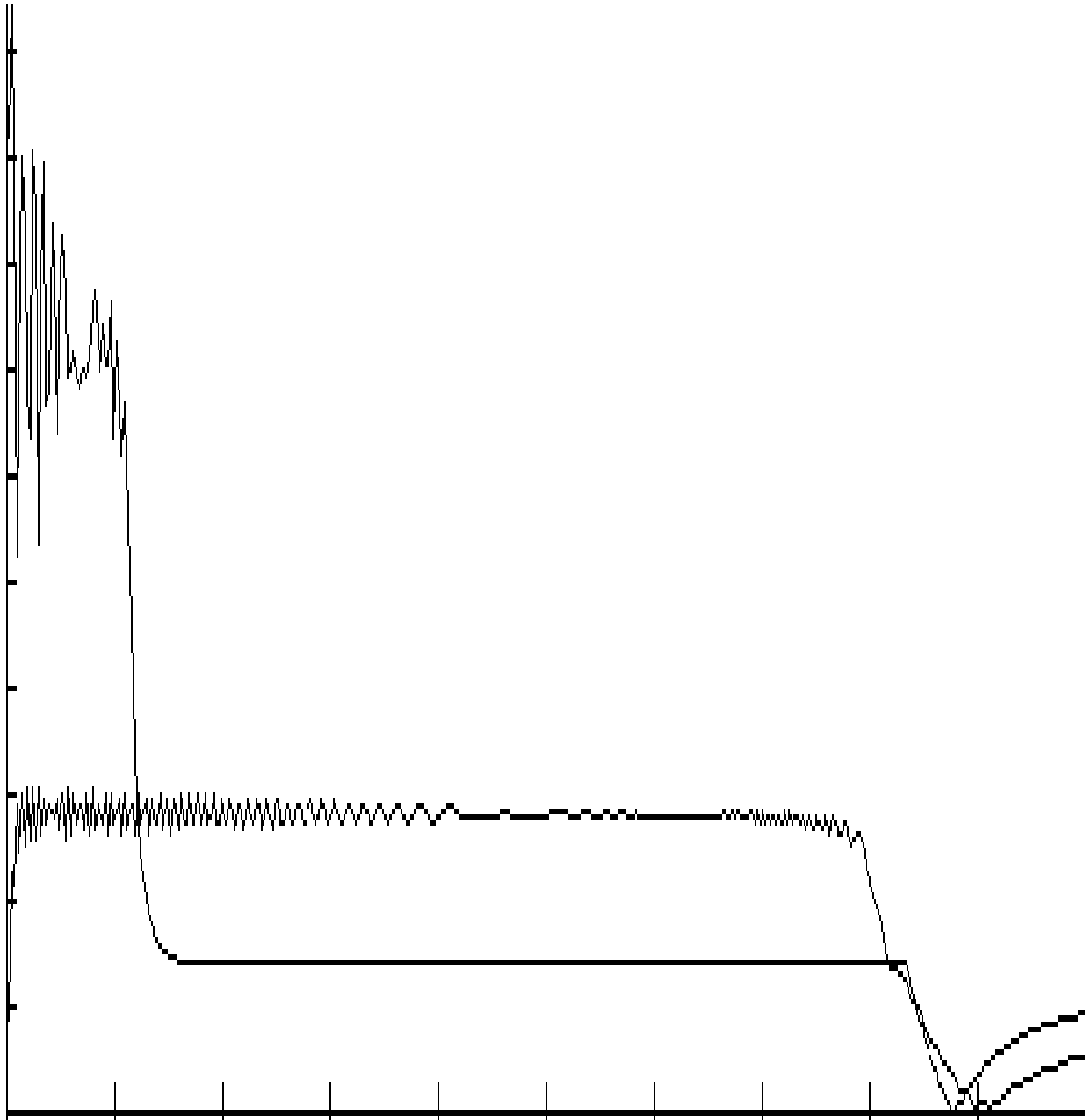


Рисунок 2.17 Залежності модуля зображуючого вектора струму статора СД при прямому асинхронному пуску без лінії живлення і з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

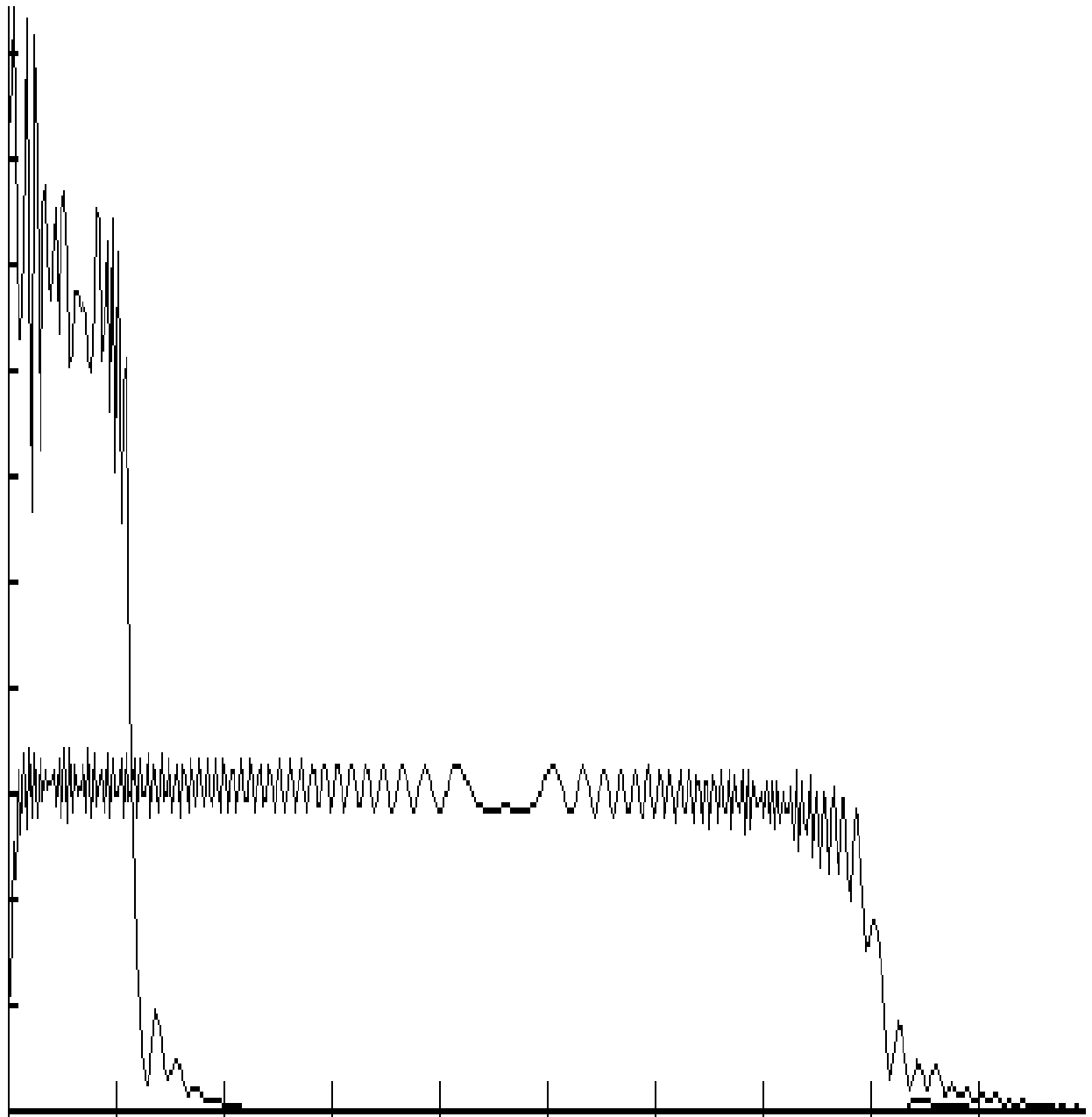


Рисунок 2.18 Залежності модуля зображуючого вектора струму ротора СД при прямому асинхронному пуску без лінії живлення та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

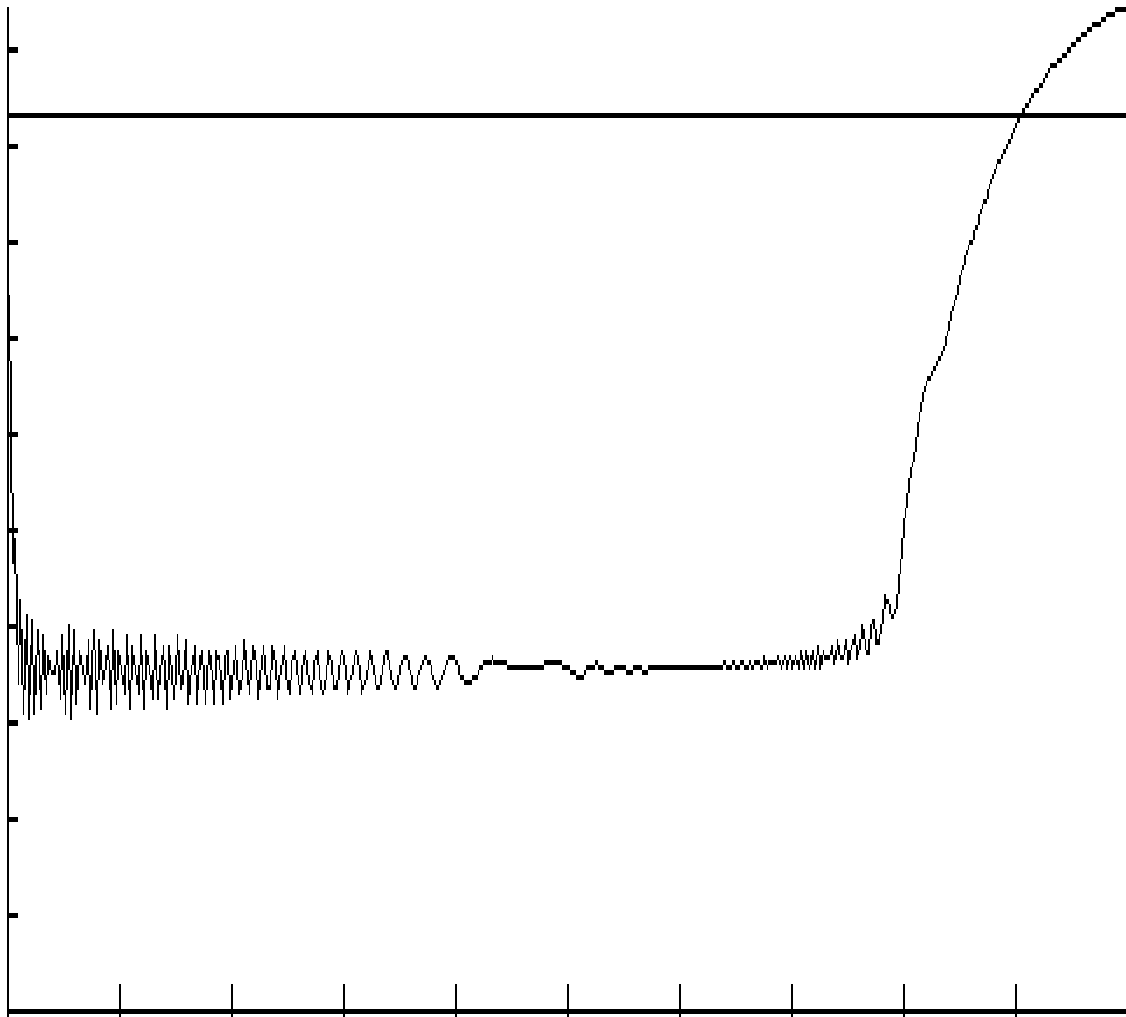


Рисунок 2.19. Залежності модуля зображуючого вектора напруги на статорі СД при прямому асинхронному пуску без лінії живлення і з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

### 2.11 Дослідження режимів полегшеного запуску СД

Другий, безпосередній етап пуску СД від систем непрямого пуску починається з моменту, коли двигун обертається з частотою, близькою до синхронної. Підключення СД до мережі можна здійснити двома методами: самосинхронізації та точної синхронізації.

