Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ТЕМА РОБОТИ

Розробка системи полегшеного запуску синхронного електропривода екскаватора ЕКГ-8И в умовах ПрАТ «ПівнГЗК»

Виконав:
студент групи ЕЕМ-23-ск _____ Кабанець К.Д.
Керівник випускної роботи _____ д.т.н., проф. В.К. Титюк
Нормоконтролер _____ д.т.н., проф. В.К. Титюк
Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. В.О. Федотов
Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. І.І. Пересунько

Кривий Ріг
2026 р.

ЗАВДАННЯ НА

ВИПУСКНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Кабанцю Костянтину Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка системи полегшеного запуску синхронного електропривода екскаватора ЕКГ-8И в умовах ПрАТ «ПівнГЗК»
2. Строк подання здобувачем роботи : 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання випускної роботи:

Мета та завдання випускної роботи – розробка системи спрощеного запуску СД, що забезпечує можливість здійснення необмеженої кількості запусків без ризику пошкодження СД як енергозберігаючої системи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) :

Опис технологічного устаткування; Електромеханічне обладнання екскаватора ЕКГ-8; Аналіз аварійності приводних СД екскаватора; Аналіз конструкцій пускових пристроїв. Аналіз динамічних режимів пускового генератора та синхронного двигуна.

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

Слайди презентації у кількості 7 штук

3.Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026
II	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026
III	Титюк В.К.	05.05.2026	10.06.2026

7.Календарний план виконання роботи та консультацій

№	Назва етапів роботи	Дата виконання
1	Аналіз аварійності приводного синхронного двигуна екскаваторів.	05.05.2026
2	Аналіз технічних характеристик електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8И.	15.05.2026
3	Вибір раціональної схеми полегшеного запуску приводного синхронного двигуна екскаватора.	20.05.2026
4	Математичне моделювання пускового генератора постійного струму.	22.05.2026
5	Розробка математичної моделі приводного синхронного двигуна.	25.05.2026
6	Дослідження динамічних режимів приводного синхронного двигуна в режимі прямого пуску та синхронізацією з живлячою мережею.	5.06.2026
7	Оформлення пояснювальної записки та презентації випускної роботи. Перевірка на антиплагіат.	10.06.2025

Дата видачі завдання *05.05.2026 р.*

Здобувач вищої освіти _____Кабанець К.Д.__
(підпис)(ПІБ)

Керівник роботи _____Титюк В.К.__
(підпис) (ПІБ)

ЗМІСТ

Реферат 5
Вступ 7
Розділ 1 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ПОЛЕГШЕНОГО ЗАПУСКУ 9
1.1 Аналіз експлуатаційних характеристик електроприводів кар'єрних екскаваторів .9
1.2 Причини підвищення аварійності синхронних двигунів кар'єрних екскаваторів. 13
1.3 Загальна характеристика та вимоги до пускових систем 18
1.4. Класифікація пускових систем 20
1.5. Технічні характеристики електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8І .23
1.5.1 Приводний синхронний двигун 23
1.5.2 Генератори постійного струму, що використовуються на екскаваторі «ЕКГ-8І» 24
1.5.3 Паспортні дані приводних двигунів 25
1.6 Розрахунок потужності системи запуску 25
1.7 Вибір обладнання системи запуску 30
Висновки до розділу 1 31
Розділ 2 ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМИ ПОЛЕГШЕНОГО ЗАПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА 33
2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення електроприводу постійного струму 33
2.2 Розрахунок двозонної системи полегшеного запуску 34
2.3 Розробка математичної моделі для дослідження пускових режимів СД 36
2.4. Дослідження режимів прямого асинхронного пуску синхронного двигуна 42
2.5 Дослідження режимів полегшеного запуску СД 44
Висновки до розділу 2 45
Розділ 3 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ 47
3.1 Характеристика системи електропостачання підприємства 47
3.2 Розрахунки електричних навантажень 48
3.3. Вибір числа й потужності силових трансформаторів на підстанції 50
3.4. Розрахунок струмів короткого замикання 51
3.5. Розрахунок залишкової напруги на статорі СД при прямому асинхронному запуску. 54
Висновки до розділу 3 57
Висновки по роботі 58
Перелік використаних джерел 60
Додатки 60

Реферат

66 сторінок, 9 таблиць, 14 рисунків, 12 джерел літератури.

Тема випускної роботи: Розробка системи полегшеного запуску синхронного електропривода екскаватора ЕКГ-8И в умовах ПрАТ «ПівнГЗК».

Об’єктом випускної роботи є СД головного перетворювального агрегату Г-Д кар’єрного екскаватора.

Мета випускної роботи: розробка системи спрощеного запуску СД, що забезпечує можливість здійснення необмеженої кількості запусків без ризику пошкодження СД як енергозберігаюча система.

Проведено аналіз пускових систем, який показав, що найбільш раціональною для екскаваторного електроприводу за системою Г-Д є система полегшеного пуску, яка забезпечує розкручування незбудженого СД на холостому ходу та підключення його до мережі методом самосинхронізації.

Для дослідження режимів пуску та самосинхронізації виконано математичне моделювання генератора постійного струму та синхронного двигуна.

Запропоновано двозонну систему полегшеного пуску з тиристорним перетворювачем, що забезпечує мінімальне споживання енергії під час пуску. Розроблено принципову схему.

Ключові слова: екскаватор, синхронний двигун, полегшений пуск, двохзонне керування, математичне моделювання.

					КНУ РБ.141.26.250с.3.РФ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кабанець К.Д.			Реферат	Літ.	Арк. 5 / Аркушів
Перевір.		Титюк В.К.					
Реценз.						ЕМ гр. ЕЕМ-23ск	
Н. Контр.		Титюк В.К.					
Затверд.		Пересунько І.І.					

Вступ

Наразі існують різні схематичні рішення проблеми пуску синхронних двигунів (СД), що реалізують найбільш доцільні методи: прямого пуску СД; пуску за допомогою допоміжних машин і 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 застосовуваної схеми, як правило, ускладнений, оскільки відсутні функціональні залежності, що характеризують їх якісні сторони. Це пояснюється тим, що не проведено досліджень з багатофункціонального аналізу різноманітних технічних рішень однієї й тієї ж задачі. Отже, доцільно не тільки проаналізувати окремі положення даного питання, але й розробити наукові підходи до вирішення проблематики в цілому. Не викликає сумнівів як необхідність, так і можливість вирішення задачі на сучасному етапі розвитку інформаційної техніки.

При виборі технічних рішень для електроприводу ігнорується його багатофункціональність (перетворювач потужності, джерело нестабільності в системі електропостачання, джерело екологічного та іншого впливу на навколишнє середовище та персонал). Такий підхід, як правило, призводить на стадії проектування та під час експлуатації до неузгодженості вимог системи електроприводу як елемента технологічного об'єкта та системи електроживлення як виробника електроенергії, що спричиняє суттєві матеріальні втрати. Їхній обсяг багаторазово зростає, якщо при аналізі схематичних рішень не повністю враховуються фактори впливу та режими, що виникають в окремих, навіть в режимах, що рідко зустрічаються.

Наприклад, за складних умов запуску СД порушення режиму напруги живлення може призвести до дуже серйозних наслідків на інших технологічних об’єктах.

Для електроприводів за системою Г-Д питання запуску СД є актуальним через такі обставини.

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

По-друге, збої в запуску унеможливлюють повторне ввімкнення через небезпеку перегріву пускової обмотки. Таким чином, різного роду аварійні ситуації вимагають створення систем, які забезпечували б можливість багаторазових повторних пусків.

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

Розділ 1 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ПОЛЕГШЕНОГО ЗАПУСКУ

1.1 Аналіз експлуатаційних характеристик електроприводів кар'єрних екскаваторів

Сучасний кар'єрний екскаватор — це складний технологічний комплекс. Його основні механізми оснащуються двигунами постійного струму, які живляться від окремих керованих генераторів. На екскаваторах поширена система Г-Д, приводним двигуном якої є високовольтний двигун змінного струму. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором напругою 3-6 кВ використовуються для приводу перетворювальних агрегатів екскаваторів з об'ємом ковша до 12,5 $м^3$ включно. Перетворювальні агрегати інших одноковшових екскаваторів оснащуються виключно синхронними двигунами напругою 6-10 кВ.

Синхронні двигуни екскаваторів, режими їхньої роботи та мережа живлення кар’єру, що їх живить, тісно взаємозалежні.

Пускові режими синхронних двигунів супроводжуються п’яти-семикратними струмовими перевантаженнями, зростанням асиметрії напруги та перегрівом обмоток двигунів.

Значне зниження напруги в живильній лінії помітно впливає на роботу інших споживачів, приєднаних до загальної з пусковим СД ЛЕП, зокрема, до лінії, що живить потужний екскаватор, може приєднуватися ще один менший, наприклад ЕКГ-5.

При цьому під час запуску мережевого двигуна потужного екскаватора може статися «перекидання» мережевого двигуна екскаватора ЕКГ-5 внаслідок значного зниження крутного моменту, що розвивається останнім. Те саме стосується й асинхронних двигунів бурових верстатів, що живляться від пересувних трансформаторних підстанцій, приєднаних до загальної з потужним екскаватором ЛЕП. Крім того, ці двигуни можуть бути відключені власним мінімальним захистом. В результаті 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 в нічний час.

Довжина окремих ліній напругою 6 кВ від головної живильної підстанції (ГПП) до екскаваторів гірничих ділянок перевищує 2 км, а в окремих випадках становить 4–5 км. Забезпечення допустимої величини напруги на клемах електродвигунів екскаваторів при такій віддаленості від ГПП досягається відповідним конструюванням кабельних або повітряних розподільних ліній. Наразі застосовувані конструкції дерев'яних або комбінованих опор зі штирьовими ізоляторами для повітряних ліній (ПЛ) допускають підвіску алюмінієвих проводів перетином до 120 мм^2 і сталевоалюмінієвих – до 70 мм^2.

Однак ПЛ 6 кВ з такими перерізами проводів довжиною 2 км і більше не забезпечують допустимого рівня напруги. Тому для живлення потужних екскаваторів і ПТП-6/0,4 кВ споруджують більш важкі ПЛ 6 кВ з навіскою проводу перетином до 240 мм^2, а іноді дві одноланцюгові лінії з проводами перетином 120 мм^2.

Вплив пускових режимів на живлячу мережу не обмежується якістю напруги. Великі стрибки струму ускладнюють налаштування та умови функціонування релейного захисту.

Додаткове нагрівання під час пусків зумовлює прискорений знос ізоляції та скорочує термін її служби: із зростанням частоти пусків термін служби ізоляції зменшується.

Ступінь впливу пускового режиму на двигун, що запускається, залежить також від тривалості розгону під час запуску. Розрахунки та практика показують, що при довжині живильної лінії 4–5 км і потужності двигуна 1,5–2,0 МВт напруга на затискачах СД може знизитися до (0,6–0,7) Uc, при цьому час пуску значно зростає. Опір живильної лінії знижує напругу на затискачах пускового двигуна, при цьому пусковий струм також знижується порівняно з пусковим струмом при номінальній напрузі. Зі зменшенням пускового струму знижується його щільність в обмотках, однак істотне збільшення тривалості розгону при зниженій напрузі призводить до того, що загальний знос ізоляції за час пуску не зменшується.

Кількість пусків СД залежить від багатьох факторів: технології гірничих робіт, схеми транспортування, кількості перемикань гнучкого кабелю живлення, інтенсивності відмов елементів системи електропостачання, потужності екскаватора тощо. У ряді випадків кількість пусків на добу може досягати 5-10, що істотно впливає на скорочення терміну служби, тому в більшості випадків прагнуть скоротити кількість пусків СД, незважаючи на деяке збільшення витрат електроенергії за рахунок роботи двигуна на холостому ходу.

У табл. 1 наведено статистику виходу з ладу синхронних двигунів екскаваторів ЕКГ-8І на гірничозбагачувальних комбінатах (ГЗК) Криворізького залізорудного басейну.

Таблиця 1.1 Статистика виходів із ладу СД

Гірничо-збагачувальний комбінат	Парк екскаваторів ЕКГ-8И, шт	Загальна кількість випадків виходу з ладу синхронних двигунів, шт.	Загальна кількість випадків виходу з ладу статорних та пускових обмоток, шт.
Новокриворізький	35	16	12
Південний	34	30	21
Північний	77	74	56
Центральний	29	38	31
Інгулецький	27	30	24

Достовірно встановлено, що 70 % від загальної кількості випадків виходу з ладу СД відбувається внаслідок руйнування пускової обмотки та коротких замикань у статорній обмотці. У 1990 році було відремонтовано 29 % СД від загального парку екскаваторів Криворізького залізорудного басейну. Внаслідок перевантажень обмоток статора СД пусковими струмами та перегріву пускових обмоток на Орджонікідзевському ГЗК у 1986–1990 рр. вийшли 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).

Наразі для потужних синхронних двигунів застосовуються 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 запуску двигуна не повинно впливати на нормальну роботу споживачів, підключених до тієї ж мережі. Відповідно до СН-174-75 зниження напруги при пусках на шинах джерела живлення в 6 кВ не повинно перевищувати 10-15% від номінального при живленні від чисто силового навантаження (25% допускається при пусках 1 раз на зміну).

2. Перевантаження трансформаторів пусковими струмами не повинно перевищувати певного заданого значення, що залежить від кількості пусків на добу та їх тривалості. Щодо динамічного впливу на трансформатор

допускається 3 пуски на добу при 4-кратному струмі перевантаження для трансформаторів потужністю до 25 МВА включно.

