

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:

Обґрунтування режимів роботи електропривода конвеєра ПрАТ «ІнГЗК» та розробка проєкту модернізації системи управління спільною роботою приводних двигунів

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-20

Віталій ПОЛЯНСЬКИЙ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет електротехнічний Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

В.о. зав. кафедри ЕПЕМ,
доктор техн. наук,
професор **В.П. Щокін**

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКОВУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Полянський Віталій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Обґрунтування режимів роботи електропривода конвеєра ПрАТ «ІнГЗК» та розробка проєкту модернізації системи управління спільною роботою приводних двигунів

Проектно-конструкторська розробка: _____

затверджена наказом по ДВНЗ «Криворізькому національному університету» від « ____ » _____ 2024 р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Керівник випускової роботи

Наук. ступінь та вч. звання

ПІБ

Підпис

« ____ » _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК

виконання випускової роботи

студентом Полянським Віталієм Вікторовичем
/прізвище, ініціали/

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Загальна частина		
2.	Спеціальна частина		
4.	Проектно-конструкторська розробка		
7.	Підготовка графічного матеріалу		

Результати атестації:

I атестація _____
Оцінка _____ Дата _____

II атестація _____
Оцінка _____ Дата _____

Студент _____
/підпис/

Зміст

Вступ.....	12
1. Короткі теоретичні відомості	13
1. Аналіз технологічного процесу і технологічного обладнання	13
1.1. Опис технологічного процесу дозатора безперервної дії.....	19
2. Розрахунок потужності електродвигуна і його вибір з каталогу. Визначення вигідного передавального відношення редуктора.....	21
2.1. Побудова тахограми і схеми навантаження виробничого механізму. Технічне завдання	21
2.2. Тривалість включення	22
2.3. Приведення опору двигуна	24
2.4. Вибір перетворювального пристрою для системи регульованого електроприводу	27
Розрахунок та вибір основних силових елементів системи регульованого електроприводу	28
2.5. Вибір додаткових резисторів для щаблів регулювання.....	28
2.6. Вибір діодів.....	30
2.7. Вибір згладжуючого дроселя.....	31
2.8. Вибір транзистора для транзисторного ключа.....	31
3. Тепловий розрахунок напівпровідникових приладів.....	31
4. Розрахунок та побудова електромеханічних та механічних характеристик електропривода для заданого діапазона регулювання	35
4.1. Розрахунок та побудова механічних характеристик	35
4.2. Розрахунок та побудова електромеханічних характеристик.....	36
4.3. Розрахунок гальмівних режимів.....	37
5. Розрахунок механічних перехідних процесів за цикл роботи.....	39
6. Розрахунок механічних перехідних процесів без урахування пружних зв'язків.....	39
7. Розрахунок електромеханічних перехідних характеристик $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ при пуску, накиданні та скиданні навантаження при лінійній зміні завдання.....	41
8. Моделювання електроприводу стрічкового конвеєра в комп'ютерному середовищі matlab 2013a.....	44

8.1. Система управління стрічкового конвеєра на базі IP - АТ	44
8.2. Пуск ЕП на холостому ході.....	46
8.3. Пуск ЕП під навантаженням	48
8.4. Цикл роботи ЕП стрічкового конвеєра	50
9. Енергетика асинхронного електроприводу	53
10. Розрахунок надійності системи	54
11. Розрахунок параметрів структурної схеми	56
11.1. Складання структурної схеми регульованого електроприводу	56
11.2. Розрахунок коефіцієнтів посилення та постійних часу системи	56
12. Розробка функціональної схеми системи регульованого електроприводу	59
13. Розрахунок каналів вимірювання координат електроприводу	60
13.1. Розрахунок каналу вимірювання струму.....	62
13.2. Розрахунок каналу вимірювання швидкості	63
13.3. Розрахунок та вибір драйверів силових ключів.....	64
14. Вибір апаратури управління та захисту	66
15. Вибір мережевого фільтра.....	67
16. Фінансовий менеджмент, ресурсоефективність та ресурсозбереження ..	68
17.1. Аналіз конкурентних технічних рішень	68
17.2. Планування науково-дослідних робіт.....	69
17. Визначення трудомісткості виконання робіт	70
18. Бюджет науково – технічного проектування (НТП)	74
Висновок по розділу «фінансовий менеджмент, ресурсоефективність та ресурсозбереження».....	76
19. Соціальна відповідальність	78
19.1. Вступ	78
19.2. Аналіз шкідливих факторів.....	78
19.2.1. Шум	79
19.2.2. Нестача природного світла	80
19.2.3. Мікроклімат.....	81
19.2.4. Метеорологічні умови	82
19.3. Аналіз небезпечних факторів.....	84
19.3.1. Механічна небезпека	85

19.3.2. Електроураження	86
19.3.3. Загоряння (пожежа)	86
19.4. Система поводження з різними видами відходів.....	87
19.5. Пожежа (загоряння) – як джерело надзвичайної ситуації	89
19.6. Електроураження як джерело надзвичайної ситуації	90
Висновок.....	92
Список літератури	93
Додаток А	95
Додаток Б.....	97
Додаток В	98
Додаток Г.....	99
Додаток Д.....	101
Додаток Е	102
Додаток Ж	106

Реферат

Ключові слова: стрічковий конвеєр, імпульсне керування, асинхронний двигун з фазним ротором, електропривод змінного струму, механічні та електромеханічні характеристики, система управління.

Об'єктом проектування є імпульсне регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з фазним ротором.

Метою роботи є розробка електроприводу стрічкового конвеєра, заснованого на системі IR-AD. Забезпечити роботу двигуна на двох швидкостях.

У підсумковій кваліфікаційній роботі був виконаний розрахунок і вибір приводного електродвигуна і обраний редуктор. Побудовані його електромеханічні та механічні характеристики, розраховані механічні перехідні процеси для циклу роботи, обрані основні силові елементи системи керування електроприводом, розраховані та побудовані електромеханічні та механічні характеристики при пуску навантаження та скиданні навантаження, розраховані енергетичні показники електроприводу, розрахована надійність системи. Електропривод був змодельований в програмному середовищі MatLab 2013a. Далі були розраховані параметри структурної схеми, розроблена функціональна схема регульованої системи електроприводу, виконаний розрахунок каналів вимірювання координат електроприводу, підібрані прилади систем управління і захисту.

Також в дипломній роботі, згідно з отриманим завданням, виконувалася робота над розділом «Фінансовий менеджмент, ресурсоефективність та ресурсозбереження» та розділом «Соціальна відповідальність».

Випускна кваліфікаційна робота виконується в текстовому редакторі Microsoft Word 2013 на папері формату А4, з використанням програм: MathCAD 2013, пакет MATLAB 2013a, Microsoft Visio 2013, MathType.

Вступ

Електропривід - це електромеханічна система перетворення електричної енергії в механічну і приводу виконавчих органів робочих машин і контролю руху при виконанні технологічного процесу.

Проблема регулювання швидкості машин і механізмів з метою економії електроенергії вирішується в останні десятиліття в основному за допомогою регульованих електроприводів. Переважали регульовані електроприводи постійного струму, в даний час їх повсюдно замінюють регульованими електроприводами змінного струму, з асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором. Пояснюється це досягненнями мікроелектроніки, які дозволяють реалізувати досить складні алгоритми управління двигуном змінного струму, який перевершує двигун постійного струму по надійності, вазі, габаритам і вартості, при невеликих апаратних витратах.

Метою даного ВРК є проектування регульованого електроприводу стрічкового конвеєра на основі асинхронного двигуна з фазним ротором. Регулювання оборотів двигуна здійснюється імпульсною зміною опору ланцюга ротора, за допомогою імпульсного перетворювача, основою якого є транзисторний перемикач, підключений паралельно з додатковим опором в ланцюзі випрямленого струму ротора. Цей спосіб регулювання швидкості електроприводу схожий з реостатним регулюванням, але не вимагає установки реостатів в кожній фазі ротора.

1. Короткі теоретичні відомості

1.1. Аналіз технологічного процесу і технологічного обладнання

У якості об'єкта проектування був обраний найпоширеніший тип конвеєрів - стрічковий, використовуваний для транспортування сипучого матеріалу.

«Стрічковий конвеєр - це пристрій безперервного транспортування з робочим органом у вигляді стрічки. Конвеєр дозволяє доставити штучні вантажі і матеріали з сипучими або кусковими конструкціями до потрібного об'єкта. Застосовується в промисловому виробництві, в доменних цехах металургійних заводів, на теплових електростанціях, в шахтах і рудниках, в сільському господарстві. Часто стрічковий конвеєр є однією з частин транспортного пристрою. [1, стор.85]

Продуктивність конвеєрів вимірюється в кубічних метрах вантажів, що перевозяться на годину. Довжина конвеєра для різних завдань від 1-2м до 2-4км (для однієї машини).

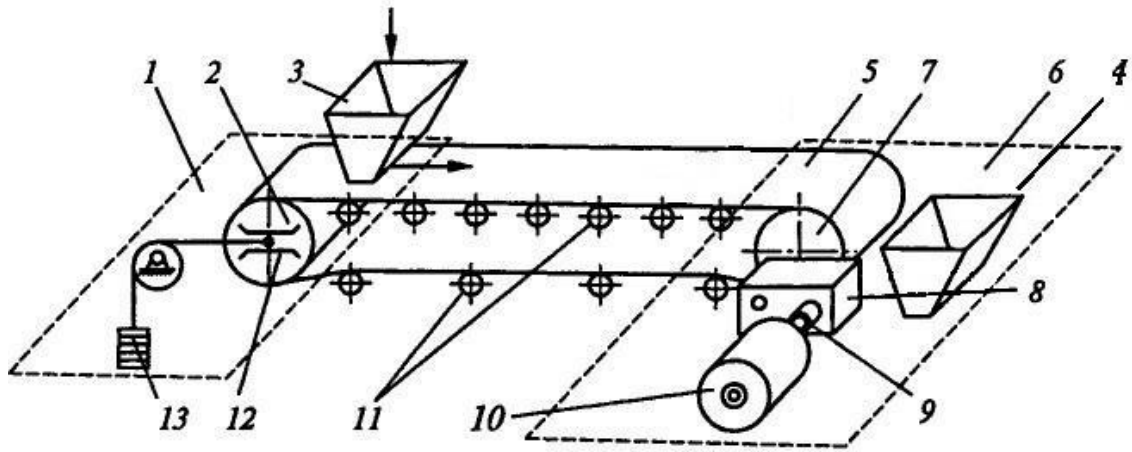
Існують конвеєрні стрічки, які переміщують вантажі з різною швидкістю, від 0, 5 до 8 м / с. Вибір стрічки залежить від тих параметрів, які необхідні для транспортування конкретного виду вантажу. Таким чином, враховується ступінь тертя об стрічку, швидкість і спосіб завантаження конвеєра, а також кут його нахилу.