Включення СД методом самосинхронізації здійснюється подачею напруги на обмотку статора при частоті обертання, близької до синхронної, і після перехідних процесів - подачею струму збудження. При підключенні до мережі

цим методом ковзання, при якому здійснюється включення, зазвичай ставлять у залежність від прискорення машини, що включається: чим більше прискорення, тим при більшому позитивному ковзанні можна проводити включення. У цьому час перехідних процесів трохи більше 1,2 з.

Використовуючи системи управління пуском генератора постійного струму, що розкручує СД, можна отримувати скільки завгодно довго практично синхронну частоту обертання СД. Однак і в цьому випадку неможливо уникнути струму включення, що досягає приблизно таких величин, що і при прямому асинхронному пуску.

Схема заміщення СД із ротором (рисунок 2.19. а), замкнутим на розрядний опір, еквівалентна схемі заміщення силового трансформатора (рисунок 2.20. б).

У перший момент еквівалентний індуктивний опір машини має найменше значення та визначається значенням надперехідного реактивного опору  $x_d''$  (опір гілки намагнічування  $x_\mu$  мало). З часом зменшуються вільні струми і відповідно зменшується їхня дію, що розмагнічує; значення  $x_\mu$  схеми заміщення зростає. Еквівалентний опір двигуна зростає.

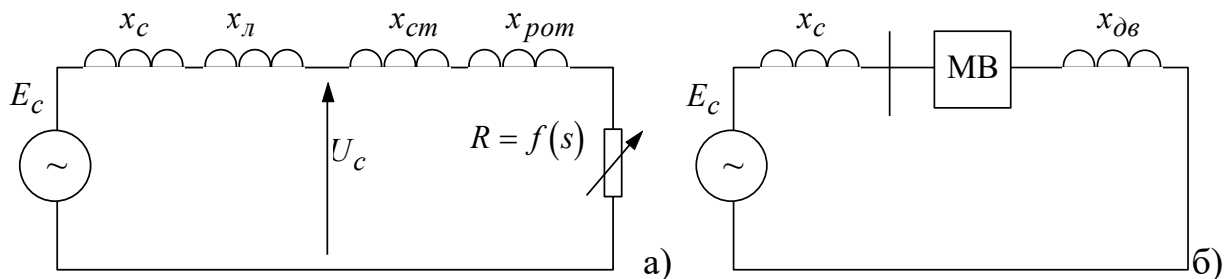


Рисунок 2.20 Схема заміщення СД із ротором замкнутим на розрядний опір – а), еквівалентна схемі заміщення силового трансформатора - б)

Після згасання вільного струму в демпферній обмотці еквівалентний індуктивний опір двигуна оцінюється приблизно перехідним індуктивним опором по поздовжній осі  $x_d'$ .

На рисунках 2.21-2.25 подано результати моделювання режимних параметрів мережі при самосинхронізації незбудженого СД з мережею.

Як видно, вільний струм обмотки статора, викликаний ним аперіодичний струм у контурах ротора і вільний струм в демпферній обмотці згасають приблизно через 0,04-0,06 с, так що найбільше значення струму статора при включенні під напругу мережі  $U_c$  незбудженого СД може визначатися виразом

$$I_{вкл} = \frac{U_c}{x'_d + x_c} \quad (2.87)$$

Пуск двигуна методом самосинхронізації як і прямий пуск супроводжується зниженням напруги на затискачах статора і в мережі:

$$U_{ш} = U_c - I_{вкл} x_c \quad (2.88)$$

З наведених вище рівнянь отримаємо

$$U_{ш} = U_c \left( 1 - \frac{x_c}{x_{\partial в} + x_c} \right) \quad (2.89)$$

де  $x_{\partial в}$  - Індуктивний опір двигуна.

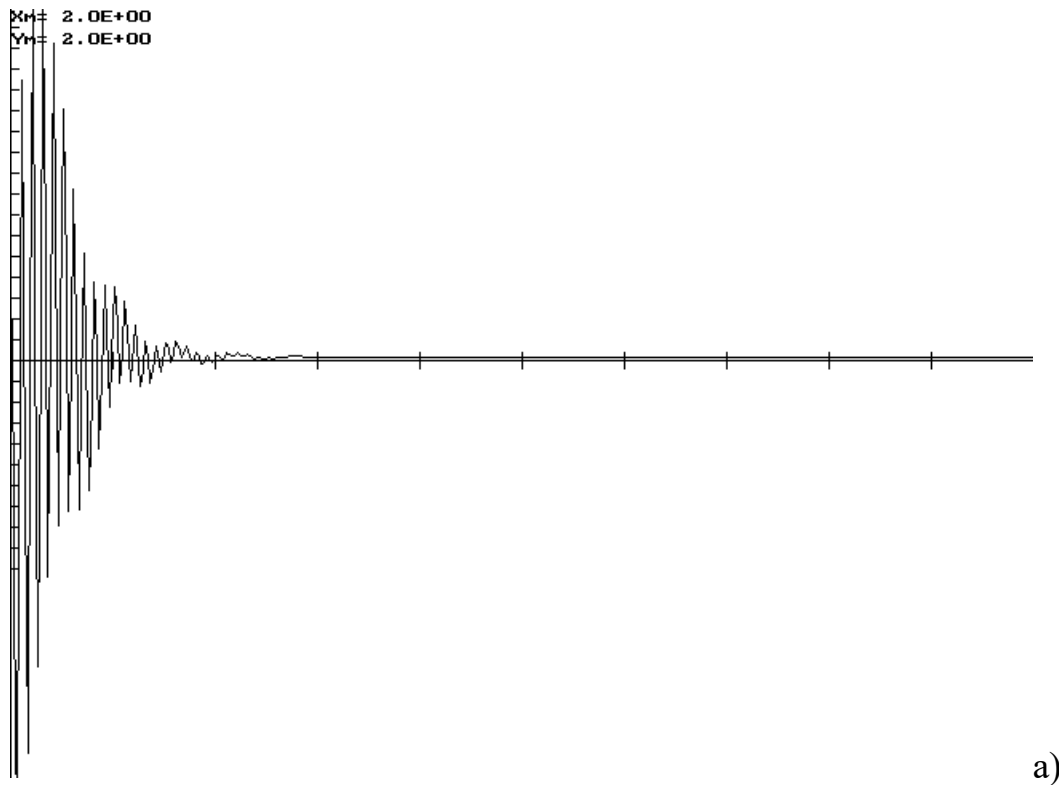
У міру втягування у синхронізм напруга відновлюється. Як очевидно з машинограм, у міру згасання пускового струму напруга відновлюється через 0,1с.

За допомогою розробленої програми виконані розрахунки полегшеного пуску СД екскаватора ЕШ 10/70 без урахування лінії живлення та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

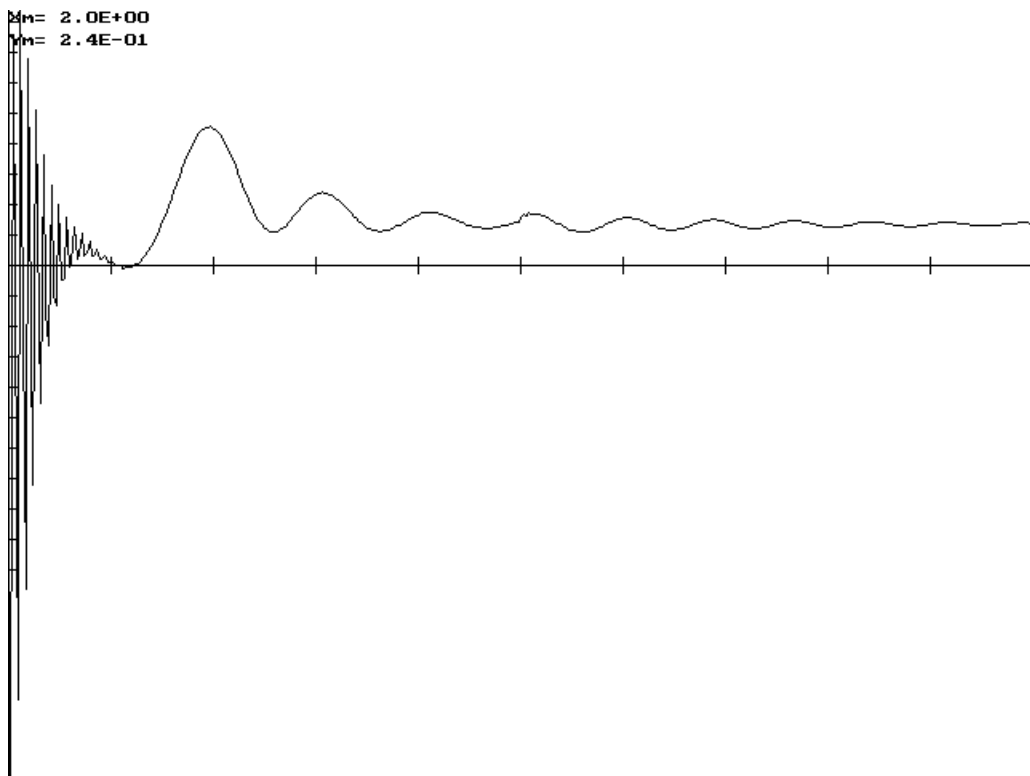
Розрахунки режимних параметрів при прямому асинхронному пуску СД без урахування лінії живлення (припускаємо, що система електропостачання нескінченної потужності) і з урахуванням наведені в таблиці.

Таблиця 2.9 Результати розрахунку параметрів полегшеного запуску СД

Параметри СД під час пуску	Полегшений запуск	
	без лінії	з лінією
Час самосинхронізації, з	0.2	0.1
Кратність пускового моменту, о.	2.0	0.24
Кратність струму статора, о.	7.8	2.8
Кратність струму демпферної обмотки, о.	6.1	2.2
Напруга на статорі, о.	1.0	0.5



a)



б)

Рисунок 2.21 Залежність електромагнітного моменту СД при пуску без живильної лінії та з урахуванням лінії АС завдовжки 5 км.