У табл. 1.2 наведено максимальну довжину повітряної лінії (км) для забезпечення допустимої напруги на клемах СД у пусковому режимі.

Таблиця 1.2 Дані щодо живильних ліній для кар'єрних екскаваторів

Тип екскаватора	Число ліній	Перетин провода марки А, мм ^{2}							
		35	50	70	95	120	150	185	240
ЕКГ-8И	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 до режимів запуску потужних СД зумовлюють необхідність критичного аналізу застосовуваних способів запуску з метою оцінки їх схематичного вирішення, виявлення їхніх переваг і недоліків, а також стану їх теоретичного дослідження.

1.2 Причини підвищення аварійності синхронних двигунів кар'єрних екскаваторів

Сучасне електромашинобудування розвивається в напрямку підвищення рівня використання машин, збільшення навантажень на активні матеріали та зниження маси машини на одиницю потужності. Однак запас міцності, а разом з тим і стійкість до перевантажень, поступово знижується. У результаті намітилася тенденція загального зниження надійності електричних машин.

Факторами, що визначають надійність приводного СД, є часті пуски та зупинки. Під час транспортування гірничої маси екскаватор працює послідовно на завантаженні складу, очищенні габариту, підготовці забою та

очікуванні порожняка. На різних ГЗК співвідношення часу цих процесів різне. У більшості випадків ці процеси становлять 50–60 % від часу загального циклу роботи. За такого режиму приводні СД працюють у несприятливих умовах. Під час тривалого очікування залізничного складу (особливо для екскаватора ЕКГ-8І) з метою скорочення холостої роботи агрегату більша частина екскаваторів відключається від електромережі. При цьому пуск і зупинка агрегатів екскаваторів ЕКГ-8І, ЕКГ-12,5 досягає 6 разів за зміну, а драглайнів ЕШ 15/90, ЕШ 20/90 – 3 рази на добу. Така частота комутаційних оперативних відключень призводить до швидкого виходу двигуна з ладу.

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

Відмови СД через пошкодження обмотки статора, як правило, відбуваються внаслідок 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 чинять концентрації навантажень під час пусків: підвищені механічні зусилля, перевантаження за струмом, перенапруги, вібрації тощо. У даній ситуації наявність ділянок зі зниженою електричною міцністю призводить до пошкодження обмотки, оскільки амплітуди можливих перенапруг недостатні для пробою доброякісної ізоляції.

На старіння ізоляції значною мірою впливають механічні та термомеханічні фактори. Термомеханічні навантаження виникають у результаті періодичного нагрівання та охолодження обмоток. Механічні навантаження 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 і дорівнюють

максимальним амплітудним значенням. Ці припущення характеризують статичний метод розрахунків.

Насправді струм безперервно змінюється, а обмотки та їхні елементи під дією сил, що змінюються в часі, переміщуються. При цьому динамічні сили, які змінюються в часі за ще більш складними законами, що залежать від різних поєднань електромагнітних сил і сил інерції, що виникають при прискоренні елементів лобових частин обмоток у 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 електродинамічними силами може створити своєрідні електродинамічні процеси.

Усі викладені вище фактори, що впливають на термін служби ізоляції (температура обмотки, вплив електричного поля, механічні зусилля тощо), мають місце під час пусків СД. У багатьох випадках домінуючим фактором є температура, додаткове нагрівання під час пусків зумовлює прискорений знос ізоляції (теплове старіння).

Загальний знос ізоляції під час запуску та охолодження обмотки двигуна можна визначити за формулою

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

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

перевантаження з номінальним навантаженням, можна прийняти: температуру охолоджувального повітря 35 °С, $\theta_н$ = 95 °С и $\Delta\theta_н$ = 60 °С.

Для екскаваторних електроприводів (на прикладі СД екскаватора ЕШ 10/70) з урахуванням пускових режимів за умови, що пуск здійснюється один раз за зміну і триває 5 с, кратність пускового струму становить 5,6, постійна часу обмотки Т = 150 с, за один рік експлуатації термін служби ізоляції зменшується на 27%. Зі зростанням частоти пусків двигунів термін служби ізоляції зменшується в більшій мірі.

Кількість пусків мережевих двигунів екскаваторів залежить від багатьох факторів: технології гірничих робіт, схеми транспорту, кількості перемикань гнучкого кабелю живлення, інтенсивності відмов елементів системи електропостачання, потужності екскаватора та ін. У ряді випадків кількість пусків мережевих двигунів на добу може досягати 5-10, що істотно впливає на скорочення терміну служби ізоляції.

Ступінь впливу пускового режиму на двигун, що запускається, залежить також від тривалості розгону двигуна під час запуску. Опір лінії знижує напругу на затискачах пускового двигуна. При цьому пусковий струм також знижується порівняно з пусковим струмом при номінальній напрузі пропорційно до напруги під час запуску. Зменшення пускового струму знижує щільність струму в обмотках двигуна. Однак істотне збільшення тривалості розгону при зниженій напрузі призводить до того, що загальний знос ізоляції за час пуску не зменшується порівняно з пуском при номінальній напрузі.

Зниження напруги на затискачах СД, що запускається, та істотне збільшення тривалості розгону призводить до збільшення втрат у роторі двигуна та перегріву пускової обмотки.

Внаслідок витіснення струму з поверхні ротора момент двигуна є складною функцією ковзання та струму.

Оскільки крутний момент двигуна пропорційний потужності втрат у роторі (втрат від першої гармоніки), поділеній на коефіцієнт ковзання:

$M = I_p^2 r / S$, втрати в роторі під час запуску мають вигляд:

$$\Delta P = \int_0^{t_n} MSdt\,, \tag{1.2}$$

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

Замінивши в (1) змінну t на S, запишемо

$$\Delta P = \int_{S_к}^{S_н} \frac{MS}{M - M_c} dS\,, \tag{1.3}$$

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

З’ясуємо залежність між втратами та струмом ротора I_p . З похідної

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

видно, щто при M_c > 0 знак похідної $\frac{d}{dI_p}\left(\frac{MS}{M - M_c}\right)$ протилежний знаку похідної за моментом за струмом 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 з вищесказаного, для СД, що запускається, втрати в пусковій обмотці (основні втрати без урахування втрат від вищих гармонік) при зниженні напруги зростають. Потужність втрат, природно, зменшується, але час розгону істотно збільшується і нагрівання пускової обмотки підвищується, незважаючи на зниження роторного струму. Оскільки струм ротора при зниженні напруги змінюється, можна зробити висновок, що втрати в роторі підвищуються, це сприяє перегріванню пускової обмотки.

1.3 Загальна характеристика та вимоги до пускових систем

У промислових системах, за наявності обмежень щодо витрат на регульований електропривід, першочергове значення набувають системи керування пуском електроприводів. Складним завданням є створення пристроїв запуску для потужних високовольтних СД та АД.

Вибір способу пуску високовольтних електродвигунів визначається такими умовами:

зниження напруги в мережі під час пуску двигуна не повинно впливати на нормальну роботу споживачів, підключених до тієї ж мережі. 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 рідкісних пусках - один раз за зміну);

Перевантаження трансформаторів пусковими струмами не повинно перевищувати заздалегідь визначеного значення, яке залежить від кількості пусків на добу та їх тривалості.

Найбільш бажаним є прямий пуск, а для синхронних двигунів (СД) — прямий асинхронний пуск. Щодо впливу 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 є неприйнятним.

Важливо розуміти, що пускові системи, по суті, є новим класом енергозберігаючого обладнання. Розуміння цього тісно пов'язане із загальними та конкретними завданнями реального енергозбереження. Невиправдано, у всіх відношеннях, робити односторонню орієнтацію на регульований електропривід. Багато завдань енергозбереження можуть бути

вирішені з використанням пускових пристроїв, що забезпечують розгін двигуна, обмеження струмових, механічних і теплових навантажень.

Основними вимогами до таких систем є:

- можливість необмеженої кількості пусків без ризику перегріву обмоток двигуна;
- обмеження динамічних моментів і струмового навантаження;
- можливість тривалої роботи на знижених швидкостях (для прогрівання деяких технологічних механізмів);
- достатню величину пускового моменту для створення підвищеного моменту при рушанні;
- низьку (порівняно з регульованим приводом) вартість;
- можливість послідовного пуску декількох двигунів.

Класифікація схем пуску електроприводів наведена на рис. 1.1.

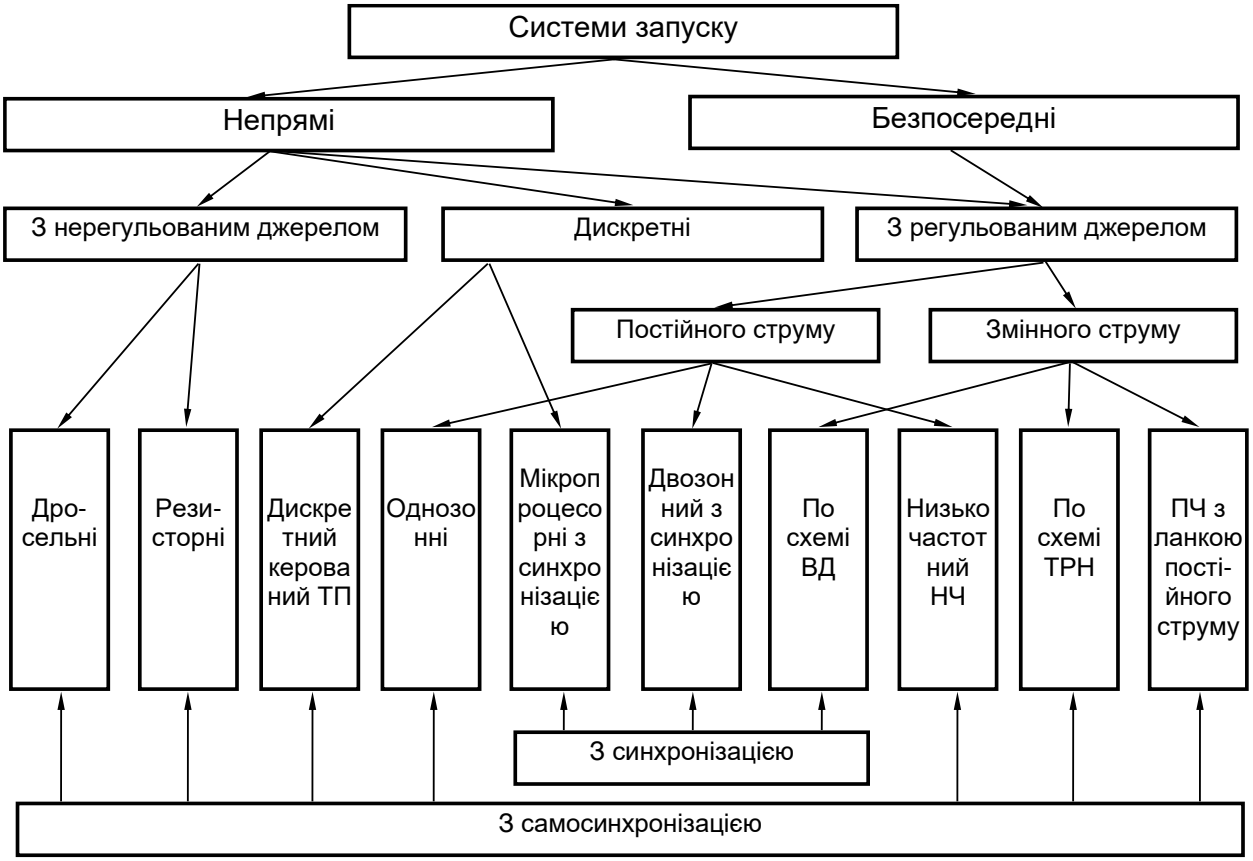


Рисунок 1.1 Класифікація пускових систем

Наразі існують різні схематичні рішення проблеми запуску високовольтних двигунів, що реалізують найбільш доцільні методи: прямого запуску; запуску за допомогою допоміжних машин і механізмів; запуску 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 непрямими — 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-АД).

1.4. Класифікація пускових систем

Системи пуску СД перетворювальних агрегатів Г-Д потужних кар'єрних екскаваторів є непрямими системами (згідно з класифікаційною таблицею). Схеми цих систем можуть бути різноманітними, але принцип їх 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. ГПТ на час розгону СД підключається до окремого джерела живлення. При досягненні швидкості, що дорівнює підсинхронній 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 при досягненні швидкості, що дорівнює підсинхронній швидкості СД, пускова система здійснює точну синхронізацію СД з мережею.

Системи пуску, виконані за першим варіантом, відрізняються більшою простотою конструкції, але залежно від потужності ГПТ як елементи використовуються пускові резистори, що вмикаються в якірне коло на час

пуску (резисторні системи пуску), або керовані тиристорні перетворювачі (тиристорні системи пуску).

Для синхронних двигунів потужністю до 630 кВт включно застосовуються резисторні пускові системи. Функціональна схема таких систем наведена на рисунку 1.2.