Переваги стрічкових конвеєрів перед іншими способами транспортування:

1. Висока ефективність і продуктивність промислових процесів за рахунок значної швидкості переміщення стрічки;
2. Споживання невеликої кількості енергії;
3. Проста і надійна конструкція.

Транспортування штучних вантажів зазвичай здійснюється на конвеєрах з гладкими стрічками. При невеликих навантаженнях і сипучих матеріалах можливе переміщення по стрічці з рифленою базовою конструкцією. Саме такий тип пристрою стрічкового конвеєра забезпечує максимальний ККД. Вантаж, що перевозиться, може переміщатися під нахилом до 45° за рахунок поперечно встановлених перегородок. Ефективна робота підприємства можлива завдяки наявності конвеєрів з різними типами стрічок: гумово-тканинними, брезентовими, сітчастими, спеціальними харчовими.

На малюнку 1 (а - б) зображено пристрій стрічкового конвеєра і кінематична схема (дозатора зважування).

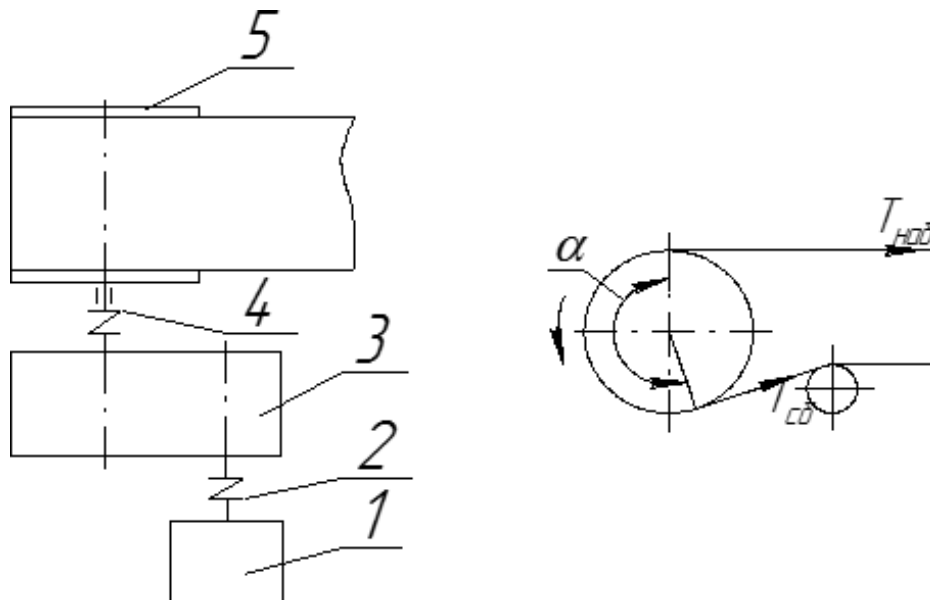


Мал. 1а – Пристрій стрічкового конвеєра (дозатора зважування)

Гнучкий ремінь 5 розташований між барабанами 2 і 7 натягу 1 і приводом 6 станції. Барабан 2, під дією вантажу 13, створює попереднє натяг ремня. Вісь барабана 2 може переміщатися в напрямних 12. Передача тягового зусилля від барабана приводної станції без пробуксовки забезпечує натяг ремня.

Підтримуючі ролики 11 встановлюються уздовж траси, щоб позбутися від провисання нижнього холостого ходу і верхньої робочої частини стрічки. Через редуктор 8 барабан приводної станції з'єднується з двигуном 10.

«Вали двигуна і коробки передач з'єднані пружною муфтою 9 для згладжування можливих ударів під час запуску і гальмування конвеєра. Через вантажну воронку вантаж, що перевозиться, подається на стрічку 3 і вивантажується на контрольну вагу 4. [2]

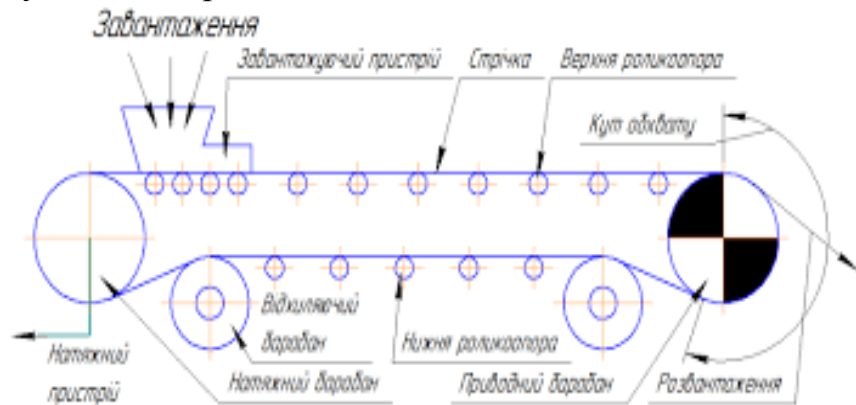


Мал. 1б – Кінематична схема стрічкового конвеєра

(привід складається з: 1 - двигуна з фазним ротором, 2,4 - муфти, 3 - редуктора, 5 - барабана)

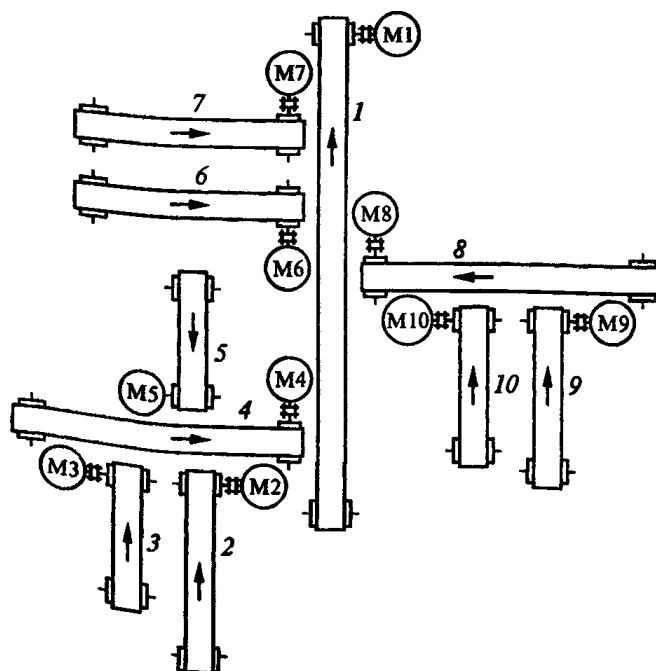
Стрічкові конвеєри мають два типи приводів: однобарабанні і багатобарабанні. Привід може стояти з правого або лівого боку конвеєра.

На малюнку 2 представлена схема завантаження і розвантаження сипучого матеріалу на конвеєр.



Мал. 2 – Схема завантаження і розвантаження сипучих речовин на Конвеєр

«У більшості випадків у виробничому процесі задіяна група конвеєрів, об'єднаних загальним технологічним циклом в єдину потоково-транспортну систему (ПТС), наприклад, процес сумішоутворення в металургійному виробництві (малюнок 3). У фургоні ОВ конвеєри можуть утворювати кілька паралельних (конвеєри 2 і 3, 6 і 7, 9 і 10) або послідовних (5, 4 і 1) ланцюгів. При цьому рух тягнучих органів конвеєрів має бути строго узгодженим, інакше може статися порушення технологічного процесу, що призведе до зниження якості продукції, що випускається. Щоб цього уникнути, двигуни конвеєра запускають в суворій послідовності, протилежно напрямку руху вантажу, а зупинка лінії починається з відключення конвеєрного двигуна, з якого вантаж надходить на наступні конвеєри.



Мал. 3 – Потоково-транспортна система

У приводах похилих стрічкових конвеєрів використовуються зупинки і гальма для захисту стрічки від мимовільного реверсного руху під впливом сили тяжіння вантажу при вимкненому приводному електродвигуні. Також на похилих ділянках траси розміщуються стрічкові уловлювачі на випадок її поломки. [3]

«Електроприводи з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором обмежені потужністю в кілька сотень кіловат. Введення двигунів з більшою потужністю призводить до зниження коефіцієнта потужності мережі електроприводу, а крім того, до великого падіння напруги в мережі при пуску стрічкового конвеєра.

Для більш потужних установок використовуються синхронні двигуни, що дає можливість підвищити енергетичні показники електроприводу. Проте приводи великої потужності (наприклад, великі стрічкові і канатні конвеєри) мають велику механічну інерцію і характеризуються важким тривалим пуском, що досягає 30 - 100 с. В цьому випадку пуск може викликати велике перевищення температури синхронного двигуна і зниження напруги мережі при відносно тривалому часі прискорення приводу. Незважаючи на це, синхронні двигуни не знайшли широкого поширення в якості приводу конвеєрних установок, хоча і мають ряд переваг.

Раніше проблема запуску потужних конвеєрів вирішувалася за рахунок використання асинхронних двигунів з фазним ротором. Вони забезпечують формування необхідної пускової характеристики і обмеження пускових струмів приводу. В установках потужністю понад 1000 кВт бажано використовувати дво- або трьохмоторний привід. [5, с.393]

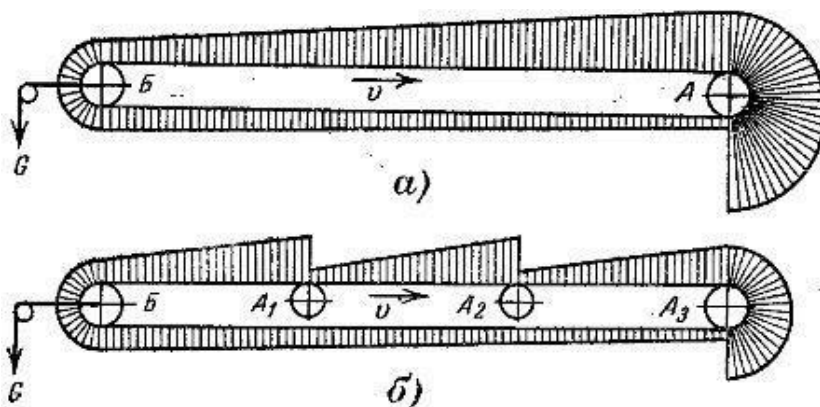
Регулювання оборотів двигуна здійснюється імпульсною зміною опору ланцюга ротора, за допомогою імпульсного перетворювача, основою якого є транзисторний перемикач, підключений паралельно з додатковим опором в ланцюзі випрямленого струму ротора. Цей спосіб регулювання швидкості електроприводу схожий з реостатним регулюванням, але не вимагає установки реостатів в кожній фазі ротора.