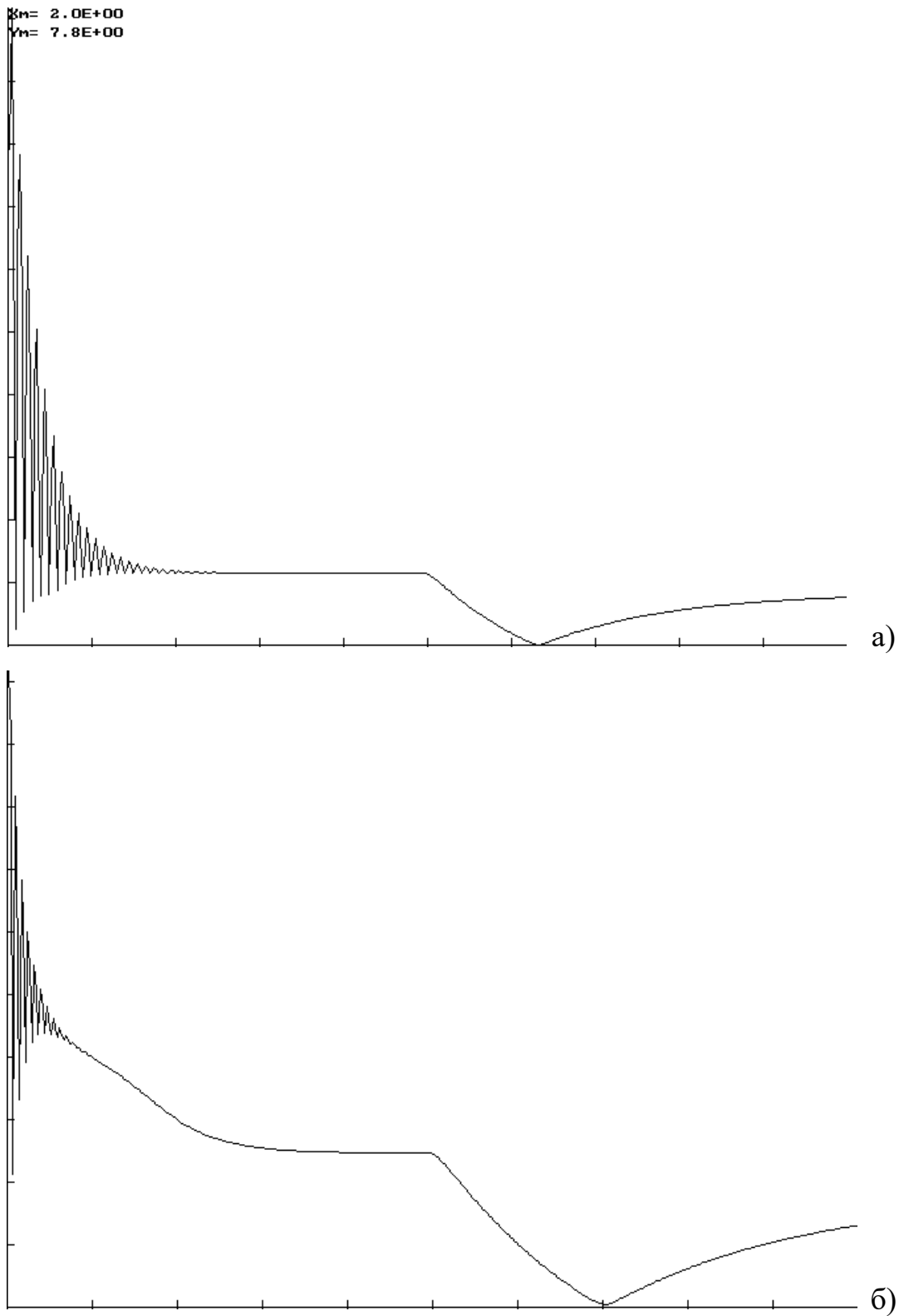


Рисунок 2.22 Залежності модуля зображуючого вектора струму статора СД при прямому полегшеному пуску без лінії живлення а) і з урахуванням лінії АС довжиною 5 км б).

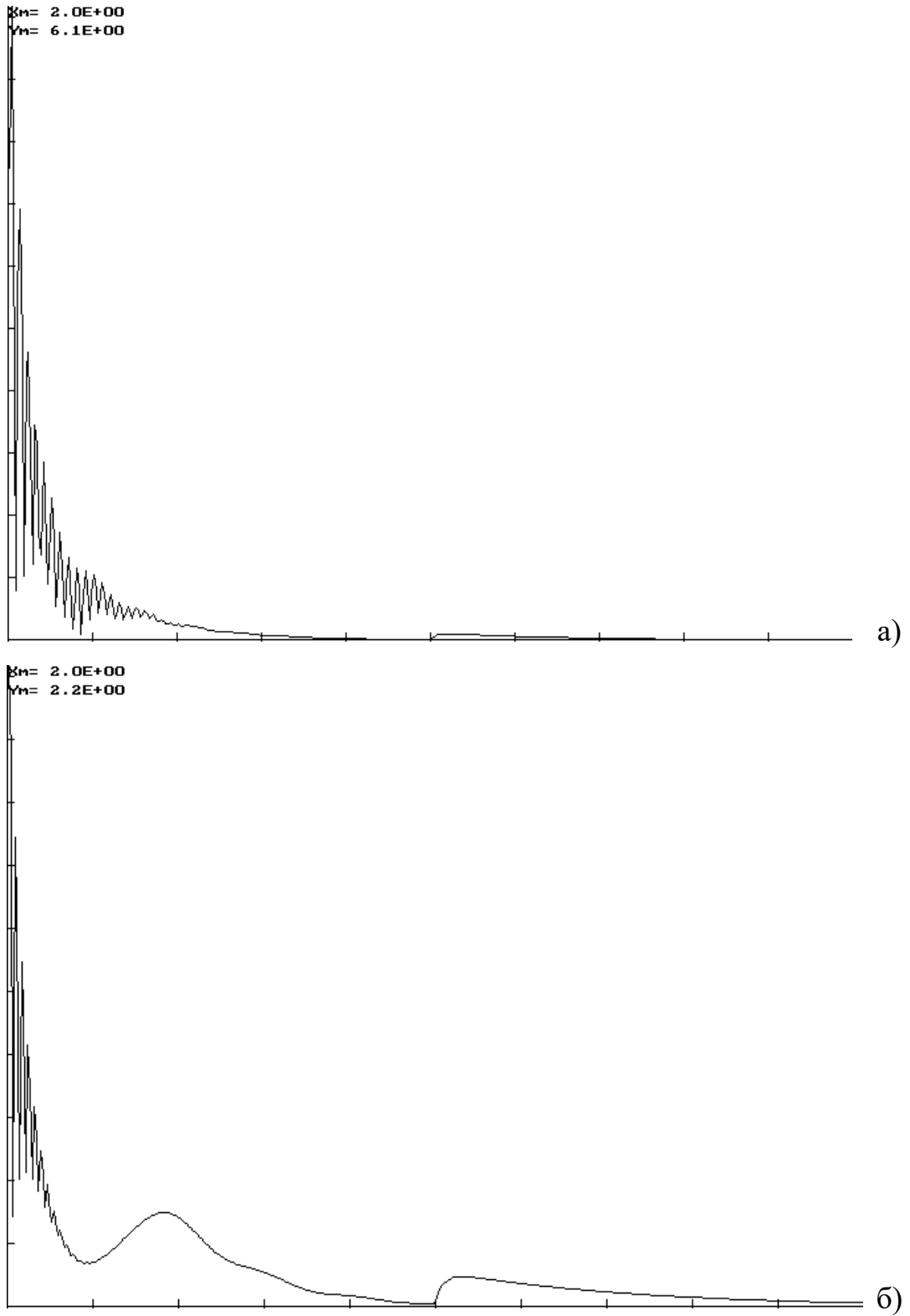


Рисунок 2.23 Залежності модуля зображуючого вектора струму ротора СД при прямому полегшеному пуску без лінії живлення а) і з урахуванням лінії АС довжиною 5 км б).

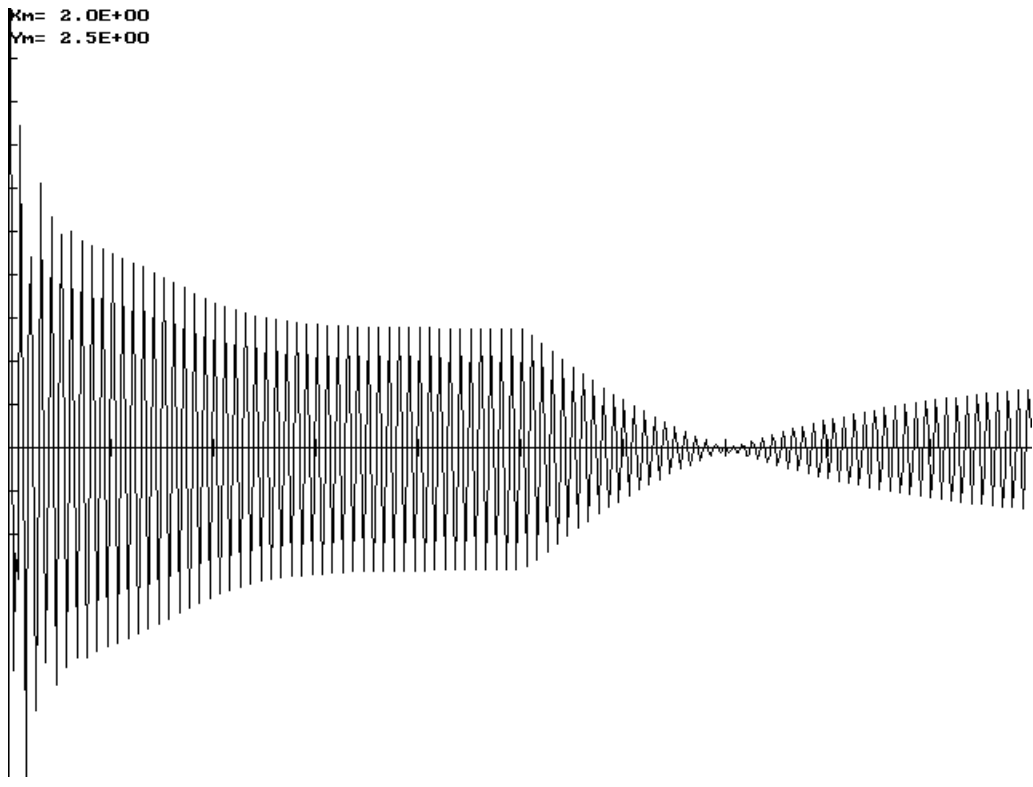
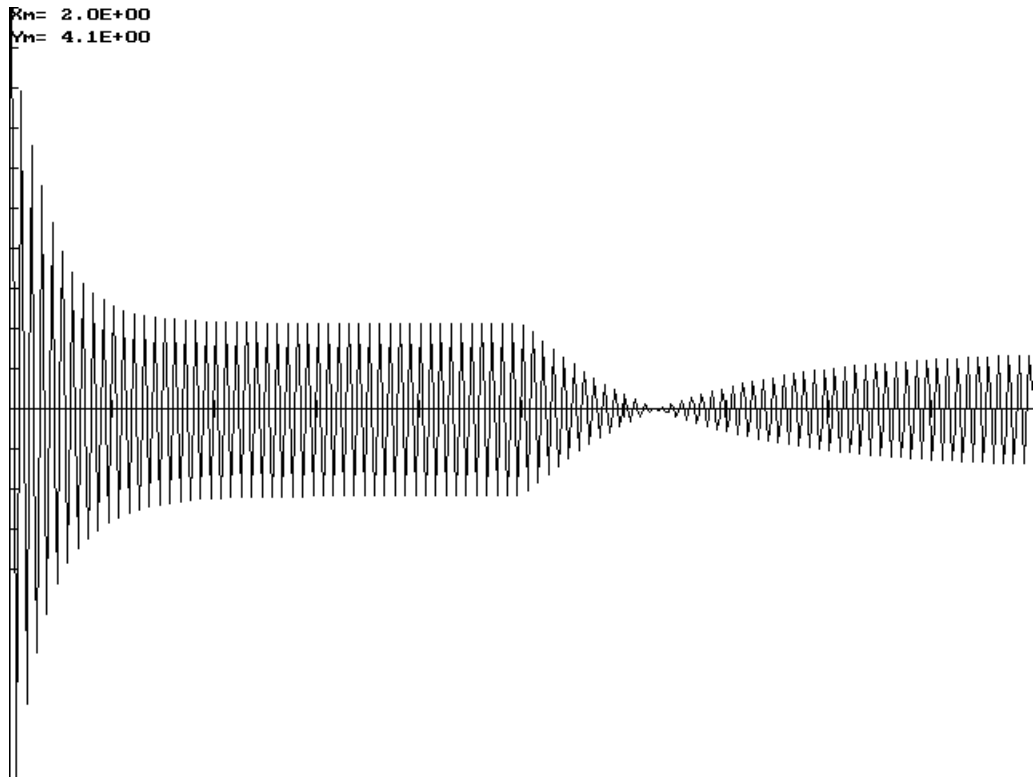


Рисунок 2.24. Залежності струму фази статора СД при полегшеному пуску без лінії живлення а) і з урахуванням лінії АС довжиною 5 км б).