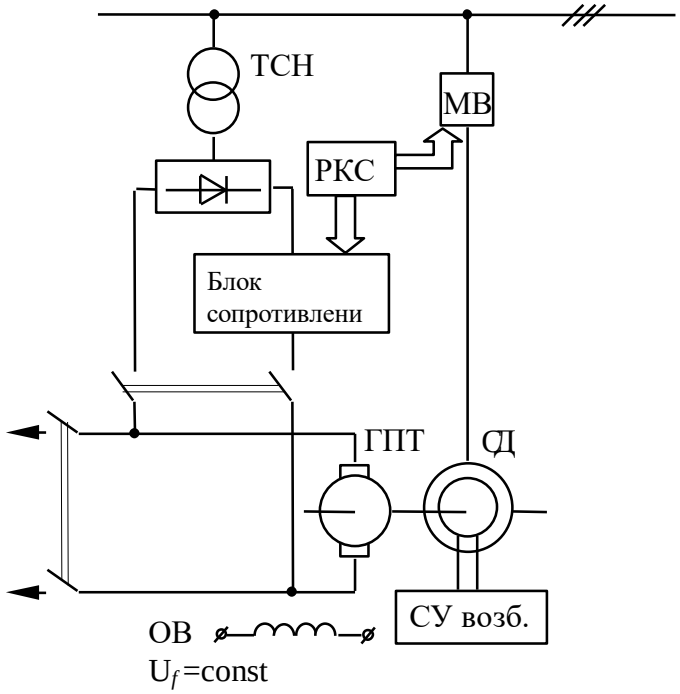


Рисунок 1.2 - Функціональна схема резисторної пускової системи з точною синхронізацією

Порядок роботи:

- Розгін непідключеного до мережі та нерозкрученого СД головного перетворювального агрегату екскаватора до підсинхронної (синхронної) швидкості за допомогою допоміжного розгінного двигуна (ВРД), в якості якого використовується генератор напору та ходу агрегату ПЕМ-2000.
- Самосинхронізація СД з мережею.

Основним критерієм, що визначає схему тиристорної пускової системи, є потужність і параметри ГПТ. Якщо номінальна напруга якоря генератора не перевищує випрямлену напругу тиристорного перетворювача, застосовуються

однозонні пускові системи, в іншому випадку необхідно застосовувати двозонні з ослабленням магнітного потоку.

Однозонні пускові системи.. Функціональна схема системи наведена на рис. 1.3.

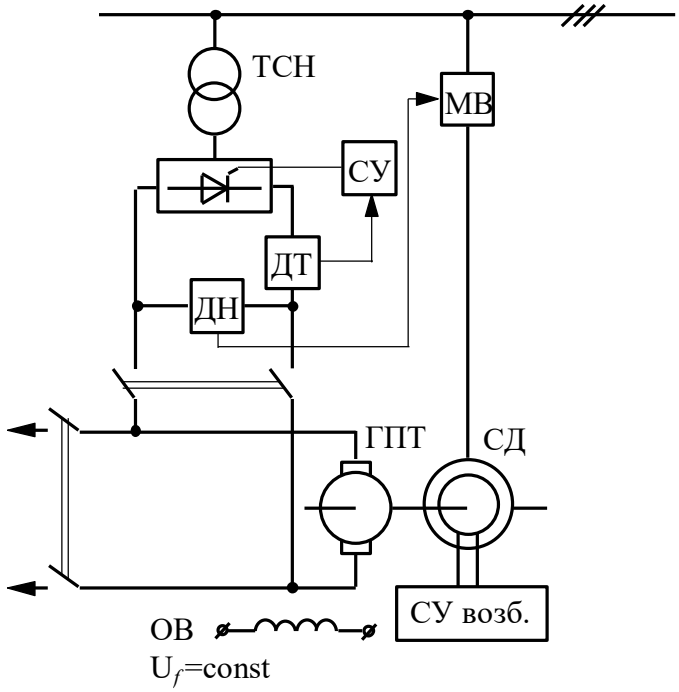


Рисунок 1.3 - Функціональна схема тиристорної однозонної пускової системи

Контрольованим параметром є струм якірного кола. Напруга збудження встановлена на рівні, близькому до номінального, і таким чином, що синхронна частота обертання агрегату буде досягнута при напрузі на якорі, що дорівнює номінальній випрямленій напрузі перетворювача

Це зручно застосовувати при напрузі генератора, що перевищує номінальну.

Двозонні пускові системи.

Використовується в електроприводі при номінальній напрузі генератора, вищій за перетворювач.

Запуск агрегату відбувається при форсованому потоці збудження. У процесі розгону напруга збудження ступінчасто знижується до рівня, необхідного для досягнення синхронної частоти обертання.

Функціональна схема системи наведена на рисунку 1.4.

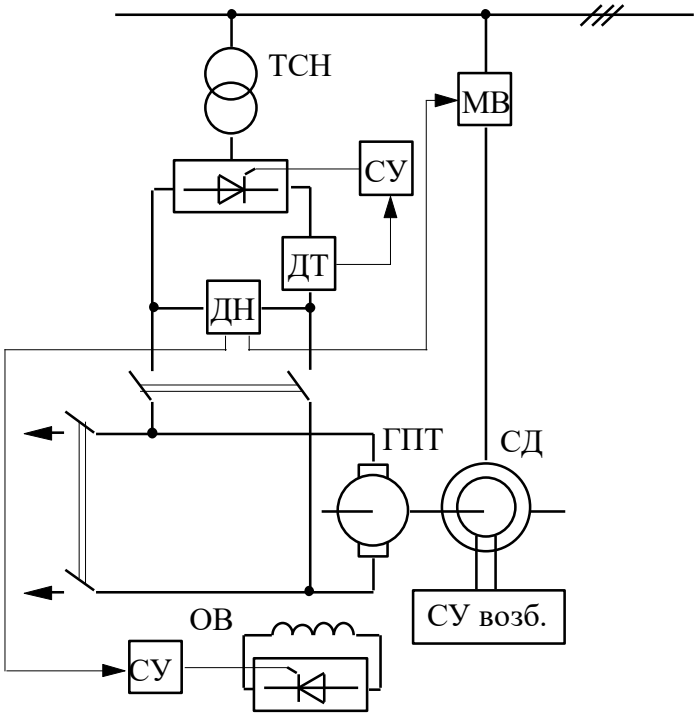


Рисунок 1.4 Функціональна схема тиристорної двозонної пускової системи

Порядок роботи.

- Розгін головного перетворювального агрегату екскаватора, що не підключений до мережі та не збуджений, до підсинхронної (синхронної) швидкості за допомогою допоміжного розгінного двигуна (ГПТ), в якості якого використовується генератор напору та ходу агрегату.
- Самосинхронізація СД з мережею.
- Перехід на живлення ОВ СД.

1.5. Технічні характеристики електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8І

1.5.1 Приводний синхронний двигун

Технічні характеристики синхронного двигуна наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики приводного синхронного двигуна.

Тип	СДЕ2-15-34-6-У2
Номінальна потужність	630 кВт
Кількість фаз	3
Частота струму	50 Гц
Номінальна потужність	630 кВт
Режим роботи	S1
Частота обертання	1000 об./хв.
Струм статора	75 А
Номінальна напруга	6 Кв
Струм збудження	270 А
Напруга збудження	36 В
Коефіцієнт навантаження, випереджаючий	0.8-0.9
Клас ізоляції	В
Вага	5100 кг
Ступінь захисту	IP21
ККД	94.2%

1.5.2 Генератори постійного струму, що використовуються на екскаваторі «ЕКГ-8І»

Живлення якірних кіл електроприводів основних механізмів екскаватора здійснюється від відповідних генераторів постійного струму.

У таблиці 1.4 наведено технічні характеристики генераторів ЕКГ-8І.

Таблиця 1.4 – Паспортні дані генераторів ЕКГ-8І

№	Механізм	Підйом	Напор	Поворот
1	Тип генератора	ПЕМ-151-8К	ПЕМ-2000М	ПЕМ-141-4К
2	Номінальна потужність генератора, кВт	500	115	250
3	Номінальна швидкість обертання, об/хв	1000	1000	1000
4	Номінальна напруга якоря, В	560	330	630
5	Номінальний струм якоря, А	895	348	397
6	Номінальний ККД, %	0,932	0,92	0,925
7	Число пар полюсів	3	2	2

8	Опір обмоток якоря, $R_{ЯГ}$, Ом	0,0075	0,0112	0,0355
9	Опір додаткових полюсів $R_{ДПГ}$, Ом	0,00153	0,00385	0,0054
10	Опір компенсаційної обмотки $R_{КОГ}$, Ом	0,00516		0,0139

1.5.3 Паспортні дані приводних двигунів

У таблиці 1.5 наведено технічні характеристики приводних двигунів екскаватора ЕКГ-8І.

Таблиця 1.5 – Паспортні дані приводних двигунів екскаватора ЕКГ-8І.

Механізм	Підйом	Напор	Поворот
Тип двигуна	2хДЕ-816	ДЕ-816	2хВЕ-812
Номінальна потужність, кВт	2х190	100	2х100
Номінальна швидкість обертання, об/хв	720	750	750
Номінальна напруга, В	2 х 300	305	2х305
Кількість пар полюсів	2	2	2
Опір обмотки якоря, Ом	2 х 0,0055	0,014	2х0,014
Опір додаткових полюсів, Ом	0,0032	0,009	2х0,009

1.6 Розрахунок потужності системи запуску

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

Для підшипників ковзання залежність моменту опору можна записати у загальному вигляді:

$$M_{ст} = M_{зр} + M_{\mu} + M_Q + M_{\nu}, \qquad (1.5)$$

де $M_{зр}$ - момент рушання; M_{ν} - момент, зумовлений в'язкістю мастила; M_Q - момент, зумовлений тертям об повітря; M_{μ} - момент, зумовлений статичним навантаженням на підшипник.

$M_{зр}$ - що зумовлено нерівномірним розподілом мастила після зупинки. Мастило стікає в нижню частину і загусає або застигає при низьких температурах.

$$M_{зр} = m\varepsilon\nu^{\frac{2}{3}}(\varphi + 1)^{-1}, \tag{1.6}$$

де $\varepsilon = 45.56$ - коефіцієнт, який залежить від конструкції підшипника та його типорозмірів; ν - кінематична в'язкість мастила; φ - кількість обертів з моменту початку обертання; $m = 8$ - кількість підшипників агрегату.

Вид залежності моменту старту $M_{зр}$ від кількості обертів φ показано на рис. 1.5.

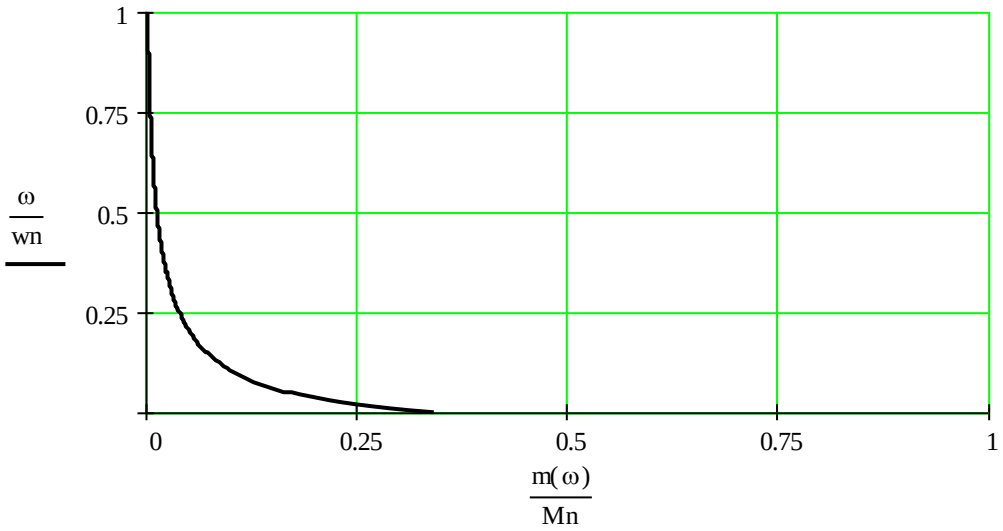


Рисунок 1.5 - Залежність моменту опору рушання

Залежність моменту опору від в'язкості мастила можна виразити формулою Стокса:

$$M_{\nu} = 6\pi\nu r\omega, \tag{1.7}$$

де r - радіус кульки в підшипнику (м); ω - кутова швидкість.