Використання ІЧ в складі системи управління електроприводом дозволяє забезпечити плавний пуск і зупинку двигуна (що збільшує його ресурс і зменшує вплив запуску двигуна на електричну мережу за рахунок обмеження стрибків струму і перепадів напруги в мережі), захищає його від крутного моменту і струму перевантаження, дозволяє плавно регулювати швидкість в робочому діапазоні і запам'ятовує довільний набір швидкостей для швидкого перемикавання між ними.

Відмінною особливістю конвеєрів є великий статичний момент опору спокою, який зазвичай перевищує номінальний в результаті різних факторів, наприклад, таких як застигання мастила в труться деталях. При цьому на електропривод конвеєрів пред'являються вимоги високої надійності, простоти обслуговування, а також забезпечення високого пускового моменту.

«Безперервний, односпрямований характер роботи розглянутого механізму визначає тривалий режим роботи електроприводу, який є нереверсивним. У деяких випадках, наприклад, при роботі конвеєрної установки на ухилі, електропривод повинен працювати як в моторному, так і в гальмівному режимах. [3]

Якщо на стрічковому конвеєрі використовується кілька приводних станцій, то місце їх установки вибирається за схемою тягового зусилля таким чином, щоб тягове зусилля двигунів декількох станцій приблизно дорівнювало силі одномоторного електроприводу (малюнок 4).



Мал. 4 – Схема тягових зусиль стрічкового конвеєра: а - з однодвигунним електроприводом; б - з багатомоторним двигуном електропривод

Якщо на стрічковому конвеєрі встановити кілька приводних станцій, то це забезпечить збільшення продуктивності багатодвигунного електроприводу. Це пов'язано з тим, що запуск багатомоторного конвеєра на холостих обертах може бути здійснений з використанням тільки одного двигуна. Далі, зі збільшенням навантаження, включаються наступні двигуни. При зниженні навантаження частина моторів може бути заглушена. Ці зміни скорочують час роботи двигунів з меншим навантаженням і підвищують їх продуктивність. Спільний запуск всіх двигунів здійснюється для забезпечення високого пускового моменту, наприклад, при збільшенні статичного крутного моменту за рахунок затвердіння мастила або при блокуванні конвеєра транспортується матеріалом.

При виборі системи управління електроприводом стрічкового конвеєра важливу роль відіграє правильний розрахунок пружних деформацій тягового органу і прискорень, які виникають при перехідних процесах. Основним фактором, що визначає статичне навантаження конвеєра, є сила тертя, яка виникає між несучим пристроєм (ролики, монорейки, канати і т. Д.) і тяговим елементом (стрічкою, ланцюгом і т. Д.). Сили тертя виникають в місцях зіткнення роликів і роликів з опорою, в підшипниках обертових елементів, тягового елемента під час його вигинів. Завдяки великій кількості рухомих елементів і великій довжині конвеєра ці сили складають основну частину загального статичного навантаження. А для горизонтальних конвеєрів визначають все статичне навантаження приводу.

Сили тертя в спокої значно перевищують сили тертя під час руху конвеєра, тому конвеєрні установки характеризуються підвищеними пусковими моментами, які в зовнішніх установках додатково збільшуються взимку.

$$F_{дин} = \sum_{i=1}^n m_i a_n + (J_{дв} i_p^2 + J_n) \frac{a_n}{R_n^2},$$

Динамічні навантаження приводу конвеєра виникають в процесі пуску і визначаються рухомими масами самого конвеєра і його приводної станції:

де: $F_{дин}$ - динамічна сила на контурі приводного елемента радіусом R_n ; m_i - маса рухомих елементів одного прямолінійного перетину в сукупності з масою рухомих елементів попереднього згинального перетину; $J_{дв}$, J_n - моменти інерції двигуна і приводного елемента; i_p - передавальне число коробки передач приводної станції; $АП$ - прискорення конвеєра при пуску.

«Для важких конвеєрів динамічна сила, обумовлена великою масою поступально рухомих елементів, може бути значною і значно перевищувати статичну силу опору. При цьому доданок, викликаний масою поступально рухомих елементів, може становити 90% і більше від результуючої динамічної сили. Тривалі пуски конвеєрів рідкісні і, як правило, простоюють. [2, С.384]

Приводний електродвигун ланцюгових конвеєрів повинен розташовуватися, як правило, після ділянки з найбільшим навантаженням, тобто ділянкою траси з великою кількістю навантажень і крутими підйомами і поворотами. Зазвичай, виходячи з цієї рекомендації, двигун розташовується в найвищій точці підйому. [3]

Режим роботи приводних електродвигунів конвеєрів безперервний з рідкісними пусками і зупинками при діапазоні регулювання швидкості, що не перевищує 1: 2, 1: 3. [5]

Для загального випадку конвеєрної траси зі складною конфігурацією не представляється можливим заздалегідь визначити однозначно оптимальне розташування приводу. Тому розглядається кілька варіантів розташування приводної станції.

«Привід повинен бути встановлений в кінці робочої секції, що дозволяє вивантажити подальшу холосту гілку конвеєра від високих натягів робочої зони. Розмістивши привід в кінці найважчої секції, можна значно знизити максимальний натяг в наступних робочих секціях. Розміщення приводу перед найдовшою холостий гілкою дозволяє знизити середню напругу по трасі. Для конвеєрів, що працюють на спуску вантажів в гальмівному режимі роботи приводу, останній встановлюється на початку робочої секції уздовж тягового елемента.

Для конвеєрних ліній значної довжини і з великою кількістю важких робочих зон може виявитися, що навіть оптимальне розташування приводної станції на трасі не знижує максимальну напругу до прийняттого рівня. В цьому випадку односекційний конвеєр замінюється багатосекційним конвеєром або на тяговому елементі встановлюються

кілька приводних станцій». [5, С.385]

«Найбільш важкий режим коливань виникає при запуску стрічкових конвеєрів довжиною в кілька тисяч метрів, що використовуються при видобутку корисних копалин відкритим способом. При запуску таких конвеєрів враховується швидкість поширення пружних коливань уздовж тягового елемента. Якщо час пуску двигуна менше часу поширення пружної хвилі від приводного елемента до натяжного елемента, двигун встигає придбати повну робочу швидкість, а хвостовий кінець тягового елемента все одно залишається Фіксована. Це означає, що коли пружна хвиля досягає кінця конвеєра, на його хвостові елементи подається імпульс повної робочої швидкості. Виникає еластичний удар, схожий на ривок при виборі провисання каната приводом підйому крана. Пружна хвиля, відбиваючись, повертається до приводного елемента. З метою ослаблення удару пружності і зменшення поширюється швидкісний імпульс, в таких конвеєрних лініях використовують пуск на попередній зниженій швидкості і вже з цієї швидкості стартують на повній робочій швидкості. [5, стор. 388]

Основними причинами виходу з ладу конвеєрів і супутнього обладнання є потрапляння в них металевих предметів, які викликають пориви і порізи стрічки, спуск стрічки, збільшення просипання, засмічення завантажувальних і розвантажувальних пристроїв.

1.2. Опис технологічного процесу дозатора безперервної дії

Дозатори безперервної дії призначені для безперервного автоматичного зважування сипучих матеріалів в різних системах управління технологічним процесом.

У технології сипучі матеріали включають матеріали, які можна транспортувати і зберігати насипом. Термін «сипучі» матеріали використовується для більшості матеріалів, що складаються з частинок певних розмірів: пилоподібних, порошкоподібних, зернистих і грудкуватих. Обсяг сипучого матеріалу складається з обсягів твердих частинок, що контактують з різними формами і розмірами і пустот між ними, заповнених повітрям або водою. Частинки, що утворюють структуру (скелет) сипучого матеріалу, мають різне співвідношення один з одним в залежності від розмірів частинок, їх форми, вологості та інших факторів. Як правило, більшість сипучих матеріалів мають складний фракційний склад і являють собою сукупність частинок з випадковим невпорядкованим розташуванням. Дозуванням називають процес дозування заданих кількостей речовин технологічними пристроями для змішування або подальшої переробки, а також упаковки матеріалів в тару.

Стрічковий конвеєр отримує рух через редуктор від приводу з двигуном змінного струму. Матеріал, що подається на підйомну машину частину конвеєра, стрічка переміщається в зону зважування. У ділянці зважування навантаження матеріалу сприймається навантажувачем і перетворюється тензодатчиком в пропорційний електричний сигнал.

Датчик рівня матеріалу призначений для сигналізації про наявність

матеріалу в формувальній воронці. Залежно від версії дозатора використовується ваговий або мембранний датчик. Принцип роботи датчика заснований на властивості матеріалів чинити тиск на стінки і дно бункера.

Комплект електрообладнання складається з шафи управління, стенду приладів, перетворювача, аварійного вимикача, операторської станції.

Електрообладнання призначене для перетворення сигналу тензодатчиків і датчика швидкості вагового конвеєра в сигнал, пропорційний миттєвому виконанню з урахуванням загальної ваги виданого матеріалу, а також автоматичного регулювання і підтримки заданої продуктивності.

Двигун приводу конвеєра, датчики і кінцеві вимикачі розташовані на роздавальному конвеєрі. Апаратура захисту і комутації, а також регулятор імпульсів розташовані в шафі управління, апаратура вимірювання, регулювання, управління та сигналізації - в стійці приладів.

Електрообладнання включає в себе вторинний пристрій, встановлений в стійці приладів, що інтегрує ПВІ, який фіксує загальну масу матеріалу, а також регулюючі пости управління і аварійний вимикач.

Завдання контролю полягає в підтримці постійної працездатності дозатора в межах допустимої похибки.

Маса речовини, що рухається по конвеєрній стрічці:

$$M = dm \nu T, (1)$$

де dm — маса, що припадає на одиницю довжини, фіксована тензодатчиком, за винятком маси стрічки під ним, кг/м; ν — швидкість стрічки, м/с; T — періодичність аналізу продуктивності дозатора, с.

Потужність конвеєра:

$$Q = \frac{Q_{mp}}{\gamma} \quad (\text{м}^3/\text{час}) (2)$$

де: Q_{mp} - необхідна продуктивність (кг/год),
 γ – щільність сипучого матеріалу (кг/м³).