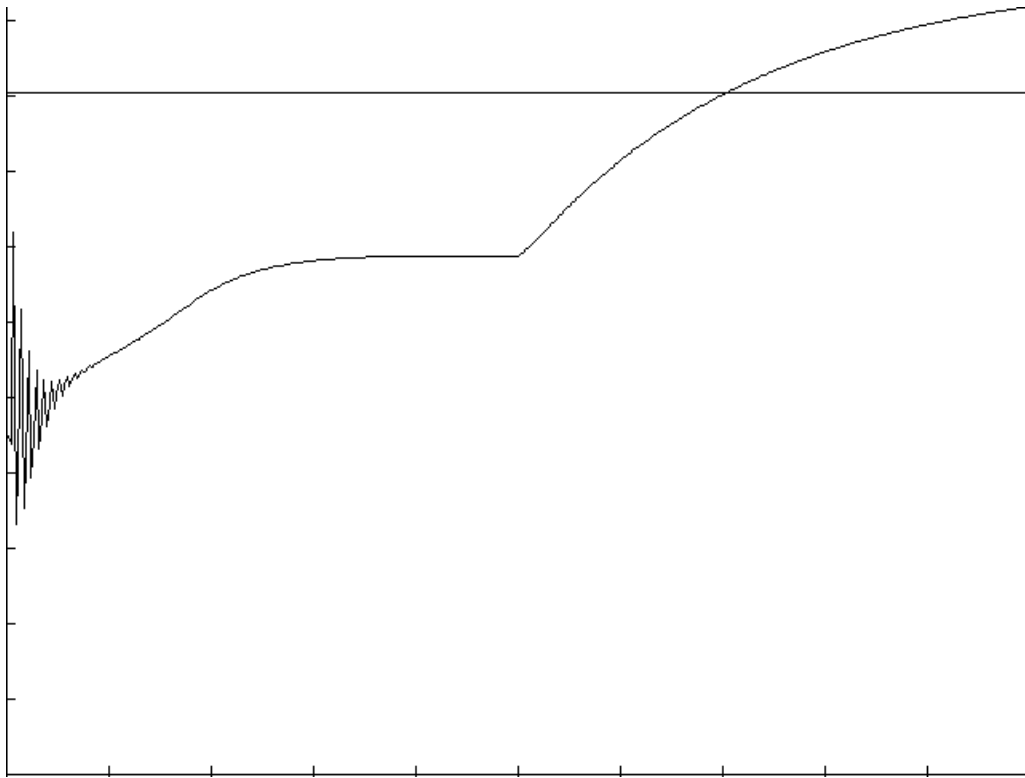


Рисунок 2.25 Залежності модуля зображуючого вектора напруги на статорі СД при полегшеному пуску без живильної лінії та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

## 2.12 Розробка схеми силової частини

### 1. Призначення.

Система побічного запуску (СКЗ) призначена для запуску та подальшого збудження приводного СД кар'єрного екскаватора ЕШ 10.70.

Робота СКЗ складається з наступних етапів:

1. Розгін невідключеного до мережі та незбудженого СД головного перетворювального агрегату екскаватора до підсинхронної (синхронної) швидкості за допомогою допоміжного розгінного двигуна (ВРД), як використовується генератор напору і ходу агрегату.
2. Самосинхронізація СД із мережею.
3. Перехід на живлення ОЗ СД.

## 2. Склад СКЗ.

До складу СКЗ входять:

- тиристорний перетворювач для живлення якірного ланцюга.
- вентильний перетворювач для живлення обмотки збудження
- релейно-контакторна система (РКС), призначена для управління процесом розгону, синхронізації та збудження, а також для захисту від аварійних струмів, пусків, що затягнулися, та інших ненормальних ситуацій
  - гасячі резистори  $R_0$  і  $R_{доб}$ , що забезпечують два ступені пуску - при номінальному та ослабленому значеннях потоку збудження
  - блокживлення та синхронізації (БПС), призначений для перетворення вхідної напруги 380 V в ряд постійних напруг, необхідних для живлення електронної частини СКЗ, а також для перетворення трифазної вхідної системи напруги живлення в шестифазну систему вихідних напруг, призначену для завдання каналам ЯФУ точок початку відліку кутів
  - вузол струмообмеження (УТО), призначений для обмеження в перехідних та аварійних режимах струму якоря на 1.5-2-кратному рівні від номінального
  - осередки фазового управління (ЯФУ), призначені для формування керуючих імпульсів на відкриття тиристорів та їх зсуву щодо точки природного відмикання функції напруги управління  $U_u$
  - блокімпульсних трансформаторів (БІТ) – призначений для передачі імпульсів відмикання з виходів ЯФУ на керуючі електроди тиристорів, одночасно здійснюючи гальванічну розв'язку силових ланцюгів ТП з електронною частиною СКЗ
  - блокгальванічної розв'язки (БГР-01) стандартний вузол, призначений для передачі та посилення вимірювального сигналу з датчика струму - шунта, включеного в якірний ланцюг ВРД, а також для гальванічної розв'язки якірного ланцюга з електронною частиною СКЗ

- БПН-01 -штатний блок живлення вузла БГР-01, що перетворює вхідну напругу +24 V в систему вихідної напруги  $\pm 15$  V. Використовується також для живлення УТО та організації керуючих напруг ( $U_y$ ).

### 3. Технічні дані.

Таблиця 2.10 Технічні дані системи полегшеного запуску

Номінальна вихідна активна потужність СКЗ - найбільше, кВт	330
Номінальна вхідна напруга,	380
Діапазон зміни вихідної напруги, - на обмотці якоря - на обмотці збудження генератора	0÷460
у форсованому режимі	260
в ослабленому режимі	170
Номінальний вихідний струм СКЗ	0
- при живленні силового ланцюга якоря генератора, А	500
- при форсованому живленні ВР якоря генератора, А	6
- при ослабленні потоку в ВВ якоря генератора, А	3
Максимальний час розгону не більше, з	60

### 4. Підключення СКЗ.

Силова частина СКЗ підключається до 3-фазної мережі через автоматичний вимикач Q1 силовим кабелем перерізом щонайменше 95 мм<sup>2</sup>.

Якірний ланцюг ВРД підключається до шин постійного струму 301, 302 силовим кабелем перерізом не менше ніж 120 мм<sup>2</sup>.

Ланцюг збудження ВРД підключається до шин постійного струму 301, кабелем 310 перетином не менше 1.5 мм<sup>2</sup> на клемник X1.



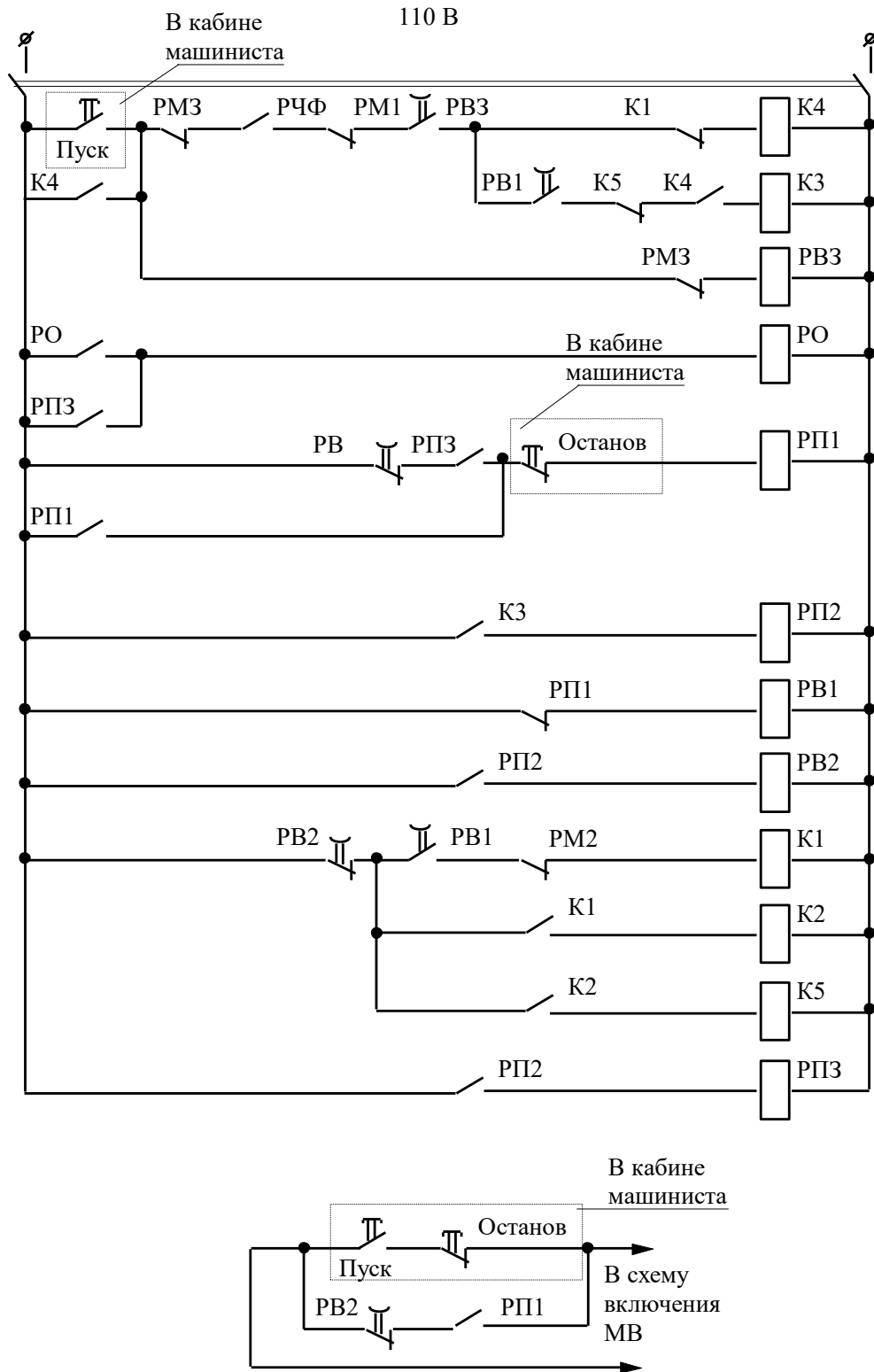


Рисунок 2.27. Принципова схема релейно-контакторної схеми системи полегшеного запуску СД

## Розробка системи управління

При описі системи управління прийняті такі умовні позначення та скорочення:

- СОЗ - системанепрямого запуску.
- ТП - тиристорний перетворювач.
- ВП - вентильний перетворювач.
- ВРД - допоміжний розгінний двигун.
- ОЗ СД - обмотка збудження СД
- ОЗ ВРД - обмотка збудження ВРД
- БПС - блок живлення та синхронізації.
- БІТ - блок імпульсних трансформатив.
- ЯФУ - осередок фазового управління.
- СІФУ - систем імпульсно-фазового управління.
- БГР - блок гальванічної розв'язки.
- БП - блок живлення БГР.
- VD - діод.
- РЧФ - релечергування фаз.
- Т - трансформатор.
- РМ - максимальне реле.
- РВ - релечасу.
- РВ - реле ослаблення поля.
- РП - реле проміжний.
- РН - реле напруги.
- ДП - датчик струму.
- До - контактор.
- УФІ - підсилювач-формував імпульсів.
- РКС - релейно-контакторна схема.