Величина статичної в'язкості мастила є складною функцією і залежить від температури та швидкості обертання. На основі апроксимації характеристик мастил отримано усереднену залежність їхньої в'язкості від температури

навколишнього середовища $t^{\circ}C$. З урахуванням отриманого рівняння графічна залежність моменту від в'язкості мастила при різних температурах має вигляд, наведений на рис. 1.6.

$$lg(\nu) = (\alpha_1 \omega - \beta_1) t^{\circ} + (-\alpha_2 \omega + \beta_2), \tag{1.8}$$

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

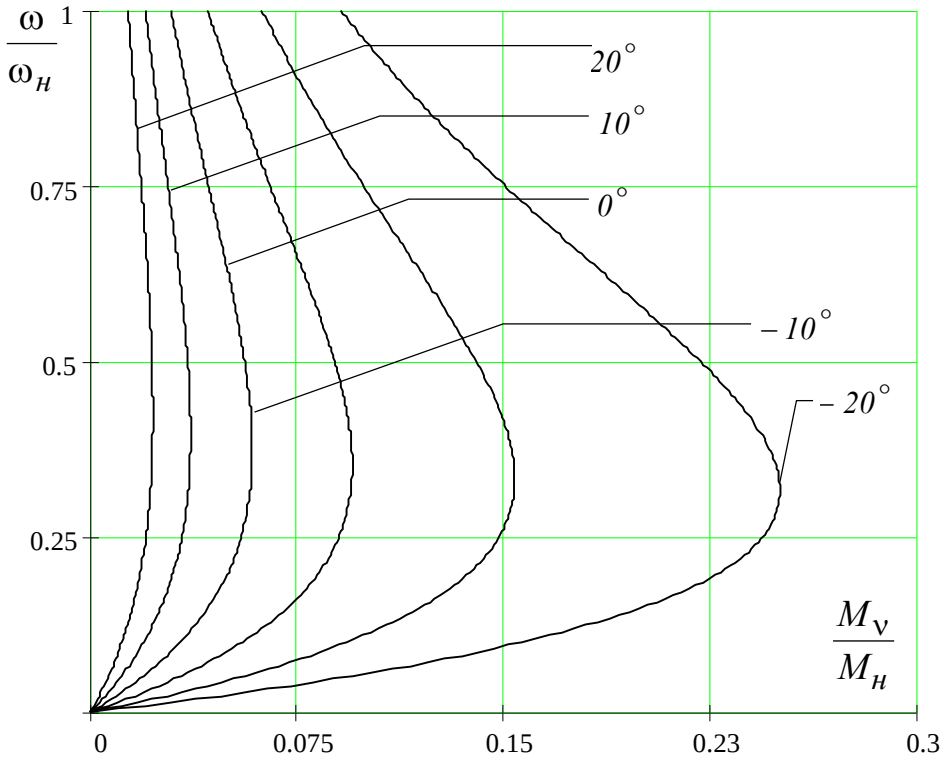


Рисунок 1.6 - Залежність моменту опору від в'язкості мастила

Момент, що залежить від статичного навантаження на підшипник, можна представити виразом, який враховує як вагу ротора, так і швидкість обертання:

$$M_{\mu} = \mu_0 g G r \left(1 - e^{-\xi \omega}\right), \tag{1.9}$$

де μ_0 - 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/с2; $\xi = 0.04$ - емпіричний коефіцієнт. Залежність моменту статичного навантаження, наведена на рис. 1.7.

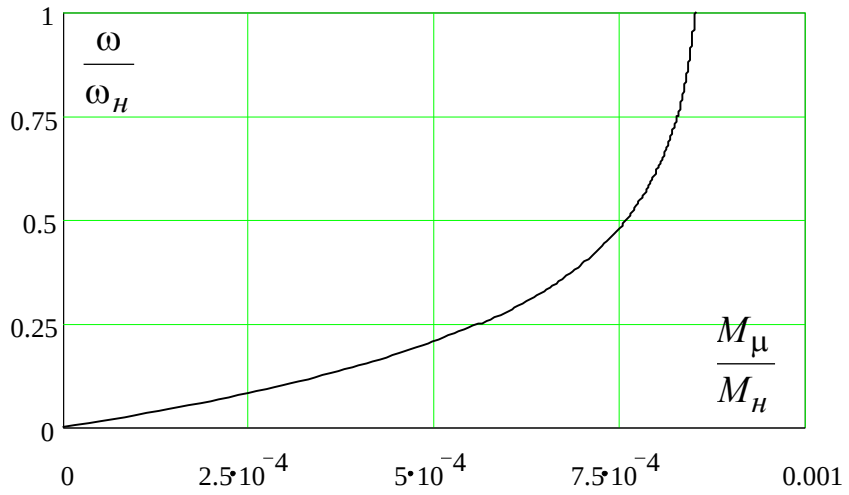


Рисунок 1.7 - Залежність моменту опору від статичного навантаження на підшипник

Момент тертя ротора електродвигуна об повітря:

$$M_Q = 4.665 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\omega}{\omega_н} \right)^{1.7} \left(1 + 4.4 \frac{l}{d} \right)^{4.4}, \qquad (1.10)$$

де $l = 0.7$ - довжина ротора, м; $d = 0.425$ - діаметр ротора, м.

Залежність моменту тертя про повітря має вигляд, наведений на рис. 1.8:

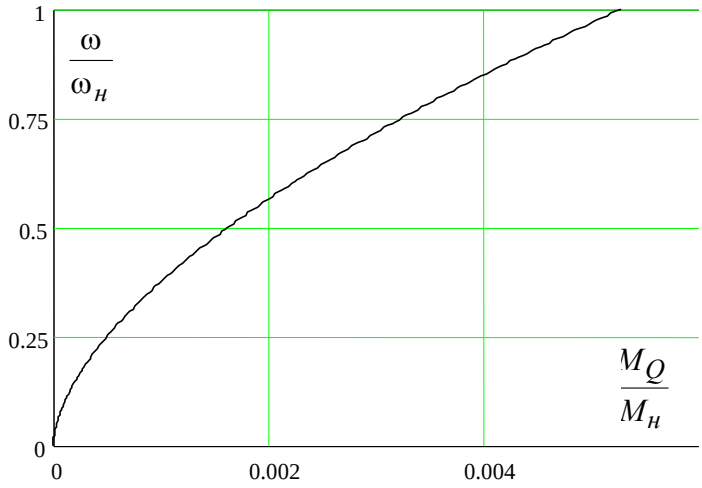


Рисунок 1.8 - Залежність моменту опору від тертя об повітря

Сумарна залежність $M_{cm} = f(\omega)$ приведена на рис. 1.9.

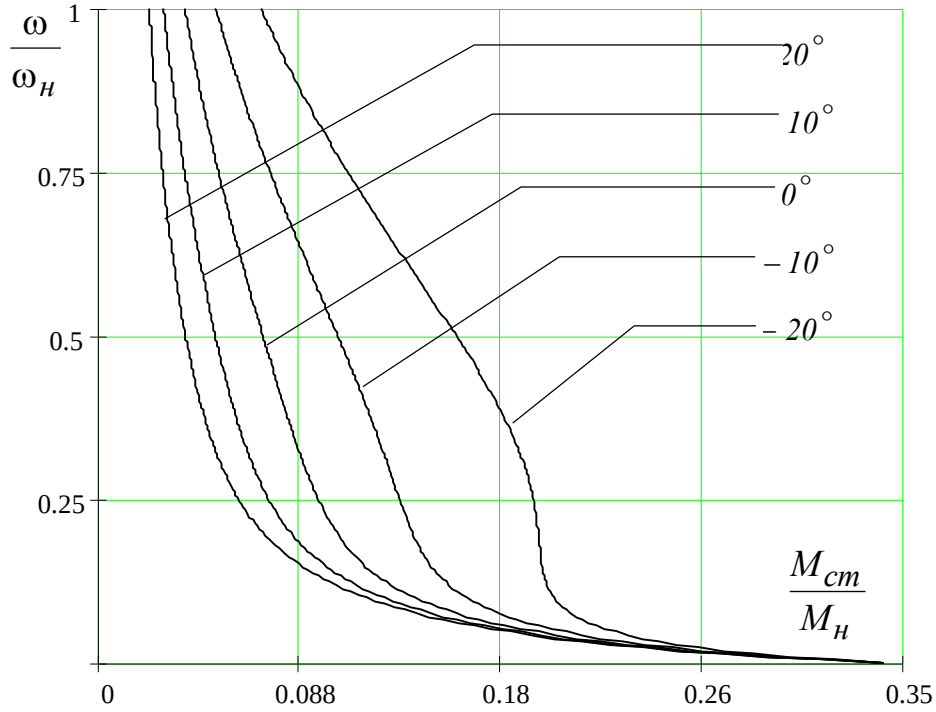


Рисунок 1.9 - Сумарна залежність статичного моменту

Як видно з розрахунків, під час рушання величина моменту опору становить. Отже, система запуску повинна забезпечувати під час рушання цю величину моменту двигуна. Згідно з цією величиною виконаємо розрахунок потужності системи.

Специфіка роботи головних перетворювальних агрегатів Г-Д висуває жорсткі вимоги до застосовуваного електроприводу системи запуску і особливо до визначення необхідної потужності. При запуску двигуна та здійсненні багаторазових повторних пусків потужність пускової системи повинна бути необхідною та достатньою для забезпечення пуску.

З основного рівняння динаміки електроприводу, момент, необхідний для розгону агрегату:

$$M \approx J_{\Sigma} \frac{\omega_0}{\Delta t} + M_c, \text{ Нм} \quad (1.11)$$

де ω_0 - синхронна частота обертання агрегату; Δt - час досягнення синхронної частоти обертання; J_{Σ} - сумарний момент інерції 4-х машинного агрегату.

Припустимо, що час розгону агрегату становить 60 с., тоді

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

Тоді струм розгону, А

$$I = \frac{M}{k\phi_{ген}} = \frac{M \cdot \omega_0}{U_н - I_н \cdot R_я} \quad (1.12)$$

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

Або при $\Delta t = 120$ с

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

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

Припустимо, що розгін генератора відбувається при струмі 500 А. Тиристорний перетворювач забезпечує номінальну напругу 460 В.

Тоді потужність пускової системи становитиме:

$$P_{пс} = I_{разг} \cdot U_{d.н} \quad (1.13)$$

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

1.7 Вибір обладнання системи запуску

Як випливає з наведеного вище аналізу, система запуску має бути двозонною з тиристорними перетворювачами, що працюють на якорне коло та обмотку збудження.

Потужність тиристорного перетворювача якірного кола становить

230 кВт, з номінальним струмом 500 А. В якості такого перетворювача виберемо перетворювач типу АТ 250/500.

Таблиця 1.6 Технічні характеристики тиристорного перетворювача

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

В якості живильного трансформатора буде використовуватися трансформатор власних потреб екскаватора ТМЕ-400/10; технічні характеристики трансформатора наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 Технічні характеристики трансформатора

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

В якості дроселя візьмемо згладжувальний реактор, дані про який наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 Технічні характеристики згладжувального реактора

Тип	ФРОС-125/0.5У3
Номінальний струм, А	500
Індуктивність, Гн	0,00075
Активний опір, Ом	0,003
Номінальні втрати в міді, Вт	750

Висновки до розділу 1

У першому розділі на основі аналізу причин аварійності приводних синхронних двигунів екскаватора показано, що однією з найважливіших причин є пошкодження пускових демпферних обмоток через складні умови

пуску синхронних двигунів. Розглянуто вимоги до пускових систем синхронних двигунів, наведено класифікацію пускових пристроїв.

Розглянуто технічні характеристики електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8И.

На основі аналізу складових моменту опору при рушанні синхронного двигуна екскаватора розраховано необхідну потужність пускового пристрою, яка склала 230 кВт. Для розгінного запуску синхронного двигуна можливе використання генератору повороту платформи, який має потужність 250 кВт.

Обрано перетворювальне обладнання для системи запуску синхронного двигуна.

Розділ 2 ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМИ ПОЛЕГШЕНОГО ЗАПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення електроприводу постійного струму

Розрахунок параметрів трансформатора.

Номінальний струм трансформатора:

$$I_2 = \frac{P_n 10^3}{\sqrt{3}U_2} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577 \text{ А} \quad (2.1)$$

Активний опір фази трансформатора:

$$R_m = \frac{\Delta P_{кз}}{3I_2^2} = \frac{5400}{3 \cdot 577^2} = 0.0054 \text{ Ом} \quad (2.2)$$

Повний опір фази трансформатора:

$$z_m = \frac{U_k \% U_2}{100 I_2} = \frac{5.5 \cdot 400}{100 \cdot 577} = 0.038 \text{ Ом} \quad (2.3)$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{0.038^2 - 0.0054^2} = 0.0376 \text{ Ом} \quad (2.4)$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_m = \frac{x_m}{100\pi} = 0.00012 \text{ , Гн} \quad (2.5)$$

Комутаційний опір тиристорного перетворювача:

$$R_\gamma = \frac{m \cdot x_m}{2\pi} = \frac{3 \cdot 0.0376}{\pi} = 0.0359 \text{ Ом} \quad (2.6)$$

Номінальна частота обертання:

$$w_{nd} = 104.72 \tag{2.7}$$

Номінальний магнітний потік:

$$k\phi_н = \frac{U_н - I_н\left(R_я + R_{дп} + R_{ко}\right)}{\omega_н} = \\ = \frac{900 - 1110 \cdot \left(0.00825 + 0.00185 + 0.00444\right)}{104.72} = 8.44 \tag{2.8}$$

Індуктивність якірного кола:

$$L_я = \frac{U_н}{I_н \omega_н p} k = 0.25 \frac{900}{1110 \cdot 104.72 \cdot 3} = 0.000645 \quad \text{Гн} \tag{2.9}$$

Еквівалентний опір якірного кола

$$R_e = R_я + R_{дп} + R_{ко} + 2R_m + R_{др} + R_\gamma \tag{2.10}$$

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

Еквівалентна індуктивність якірного кола

$$L_e = L_я + 2L_m + L_{дp} = \\ = 0.000645 + 2 \cdot 0.00012 + 0.00075 = 0.001635 \text{ Гн} \tag{2.11}$$

Електромагнітна постійна часу

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0.001635}{0.06424} = 0.02545 \ \ c \tag{2.12}$$

Електромеханічна постійна часу

$$T_m = J_\Sigma \frac{R_e}{\left(k\phi\right)^2} = 843.75 \frac{0.06424}{8.44^2} = 0.761 \ \ c \tag{2.13}$$

2.2 Розрахунок двозонної системи полегшеного запуску

Система регулювання пуску електроприводу повинна бути побудована за принципом підпорядкованого регулювання. Однак відсутність датчика швидкості накладає обмеження на структуру системи. Технічно можливо

реалізувати лише контур швидкості. Регулювання у другій зоні має бути дискретним.