Потужність дозатора можна регулювати швидкістю руху стрічки або значенням dm , а також цими параметрами одночасно. Для цього система управління постійно опитує тензодатчик в циклі і фіксує значення dm , після чого на підставі формули (2) розраховується швидкість, яка встановлюється на привід.

**2. Розрахунок потужності електродвигуна і її підбір з каталогу.
Визначення вигідного передавального числа коробки передач**

2.1. Побудова тахограми і схеми навантаження виробничого механізму. Технічне завдання.

Технічне завдання:

Частота обертів механізму на першому ступені: $n_1 = 50 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$

Час роботи на першому ступені: $t_1 = 24 \text{ с}$

Частота обертів механізму на другому ступені: $n_2 = 25 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$

Час роботи на другому ступені: $t_2 = 16 \text{ с}$

Час паузи: $t_{\text{п}} = 40 \text{ с}$

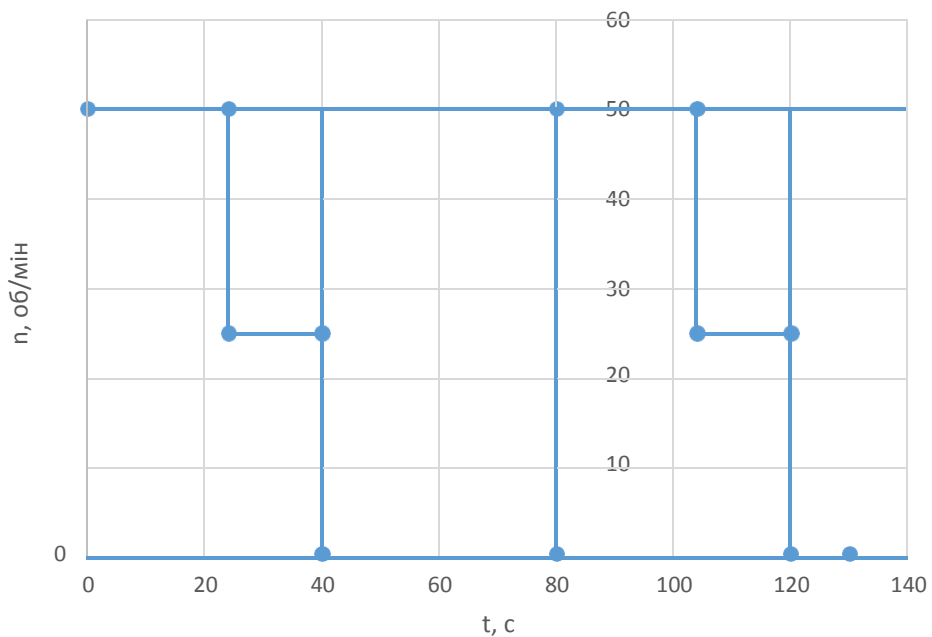
Момент механізму: $800 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Характер навантаження: реактивна

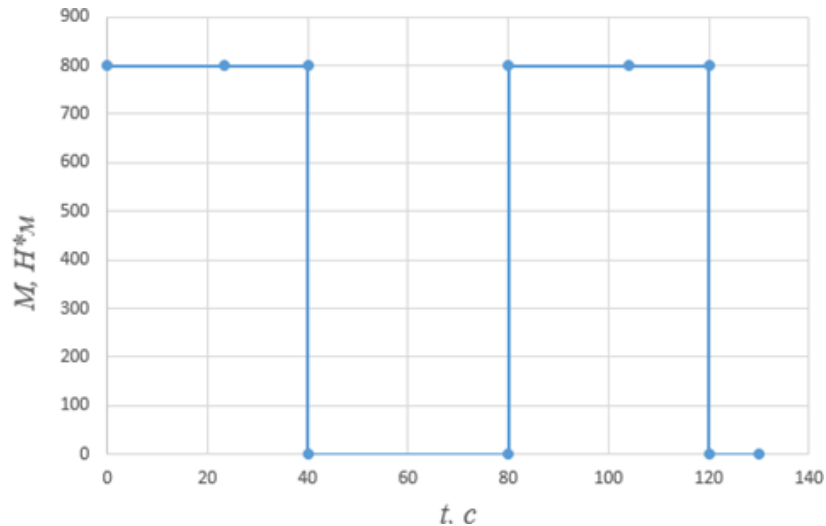
Ефективність/ ККД передачі при максимальній частоті обертів: $\eta = 0,97$

Момент інерції механізму: $J_{\text{мех}} = 60 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

На малюнках 5 – 6 представлені тахограма та діаграма навантаження виробничого механізму.



Мал. 5 – Тахограма виробничого механізму.



Мал. 6 – Навантажувальна діаграма виробничого механізму

2.2. Тривалість включення

$$PV_{\text{вася}} = \frac{t_p}{t_c} \cdot 100\% = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{\pi}} \cdot 100\% = \frac{16 + 24}{16 + 24 + 40} \cdot 100\% = 50\%$$

Обираємо стандартне (15%, 25%, 40%, 60%), ближче за величиною значення тривалості включення. [10,с.99]

$$PV_{\text{кат}} = 40\%$$

Діапазон регулювання.

$$D_{\text{рег}} = \frac{n_{m1}}{|n_{m2}|} = \frac{50}{|25|} = 2:1$$

Середньоквадратичне значення потужності за час роботи на основі тахограми та навантажувальної діаграми.

$$P_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{P_i \cdot \omega_{\text{макс}}}{\omega_i} \right) \cdot t_{p,i}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{p,i}}}$$

Де: m – число робочих ділянок у циклі;

$t_{p,i}$ - час роботи на І-й ділянці цикла;

β_i - коефіцієнт погіршення тепловіддачі на І-й ділянці цикла;

P_i - потужність навантаження на валу механізму на І-й ділянці цикла. Значення кутових швидкостей по ступеням.

-перша ступінь

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{m2}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot |50|}{60} = 5,236 \text{ рад/с,}$$

-друга ступінь

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot |n_{m1}|}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot |25|}{60} = 2,618 \text{ рад/с.}$$

Потужність на І-й ділянці роботи.

- перша ступінь:

$$P_1 = M_{\text{мех}} \cdot \omega_2 \cdot 10^{-3} = 800 \cdot 5,236 \cdot 10^{-3} = 4,189 \text{ кВт},$$

- друга ступінь:

$$P_2 = M_{\text{мех}} \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3} = 800 \cdot 2,618 \cdot 10^{-3} = 2,094 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнт погіршення тепловіддачі по ступеням.

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{\text{макс}}},$$

Де: $\beta_0 = 0.5$ - коефіцієнт погіршення тепловіддачі при нерухомому якорі (роторі), що приймається для двигунів закритого виконання без примусового охолодження;

Для першої ділянки:

$$\beta_1 = 0,5 + (1 - 0,5) \cdot \frac{5,236}{5,236} = 1,$$

Для другої ділянки:

$$\beta_2 = 0,5 + (1 - 0,5) \cdot \frac{2,618}{5,236} = 0,975.$$

Средньоквадратичн значення потужності дорівнює

$$P_3 = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 \cdot \omega_2}{\omega_1}\right)^2 \cdot t_1 + \left(\frac{P_2 \cdot \omega_2}{\omega_2}\right)^2 \cdot t_2}{\beta_1 \cdot t_1 + \beta_2 \cdot t_2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{4,189 \cdot 5,236}{5,236}\right)^2 \cdot 24 + \left(\frac{2,094 \cdot 5,236}{2,618}\right)^2 \cdot 16}{1 \cdot 24 + 0,975 \cdot 16}} = 4,21 \text{ кВт}$$

Перерахунок середньоквадратичної потужності двигуна на обране стандартне значення ПВ=60%.

$$P_k = P_3 \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{расч.э}}}{ПВ_{\text{кат}}}} = 4,21 \cdot \sqrt{\frac{50}{60}} = 4,707 \text{ кВт},$$

Розрахункова потужність електричного двигуна.

$$P_{\text{розр}} = \frac{P_k \cdot k_3}{\eta_{\text{мех}}},$$

Де: $k_3 = (1,1-1,3)$ – коефіцієнт запасу;

$\eta_{\text{мех}} = 0,97$ - КПД передачі при $n_{\text{макс}}$,

Приймаємо $k_3 = 1,3$.

$$P_{\text{розр}} = \frac{P_k \cdot k_3}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{3,843 \cdot 1,3}{0,97} = 6,308 \text{ кВт}.$$

Обираємо асинхронний трьохфазний двигун з фазним ротором МТМ-211-6, який має наступні паспортні дані (таблиця 1).

Таблиця 1. – Паспортні дані двигуна

Тип	$P_H,$ кВт	$\frac{n_H, \text{об}}{\text{мин}}$	$\frac{M_{\max}}{M_H}$	Статор					
				$\cos\varphi$		$I_{1H},$ А	$I_0,$ А	$R_1,$ Ом	$X_{1\sigma},$ Ом
				ном.	х.х.				
МТМ111-6	2,2	885	2,3	0,76	0,13	6,6	4,6	4,33	2,61
МТМ112-6	3,5	895	2,3	0,75	0,13	9,5	7,25	2,8	1,67
МТМ211-6	5	920	2,5	0,75	0,1	13,6	9,7	1,41	1,29
МТМ311-6	7,5	945	2,5	0,73	0,095	20	14,2	0,9	0,663

Тип	$P_H,$ кВт	$\frac{n_H, \text{об}}{\text{мин}}$	$J_{\text{дв}},$ кг·м ²	Ротор				
				$E_{2H},$ В	$I_{2H},$ А	$R_2,$ Ом	$X_{2\sigma},$ Ом	$k_e,$ о.е.
МТМ111-6	2,2	885	0,0487	144	11,1	0,72	0,595	2,5
МТМ112-6	3,5	895	0,0675	177	13,5	0,725	0,595	2,02
МТМ211-6	5	920	0,115	215	16,2	0,58	0,66	1,76
МТМ311-6	7,5	945	0,225	240	19,7	0,35	0,511	1,51

Передатне відношення редуктора.

$$i_p = \frac{n_H}{n_{\max}} = \frac{920}{50} = 18,9$$

Де: n_H - номінальна кутова швидкість обертання двигуна.

Приймаємо передатне відношення редуктора зі стандартного ряду передаточних чисел (за умовою, що $i_{p,ст} \leq i_p$).

$$i_{ст.р} = 18$$

Стандартне передатне число редуктора обирається зі стандартного ряду чисел.