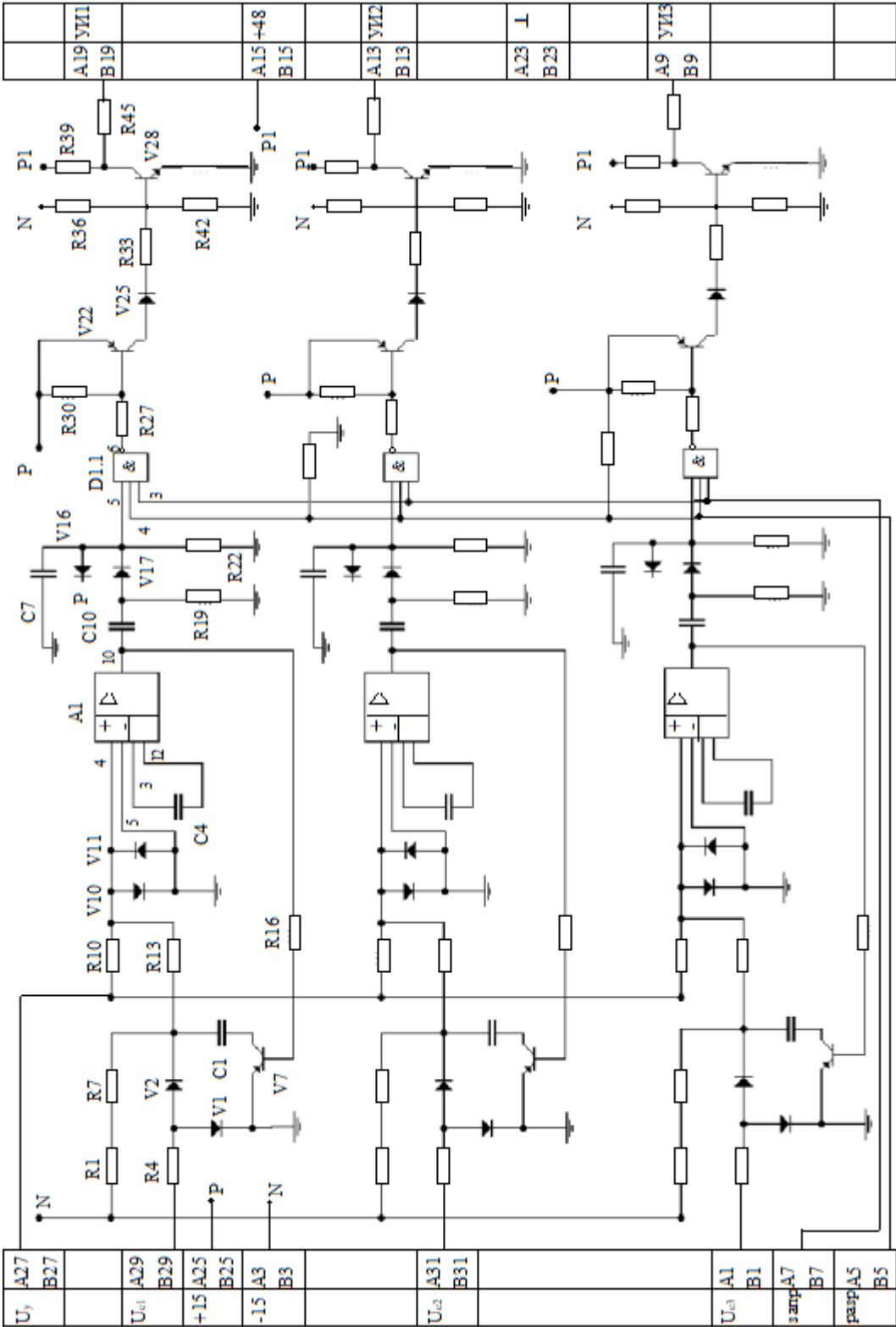


Рисунок 2.28 Принципова схема СІФУ

Склад СОЗ

До складу СОЗ входять:

тиристорний перетворювач для живлення якірного ланцюга ВРД (надалі далі ТП)

-вентильний перетворювач для живлення обмотки збудження ВРД (названий надалі ВП)

- Релейно-контакторна система (РКС), призначена для управління процесом розгону, синхронізації та збудження, а також для захисту від аварійних струмів, пусків, що затягнулися, та інших ненормальних ситуацій

-гасячі резистори  $R_0$  і  $R_{доб}$ , що забезпечують два ступені пуску ВРД - при номінальному та ослабленому значеннях потоку збудження

- блокживлення та синхронізації (БПС), призначений для перетворення вхідної напруги 380 V в ряд постійних напруг, необхідних для живлення електронної частини СОЗ, а також для перетворення трифазної вхідної системи живлячої напруги в шестифазну систему вихідної напруги, призначену для завдання каналів ЯФУ точок початку відліку кутів відпір

-вузол струмообмеження (УТО), призначений для обмеження в перехідних та аварійних режимах струму якоря ВРД на 1.5-2-кратному рівні від номінального

-осередки фазового управління (ЯФУ), призначені для формування керуючих імпульсів на відкриття тиристорів та їх зсуву щодо точки природного відмикання функції напруги управління  $U_y$

- блокімпульсних трансформаторів (БІТ) – призначений для передачі імпульсів відмикання з виходів ЯФУ на керуючі електроди тиристорів, одночасно здійснюючи гальванічну розв'язку силових ланцюгів ТП з електронною частиною СОЗ

- блокгальванічної розв'язки (БГР-01) стандартний вузол, призначений для передачі та посилення вимірювального сигналу з датчика струму - шунта, включеного в якірний ланцюг ВРД, а також для гальванічної розв'язки якірного ланцюга з електронною частиною СОЗ

- БПН-01 -штатний блок живлення вузла БГР-01, що перетворює вхідну напругу +24 V в систему вихідної напруги  $\pm 15$  V. Використовується також для живлення УТО та організації керуючих напруг ( $U_y$ ).

### Пристрій та опис роботи РКС

Перед початком роботи РКС перебуває у наступному вихідному стані: збуджені реле часу РВ, РВ1, чиї контакти готують ланцюги живлення котушки контактора КК3 і блокує ланцюг живлення проміжного реле РП1, і навіть масляного вимикача МВ, решта реле і контактори знеструмлені.

При натисканні кнопки "Пуск" і правильному чергуванні фаз напруги живлення, підключеного до СОЗ (дозволяється замкнутим контактом РЧФ в ланцюзі живлення К4) під живлення стає котушка К4, що підключає силовими контактами до мережі 380 V перетворювачі ТП і ВП і своїми блок-контактами активується реле РВ3. Два полюси контактора КК3 і один блок-контакт приєднують ланцюга ВРД до ТП і ВП, а інший блок-контакт через проміжне реле РП2 підключає РН до виходу ТП і вмикає вхід СІФУ до виходу УТО, а також напруга завдання СІФУ до прямого входу мікросхеми D1. Починається запуск. Через наявність інтегруючого конденсатора С2 в ланцюгу прямого входу мікросхеми D1 сигнал управління ТП наростає плавно, що пов'язано з необхідністю обмеження темпу наростання струму в ланцюгу якоря ВРД, так як в іншому випадку, при темпі наростання струму, обмеженої тільки електромагнітної постійної часу якорного ланцюга ВРД, напруга керування СІФУ.

Та й, крім того, виключається можливість помилкового спрацьовування реле РН. Таким чином, струм якоря ВРД наростає до тих пір, поки зростаюче падіння напруги на шунті, посилюється блоком БГР-01, не досягне напруги пробною стабілітрона VD, після чого в подальшому зростаючий сигнал зворотного зв'язку, що надходить з цього стабілітрона на інверсний вхід D1 УТО зменшує вихідний сигнал D1. Вихідна напруга  $U_{тп}$  також знижується. Процес зниження цієї напруги закінчиться при досягненні струмом ВРД 1.5-2-кратного значення номінального струму.

ВРД, розкручуючи, генерує зростаючу проти ЕДС обмоток якоря, спрямовану зустрічно напрузі ТП. Це призводить до зниження струму якоря ВРД, проте зворотний зв'язок струму, відстежуючи процес падіння струму,

своєчасно збільшує сигнал управління СІФУ, а значить, і ТП, підтримуючи струм якоря ВРД на заданому рівні. Таким чином, при підтримці струму якоря на деякому рівні напруга ТП зростає відповідно до зростання швидкості ВРД, що розкручується. При досягненні ТП порогового значення напруги спрацьовування реле напруги РН відбувається перемикання на другий рівень розгону з ослабленим потоком ВРД. Необхідність цього пов'язана з тим, що максимальна напруга ТП менша за номінальну напругу ВРД, так що при номінальному потоці збудження ВРД в кінці першого ступеня розгону обертається зі швидкістю, далекою від синхронної.

Перемикання на другий щабель відбувається так. При спрацьовуванні РН воно через контакти проміжного реле РПЗ включає реле ослаблення поля РВ (яке ставиться на самопідхоплення і шунтує резистор  $R_0$  ланцюга збудження ВРД), обриває ланцюг живлення реле часу РВ, почавши відлік витримки часу на включення РП1. Однак, поки закінчується час витримки, через ослаблення потоку ВРД струм якоря ВРД знову досягає граничних значень, заново через контур зворотного зв'язку знижуючи сигнал управління ТП, через зниження  $U_{TP}$  реле РН відпускає, повертаючи всі свої контакти в колишнє положення. Реле РП1 не ввімкнеться. Другий ступінь пуску триває аналогічно першій, з тією ж конфігурацією РКС (за винятком РВ на самопідхоплення). В кінці другого ступеня пуску, при вторинному спрацьовуванні РН воно знову готує ланцюг живлення РП1, і після часу витримки часу знеструмленого реле РВ його контакт замкне ланцюг живлення РП1, і РП1 стане на самопідхоплення. Його контактами УТО відключається від СІФУ, знеструмлюється реле часу РВ1, готуються ланцюги живлення контакторів збудливої групи К1, К2, К5, ланцюг живлення приводу масляного вимикача, і готує ланцюг подачі керуючого сигналу збудження на СІФУ. Після закінчення витримки часу реле РВ1, необхідної для спадання керуючих імпульсів з ТП, знеструмлюється К3, що від'єднує ланцюга ВРД від ТП і ВП, а також через контакти проміжного реле РП2 відключає РН від ТП, УТО від СІФУ, живлення РВ2. У той самий момент іншим контактом РВ1 буде включений привід МВ, при спрацьовуванні якого СД перейде в режим

асинхронного ходу, з метою доведення швидкості СД до підсинхронної. Після закінчення витримки часу знеструмленого РВ2, необхідної заспокоєння перехідних процесів доведення швидкості режимом асинхронного ходу, його контакт підключить котушку К1, контакт К1 - котушку К2, контакт К2 - котушку К5.

При цьому спочатку до мережі 380 V підключиться первинна обмотка силового трансформатора збудження опору  $R_{говсд}$  і СІФУ підключається напруга завдання збудження.