Пуск двигуна здійснюється при максимальному магнітному потоці при заданому рівні обмеження струму для забезпечення необхідного моменту рушання. Релейний датчик напруги на якорі вмикає ступінь ослаблення магнітного потоку при досягненні максимальної напруги перетворювача. Двигун переходить на відсічку, напруга на якорі знижується і розгін триває до заданої швидкості.

Проведемо розрахунок ПІ-регулятора струму.

Структурна схема контуру регулювання струму наведена на рис. 2.1:

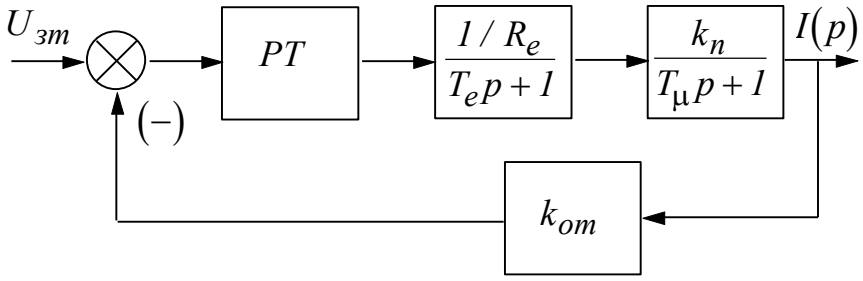


Рисунок 2.1 - Структурна схема контуру регулювання струму

Відповідно до структурної схеми передавальна функція якірного кола:

$$W_I(p)=\frac{k_n/R_e}{\left(T_\mu p+1\right)\left(T_e p+1\right)}, \tag{2.14}$$

де $k_n=\frac{U_{d.н}}{U_{з.max}}=\frac{460}{10}=46$ - коефіцієнт підсилення перетворювача,

$k_{от}=\frac{U_{з.max}}{I_{max}}=\frac{10}{500}=0.02$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом.

Використовуємо ПІ-регулятор із передавальною функцією

$$W_{p.m}(p)=\frac{T_0 p+1}{T_{01}p}. \tag{2.15}$$

Тоді передавальна функція розімкнутого струмового контуру

$$W_{p.k}(p)=W_{p.m}(p)\cdot W_I(p)=\frac{k_n\left(T_0 p+1\right)/R_e}{\left(T_\mu p+1\right)\left(T_e p+1\right)T_{01}p}. \tag{2.16}$$

Приймаємо $T_0 = T_e$ - постійна часу, яку необхідно компенсувати. Тоді

$$W_{p.k}(p) = W_{p.m}(p) \cdot W_1(p) = \frac{k_n / R_e}{(T_\mu p + 1) T_{01} p}. \quad (2.17)$$

Передавальна функція замкнутого контуру

$$W_{з.k}(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot k_{от}} = \frac{1 / k_{от}}{\frac{T_\mu T_{01} R_e}{k_{от} k_n} p^2 + \frac{T_{01} R_e}{k_{от} k_n} p + 1}, \quad (2.18)$$

тобто замкнутий контур є системою другого порядку.

Для забезпечення оптимального перехідного процесу необхідно, щоб коефіцієнт демпфірування дорівнював 0,707. Це можливо, якщо коефіцієнт при *p* дорівнюватиме:

$$\frac{T_{01} R_e}{k_{от} k_n} = 2T_\mu, \quad (2.19)$$

звідки

$$T_{01} = \frac{2T\mu k_{от} k_n}{R_e}. \quad (2.20)$$

Передавальна функція регулятора струму матиме вигляд:

$$W_{p.m}(p) = \frac{(T_e p + 1) R_e}{2T_\mu k_{от} k_n p}. \quad (2.21)$$

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

2.3 Розробка математичної моделі для дослідження пускових режимів СД

Математичний аналіз процесів у системі пуску синхронного двигуна в загальному випадку є досить складним завданням, що зумовлено зміною електромагнітного стану двигуна в широкому діапазоні.

Наразі існує низка методів вирішення розглянутої задачі. Найчастіше синхронні машини моделюються на основі рівнянь, записаних в осях, нерухомих відносно ротора даної машини (система d,q). Розглянута СД – явнополюсна трифазна синхронна машина, нормального виконання. Обмотка якоря розміщується на статорі, основне поле створюється обмоткою збудження, розташованою на роторі. Магнітопровід машини має дві осі симетрії – поздовжню та поперечну. Ротор машини оснащений демпферною системою.

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

Врахувати всі фактори під час аналізу процесів, що відбуваються в ДВЗ, можна за допомогою складних систем рівнянь, розв'язання та аналіз яких становлять певні труднощі. Доцільно прийняти деякі ідеальні умови, за яких простіше розглянути процеси, що відбуваються в двигуні, без істотного спотворення загальної картини явищ.

Відзначимо основні припущення, що стосуються розподілу полів і характеру процесів у машині.

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

2. Магнітне поле обмотки збудження. Якір машини вважається гладким. При дослідженні не враховується спотворення поля, зумовлене зубцями якоря. Крива поля вважається синусоїдальною. Магнітна вісь обмотки збудження збігається з поздовжньою віссю машини.

3. Магнітне поле обмотки статора. Магнітні осі фазних обмоток зміщені одна відносно одної на 120°. Магнітна провідність змінюється вздовж окружності статора внаслідок змінного зазору з періодом 180°. Полями вищих

просторових гармонічних складових, зумовлених основною гармонічною намагнічувальною силою, можна знехтувати, оскільки вони дають невеликі потокозчеплення. У синхронних машинах нормального виконання обмотувальні коефіцієнти ряду вищих гармонічних намагнічувальних сил статора малі. Тому можна знехтувати асинхронними моментами, які створюють вищі просторові гармонічні поля. Магнітне поле, створене струмами обмоток статора, розподілене в повітряному зазорі вздовж окружності статора і змінюється за синусоїдальним законом з періодом, рівним подвійному полюсному поділу.

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

5. Вплив вихрових струмів та гістерезису не враховується.

6. Вплив насичення сталі також не враховується.

Ці умови, хоча й є ідеальними, не становлять значного відхилення від реальності. У реальних умовах синхронний двигун зазвичай працює на вигині характеристики холостого ходу, і насичення сталі є незначним. Спеціальна форма полюсного наконечника у явнополюсній машині робить форму поля в розточуванні статора практично синусоїдальною, тобто відхилення від синусоїдальної форми згідно з нормами не перевищує 5%. Фази обмотки мають однакові параметри.

Електромеханічні перехідні процеси синхронного двигуна розраховують за системою рівнянь Парка-Горева в прямокутній координатній системі осей d, q, o, жорстко пов’язаній з ротором, записаній у відносних одиницях у системі Xad.

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

Повна система рівнянь Парка-Горева має вигляд:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = U_d - i_d \cdot r + \omega \cdot \psi_q ; \quad (2.22)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = U_q - i_q \cdot r - \omega \cdot \psi_d ; \quad (2.23)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = U_f - i_f \cdot r_f ;$$

(2.24)

$$\frac{d\psi_{ed}}{dt} = -i_{ed} \cdot r_{ed} ; \quad (2.25)$$

$$\frac{d\psi_{eq}}{dt} = -i_{eq} \cdot r_{eq} ; \quad (2.26)$$

$$\psi_d = i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{эd} x_{ad} ; \quad (2.27)$$

$$\psi_f = i_d x_{ad} + i_f x_f + i_{эd} x_{ad} ; \quad (2.28)$$

$$\psi_{эd} = i_d x_{ad} + i_f x_{ad} + i_{эd} x_{эd} ; \quad (2.29)$$

$$\psi_q = i_q x_q + i_{эq} x_{aq} ; \quad (2.30)$$

$$\psi_q = i_q x_{aq} + i_{эq} x_{эq} ; \quad (2.31)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H_j} \cdot \left(\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d - M_c \right). \quad (2.32)$$

$$\text{де } H_j = \frac{J\omega_0^3}{P_б \cdot p^2}. \quad (2.33)$$

Тут r_a, r_f, r_{ed}, r_{eq} – 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_{eq},

X_f – індуктивні опори демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осях і обмотки збудження відповідно; U_d, U_q, U_f – відносні значення напруги статора та обмотки збудження; x_d, x_q, x_f, x_{ed}, x_{eq} - відносні значення зв'язків потоків відповідно статора, обмотки збудження та демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осях; H_j – інерційна постійна ротора.

У системі рівнянь, прийнятій для моделювання, введено такі позначення:

$$k_{11} = \frac{X_f X_{эd} - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.34)$$

$$k_{12} = \frac{X_{ad}(X_f - X_{ad})}{D}; \quad (2.35)$$

$$k_{21} = \frac{X_{ad}(X_{эd} - X_{ad})}{D}; \quad (2.36)$$

$$k_{22} = \frac{X_d X_{эd} - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.37)$$

$$k_{23} = \frac{X_{ad}(X_d - X_{ad})}{D}; \quad (2.38)$$

$$k_{31} = \frac{X_{ad}(X_f - X_{ad})}{D}; \quad (2.39)$$

$$k_{32} = \frac{X_{ad}(X_d - X_{ad})}{D}; \quad (2.19)$$

$$k_{33} = \frac{X_f X_d - X_{ad}^2}{D}; \quad (2.40)$$

$$k_{41} = \frac{X_{эq}}{Q}; \quad (2.41)$$

$$k_{42} = \frac{X_{aq}}{Q}; \quad (2.42)$$

$$k_{51} = \frac{X_{aq}}{Q}; \quad (2.43)$$

$$k_{52} = \frac{X_q}{Q}; \tag{2.44}$$

$$D = X_d X_f X_{эd} - X_{ad}^2 (X_d + X_f + X_{эd}) + 2X_{ad}^3; \tag{2.45}$$

$$Q = X_q X_{эq} - X_{aq}^2. \tag{2.46}$$

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

Індуктивний опір обмотки збудження

$$x_f = x_{cf} + x_{ad}, \tag{2.47}$$

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

Індуктивний опір демпферної обмотки по поздовжній та поперечній осі

$$x_{ed} = x_{ad} + x_{ced}; \tag{2.48}$$

$$x_{eq} = x_{aq} + x_{ceq}, \tag{2.49}$$

де індуктивний опір розсіювання демпферної обмотки:

$$x_{ceq} = \frac{x_{ad}\left(x_q'' - x_c\right)}{x_{aq} - x_d'' + x_c}; \tag{2.50}$$

$$x_{ced} = \frac{x_{ad} x_f \left(x_d'' - x_c\right)}{x_{ad}\left(x_f - x_d'' + x_c\right) - x_f \left(x_d'' - x_c\right)}. \tag{2.51}$$

Активний опір контурів демпферної обмотки:

$$r_{ed} = 2\omega_0 T_d'' \left(x_{ced} + \frac{x_{ad} x_c x_f}{x_{ad} x_c + x_{ad} x_f + x_c x_f} \right); \tag{2.52}$$

$$r_{eq} = r_{ed} \frac{21}{51}. \tag{2.53}$$

Під час проведення досліджень виникла необхідність враховувати вплив мережі живлення. Це можна зробити, включивши опір мережі до рівнянь

електричного балансу статорних кіл. У цьому випадку опори, що входять до рівнянь СД, становитимуть суму опорів ліній та самої машини.

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

$$U_d = 1 - \left(R_p \cdot i_d - x_p \cdot i_q\right); \quad (2.54)$$

$$U_q = 1 - \left(R_p \cdot i_q + x_p \cdot i_d\right). \quad (2.55)$$

Зв'язок між струмами та напругами у двох системах координат виражається таким чином:

- модуль зображуючого вектора напруги

$$U^2=(U_q)^2+(U_d)^2; \quad (2.56)$$

- модуль зображуючого вектора струму

$$I^2=(I_q)^2+(I_d)^2; \quad (2.57)$$

- активна потужність

$$P=U_d I_d + U_q I_q; \quad (2.58)$$

- реактивна потужність

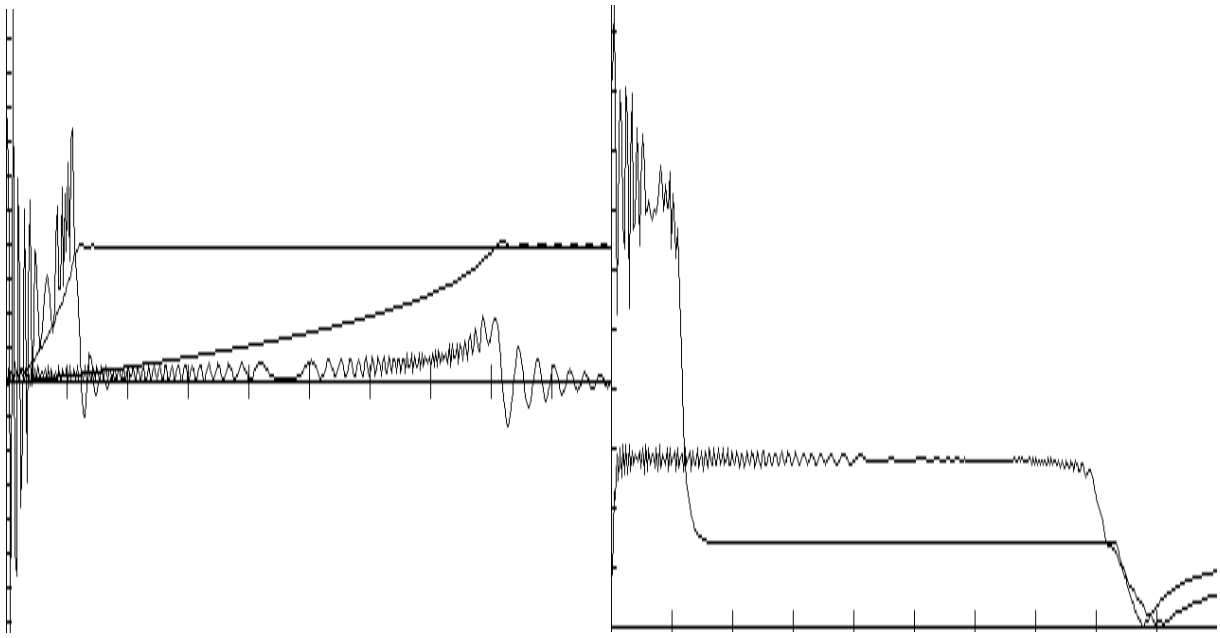
$$Q=-U_d I_q + U_q I_d \quad (2.59)$$

2.4. Дослідження режимів прямого асинхронного пуску синхронного двигуна

Для дослідження пускових режимів відповідно до наведених вище виразів і розрахунків розроблено програму мовою PASCAL. Використання програмної розробки пояснюється тим, що жоден із математичних пакетів не забезпечує всіх логічних зв’язків та умов, які мають місце під час моделювання СД. Програма для розрахунку динамічних режимів наведена в додатку А.