Визначаємо швидкість оберту двигуна за ступенями.

$$n_{CT1} = n_1 \cdot i_{CT.P} = 50 \cdot 18 = 900 \text{ об/мин}$$

$$n_{CT2} = n_2 \cdot i_{CT.P} = 25 \cdot 18 = 450 \text{ об/мин}$$

Визначаємо статичесні моменти за ступенями.

У руховому режимі:

$$M'_{C1} = M'_{C1} = \frac{M_{\text{Мех}}}{i_{CT.P} \cdot \eta_{\text{Мех}}} = \frac{800}{18 \cdot 0,97} = 45,819 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначаємо параметри двигуна та будуємо електромеханічні та механічні характеристики двигуна

2.1. Приведення опорів двигуна

Наведений активний опір фази ротора до статора фази:

$$R'_2 = R_2 \cdot k_c^2 = 0,35 \cdot 1,51^2 = 0,798 \text{ Ом}$$

Наведений індуктивний опір фази ротора до статора фази:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot k_c^2 = 0,511 \cdot 1,51^2 = 1,165 \text{ Ом}$$

Сумарний індуктивний опір фази двигуна:

$$x_{\kappa} = X_{1\sigma} + X' = 0,663 + 1,165 = 1,828 \text{ Ом}.$$

Еквівалентні активні та індуктивні опори фази двигуна: $0,745\text{Ом}$

$$X_{дв} = \frac{X + X'}{k_c^2} = \frac{0,663 + 1,165}{1,51^2} = 0,802\text{Ом}$$

Визначаємо синхронну частоту обертів n_0 та синхронну швидкість ω_0 :

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1H}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104,72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Визначаємо критичний момент двигуна у руховому режимі:

$$M_{кр} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2})} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (0,9 + \sqrt{0,9^2 + 1,828^2})} = 235,997 \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо номінальний момент двигуна:

$$\frac{M_{кр}}{M_H} = 2,5$$

$$M_H = \frac{M_{кр}}{2,5} = \frac{235,997}{2,5} = 94,399 \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо критичне ковзання у руховому режимі:

$$S_{кр} = \frac{R}{\sqrt{R_2^2 + x_k^2}} = \frac{0,798}{\sqrt{0,35^2 + 1,828^2}} = 0,429.$$

Визначаємо номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{n_0 - n_{дв.н.}}{n_0} = \frac{1000 - 945}{1000} = 0,055.$$

Визначаємо ковзання по ступеням:

$$S_{cm1} = \frac{n_0 - n_{cm1}}{n_0} = \frac{1000 - 900}{1000} = 0,1,$$

$$S_{cm2} = \frac{n_0 - n_{cm2}}{n_0} = \frac{1000 - 450}{1000} = 0,55.$$

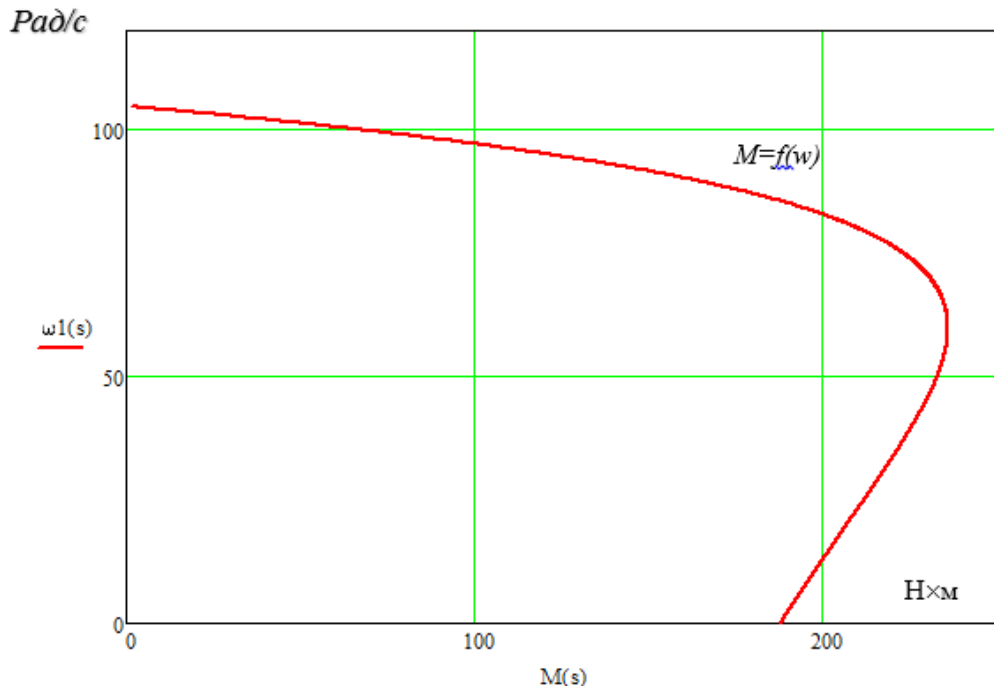
Розраховуємо природню механічну характеристику $M = f(S)$ по

Виразу

$$M = M_{кр} \cdot \frac{2 + q}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q},$$

Де: $q = \frac{R_1}{R_2} \cdot 2 \cdot S_{кр} = \frac{0,9}{0,798} \cdot 2 \cdot 0,429 = 0,967.$

Задаємося кутовою швидкістю, як $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ і будуємо природню характеристику $M = f(\omega)$ (малюнок 7).



Мал. 7 – Природна механічна характеристика електродвигуна:

$$M = f(\omega)$$

Розраховуємо природні електромеханічні характеристики:

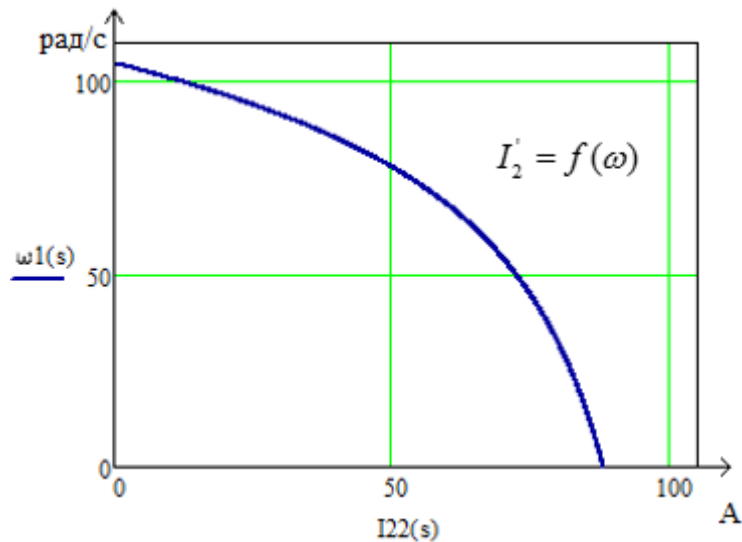
$$I_2' = f(S) \text{ і } I_1 = f(S)$$

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}},$$

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha)},$$

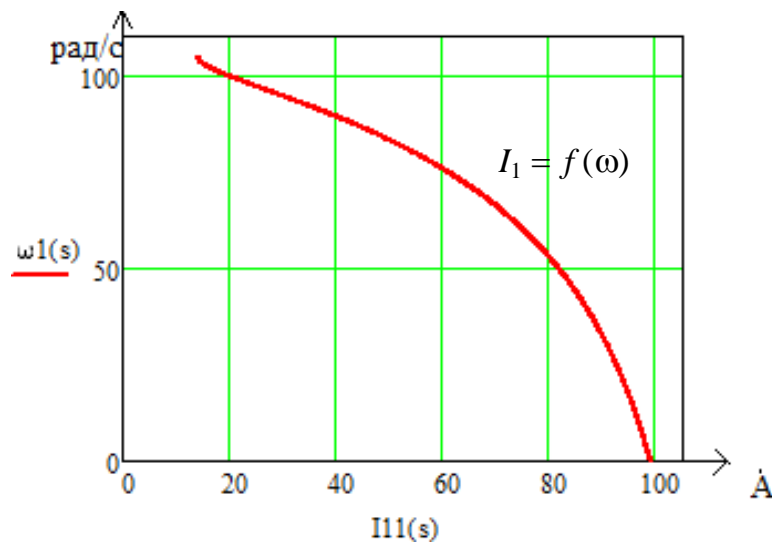
Де: $\alpha = 0,12$.

Задаємося кутовою швидкістю, як $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ та будуємо природні електромеханічні характеристики $I_2' = f(\omega)$ (малюнок 8) и $I_1 = f(\omega)$ (малюнок 9).



Мал. 8 - Природна електромеханічна характеристика електродвигуна

$$I_2' = f(\omega)$$



Мал. 9 - Природна електромеханічна характеристика електродвигуна

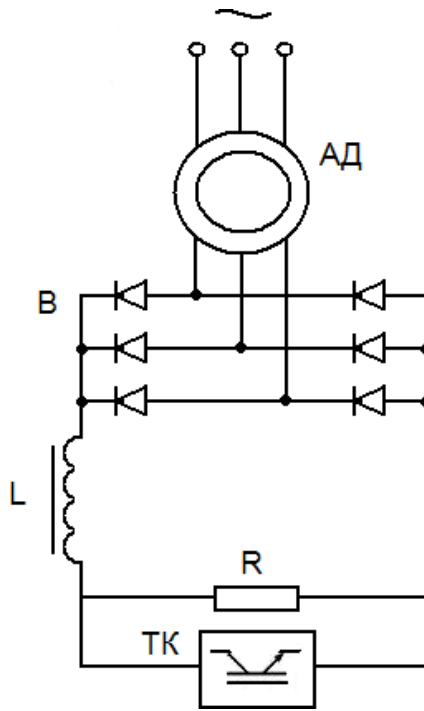
$$I_1 = f(\omega)$$

3. Вибір перетворювального пристрою для системи регульованого електроприводу

Нереверсивний імпульсний регулятор напруги (ІР) з тиристорним комутатором. Імпульсне регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором здійснюється шляхом введення додаткового опору в ланцюг ротора через випрямний міст. *B* (малюнок 10).

Додатковий резистор $R_{доб}$ включений послідовно зі зглажуючим дроселем $L_{др}$, який введений для збільшення індуктивності комутованого ланцюга.