Подальша робота СОЗ проходить як збудник СД.

При необхідності відключення агрегату натискається кнопка "С", що знімає РП1 з самопідхоплення. Контакти РП1 обривають живлення приводу МВ (відключаючи СД від мережі), подачу сигналу завдання збудження на СІФУ (знімаючи з ТП імпульси керуючі), обриваючи живлення котушки реле РВ1. Після закінчення витримки часу, необхідної для спадання струму в ОВ СД, контакт РВ1 в ланцюзі котушки К1 відпадає, послідовно відключаючи контактори К1, К2, К5. Роботу закінчено. Схема у вихідному стані.

Якщо процес синхронізації СД через будь-які причини ненормально затягується, то після закінчення часу витримки реле РВ3 його контакт в ланцюзі живлення КК4 відпадає, і подальша робота припиниться.

Якщо ж через відмову УТО або з інших причин струм якоря ВРД досягне неприпустимих значень, спрацює максимально струмове реле РМ1, обриваючи ланцюг живлення контактора К4.

Те саме саме в ланцюзі збудження СД призведе до спрацьовування реле РМ2, контакт якого відключить збудливу групу контакторів К1, К2, К5.

У разі виникнення зовнішнього короткого замикання у ВП контакт реле РМ3 обриває ланцюг живлення К4, припиняючи подальшу роботу.

Для захисту ТП від зовнішніх та внутрішніх коротких замикань, особливо небезпечних для цього виду приладів, призначені спеціальні швидкодіючі запобіжники.

## Влаштування та опис роботи СІФУ

СІФУ складається з двох осередків фазового управління. Розглянемо роботу одного каналу, верхнього за схемою. У вихідному стані під дією  $U_y$  позитивної полярності на вході підсилювача D1, що працює в режимі компаратора, встановлено негативну напругу, якою відкривається транзистор V7. Враховуючи незначне падіння напруги на діодах V1 і V2, верхня обкладка (за схемою) конденсатора C1 знаходиться під потенціалом землі, і через C1, V7 струм не проходить. У момент переходу синхронізуючої напруги через нуль (від "+" до "-") закриваються діоди V1, V2 і під дією негативної напруги -15 V починає заряд конденсатора C1 ланцюга R1-R7-C1-V7-0. Як тільки потенціал верхньої обкладки конденсатора C1 через резистор R13 перевищує значення потенціалу напруги, що управляє через R10, на виході D1 змінюється полярність напруги від "-" до "+". Транзистор V7 закривається та на вхідній обкладці C1 сигнал збільшується негативна напруга. Завдяки тригерному ефекту досягається стійкість роботи формувача імпульсів.

Конденсатор C1 розряджається при відкритті транзистора V7 у позитивному напівперіоді  $U_{\text{синхр}}$  через пряму провідність колекторного переходу. Сигнал з виходу D1 диференціюється ланцюжком C10-R19 та імпульси негативного знака відсікаються діодом V17. Імпульси позитивної полярності подаються на вхід елемента D4.1, і, при відповідних сигналах двох інших входах, на виході елемента D4.1 виділяється вузький імпульс. Цей імпульс відкриває транзистори V22, V34 вихідних каскадів, що формують імпульс, що управляє. За допомогою діодів V37, V38 відбувається спарювання імпульсів. Підстроювальними резисторами R1, R2, R3 домагаються однакового нахилу пилкоподібної напруги по всіх каналах.

## 7. Пристрій та робота БІТ

БІТ складається із шести вузлів ІТ-імпульсних трансформаторів. ІТ призначені для гальванічної розв'язки силових сигнальних ланцюгів і передачі керуючого імпульсу до тиристорам. Коли транзистор V34 відкривається через

первинну обмотку трансформатора ТТ1 проходить вузький імпульс струму, збуджуючи магнітну систему і наводячи у вторинній обмотці ТТ1 імпульс напруги. Цей імпульс напруги фільтрується на R2, C1 та виділяється на резисторі R1. Діод V2 із резистором R3 призначені для захисту транзистора V34 від пробою перенапругою, замикаючи через себе магнітну енергію ТТ1 при закритті транзистора V34. Діод V1 призначений для закорочування струму від імпульсів напруги іншої полярності.

### 8. Пристрій та робота БПС

Для здійснення живлення та синхронізації системи управління перетворювача встановлено трансформатор ТТ2.

Вузол живлення має 4 джерела постійної напруги:

- випрямні мости V1 - V6 і V7 - V12 утворюють два послідовно включених нестабілізованих згладжених джерела з напругою по 15 V кожен для живлення інтегральних мікросхем та транзисторів підсилювача формувача імпульсів.
- Випрямний міст V13 - V18 з вихідною напругою 24 V призначений для живлення блоку живлення БПН-01 вузла БГР-01
- Випрямляючий міст V19 - V24 з згладжуючими ємностями на виході утворює нестабілізоване джерело 48 V, призначене для живлення вихідних каскадів підсилювачів - формувачів імпульсів на транзисторах V34, V35, V36.

Усі ланцюгинавантаження цих джерел живлення захищено від коротких замикань та перевантажень плавкими вставками запобіжників F41 - F44.

### 9. Пристрій та робота СУ

Пристрій, що погоджує, призначений для узгодження виходу вузла струмообмеження з входом СІФУ і для обмеження сигналу управління по мінімуму і максимуму. Операційний підсилювач включений за схемою емітерного повторювача з однополярним живленням.

Припустимо, що повзунок потенціометра R11 встановлений потенціал  $U_{оп\min}$ , а повзунок потенціометра R10 встановлений потенціал  $U_{оп\max}$ . Тоді

при значеннях вхідного сигналу  $CU$  від "0" до  $U_{опmin}$  діод  $VD2$  буде відкритий, і на прямому вході  $OY D2$  присутній потенціал  $U_{опmin}$ , обмежуючи мінімальну напругу завдання перетворювача, при значеннях вхідного сигналу від  $U_{опmin}$  до  $U_{опmax}$  обидва діода  $VD1$  і  $VD2$  сигнал  $D$  управління, який необхідний; при значеннях вхідного сигналу більше  $U_{опmax}$  відкривається діод  $VD1$ , пропускаючи на прямий вхід  $D1$  потенціал  $U_{опmax}$  і тим самим обмежуючи максимальну напругу завдання перетворювача зверху.

### 10 Підключення СОЗ

Силова частина СОЗ підключається до 3-фазної мережі через автоматичний вимикач  $Q1$  силовим кабелем перерізом щонайменше  $95 \text{ мм}^2$ .

Якірний ланцюг ВРД підключається до шин постійного струму 301, 302 силовим кабелем перерізом не менше ніж  $120 \text{ мм}^2$ .

Ланцюг збудження ВРД підключається до шин постійного струму 301, кабелем 310 перетином не менше  $1.5 \text{ мм}^2$  на клемник  $X1$ .

Релейно-контакторна схема підключається до напруги власних потреб екскаватора 110 через 2-фазний автоматичний вимикач кабелем перетином не менше  $1.5 \text{ мм}^2$ .

## 2.13 Електропостачання

Екскаватор ЕШ 10/70 – електромеханічний комплекс з високою встановленою потужністю електрообладнання та отримує живлення від окремої лінії. Схема електропостачання наведено рис.2.29.

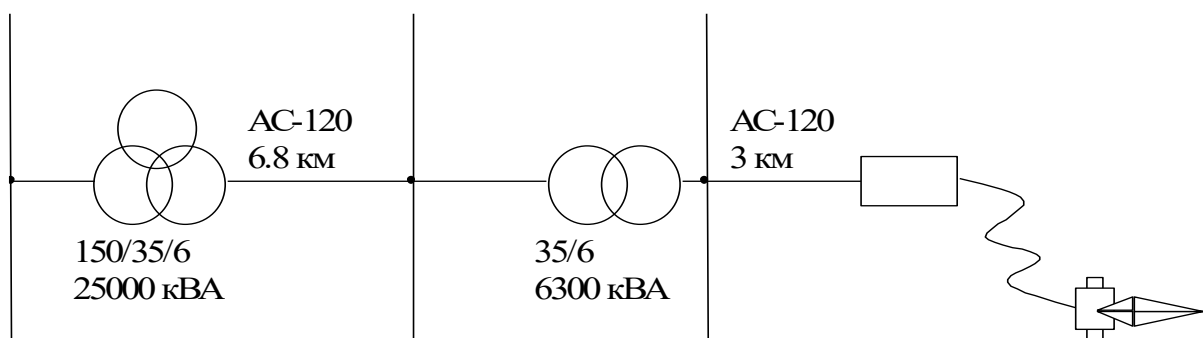


Рисунок 2.29 Схема електропостачання екскаватора ЕШ 10/70

Т.к. у дипломному проекті розглядається розробка системи полегшеного пуску, то для обґрунтування та підтвердження положень виконані розрахунки по навантаженню ліній пусковими струмами та зниження напруги при пуску СД.

Напруга на затискачах СД у момент пуску може бути визначено за формулою:

$$U_n = U_l - \Delta U_n, \quad (2.90)$$

де  $U_n$  - Напруга на затискачах двигуна в момент пуску;

$U_l$  - напруга на шинах живильного центру, до якого підключений двигун;

$\Delta U_n$  - Додаткова втрата напруги від джерела живлення до затискачів двигуна від пускового струму.

Втрата напруги від джерела живлення до будь-якої точки, до якої підключений споживач, може бути визначена за формулою:

$$\Delta U_n = \sqrt{3}(R_n \cos(\varphi_n) + x_n \sin(\varphi_n))I'_n, \quad (3.91)$$

де  $R_n$  і  $x_n$  активний і реактивний опір від джерела до двигуна, що запускається;

$I'_n$  - пусковий струм, а.

$\cos(\varphi_n)$  і  $\sin(\varphi_n)$  - значення, що відповідає пусковому режиму, для СД можна прийняти  $\cos(\varphi_n) = 0.35$ ,  $\sin(\varphi_n) = 0.94$ .

Для реальної лінії живлення АС-120 довжиною 3 км значення опорів:

$$R_n = l \cdot r_n; \quad (2.92)$$

$$X_n = l \cdot x_n, \quad (2.93)$$

де  $r_n = 0.21$  і  $x_n = 0.297$  Ом/км – питомий опір лінії.

Тоді  $R_n = 3 \cdot 0.21 = 0.63$  Ом,  $X_n = 3 \cdot 0.297 = 0.891$  Ом.

Зниження напруги при пуску:

$$\Delta U_n = \sqrt{3}(0.63 \cdot 0.35 + 0.891 \cdot 0.94)112.7 = 1436 \text{ Ст.}$$

Відносне значення зниження напруги:

$$\Delta U_n^* = \frac{\Delta U_n}{U_{n,\phi}}. \quad (2.94)$$

$$\Delta U_n^* = \frac{1436}{3464} = 0.41.$$

Отримані результати підтверджують результати моделювання. Такі значні зниження напруги, що призводять до різких коливань напруги на шинах підстанції, перевищують допустимі значення.

Правила рекомендують включення мережевих двигунів потужністю понад 1000 кВт проводити через пусковий реактор. Для вибору пускового реактора одним із визначальних параметрів є його опір, величина якого може бути визначена за формулою:

$$X_p = \frac{I}{\sin(\varphi_n)} \left[ \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}I_n} \left( \frac{U_{ш}^* A_{ш}^* I_n}{\Delta U_{ш}^*} \right) - R_n \cos(\varphi_n) \right] - X_n, \quad (2.95)$$

де  $X_p$  - індуктивний опір пускового реактора, Ом;

$R_n$  і  $X_n$  - активний та індуктивний опір від джерела до затискачів двигуна без урахування реактивного опору пускового реактора, Ом;

$\Delta U_{ш}^*$  - Допустиме коливання напруги на шинах.