За допомогою розробленої програми виконано розрахунки прямого асинхронного пуску СД екскаватора ЕКГ8И без урахування живильної лінії та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

Нижче наведено діаграми пускових процесів синхронного двигуна.



а) б)

Рисунок 2.2 - Залежності швидкості та електромагнітного моменту СД (а) та модуля вектора струму статора СД (б) під час запуску без живильної лінії та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км

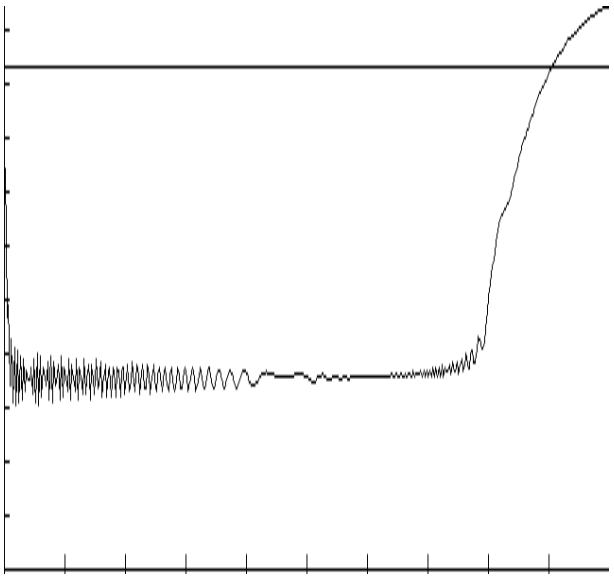


Рисунок 2.3 - Залежності модуля вектора напруги на статорі СД при прямому асинхронному пуску без лінії живлення та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км

Розрахунки режимних параметрів при прямому асинхронному запуску СД без урахування лінії живлення (припускаємо, що система електропостачання має необмежену потужність) та з її урахуванням наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Результати розрахунку параметрів прямого асинхронного запуску СД

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

2.5 Дослідження режимів полегшеного запуску СД

Другий, безпосередній, етап запуску асинхронного двигуна від систем непрямого запуску починається з моменту, коли двигун обертається з частотою, близькою до синхронної. Підключення асинхронного двигуна до мережі можна здійснити двома методами: самосинхронізацією та точною синхронізацією.

Увімкнення СД методом самосинхронізації здійснюється подачею напруги на обмотку статора при частоті обертання, близькій до синхронної, і після закінчення перехідних процесів – подачею струму збудження. При підключенні до мережі цим методом ковзання, при якому здійснюється ввімкнення, зазвичай ставлять у залежність від прискорення машини, що вмикається: чим більше прискорення, тим при більшому позитивному

ковзанні можна здійснювати ввімкнення. При цьому час перехідних процесів не більше 1,2 с.

За допомогою розробленої програми виконано розрахунки полегшеного пуску СД екскаватора ЕКГ-8И без урахування лінії живлення та з урахуванням лінії АС довжиною 5 км.

Розрахунки режимних параметрів при полегшеного запуску СД без урахування живильної лінії (припускаємо, що система електропостачання має необмежену потужність) та з урахуванням наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Результати розрахунку параметрів полегшеного запуску СД

Параметри СД під час полегшеного пуску	Прямий асинхронний пуск	
	без лінії	з лінією
Тривалість самосинхронізації, с	0.2	0.1
Кратність пускового моменту, у.о.	2.0	0.24
Кратність струму статора, у.о.	7.8	2.8
Кратність струму демпферної обмотки, у.о.	6.1	2.2
Напруга на статорі, у.о.	1.0	0.5

Наведені результати підтверджують значні переваги, створені системою полегшеного запуску.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розраховано параметри схеми заміщення системи полегшеного запуску від генератора повороту платформи, виконано розрахунки параметрів системи замкненого керування. Для приводного синхронного двигуна виконано розробку математичної моделі з урахуванням впливу довгої живлячої лінії. Виконано розрахунки прямого асинхронного пуску синхронного двигуна та розраховано процеси при самосинхронізації синхронного двигуна з підсинхронної швидкості після завершення полегшеного пуску.

Отримані результати підтверджують перспективність використання систем полегшеного пуску для підвищення надійності роботи потужних синхронних двигунів.

Розділ 3 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Характеристика системи електропостачання підприємства

Вскришні роботи на Північному кар'єрі проводяться двома комплексами №4 і №6, які підключені кабельними лініями 35 кВ.

Електроприймачі 6 кВ живляться від двох підстанцій 35/6 кВ «№2» і «№10» по по-вітряно-кабельних лініях. Кожна з підстанцій (№2 і №10) харчується по двом ВЛ 35 кВ від підстанції 150/35/6 кВ «Чкаловка». Підстанція №2 із трансформаторами ТДНС-10000/6 підключена за допомогою ВЛ 35 кВ «Північ-31» і «Північ-32». Підстанція №10 із транс-форматорами ТМ-4000/6 живляться по ВЛ «Чкаловка-31» і «Чкаловка-32».

Від підстанції №10 одержують електропостачання екскаватори ЕКГ-5А №№ 12 і 23 рудного складу, 2 КТП по 400 кВа (живильні ошатну, вузол зв'язку майстерні й висвітлення, у т.ч. 2 Дкст-10000), а також екскаватори гірського 15/90 №175 і ЕКГ-5А №37.

Від підстанції №2 одержують живлення всі приводні станції стрічкового конвеєра, відвалоутворювач A2Rs, КТП №3 і екскаватори гірської ділянки ЕШ 20/90 №128, ЕШ 10/70 №132, а також ЕКГ-5А №7 і №14.

Північний кар'єр входить у перелік об'єктів – регуляторів розвантаження енергосистеми в години ранкового й вечірнього максимуму. Дозволена потужність на час максимуму навантажень енергосистеми становить 10 Мвт.

Із цієї причини робочі зміни починаються в 8-00 і 20-00 і роторні комплекси №4 і №6 на період максимуму навантажень енергосистеми зупиняються, відповідно зупиняється стрічковий конвеєр транспортування розкривних порід, а в роботі перебувають лише екскаватори гірської ділянки, задіяні безпосередньо для видобутку залізорудної сировини.

3.2 Розрахунки електричних навантажень

Розрахунки навантажень ведеться методом коефіцієнта попиту $\mathbf{k_c}$.

Розрахункове навантаження для кожного із приймачів електроенергії:

$$P_P = k_C P_H, \text{ кВт;} \tag{3.1}$$

$$Q_P = P_P tg\varphi, \text{ кВАр;} \tag{3.2}$$

$$S_P = \sqrt{P_P{}^2 + Q_P{}^2} = \frac{P_P}{\cos\varphi}, \text{ кВа} \tag{3.3}$$

де $\mathbf{k_c}$ – коефіцієнт попиту, прийнятий по даним енергослужби кар'єру;

$\mathbf{tg\varphi}$ – відповідає $\mathbf{cos\varphi}$.

Розрахункове навантаження для приводної станції:

$$P_P = k_C P_H = 0.67 \cdot 1890 = 1266 \text{ кВт,}$$

$$Q_P = P_P tg\varphi = 1266 \cdot 1.02 = 1292 \text{ кВАр,}$$

$$S_P = \sqrt{P_P{}^2 + Q_P{}^2} = \sqrt{1266^2 + 1292^2} = 1809 \text{ кВА.}$$

Розрахунки для інших електроприймачів виконуються аналогічно. Розрахунки виконано в програмі Microsoft Excel. Усі значення занесено в таблицю 3.1.

Згідно з відомостями енергослужби кар'єру коефіцієнт $\mathbf{k_{ом}}$ одночасності максимумів навантаження за найбільш завантажену зміну може досягати значення 1.

Таблица 2.1. Електричні навантаження Північного кар’єру

Тип Електроприемника	Uном,кВ	Рном, кВт	Кс	cosφ	tgφ	Рр, кВт	Qр, квар	Sр, кВА
ПС "№10"						**2610,16**	**72,87**	**2611,18**
ЛЕП №105						**1579,72**	**-412,06**	**1632,58**
ЕКГ-8	6	1900	0,70	-0,90	-0,4843	1330,00	-644,15	1477,78
Трансформатор	6	400	0,43	0,70	1,0202	172,00	175,48	245,71
ЕКГ-5А №37	6	250	0,20	0,87	0,5667	50,00	28,34	57,47
Трансформатор	6	63	0,44	0,70	1,0202	27,72	28,28	39,60
ЛЕП №106						**495,22**	**245,20**	**552,60**
КТП №24	6	400	0,70	0,93	0,3952	280,00	110,66	301,08
ЕКГ-5А №23	6	250	0,75	0,87	0,5667	187,50	106,26	215,52
Трансформатор	6	63	0,44	0,70	1,0202	27,72	28,28	39,60
ЛЕП №108						**535,22**	**239,72**	**586,45**
КТП №4	6	400	0,80	0,95	0,3287	320,00	105,18	336,84
ЕКГ-5А №12	6	250	0,75	0,87	0,5667	187,50	106,26	215,52
Трансформатор	6	63	0,44	0,70	1,0202	27,72	28,28	39,60
ПС "№2"						**12688,54**	**8300,43**	**15162,33**
Т1						**9041,10**	**8992,12**	**12751,46**
ЛЕП №23						**2788,60**	**2775,77**	**3934,61**
Приводна станція №11	6	1890	0,67	0,70	1,0202	1266,30	1291,88	1809,00
Трансформатор	6	160	0,80	0,80	0,7500	128,00	96,00	160,00
Приводна станція №21	6	1890	0,67	0,70	1,0202	1266,30	1291,88	1809,00
Трансформатор	6	160	0,80	0,80	0,7500	128,00	96,00	160,00
ЛЕП №25						**3463,90**	**3440,58**	**4882,23**
Приводна станція №51	6	1890	0,67	0,70	1,0202	1266,30	1291,88	1809,00
Трансформатор	6	160	0,80	0,80	0,7500	128,00	96,00	160,00
Відвалоутворювач	6	3980	0,52	0,71	0,9918	2069,60	2052,70	2914,93
ЛЕП №27						**2788,60**	**2775,77**	**3934,61**
Приводна станція №31	6	1890	0,67	0,70	1,0202	1266,30	1291,88	1809,00
Трансформатор	6	160	0,80	0,80	0,7500	128,00	96,00	160,00
Приводна станція №41	6	1890	0,67	0,70	1,0202	1266,30	1291,88	1809,00
Трансформатор	6	160	0,80	0,80	0,7500	128,00	96,00	160,00
Т2						**3647,44**	**-691,69**	**3712,45**
ЛЕП №22						**1922,00**	**-672,09**	**2036,12**
ЕШ-10/70 №136	6	1900	0,70	-0,90	-0,4843	1330,00	-644,15	1477,78
Трансформатор	6	400	0,43	0,70	1,0202	172,00	175,48	245,71
ЛЕП №24						**320,00**	**105,18**	**336,84**
КТП №3	6	400	0,80	0,95	0,3287	320,00	105,18	336,84
ЛЕП №26						**215,22**	**134,54**	**253,81**
ЕКГ-5А №14	6	250	0,75	0,87	0,5667	187,50	106,26	215,52

Трансформатор	6	63	0,44	0,70	1,0202	27,72	28,28	39,60
ЛЕП №28						**1190,22**	**-259,32**	**1218,14**
ЕШ-10/70 №132	6	1250	0,70	-0,87	-0,5667	875,00	-495,89	1005,75
Трансформатор	6	250	0,40	0,70	1,0202	100,00	102,02	142,86
ЕКГ-5А №7	6	250	0,75	0,87	0,5667	187,50	106,26	215,52
Трансформатор	6	63	0,44	0,70	1,0202	27,72	28,28	39,60

3.3. Вибір числа й потужності силових трансформаторів на підстанції

Вибір числа трансформаторів на підстанції визначається керуючись надійністю забезпечення живлення споживачів.