Резистор $R_{доб}$ періодично вмикається та вимикається за допомогою транзисторного ключа ТК. [12, с. 187]



Мал. 10 – Схема включення асинхронного двигуна із фазним ротором з імпульсним регулюванням

4. Розрахунок та вибір основних силових елементів системи регульованого електроприводу

4.1. Вибір додаткових резисторів для щаблів регулювання

в ланцюзі ротора присутній некерований випрямляч, то механічні характеристики і, відповідно, додатковий опір розраховуватимуться так як в даному електроприводі [13, с. 29]:

$$M_{cm1} = \frac{E^2 \cdot s}{E_d^2 \cdot s} \cdot \frac{1}{\omega_0 \cdot (R_{\Sigma} + R_{доб} + \frac{3 \cdot X_{ДВ} \cdot s}{\pi})}$$

Де: $R_{\Sigma} = 1,75 \cdot R_{ДВ} + R_{ДР} = 1,75 \cdot 0,145 + 0,10 = 0,354 \text{ Ом}$

$R_{ДР}$ - активний опір дроселя, що згладжує.

$$E_d = \frac{2,34 \cdot E_2}{\sqrt{3}} = \frac{2,34 \cdot 215}{\sqrt{3}} = 290,465 \text{ В} - \text{випрямлена постійна напруга}$$

некерованого трифазного мостового випрямляча.

Вирішуючи рівняння механічної характеристики відносно опору $R_{ДОБ}$ для першого ступеня визначимо максимально необхідний опір для забезпечення розрахованого діапазону регулювання отримуємо:

$$R_{ДОБ.РАСЧ1} = \frac{E_d^2 \cdot S_{cm2} - R_{\Omega} \cdot \omega_0 \cdot M_{cm1} - \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot S_{cm2} \cdot \omega_0 \cdot M_{cm1}}{\omega_0 \cdot M_{cm1}} =$$

$$= \frac{290,465^2 \cdot 0,1 - 1,306 \cdot 104,72 \cdot 45,819 - \frac{3 \cdot 0,802}{3,14} \cdot 0,1 \cdot 104,72 \cdot 45,819}{104,72 \cdot 45,819} = 0,126 \text{ Ом}$$

Опір резистора $R_{ДОБ}$ обираємо з ряду номінальних значень Е24: 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,4; 2,7; 3; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1. Необхідно прийняти $R_{ДОБ} = 8,2 \text{ Ом}$.

При великій частоті комутації ключа f_0 можна вважати, що в ланцюг випрямленого струму ротора вміщено регульований «імпульсний» додатковий опір $R_{дод.імн.}$, величина якого поступово змінюється від 0 до $R_{ДОБ}$ при вимірі скважності імпульсів $\gamma = t_{імп} / T_0$ від 1 до 0.

Де $t_{імп}$ - Тривалість замкнутого стану ключа,

$T_0 = 1 / f_0$ - період комутації.

Зв'язок $R_{дод.імн.}$ з γ виражається лінійною залежністю:

$$R_{дод.імн.} = (1 - \gamma) \cdot R_{ДОБ}$$

При $\gamma = 1$ $R_{дод.імн.} = 0$ - робота на природній характеристиці.

Знайдемо скважність γ_1 при роботі на першому робочому ступені:

$$\gamma_1 = 1 - \frac{R_{ДОБ.РАСЧ1}}{R_{ДОБ}} = 1 - \frac{0,126}{8,2} = 0,88$$

Для визначення скважності γ_2 при роботі на другому робочому ступені знайдемо додатковий опір на даній ділянці роботи:

$$R_{ДОБ.РАСЧ2} = \frac{E_d^2 \cdot S_{cm1} - R_{\Omega} \cdot \omega_0 \cdot M_{cm1} - \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot S_{cm1} \cdot \omega_0 \cdot M_{cm1}}{\omega_0 \cdot M_{cm1}} =$$

$$= \frac{290,465^2 \cdot 0,55 - 1,306 \cdot 104,72 \cdot 45,819 - \frac{3 \cdot 0,802}{3,14} \cdot 0,55 \cdot 104,72 \cdot 45,819}{104,72 \cdot 45,819} = 7,994 \text{ Ом}$$

Тоді скважність γ_2 при роботі на другому робочому ступені:

$$\gamma_2 = 1 - \frac{R_{\text{ДОБ.РАСЧ2}}}{R_{\text{ДОБ}}} = 1 - \frac{4,53}{8,2} = 0,45$$

4.2. Вибір діодів

Визначимо електричні параметри, за якими можуть бути обрані діоди, тобто визначимо середнє значення напруги навантаження $I_{d.\text{cp}}$ через вентиль, а також $U_{\text{обр.маx}}$ та $I_{d.\text{Маx}}$.

Визначимо постійну складову випрямленої напруги:

$$E_d = \frac{2,34 \cdot E_2}{\sqrt{3}} = \frac{2,34 \cdot 215}{\sqrt{3}} = 290,465 \text{ В.}$$

Максимальне значення струму навантаження при $s = 1$:

$$I_{d.\text{маx}} = \frac{E_d \cdot s}{R_{\text{Э}} + \frac{3 \cdot X_{\text{ДВ}}}{\pi} \cdot s} = \frac{290,465 \cdot 1}{1,306 + \frac{3 \cdot 0,802}{\pi} \cdot 1} = 140,193 \text{ А}$$

Значення випрямленого струму на першому і другому робочому ступені:

$$I_{d.\text{ycm}} = \frac{E_d \cdot s}{R_{\text{Э}} + R_{\text{ДОБ}} \cdot (1 - \gamma_1) + \frac{3 \cdot X_{\text{ДВ}}}{\pi} \cdot s} = \frac{E_d \cdot s}{R_{\text{Э}} + R_{\text{ДОБ}} \cdot (1 - \gamma_2) + \frac{3 \cdot X_{\text{ДВ}}}{\pi} \cdot s} =$$

$$= \frac{290,465 \cdot 1}{1,306 + 8,2 \cdot (1 - 0,031) + \frac{3 \cdot 0,802}{\pi} \cdot 1} = \frac{290,465 \cdot 1}{1,306 + 8,2 \cdot (1 - 0,954) + \frac{3 \cdot 0,802}{\pi} \cdot 1} = 27,589 \text{ А}$$

Середнє значення струму навантаження:

$$I_d = \frac{I_{d.\text{ycm}}}{R_{\text{ДОБ}}} = \frac{27,582}{8,2} = 3,365 \text{ А.}$$

Максимальне значення зворотної напруги:

$$U_{\text{обр.маx}} = \sqrt{6} \cdot E_2 = \sqrt{6} \cdot 237 = 580,529 \text{ В.}$$

За отриманими даними по [5] обираємо 6 діодних модулів ND171N18K з наступними параметрами [Додаток А]:

Середнє значення струму $I_{\text{пр.ср.маx}} = 170 \text{ А}$;

Гранично допустима температура корпусу $T_{\text{к}} = 100^\circ \text{C}$;

Зворотня напруга $U_{\text{обр.маx}} = 1800 \text{ В}$;

4.3. Вибір згладжуючого дроселя

Вибір даного елементу розраховуємо на струм, що протікає у ланцюгу випрямленого струму ротора $I_{d,max} = 140,193A$, а також з умов:

$$L_{ДР} = \frac{I_d \cdot R_{ДОБ} \cdot \Delta t}{\Delta i} - 2 \cdot L_{ДВ}$$

Де: $L_{ДВ}$ – індуктивність фази двигуна.

$\Delta t = \frac{T}{2}$, T період перемикання, задаючись частотою перемикання

$$f = 280 \text{ Гц}, \text{ то } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{280} = 3,571 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \text{ и } \Delta t = \frac{T}{2} = \frac{3,571 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,786 \cdot 10^{-3}$$

Також задаючись діапазоном зміни струму $\Delta i = 200 A$ індуктивність виходить такою:

$$L_{ДР} = \frac{I_d \cdot R_{ДОБ} \cdot \Delta t}{\Delta i} - 2 \cdot L_{ДВ} = \frac{3,365 \cdot 8,2 \cdot 1,786 \cdot 10^{-3}}{140} - 2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Обираємо згладжуючий реактор ФОРС-250/0.5УЗ [6, с. 95] з наступними параметрами:

$$I_{d,n} = 320 A; L_{ДР} = 0,75 \text{ мГн}; R_{ДР} = 3 \text{ мОм}.$$

4.4. Вибір транзистора для транзисторного ключа

Транзистор вибираємо за максимально допустимим струмом:

$$I_{Т,доп} \geq I_{d,max},$$

та максимально допустимій напрузі:

$$U_{Т,доп} \geq U_{обр,max}.$$

Виходячи з даних умов вибираємо IGBT 1MVi600NN-060 Модуль [5] з наступними параметрами [Додаток Б]:

$$\text{Максимальна напруга: } U_{МАХ,КЭ} = 600 \text{ В}$$

$$\text{Максимальний струм: } I_{КЭ,МАХ} = 600 \text{ А}$$

5. Тепловий розрахунок напівпровідникових приладів

Втрати в IGBT транзисторах у провідному стані [5]:

$$P_{SS} = I_{cp} \cdot U_{ce(sat)} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right) = 27,589 \cdot 2,1 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3\pi} \right) = 13,082 \text{ Вт},$$

$$D = \frac{t_p}{T} \approx 0,95 \text{ – максимальна свердловість;}$$

СТ
Стані.

$U_{ce(sat)} = 2,1 \text{ В}$ – пряме падіння напруги на IGBT у насиченому

Втрати в IGBT транзисторах при комутації:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot (t_{c.on} + t_{c.off}) \cdot f_{sw}}{2} =$$

$$= \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{27,589 \cdot 573,8 \cdot (0,6 + 0,6) \cdot 10^{-6} \cdot 5000}{2} = 10,69 \text{ Вт,}$$

Где: $U_{cc} = k_{с.н} \cdot U_{дв.н} = 1,51 \cdot U_{дв.н} = 1,51 \cdot 380 = 573,8 \text{ В}$ – напруга на колекторі IGBT, (комутувана напруга);

$t_{c.off} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – час перехідних процесів у ланцюгу колектора IGBT на закривання транзистора;

$t_{c.on} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – час протікання перехідних процесів у ланцюгу колектора IGBT на момент відкриття транзистора;

$k_{с.н} = 1,35$ – коефіцієнт схеми для номінального навантаження;

f_{sw} – частота комутації ключей, Гц (частота ШИМ), зазвичай від 5000 до 15 000;

Гц; $f_{sw} = 5000 \text{ Гц}$ – частота комутації ключей.