Індуктивний опір реактора визначається за формулою:

$$x_p \% = \frac{\sqrt{3} X_p I_{ном,p}}{U_{ном,p}} 100\%, \quad (2.96)$$

де  $I_{ном,p}$  і  $U_{ном,p}$  - номінальний струм та напруга реактора (номінальний струм реактора вибирається рівним 0.7-1.0 номінального струму двигуна).

З урахуванням виконаних вище розрахунків:

$$X_p = \frac{I}{0.94} \left[ \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 112 \cdot 7} \left( \frac{0.59 \cdot 0.41 \cdot 7}{0.99} - 1 \right) - 0.63 \cdot 0.35 \right] - 0.891 = 1.786 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір реактора:

$$x_p \% = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.786 \cdot 250}{6000} 100\% = 12.8.$$

Приймаємо до встановлення реактор РБАМ6-250.

Визначимо значення коефіцієнта  $A_{ш}^*$  з урахуванням опору реактора:

$$A_{ui}^* = \frac{\sqrt{3}(0.63 \cdot 0.35 + 0.94 \cdot (0.891 + 1.786))7}{6000} = 0.0055 \text{ Ом/В}$$

Тепер відносне значення напруги на затискачах СД:

$$U_{ui}^* = \frac{U_{ui1}^*}{1 + I_n A_{ui}^*} = \frac{1.001}{1 + 7 * 0.0055} = 0.96 \quad (2.97)$$

Коливання напруги на шинах при пуску через реактор:

$$\Delta U_{ui}^* = 0.0055 \cdot 0.143 \cdot 0.96 \cdot 112 \cdot 7 = 0.059 < \Delta U_{ui}^* = 0.1$$

Реактор вибрано правильно, т.к. напруга не виходить за межі допустимої.

## 2.14 Організація безпечної експлуатації установки

### 1. Техніка безпеки під час обслуговування екскаватора

До роботи з обслуговування екскаватора робітники можуть бути допущені лише після відповідного інструктажу та за наявності у них посвідчення щодо перевірки знань, інструктажу з техніки безпеки.

Перед початком роботи екскаватора має бути перевірено стан вибою. Не можна приступати до роботи за наявності у вибої навислих шматків породи ("козирків"). Починати роботу дозволяється лише у встановлений час відповідно до вказівки технічного нагляду ділянки.

Всі робітники екскаваторної бригади повинні виконувати вимоги машиніста екскаватора, оскільки він є особою, яка відповідає за безпеку робіт у свою зміну.

Усі робітники, робота яких пов'язана з перебуванням у екскаваторного вибою, повинні твердо засвоїти значення сигналів, що подаються машиністом екскаватора. Це особливо важливо при завантаженні екскаватором у транспортні судини. Таблиця сигналів має бути вивішена на екскаваторі на видному місці.

Перед початком роботи машиніст повинен переконатись у повній справності обладнання екскаватора. Робота на несправному устаткуванні

заборонена. Знаходження людей на транспортерах у радіусі дії екскаватора забороняється.

Заходити в кабіну екскаватора без дозволу машиніста робітникам, які не пов'язані з обслуговуванням обладнанням екскаватора забороняється. Протягом зміни машиніст не повинен залишати без нагляду екскаватор.

В окремих випадках, наприклад, при огляді робочого майданчика уступу, при пересуванні він повинен доручити вести спостереження за екскаватором помічнику.

Всі частини обладнання екскаватора, що обертаються, повинні бути огорожені спеціальними металевими кожухами. Під час роботи екскаватора забороняється проводити кріплення та змащення розташованих у важкодоступних місцях будь-яких рухомих частин, і навіть їх огляд. Чищення ковша або заміну зубів ковша дозволяється проводити тільки з відома машиніста і при опущеному ковші на ґрунт.

У неробочий час екскаватор повинен бути відведений від вибою у безпечне місце, ківш опущений на землю, кабіна замкнена, кабель вимкнено. Драглайни, що розміщуються під час роботи на верхньому робочому майданчику уступу, повинні встановлюватися за межами зони обвалення.

При виявленні в вибої шпурів або свердловин, що не вибухнули, перемішаних з породою вибухових речовин, підземних трубопроводів, кабелів і т.п. робота екскаватора має бути припинена. Про це негайно необхідно повідомити гірничого майстра або начальника зміни.

Під час проведення нічних робіт на ділянці має бути забезпечене достатнє електричне освітлення робочого місця у радіусі дії екскаватора. Робота на неосвітленому вибої забороняється.

Усі проходи на екскаваторі для зручності сполучення між місцями обслуговування мають бути вільними від сторонніх предметів. На екскаваторі необхідно дотримуватися чистоти. Інвентар та інструменти, що потрібні при роботі екскаватора, повинні знаходитися в місцях, відведених для їх зберігання.

Про помічені несправності екскаватора або ненормальні умови експлуатації, що загрожують аварією або небезпекою для обслуговуючого персоналу, необхідно негайно повідомити машиніста екскаватора.

Пересування екскаватора із наповненим ковшем забороняється. При пересуванні екскаватора робітники, які його супроводжують, не повинні знаходитися перед машиною. При переміщенні драглайна стріла повинна бути спрямована у бік, зворотний напрямку руху. При пересуванні екскаватора ківш повинен бути не вище 1 м від ґрунту. Пересування екскаватора повинно здійснюватись за сигналами помічника машиніста.

Для переведення екскаватора через діючі залізничні колії має бути отриманий письмовий дозвіл від залізничної адміністрації, а на залізничне полотно має бути покладений суцільний настил зі шпал та колод.

Ремонт екскаватора проводиться зазвичай на спеціальному монтажному майданчику, який по можливості повинен бути рівним і звільненим від сторонніх предметів.

Підйомні засоби та пристрої, що застосовуються при ремонті, повинні мати відповідні посвідчення, що встановлюють їхню вантажопідйомність. Піднімати вантаж, що перевищує вантажопідйомність механізму, не дозволяється. Під час опускання деталей застосування будь-яких підкладок не дозволяється. Необхідні підкладки повинні укладатися заздалегідь.

Перед підйомом і опусканням стріли підйомний трос повинен бути ретельно оглянутий, а гальмо відрегульоване так, щоб у будь-якому положенні він міг утримати стрілу.

У темну пору доби монтажний майданчик повинен мати достатнє освітлення. При використанні для освітлення переносних ламп повинна застосовуватися напруга не вище 36 В змінного струму і до 50 В постійного.

## 2. Безпека екіпажу

Група робітників, яка обслуговує екскаватор протягом зміни, складає його змінну бригаду (екіпаж). Залежно від продуктивності екскаватора змінна бригада складається з двох і більше осіб.

Сучасний екскаватор є складною машиною, і тому робота на ньому вимагає від членів бригади спеціальних знань і навичок. Особи, які не мають для цього необхідної підготовки, до роботи на екскаваторах недопускаються, оскільки це небезпечно як їм, але й оточуючих. До роботи на екскаваторі допускаються фізично здорові особи, які досягли 18 років, пройшли спеціальний курс теоретичної та практичної підготовки, отримали посвідчення на право керування екскаватором, а також посвідчення на право допуску до обслуговування високовольтних установок.

Машиніст екскаватора - особа відповідальна за техніку безпеки під час роботи екскаватора. Він дає вказівки бригаді про безпечні прийоми робіт та вимагає від неї неухильного виконання Правил безпеки.

Машиністи екскаватора та їх помічники не рідше одного разу на рік складають іспити на знання безпечних методів роботи. Їх приймає комісія, яку призначають адміністрація підприємства. Машиніст екскаватора або його помічник, які не здали у встановлений термін перевірочних випробувань або отримали незадовільні оцінки, до подальшої роботи не допускаються.

Для забезпечення безпечних методів роботи екскаватора в конкретних гірничо-геологічних умовах адміністрацією кар'єру затверджується інструкція з безпеки для машиністів екскаватора та їх помічників. Ця інструкція має бути вивішена на екскаваторі і видається кожному машиністу та помічнику машиніста під розписку. Винні у невиконанні інструкції Правил безпеки відповідають в установленому порядку.

Підставою для складання інструкції є Єдині правила безпеки розробки родовищ корисних копалин відкритим способом.

### 3. Пожежна безпека

Для уникнення пожежі забороняється зберігати на екскаваторі легкозаймисті речовини (бензин, гас, тощо). Не можна допускати навіть короточасного зберігання на екскаваторі вибухових матеріалів або перебування підричників із спорядженими вибуховими речовинами сумками. Використані обтиральні кінці і промаслені ганчірки можуть бути причиною виникнення пожежі і повинні бути складені в спеціальну залізну скриньку з кришкою, що закривається. Екскаватор має бути укомплектований вогнегасником.

#### 4. Електробезпека

Правилами техніки безпеки нормуються безпечні рівні впливу на організм людини електричного постійного та змінного струму. Струм 50 мА становить небезпеку для людини, величина струму понад 100 мА може призвести до смерті. Найнебезпечнішими межами частоти струму є 40-60 Гц. Підвищення частоти підвищує безпеку робіт, тому використовується електроінструмент, що працює при частоті 200, 400 Гц.

Кордоном небезпечної напруги є 40 В. При напрузі понад 65 В поразка може виявитися смертельною.

Для забезпечення безпеки ураження персоналу електричним струмом на екскаваторі використовуються УАКІ – пристрої контролю струму витоку для захисту людини від ураження електричним струмом та відключення трифазної трипровідної мережі змінного струму із ізольованою нейтраллю при зниженні загального опору ізоляції до небезпечної величини.

Застосування УАКІ запобігає небезпеці поразки електричним струмом персоналу випадково доторкнувся до провідника або корпусу електроустановки під напругою або заземлення несправно.

Застосування УАКІ знижує ймовірність займання електроустановки струмами витоку та розвитку пошкодження працюючого електрообладнання, що працює у вологому середовищі.

Вимкнення мережі при зниженні опору ізоляції до небезпечної величини здійснюється автоматичним вимикачем. УАКІ застосовуються в мережах з напругою 220 та 380 В.

## ВИСНОВОК

У роботі виконано аналіз систем пуску потужних СД кар'єрних екскаваторів. Встановлено, що основними причинами аварійності є важкі пускові умови: великі пускові струми та зниження напруги під час пуску.

Для забезпечення пускових режимів без небезпеки пошкодження СД як пускова система прийнята система полегшеного запуску: за допомогою генератора повороту екскаватора незбуджений СД розкручується до синхронної швидкості, а потім підключається до мережі методом самосинхронізації.

Виконано розрахунок пускових режимів прямого асинхронного пуску та пуску методом самосинхронізації. Встановлено, що при підключенні до мережі обертового СД струми включення досягають 5-7 кратних величин, проте тривалість цього струму не перевищує 0.1 с.

Розроблено систему полегшеного запуску як двозонну систему з тиристорним перетворювачем. Потужність пускової системи обирається у 230 кВт. Дорозгін СД забезпечується зниженням напруги на обмотці збудження. Розроблена принципова схема доведена рівня завершеної і може становити інтерес розробки реальних систем.