Із трьох існуючих категорій споживачів електроенергії для перших двох необхідна установка як мінімум двох трансформаторів. В об'єкта проектування є споживачі як I, так і II категорії (про що було сказано вище, у розділі 1). При живленні об'єктів таких категорій від однієї підстанції потрібно мати в роботі два трансформатори. По стандарті ДЕРЖСТАНДАРТ 14209-69 в аварійних випадках трансформатори допускають протягом не більше 5 доби перевантаження 1,4 номінальної потужності на час максимумів навантаження, тривалістю не більше 6 годин на добу. Тому для двотрансформаторної підстанції, при відсутності резервування по мережах вторинної напруги, потужність кожного трансформатора приймається 0,7 P_{max}.

Повна потужність для вибору трансформаторів на підстанції №2:

$S_{пол.розр.}$ = 15162,33 кВ*А.

Ця потужність отримана при підсумовуванні потужностей всіх електроприймачів, підключених до підстанції №2.

Потужність трансформаторів вибирається з обліком їхньої навантажувальної здатності в післяаварійному режимі. Граничне перевантаження для трансформаторів, що не мають “складського” резерву - 30%.

$S_{н.тр.}$ = ДО 1-_2 * $К_{см}$ * $P_{розр.\Sigma}$ / ($К_{пер}$ * $cos\varphi_{пр}$) ;

$К_{1-2}$ – коефіцієнт, що враховує наявність приймачів I й II категорії;

$К_{1-2} = 0,8$.

$К_{см}$ – коефіцієнт сполучення максимумів навантаження; $К_{см} = 0, 85\text{-}0,95$.

$К_{пер}$ - коефіцієнт перегнавантаження; $К_{пер} = 1, 1\text{-}1,3$

Одержимо $S_{н.тр.} = 8138,77$ кВ*А.

З огляду на паралельну роботу трансформаторів, і те, що на кожній секції шин у нас навантаження рівна, вибираємо трансформатор, виходячи з розрахункового навантаження на одну секцію шин:

$S_{розр.} = 4069,35$ кВ*А.

Вибираємо ближній більший:

ТДНС – 6300/35, $U_{вн} = 35$ кВ; $U_{нн} = 6,3$ кВ; $\Delta P_{хх} = 8$ кВт; $\Delta P_{кз} = 46,5$ кВт;

$U_к = 7,5\%$; $I_{хх} = 0,8\%$.

Аналогічно вибираємо трансформатор на U = 0,4 кВ

$S_{розр.} = 243$ кВ*А.

Вибираємо трансформатор ТМ-250

$S_н = 250$ кВ*А; $U_{вн} = 6$ кВ; $U_{нн} = 0,4$ кВ; $\Delta P_{хх} = 0,82$ кВт; $\Delta P_{кз} = 3,7$ кВт;

$U_к = 4,5\%$; $I_{хх} = 2,3\%$.

Перевірка обраного трансформатора: при відключенні одного трансформатора, другий повинен забезпечити 75-80% навантаження.

Для нашого випадку (двотрансформаторна підстанція):

$\frac{S_{н.тр.}*100}{} = 7,7\% S_{розр.}$

Коефіцієнт завантаження трансформатора в нормальному режимі:

$К_{зг} = \frac{S_{розр.}}{} = 0,65\ 2\ S_{н.тр.}$

Обраний трансформатор задовольняє нашим умовам.

3.4. Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання виконується для:

- вибору електричних апаратів і кабелів;

- вибору засобів обмеження струмів короткого замикання;
- проектування й настроювання релейного захисту;
- визначення умов роботи споживача в аварійних режимах.

Розрахунок при U > 1кВ виконується у відносних одиницях.

Розрахункова схема й схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання зображена на рис.3.1.

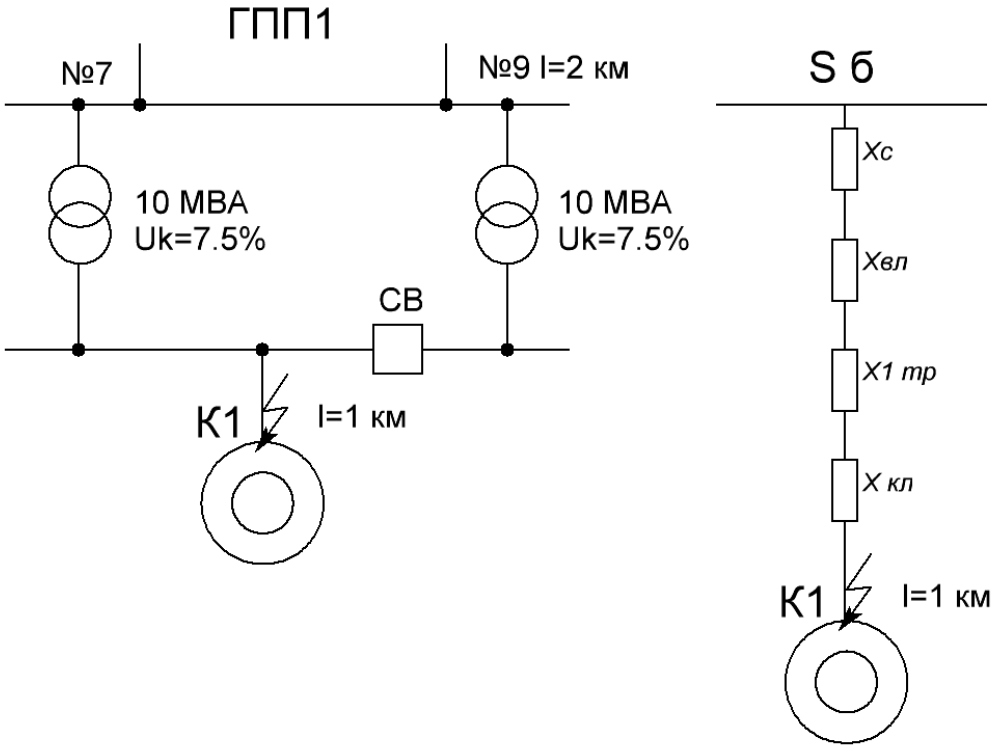


Рисунок 3.1 – Принципова схема та схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання

При розрахунку струму короткого замикання в мережах напругою вище 1 кВ активним опором зневажаємо.

Визначаємо в базисних ОЕ індуктивні опори всіх елементів $X_{*бі}$ кола до точки ДО, з урахуванням схеми з'єднання.

Перед початком розрахунку приймаємо базисну потужність $S_б = 63$ МВ*А и базисне значення напруги $U_б = 6{,}3$ кВ.

визначаємо індуктивний опір системи:

$X_{*бi} = X_i * \frac{S_б}{U_{н^2}} = 8,77 * \frac{63}{35^2} = 0,045$;

визначаємо індуктивний опір ВЛ ЛЕП 35 кВ:

$X_{*вл} = X_o * l_1 * \frac{S_б}{U_{н^2}} = 0,4 * 2 * \frac{63}{35^2} = 0,0041;$

X_o – питомий опір лінії (Ом/км);

визначаємо індуктивний опір трансформатора:

$X_{*тр} = X_{*н.тр.} * \frac{S_б}{S_{н.тр}} = \frac{U_к}{100} * \frac{S_б}{S_{н.тр}} = \frac{7,5}{100} * \frac{63}{7,3} = 0,75$;

визначаємо індуктивний опір КЛ (ВЛ)

$X_{*б.кл} = X_o * l_2 * \frac{S_б}{U_{н^2}} = 0,08 * 1 * \frac{63}{5.3^2} = 0,127$;

визначаємо сумарний реактивний опір короткозамкненого кола:

$X_{*бΣ1} = X_{*б.з} + X_{*вл} + X_{*б.тр} + X_{*б.леп} = 0,9261,$

$X_{*бΣ2} = 1,454;$

визначаємо струм короткого замикання в базисних одиницях:

$I_{*бΣ} = \frac{1}{X_{*бΣ}} = 1,0797 \ (0,697)$;

визначаємо струм короткого замикання в абсолютних одиницях:

$I_{кз} = I_{*б} * I_б = 6,231 \ (4,023)$ кА, $I_б$ – базисний струм,

$I_б = * \frac{S_б}{\sqrt{3}U_б} = 5,77$ кА ,

$I_{кз} = 0.87 * I_{нз} = 5,42$ кА (3,5 кА);

визначаємо ударний струм короткого замикання:

$I_у = \sqrt{2}K_у * I_{нз} = 15,85$ кА (7,88 кА),

$K_у = 1,8$ – ударний коефіцієнт по таблиці;

визначимо потужність короткого замикання:

$S_{кз} = \frac{S_б}{X_2} = 68$ МВ*А (44 МВ*А);

розрахунок ударного струму з урахуванням підживлення точки короткого замикання потужним двигуном:

$I_{к.дв.} = \frac{0.9}{X_{*н.дв.}} * I_{н.дв.} = 4.5\, I_{н.дв.}$,

Звідси сумарне значення ударного струму з обліком підпитки:

$I_{у\Sigma} = \sqrt{2}*(K_у * I_{кз} + 4{,}5*I_{н.дв.}) = 1{,}4K_ф* I_{кз} + 6{,}5*I_{н.дв\Sigma} = 15{,}85 + 6{,}5(4*1{,}33 +$ $+2*264 + 670\ 133)*10 = 25{,}85$ кА.

Збільшення потужності трансформаторів пов'язане з підвищенням струмів короткого замикання й лімітується розривною потужністю промислових вимикачів 6кВ.

Обмеження струму короткого замикання досягається:

установкою додаткових індуктивних опорів (реакторів);

штучний додатковий активний опір;

відмовою від паралельної роботи трансформаторів;

застосуванням трансформаторів S 2,5 МВ*А с розщепленими обмотками;

застосуванням трансформаторів з підвищеним значенням $U_к$,%.

3.5. Розрахунок залишкової напруги на статорі СД при прямому асинхронному запуску.

Екскаватор ЕКГ-8И – електромеханічний комплекс із високою встановленою потужністю електроустаткування й отримує живлення по окремій лінії. Схему електропостачання екскаватора наведено на рис. 3.2.

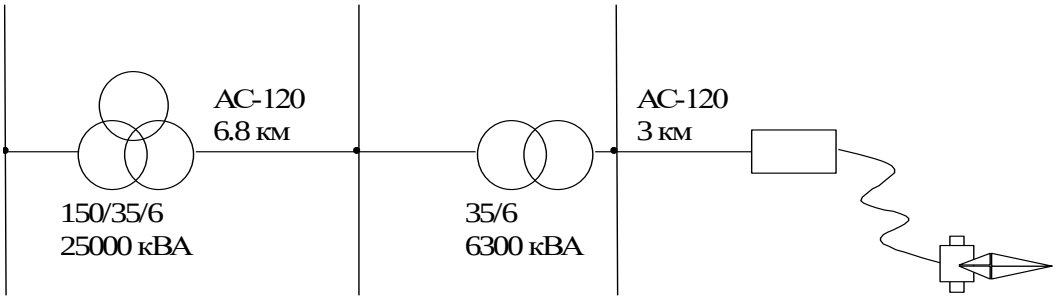


Рисунок 3.2 - Схема електропостачання екскаватора ЕКГ 8И

Оскільки у дипломному проекті розглядається розробка системи полегшеного пуску, то для обґрунтування й підтвердження висунутих положень виконаємо розрахунки по навантаженню ліній пусковими струмами й зниженню напруги при пуску СД.

Напруга на затисках СД у момент пуску може бути визначена по формулі:

$$U_n = U_1 - \Delta U_n, \tag{3.4}$$

де U_n - напруга на затисках двигуна в момент пуску;

U_1 - напруга на шинах живильного центру, до якого підключений двигун;

ΔU_n - додаткова втрата напруги від джерела живлення до затисків двигуна від пускового струму.

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

$$\Delta U_n = \sqrt{3}\left(R_n \cos(\varphi_n) + x_n \sin(\varphi_n)\right) I'_n, \tag{3.5}$$

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

I'_n - пусковий струм, в.о.;

$\cos(\varphi_n)$ і $\sin(\varphi_n)$ - значення, відповідне до пускового режиму, для СД можна прийняти $\cos(\varphi_n) = 0.35$, $\sin(\varphi_n) = 0.94$.

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

$$R_n = l \cdot r_n; \tag{3.6}$$

$$X_n = l \cdot x_n, \tag{3.7}$$

де $r_n = 0.21$ й $x_n = 0.297$ 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:

$\Delta U_n = \sqrt{3}\left(0.63 \cdot 0.35 + 0.891 \cdot 0.94\right) 112 \cdot 7 = 1436$ В.

Відносне значення зниження напруги:

$$\Delta U_n* = \frac{\Delta U_n}{U_{n.ф.}}. \quad (3.8)$$

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

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

Правила рекомендують включення мережних двигунів потужністю понад 1000 кВт виконувати через пусковий реактор. Для вибору пускового реактора одним з визначальних параметрів є його опір, величина якого може бути визначена по формулі:

$$X_p = \frac{1}{sin(\varphi_n)}\left[\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}I_n}\left(\frac{U^*_ш A^*_ш I_n}{\Delta U^*_ш}\right) - R_n\, cos(\varphi_n)\right] - X_n, \quad (3.9)$$

де X_p - індуктивний опір пускового реактора, Ом;

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

$\Delta U^*_ш$ - припустиме коливання напруги на шинах.