Втрати зворотного діода у провідному стані:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ec} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right) = 27,589 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3\pi} \right) = 17,443 \text{ Вт;}$$

Сумарні втрати в IGBT:

$$P_Q = P_{SS} + P_{SW} = 13,082 + 10,69 = 23,772 \text{ Вт.}$$

Де: $U_{ec} = 2,8 \text{ В}$ – пряме падіння напруги на діоді у відкритому стані при I_{ep} , В;

$I_{ep} = I_{cp}$ – максимальна амплітуда струму, що протікає через зворотний діод, А;

Втрати при відновленні замикаючих властивостей зворотного діода:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} = \frac{1}{8} \cdot 27,589 \cdot 573,8 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 1,484 \text{ Вт,}$$

Де: t_{rr} – тривалість імпульсу зворотного струму, с;

I_{rr} – амплітуда зворотного струму протікає через діод, А ($I_{rr} = I_{ep}$).

Сумарні втрати зворотного діода:

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 17,443 + 1,484 = 18,927 \text{ Вт}$$

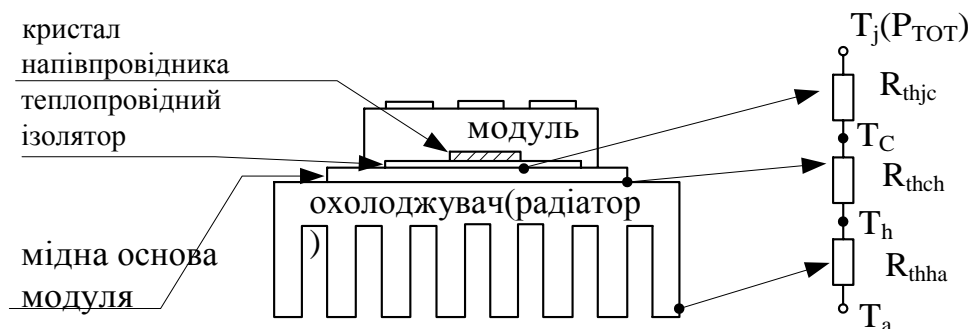
Результуючі втрати IGBT із зворотним діодом:

$$P_T = P_Q + P_D = 23,772 + 18,927 = 42,699 \text{ Вт.}$$

Отримані результуючі втрати застосовуються як основні показники необхідні виконання теплового розрахунку, у результаті вибирається тип і розміри необхідного радіатора і виконується перевірка теплового режиму роботи зворотного діода і кристалів IGBT транзистора.

Тепловий розрахунок напівпровідникових приладів зводиться у розрахунок теплового опору радіатора, необхідного для їхнього охолодження. Втрати внаслідок перебігу струму призводять до нагрівання силових напівпровідникових ключів. Для того щоб запобігти перегріванню і поломці їх кріплять на радіаторі з розвиненою поверхнею.

Схематично ця конструкція показана на малюнку 11.



Мал. 11 – Схема системи охолодження транзисторного модуля

У результаті впливу різниці температур між нагрітим кристалом і навколишнім середовищем тепла енергія подається від кристала до корпусу приладу, потім від корпусу вона переходить в радіатор і з його поверхні в навколишнє середовище. Втрати в ключовому елементі P_{TOT} еквівалентні струму в електричних ланцюгах, різниця температур еквівалентна електричній напрузі. За подобою закону Ома для схеми теплового заміщення, запишемо:

$$P_{TOT} = \frac{\Delta T}{R_{th}}, \text{ где: } R_{th} - \text{Термічний опір, це коефіцієнт, який}$$

характеризує теплопровідність навколишнього середовища, педалюючи теплову енергію; ΔT - різниця температур між характерними точками теплової системи.

Існує три термічних опори :

1. Тепловий опір охолоджувач навколишнє креда - $R_{th(h-a)} = R_{th(f-a)}$.
2. Тепловий опір корпус-охолоджувач - $R_{th(c-h)} = R_{th(c-f)}$
3. Тепловий опір переходу-корпусу - $R_{th(j-c)}$;

Тепловий опір тіла переходу $R_{th(j-c)}$ є паспортним параметром (додаток В).

Опір корпусу $R_{th(c-h)}$ залежить від типу корпусу, сили затиску, наявності термопасти, наявності і типу ізоляційної прокладки. Тепловий опір корпус – охолоджувач наводять в справочних і паспортних даних (Додаток Б).

Тепловий розрахунок інвертора [2]:

Максимально допустимий охолоджувач перехідного опору –

оточуюча середа $R_{th(f-a)1}$ °C/Вт, $\leq \frac{P_T}{P_a} - R_{th(c-f)1}$,
 транзистор/зворотній діод):

$$R_{th(f-a)1}$$

Де: $T_c = 90 - 110^\circ\text{C}$ – Температура теплопровідної пластини, приймаємо $T_c = 100_0\text{C}$;

$T_a = 45 - 50^\circ\text{C}$ – Температура охолоджуючого повітря; приймаємо $T_a = 50_0\text{C}$;

$R_{th(c-f)1}$ – Тепловий перехідний опір корпусу - поверхня теплопровідної пластини модуля на пару IGBT/FWD, $R_{th(c-f)1} = 0,0125\text{ C/Вт}$.

Тому:

$$R_{th(f-a)1} \leq \frac{100 - 50}{42,699} - 0,0125; \quad R_{th(f-a)1} \leq 1,158.$$

Зворотна температура кристала діода FWD, °C:

$$T_{jd} = T_c + P_D \cdot R_{th(j-c)d} = 100 + 18,927 \cdot 0,11 = 102,082^\circ\text{C}$$

Де: $R_{th(j-c)d} = 0,11\text{ °C/Вт}$ – Термічний перехідний опір кристал - корпус для FWD частини модуля. При цьому повинна виконатися умова $T_{jd} < 125^\circ\text{C}$.

Температура кристала IGBT, °C, визначається за формулою:

Де: $R_{th(j-c)q} = 0,063\text{ °C/Вт}$ - Термічний перехідний опір кристал-корпус для IGBT частини модуля. При цьому повинна виконуватися умова $T_{jd} < 125^\circ\text{C}$.

Спочатку необхідний сумарний перехідний тепловий опір охолоджувача - середовища визначається виходячи з потужності, що виділяється силовими напівпровідниковими приладами (модулями), встановленими на даному охолоджувачі.

$$R_{th(f-a)1} = 0,35\text{ °C}$$

Тепловий опір охолоджувача навколишньому середовищу ($R_{th(f-a)}$) залежить від багатьох факторів. Для точкового джерела тепла, розташованого на пластині товщиною d , для теплового опору охолоджувача - навколишнього середовища відомо наступний вислів:

$$R_{th(f-a)} = \frac{3.3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C_f^{0.25} + \frac{650}{S} \cdot C_f,$$

Де:

λ - коефіцієнт теплопровідності охолоджувача, Вт/К·см. [6]

S - площа пластини (см²),

C_f - Поправочний коефіцієнт, який враховує стан поверхні і розташування радіатора в просторі. Для вертикального положення: почорніла поверхня - 0,43. Для горизонтального положення, відповідно 1,0 і 0,5, блискуча поверхня - 0,85.

Де ми приймаємо: $C_f=1$; $\lambda=2.1$ Вт/К·см; $d = 2$ мм.

Виходячи з вищеведеного виразу, збільшення ефективності охолодження і зниження теплового опору досягаються виготовленням радіаторів з матеріалів з високим коефіцієнтом теплопровідності і застосуванням радіаторів з більшою поверхнею охолодження.

Визначимо мінімальну площу пластини:

$$S = \frac{650 \cdot C_f}{R_{th(f-a)} - \frac{3.3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C_f^{0.25}} = \frac{650}{0.35 - \frac{3.3}{\sqrt{2.1 \cdot 0.2}}} = 137,073 \text{ см}^2$$

Площа пластини, що є в наявності, складає 150 см², що в даних умовах є оптимальним для охолодження IGBT – модуля.

1. Розрахунок і побудова електромеханічних і механічних характеристик електроприводу для заданого діапазону

Постанова

1. Розрахунок і побудова механічних характеристик

$$M_{cm1} = \frac{E_d^2 \cdot s}{\omega_0 \cdot (R_{\Sigma} + R_{ДОБ} + \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot s)}$$

Задаючись ковзанням від 0 до 1, кутовою швидкістю, як $\omega = \omega_0 \cdot (1-s)$ будемо механічні характеристики $\dot{I} = f(\omega)$ для ступенів регулювання (малюнок 12):

Перша ступінь:

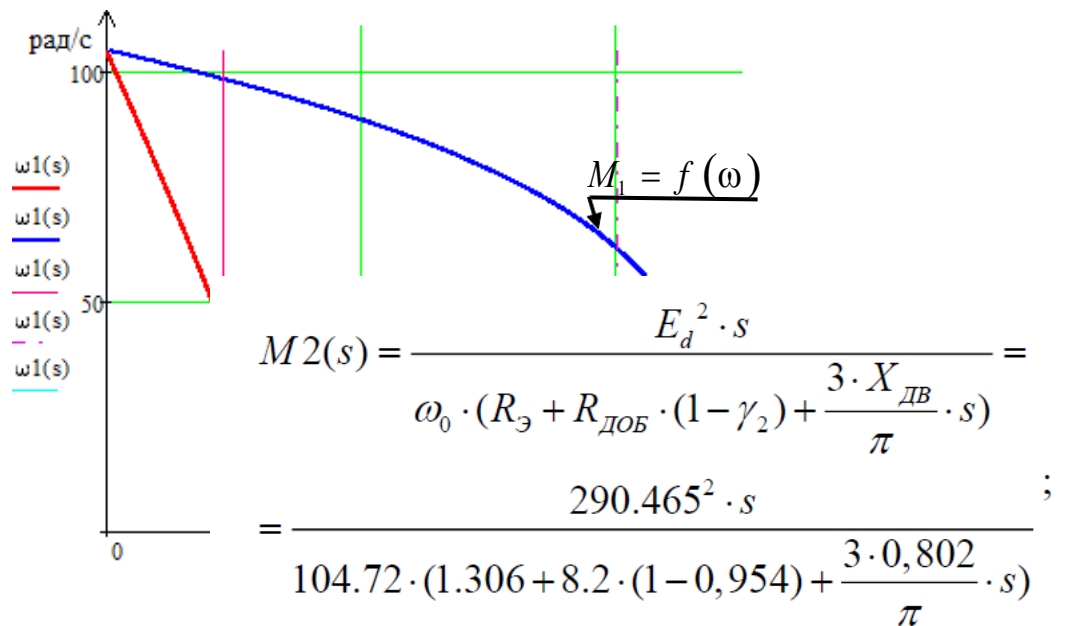
$$M1(s) = \frac{E_d^2 \cdot s}{\omega_0 \cdot (R_{\Sigma} + R_{ДОБ} \cdot (1 - \gamma_1)) + \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot s} =$$

$$= \frac{290.465^2 \cdot s}{104.72 \cdot (1.306 + 8.2 \cdot (1 - 0,031)) + \frac{3 \cdot 0,802}{\pi} \cdot s} ;$$