Виконано аналіз пускових режимів прямого пуску та через реактор. Отримані результати підтверджують теоретичні передумови та результати комп'ютерного моделювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. German Approach to Mass Excavation. - «Engineering», 1964, N 12.
2. Wheel excavator loading ont 1,000 tons per hour in semi-hard brown T thale. - «Earthmoving and Construction», 1965, N 10.
3. Подерні Р.Ю. Механічне обладнання кар'єрів: Підручник для вузів. - 6-е изд., Перераб. і доп.- М.: Изд-во МДГУ, 2007. - 680с.
4. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. – Д.: Донбас, 2007. – Т.2: Л – Р. – 670 с. – ISBN 57740-0828-2.
5. Земляний А. О. Багатодвигунний електропривод драглайна : дис. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
6. Павленко Т. П., Донець О. В., Петренко О. М. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів //Харків: ХНУМГ ім. ОМ Бекетова. – 2018.
7. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка). – 2021.
8. Чермалих О. В. и др. Автоматизований електропривод машин та установок. – 2021.
9. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001.-376 с.
10. Практикум за теорії електропривода: Навчальний посібник/В.В. Каневський, В.Ю. Захаров, А.П. Сінолиций, Ю.Г. Осадчук, Т.В. Величко/За заг. ред. В.В. Каневського. - Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2008.-124 с., з іл.
11. Щербина О. Проблеми економії енергоресурсів в Україні. /Щербина О. // Ринок інсталяцій, травень, 2002, С. 7-8.
12. Михайлюта С.Л., Биков В.І., Михайлюта Г.С.Регульований електропривід як засіб підвищення ефективності виробництва // Вісник інженерної академії України. – № 2, 2010. – С. 267-271.

13. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. № 379/1404.
14. ДСН 3.36.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: Держстандарт, 1999. – 31 с.
15. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – К.: Держстандарт, 1999.
16. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. – К.: Мінбуд України, 2006.
17. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2009. – Х.: Форт, 2009.
18. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Укр. НДПБ, 2007.
19. ДБН В.1.1.7-2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2003.
20. НАПБ Б.03.001-2004. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. К.: МНС України, 2004.

## Елементна база системи запуску

назва.	Тип	Кіл	Прим.
Автоматичні вимикачі			
Q1	ВА 51-35-340010-00УХЛЗ	1	$U=660V$ $I_{НОМ}=250A$ $I_{отс}=12I_H$
Q2	АЕ 2535 10УЗ	1	$U=220V$ $I_{НОМ}=25A$ $I_{отс}=10I_H$
Q3	АП 50Б-2МЗТНУ340	1	$U=380V$ $I_{НОМ}=40A$ $I_{отс}=12I_H$
Релейно-контакторна схема			
K1	Контактори МК1 - 30УЗ	1	3 полюса $U_H=110V$ $U_H=\sim 380V$ $I_H=40A$
K2	КМ15 - 35С3301	1	3 полюса $U_H=110V$ $U_H=\sim 380V$ $I_H=40A$
K3	МК6 - 20УХЛЗ	1	3 полюса $U_H=110V$ $U_H=\sim 380V$ $I_H=40A$
K4	КМ15 - 37С3301	1	3 полюса $U_H=110V$ $U_H=\sim 380V$ $I_H=40A$
K5	МК6 - 20УХЛЗ	1	3 полюса $U_H=110V$ $U_H=\sim 380V$ $I_H=40A$
Реле часу			
PВ	РЭ - 16 - 12 - 2x3	1	в/в до 5 с $U_H=110V$
PВ1	РЭ - 16 - 12 - 2x3	1	в/в до 5 с $U_H=110V$
PВ2	РЭ - 16 - 12 - 2x3	1	в/в до 5 с $U_H=110V$
PВ3	ВЛ56 - УХЛ4	1	в/в до 100 с $U_H=110V$
Реле максимальні			
PM1	РЭ - 12 - 1x3	1	$I_H=400A$
PM2	РЭ - 12 - 1x3	1	$I_H=320A$
PM3	РЭ - 12 - 1x3	1	$I_H=10A$
Реле напруги			
PH	PH 53/400 $R_1=24$ кОм $R_2=33$ к Ом $C=0.01$ мкФ КБГ-И $U=600V$	1	

	Реле промезуточное		
РП1	РЭП - 20 - 42	1	U <sub>п</sub> =110V (4н.р.; 2н.з.)
РП2	РЭП - 20 - 42	1	
РП3	РЭП - 20 - 42	1	
	Реле ослаблення поля		
РО	РПУ - 3 - 116 - УЗА	1	U <sub>п</sub> =110V I <sub>раб</sub> =5А при пост.часу інд.навант t=0
	Реле чередування фаз		
РЧФ	ЕЛ - 11 - УХЛ	1	
	Блок ТП		
VT1-VT6	Тиристори Т171 - 250 - 8	6 шт	R - C коло
	Радиатори 0181	6 шт	
Пр1- Пр6	Запобіжники швидкодiючі ПП57 - 3427	6 шт	
Пр7- Пр9	Запобіжники ПП57 - 3127	3 шт	
R1 - R6	Резистори ПЭВ 25 R = 20(Ом)±10%	6 шт	
C1 - C6	Конденсатори МБГ4 - 1 - 2А 750V	6 шт	
	Блок ВП		
VD1-VD4	Дiюди Д112 - 10	4 шт	R - C коло ВП
	Охолоджувачі 0111	4 шт	
R1 - R4	Резистори ПЭВ 25 R=20(Ом)±10%	4 шт	
C1 - C4	Конденсатори МБГ4 - 1 - 2А 750V	4 шт	
	Блок УТО		
D1	Операційний підсилювач К553УД2	1	
R2, R4	Резистори МЛТ - 0.125 - 10к±10%	2	
R3	МЛТ - 0.125 - 100к±10%	1	
R7	МЛТ - 0.125 - 5к±10%	1	
R8	МЛТ - 0.125 - 10к±10%	1	
	Резистори підстречні		

R1 R5 R6 Cт	СПЗ - 39 -10к ± 5% СПЗ - 39 -100к ± 5% СПЗ - 39 -10к ± 5% Стабілітрон КС133		
	Блок БИТ		
T1 R1 R2 R3 C1 V1 - V3	Катушка 5ЕУ.520.32.043 Резистори МЛТ - 0.5 - 150Е±10% МЛТ - 1 - 22Е±10% МЛТ - 1 - 10Е±10% Конденсатори К73-17- 250В - 0.047мкФ ±10% - ХЛ2 Діоди КД208А	6 шт 6 шт 6 шт 6 шт 6 шт 18 шт	
	Блок БПС		
ТТ2 V1 - V24 C1 - C12 C13 - C17 FU1 - FU4	Трансформатор 6Бу.179.34.042 Діоди КД208А Конденсатори К50-16- 25В - 500мкФ К50-16- 100В - 20мкФ Вставка плавка ВП1-12,0А АГО.481.303.ТУ тримач вставки ДВП4-І АГО.481.301.ТУ	1шт 24шт 12шт 5 шт 4 шт 4 шт	
ТТ3	Трансформатор силовий	1 шт	$U_1=380\text{ В}$ $U_2=45\text{ В}$ $I_1=30\text{ А}$ $I_2=250\text{ А}$
“П” “С”	Кнопка “Пуск” КЕ 011 У3 штифт чорний Кнопка “Стоп” КЕ 011 У3 штифт червоний	1 шт 1 шт	
R <sub>доб</sub>	Резистори ЭС ЗУЗ - 12 R=12 Ом ЭС ЗУЗ - 2.8	1 шт	$I_{НОМ}=5.8\text{ А}$

R <sub>0</sub>	R=2.8 Ом	1 шт
	ЭС ЗУЗ - 37	
	R=37 Ом	1 шт
	ЭС ЗУЗ - 21.5	
БГР - 01 БП1 - 01	R=21.5 Ом	1 шт
	Блок гальванічногог розділення	
	БГР - 01	1 шт
	Блок живлення	1 шт
	Шунт	
	75 ШСММЗ 500А 75mV	1 шт
C1 - C3	Блок СИФУ	
C4 - C6	Конденсатори	
C7 - C9	K73-17-250В-	6 шт
C10 - C12	0.33мкФ±10%	6 шт
D1 - D3	K10-7В-П33-47пФ±10%	6 шт
D4	K10-7В-Н30-2200пФ±10%	6 шт
R1 - R3	K10-7В-Н90-	
R4 - R9	0.033мкФ±20%	6 шт
R10 - R15	Мікросхеми	2 шт
R16 - R26	K553УД2	
R27 - R32	K511ЛА2	6 шт
R33 - R35	Резистори	12шт
R36 - R41	СПЗ - 39 -47к ± 10%	12шт
R42 - R44	МЛТ- 0.25 -47кОм±5%	22шт
V1 - V6	МЛТ- 0.25 -100кОм±5%	12шт
V10 - V21	МЛТ- 0.25 - 10кОм±5%	6 шт
V29	МЛТ- 0.25 - 1.5кОм±5%	12шт
V25	МЛТ- 0.25 - 100Ом±5%	6 шт
V27	МЛТ- 0.25 - 10кОм±5%	6 шт
V7 - V9	МЛТ- 0.25 - 470Ом±5%	12шт
V22 - V24	Діоди	24шт
V36, V35	КД522Б	2 шт
V34	КД522Б	2 шт
X	КД208А	2 шт
	КД208А	
	КД208А	6 шт
	Транзистори	6 шт
	КТ203Б	4 шт
	КТ814Б	2 шт
	КТ817Г	
	КТ817Г	
	Роз'єм	2 шт
	Вилка	

	СНП58-32/94х9В-23-2-8 Розетка СНП58-32/94х9В-23-2-8	2 ШТ	
	Блок СУ		
D2	Мікросхема К553УД2	1 ШТ	
VD1- VD2	Діоди КД103А	2 ШТ	
C1	Конденсатори К10-7В-П33-47пФ±10%	1 ШТ	
R10 - R11	Резистори СП5 - 2 - 1кОм ±5%	2 ШТ	
R9	МЛТ-0.125 -27кОм±10%	1 ШТ	
R12	МЛТ-0.115 -10кОм±10%	1 ШТ	
R13	МЛТ-0.115 -10кОм±10%	1 ШТ	

## Елементна база СІФУ

Поз.	назва	Кіл	Прим.
A1-A3	Мікросхеми : К553УД2 6КО.348.260-02ТУ	3	
C1-C3	Конденсатори : К73-17-250В-0,33мкФ±10%	3	
C4-C6	Конденсатори : К10-7В-П33-47рF±10%	3	
C7-C9	Конденсатори : К10-7В-Н30-2200рF±10%	3	
C10-12	Конденсатори : К10-7В-Н30-0,033мкФ±20%	3	
D1	Мікросхема К511ЛА2	1	
R1-R3	СП5-3-47КОм±10%	3	
R4-R9	СП5-3-47КОм±5%	6	
R10- R15	МЛТ-0,25-100КОм±5%	6	
R16- R26	МЛТ-0,25-10КОм±5%	11	
R27- R32	МЛТ-0,25-1,5КОм±5%	6	
R33- R35	МЛТ-0,25-100(Ом)±5%	3	
R36- R41	МЛТ-0,25-10КОм±5%	6	
R42- R44	МЛТ-0,25-470Ом±5%	3	
R45- R47	МЛТ-0,25-47Ом±5%	3	Підбир. при налагодж.
V1-V6	Діод КД522Б	6	
V7÷V9	Транзистор КТ209Б	3	
V10÷21	Діод КД522Б	12	
V22÷24	Транзистор КТ814Б	3	
V25÷27	Діод КД208А	3	
V28÷30	Транзистор КТ817Г	3	
X1	Вилка СНП58-64/94*9В-29-2 Ке'О.364.043 ТУ	1	

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій  
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату  
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Мельніков Олександр Миколайович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025