Індуктивний опір реактора визначається по формулі:

$$x_p\% = \frac{\sqrt{3}X_p I_{ном.р}}{U_{ном.р}} 100\%, \quad (3.10)$$

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

З урахуванням виконаних вище розрахунків:

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

Індуктивний опір реактора:

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

Обираємо до установки реактор РБАМ 6-250.

Визначимо значення коефіцієнта $A''^{*}_{ш}$ з урахуванням опору реактора:

$$A''^{*}_{ш} = \frac{\sqrt{3}\left(0.63 \cdot 0.35 + 0.94 \cdot \left(0.891 + 1.786\right)\right)7}{6000} = 0.0055 \text{ Ом/В}$$

Тепер відносне значення напруги на затискачах СД:

$$U^{*}_{ш} = \frac{U^{*}_{ш1}}{1 + I_{п} A^{*}_{ш}} = \frac{1.001}{1 + 7 * 0.0055} = 0.96 \qquad (3.11)$$

Коливання напруги на шинах при пуску через реактор:

$$\Delta U''^{*}_{ш} = 0.0055 \cdot 0.143 \cdot 0.96 \cdot 112 \cdot 7 = 0.059 < \Delta U^{*}_{ш} = 0.1$$

Реактор обраний правильно, тому що напруга не виходить за межі припустимого.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано необхідні розрахунки елементів системи електропостачання ділянки кар'єра Північного ГЗКа. Виконано розрахунки потужності за методом коефіцієнту попиту, обрано силові трансформатори. Виконано розрахунки струмів короткого замикання. Виконано перевірку залишкової напруги при прямому асинхронному запуску електропривода екскаватора ЕКГ-8И.

Висновки по роботі

У першому розділі на основі аналізу причин аварійності приводних синхронних двигунів екскаватора показано, що однією з найважливіших причин є пошкодження пускових демпферних обмоток через складні умови пуску синхронних двигунів. Розглянуто вимоги до пускових систем синхронних двигунів, наведено класифікацію пускових пристроїв.

Розглянуто технічні характеристики електромеханічного обладнання екскаватора ЕКГ-8И.

На основі аналізу складових моменту опору при рушанні синхронного двигуна екскаватора розраховано необхідну потужність пускового пристрою, яка склала 230 кВт. Для розгінного запуску синхронного двигуна можливе використання генератору повороту платформи, який має потужність 250 кВт.

Обрано перетворювальне обладнання для системи запуску синхронного двигуна.

У другому розділі розраховано параметри схеми заміщення системи полегшеного запуску від генератора повороту платформи, виконано розрахунки параметрів системи замкненого керування. Для приводного синхронного двигуна виконано розробку математичної моделі з урахуванням впливу довгої живлячої лінії. Виконано розрахунки прямого асинхронного пуску синхронного двигуна та розраховано процеси при самосинхронізації синхронного двигуна з підсинхронної швидкості після завершення полегшеного пуску.

Отримані результати підтверджують перспективність використання систем полегшеного пуску для підвищення надійності роботи потужних синхронних двигунів.

У третьому розділі виконано необхідні розрахунки елементів системи електропостачання ділянки кар’єра Північного ГЗКа. Виконано розрахунки потужності за методом коефіцієнту попиту, обрано силові трансформатори. Виконано розрахунки струмів короткого замикання. Виконано перевірку залишкової напруги при прямому асинхронному запуску електропривода екскаватора ЕКГ-8И.

Перелік використаних джерел

1. І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. – Регульований електропривод [Текст] : підручник. – Київ : Ліра-К, 2015. – 504 с.
2. О. М. Возняк – Сучасні системи електроприводів [Текст] : навчальний посібник : у 2 ч. – Вінниця : ТВОРИ, 2021. – Ч. 1. – 280 с.
3. С. П. Денисюк – Системи силової електроніки та засоби електромеханіки [Текст] : навчальний посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 120 с.
4. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001.-376 с .
5. Браславський І. Я. Енергозберігаючий асинхронний привід. - М.: AKADEMIA, 2004. – 250с.
6. Мелешин В. І. Транзисторна перетворювальна техніка. - М.: Техносфера, 2005. – 632с.
7. Широтно-імпульсна модуляція в електроприводі змінного струму [Електронний ресурс]/Пересада С.М., Король С.В. Режим доступу: http://www.el-drive.com.ua/index.php?adr=5_article_el.
8. Казачковський М. М. Комплектний електропривод. – Дніпропетровськ: НГУ, 2003. – 226 с.
9. Довідник з електричних машин: Навч. посібник для студ. освітніх установ середньої проф. освіти / Кацман М. М. - М.: "Академія"., 2005. – 480с.
10. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Луганськ: Ноулідж, 2010, с. 670.
11. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник.-Вінниця: Нова Книга,2004.-656с.:іл.
12. Закладний О.М., ПраховникА.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник.- К: Кондор,2005.-408с.

					КНУ РБ.141.26.250с.3.ДЖ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кабанець К.Д.			Перелік використаних джерел	Літ.	Арк. 60 / Аркушів
Перевір.		Титюк В.К.					
Реценз.						ЕМ гр. ЕЕМ-23ск	
Н. Контр.		Титюк В.К.					
Затверд.		Пересунько І.І.					

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма для дослідження пускових режимів СД

```
uses Crt;
Const   N=7;
      Iter=400;
      Pi=3.14159;
      Ro=2.094;
Type Mas=                              Array [0..N] of real;
     Abk=                              Array [0..6] of char;
Var  Time,Timef,Tir,tireal,tiv,
     Id,Iq,Iv,Ied,Ieq,Ia,Ib,Ic,Ir,Is,Ibaz,
     Memst,Mem,dm12,dm23,dm14,dm,
     Dd,Xd,Xed,Xf,Xad,Qq,Xq,Xeq,Xaq,Xs,Xsed,Xseq,Xsf,T2d,
     X2d,X2f,X2ed,X2df,X2ded,X2fed,X2q,X2eq,X2qeq,Xl,
     Rf,Ra,Red,Req,Rl,rr,rr_kdp,G,kos,
     Ua,Ub,Uc,Uq,Ud,Uf,Uuff,Ubaz,Uz,dud,duq,dudu,
     Wz,
     Pristep,Step,Hj1,Cct,Gct,gam,S,Q,dp                    : real;
     Swi,j,Sh,jf,Nsp                                        : integer;
     Y,F                                                    : Mas;
     Rev,Fig,Zap                                            : Abk;
     sdv1,sdv2,sdv3,sdv4,sdv5,sdv6,sdv7,sdv8,sdv9,sdv10,
     sdv11,sdv12                                       : file of real;
Procedure DU;
    Begin
        dud:=rl*id-xl*iq;
        duq:=rl*iq+xl*id;
        Ud:=cos(Time-y[7])-dud;
        Uq:=sin(Time-y[7])-duq;
        Id:=y[1]/X2d-y[3]/X2df-y[4]/X2ded;
        Iv:=-y[1]/X2df+y[3]/X2f-y[4]/X2fed;
```

```
        Ied:=-y[1]/X2ded-y[3]/X2fed+y[4]/X2ed;
        Iq:=y[2]/X2q-y[5]/X2qeq;
        Ieq:=-y[2]/X2qeq+y[5]/X2eq;
        f[1]:=Ud+y[6]*y[2]-Ra*Id;
        f[2]:=Uq-y[6]*y[1]-Ra*Iq;
        f[3]:=Uf-Iv*Rf;
        f[4]:=-Red*Ied;
        f[5]:=-Req*Ieq;
        Mem:=y[1]*Iq-y[2]*Id;
        if y[6]>=0 then Memst:=0.1 else Memst:=-0.1;
        f[6]:=(Mem-Memst/5)/Hj1;
        f[7]:=y[6];
    end;
Procedure Vozb;
    Begin;
        Uf:=Uuff;
        Rf:=Rf/8;
        jf:=1;
    End;
Procedure Parametr;
    Begin;
        Ubaz:=3464*sqrt(2);
        Ibaz:=112*sqrt(2);
        Ra:=0.0396*Ibaz/Ubaz;
        Rf:=8*0.00238;
        rl:=5*0.001;
        xl:=5*0.05;
        Hj1:=150;
        Xd:=1.505;
        Xq:=0.829;
        Xs:=0.133;
        T2d:=0.01635;
        X2d:=0.183;
```

```
        Xad:=Xd-Xs;
        Xsf:=0.2046;
        Xaq:=Xq-Xs;
        Xf:=Xsf+Xad;
        X2q:=0.1837;
        Xseq:=Xaq*(X2q-Xs)/(Xaq-X2d+Xs);
        Xsed:=Xad*Xf*(X2d-Xs)/(Xad*(Xf-X2d+Xs)-Xf*(X2d-Xs));
        Xed:=Xad+Xsed;
        Xeq:=Xaq+Xseq;
        Red:=(Xsed+Xad*Xs*Xf/(Xad*Xs+Xad*Xf+Xs*Xf))/(100*Pi*T2d);
        Req:=Red*21/51;
        Dd:=Xd*Xf*Xed-Xad*Xad*(Xd+Xf+Xed)+2*Xad*Xad*Xad;
        Qq:=Xq*Xeq-Xaq*Xaq;
        X2d:=Dd/(Xf*Xed-Xad*Xad);
        X2f:=Dd/(Xd*Xed-Xad*Xad);
        X2ed:=Dd/(Xd*Xf-Xad*Xad);
        X2df:=Dd/(Xed*Xad-Xad*Xad);
        X2ded:=Dd/(Xf*Xad-Xad*Xad);
        X2fed:=Dd/(Xd*Xad-Xad*Xad);
        X2q:=Qq/Xeq;
        X2eq:=Qq/Xq;
        X2qeq:=Qq/Xaq;
    End;
Procedure Faza;
    Begin
        Ia:=(Id*cos(y[7])-Iq*sin(y[7]))/1.4142;
        Ir:=sqrt(sqr(Ied)+sqr(Ieq))/1.4142;
        Is:=sqrt(sqr(Id)+sqr(Iq))/1.4142;
        Ua:=(Ud*cos(y[7])-Uq*sin(y[7]));
        dUdu:=sqrt(Ud*Ud+Uq*Uq);

    End;
Procedure Intro;
```

```
    Begin
write('step=');        read(step);
write('pristep=');    read(pristep);
write('Uf=');          read(Uuff);
         tiv:=1;
        nsp:=1;
        if Nsp=1 then
                    begin
                        y[1]:=0.000001;
                        y[2]:=0.000001;
                        y[3]:=0.000001;
                        y[4]:=0.000001;
                        y[5]:=0.000001;
                        y[6]:=1;
                        y[7]:=0.000001;
                    end;
        if Nsp=0 then for j:=1 to N do y[j]:=0;
    End;
Procedure Down;
    Begin
      assign(sdv1,'mem.das'); rewrite(sdv1);
      assign(sdv8,'w1.das'); rewrite(sdv8);
      assign(sdv3,'is.das'); rewrite(sdv3);
      assign(sdv4,'ir.das'); rewrite(sdv4);
      assign(sdv6,'dudu.das'); rewrite(sdv6);
      assign(sdv7,'ia.das'); rewrite(sdv7);
     end;
Procedure Draw;
    Begin
        gotoxy(3,3);
        writeln(Sh,'   ',Time:3:3,'   Time ',Time/314:4:5);
        writeln('M=',Mem:2:3,' W=',y[6]:2:3,' i=',is:3:3);
                            tireal:=time/314;
```

```
                        write(sdv1,Tireal,Mem);
                        write(sdv8,Tireal,y[6]);
                        write(sdv3,Tireal,is);
                        write(sdv4,Tireal,ir);
                        write(sdv6,Tireal,dudu);
                        write(sdv7,Tireal,ia);

    End;
Procedure Dr;
    Begin
         for j:=1 to N do writeln('y[',j,']:=',y[j]:2:3);
    end;
Procedure Clodk;
    Begin
      Close(sdv1); Close(sdv8); Close(sdv3);
      Close(sdv4); Close(sdv6); Close(sdv7);
    end;
Procedure RK4(Var f,y:Mas; Var T:real; H:real);
    Var K,W : array [0..N] of real;
        U:real;
        J:integer;
    Begin
        for j:=1 to N do W[j]:=Y[j];
        DU;
        for j:=1 to N do
             begin
                 U:=H*F[j]; K[j]:=U; Y[j]:=W[j]+U/2; end;
        T:=T+H/2;
        DU;
        for j:=1 to N do
             begin
                 U:=H*F[j]; K[j]:=K[j]+U*2; Y[j]:=W[j]+U/2; end;
        DU;
```

```
        for j:=1 to N do
             begin
                 U:=H*F[j]; K[j]:=K[j]+2*U; Y[j]:=W[j]+U; end;
        T:=T+H/2;
        DU;
        for j:=1 to N do
             begin
                 Y[j]:=W[j]+(K[j]+H*F[j])/6; W[j]:=Y[j]; end;
    End;
Begin
    Sh:=0; Swi:=1; Uf:=0; jf:=0;
         Intro;
         Parametr;
         Down;
         ClrScr;
         While Sh<Iter do
              begin
                  RK4(F,Y,Time,Step);
                  Faza;
                  if Time>=Swi*Pristep then
                      begin
                          Draw;
                          Swi:=Swi+1;
                          Sh:=Sh+1;
                          if jf=0 then if tireal>tiv then vozb;
                      end;
         end;
         Clodk;
         Dr;
    End.
```