Друга ступінь:

$$M2(s) = \frac{E_d^2 \cdot s}{\omega_0 \cdot (R_{\Sigma} + R_{ДОБ} \cdot (1 - \gamma_2)) + \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot s} =$$

$$= \frac{290.465^2 \cdot s}{104.72 \cdot (1.306 + 8.2 \cdot (1 - 0,954)) + \frac{3 \cdot 0,802}{\pi} \cdot s} ;$$



Мал. 12 – Механічні характеристики $M = f(\omega)$

Розрахунок і побудова електромеханічних характеристик

Електромеханічні характеристики $I_d = f(\omega)$ будуємо за виразом:

$$I_d(s) = \frac{E_d \cdot s}{R_{\Sigma} + R_{ДОБ} \cdot (1 - \gamma) + \frac{3 \cdot X_{ДВ}}{\pi} \cdot s}$$

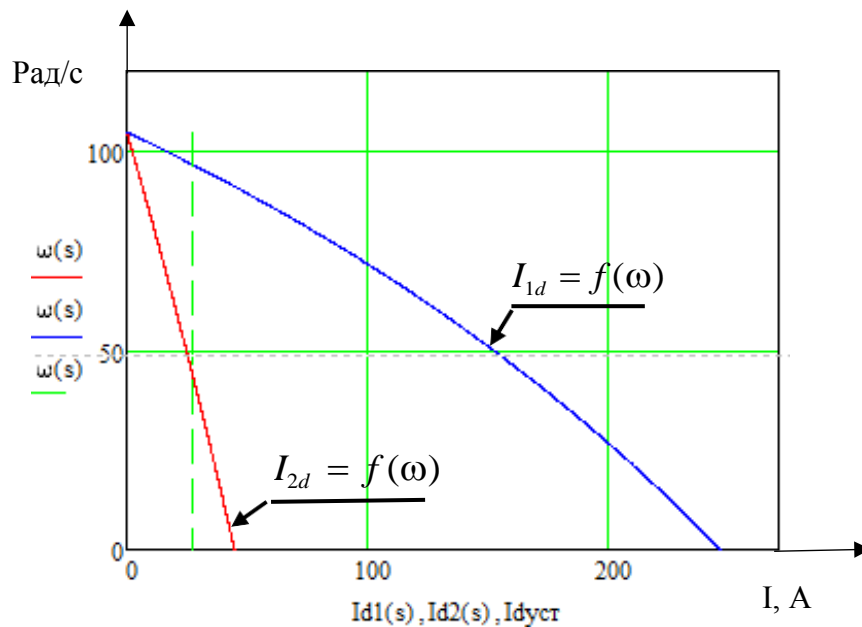
Для першого ступеня:

$$I_{1d}(s) = \frac{E_d \cdot s}{R_{\Sigma} + R_{\text{ДОБ}} \cdot (1 - \gamma_1) + \frac{3 \cdot X_{\text{ДВ}}}{\pi} \cdot s}$$

Для другого ступеня:

$$I_{2d}(s) = \frac{E_d \cdot s}{R_{\Sigma} + R_{\text{ДОБ}} \cdot (1 - \gamma_2) + \frac{3 \cdot X_{\text{ДВ}}}{\pi} \cdot s}$$

Підставляючи γ_1 и γ_2 відповідно для першої ділянки и для другої, Отримуємо графіки, зображені на малюнку 13.



Мал. 13 - Електромеханічні характеристики $I_d = f(\omega)$:

1 – Регульовальна характеристика першого ступеня; 2 - Коригувальна характеристика другого ступеня.

Розрахунок режимів гальмування

Розрахуємо характеристики динамічного гальмування [11,с.105].

Після завершення двох робочих циклів двигун необхідно загальмувати до нульових оборотів.

Визначимо еквівалентний струм статора :

$$I_{19} = 0,816 \cdot I_{II},$$

Де: I_{II} - Статичний постійний струм при динамічному гальмуванні, магнітуда який визначається з умови:

$$I_{II} = (2 \div 3) \cdot I_0 = 2 \cdot 14,2 = 28,4 \text{ A},$$

$$I_{19} = 0,816 \cdot I_{II} = 0,816 \cdot 28,4 = 23,174 \text{ A}.$$

Визначимо значення критичного моменту для динамічного гальмування

$$M_{кр.дм} = \frac{3 \cdot I_{19}^2 \cdot x_m^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_2' + x_m)},$$

Де: значення x_m при номінальному струмі вона визначається виразом:

$$x_m = \frac{E_{1H}}{I_0} = \frac{209,232}{14,2} = 14,735 \text{ Ом}, \text{ где}$$

$$E_{1H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}} \cdot k_e = \frac{240}{\sqrt{3}} \cdot 1,51 = 209,232 \text{ В},$$

$$M_{кр.дм} = \frac{3 \cdot I_{19}^2 \cdot x_m^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_2' + x_m)} = \frac{3 \cdot 23,174^2 \cdot 14,735^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (1,165 + 14,735)} = 105,043 \text{ Нм}.$$

Визначимо значення критичного пробуксовки для режиму динамічного гальмування

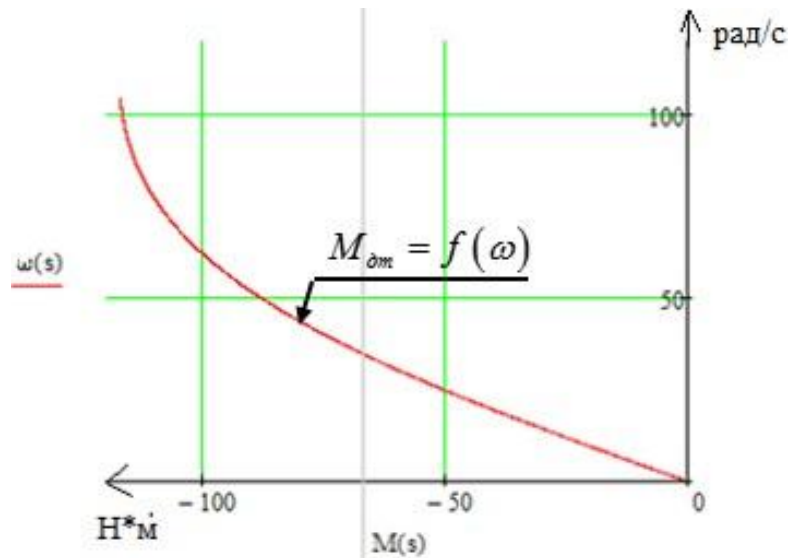
$$S_{кр.дт} = \frac{R_{дт}'}{x_{2\sigma}' + x_m} = \frac{20,749}{1,165 + 14,735} = 1,305, \text{ де:}$$

$$R_{дт}' = (R_{ДОБ} + R_1) \cdot k_e^2 = (8,2 + 0,9) \cdot 1,51^2 = 20,749 \text{ Ом}.$$

Розрахунок механічної характеристики проводиться виразом :

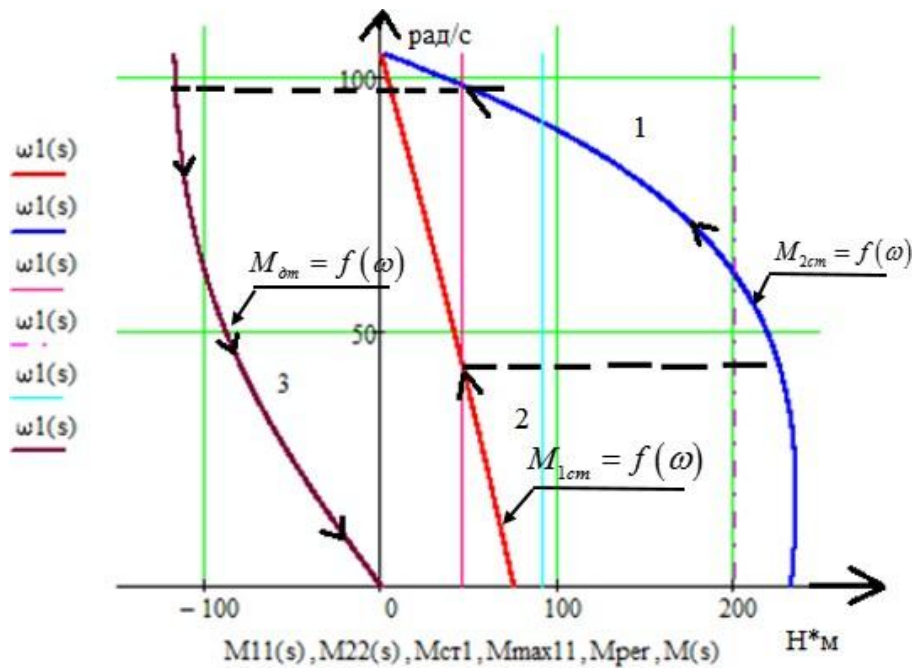
$$M = M_{кр.дм} \cdot \frac{2}{\frac{S}{S_{кр.дт}} + \frac{S_{кр.дт}}{S}} = 105,043 \cdot \frac{2}{\frac{S}{1,305} + \frac{1,305}{S}}.$$

Характеристика динамічного гальмування розташована на другому квадранті представлена на малюнку 14.



Мал. 14 – Механічна характеристика динамічного гальмування
 $M_{ом} = f(\omega)$

Механічні характеристики повного циклу роботи наведені на малюнку 15.



Мал. 15 – Механічні характеристики повного циклу робіт $M = f(\omega)$:

1 – регулювальна характеристика першого ступеня; 2 - регулювальна характеристика другого ступеня; 3 - динамічна характеристика гальмування

Розрахунок механічних перехідних процесів за цикл

Розрахунок механічних перехідних процесів без урахування пружних зв'язків

Рівняння руху електроприводу:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

Час початку і уповільнення ми знайдемо як:

$$t_{II} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{ycm}}{M - M_c};$$

$$t_T = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{ycm}}{M + M_c},$$

Где: $J_{\Sigma} = k \cdot J_{ДВ} + \frac{J_{МЕХ}}{i^2_{cm.p}} = 1,3 \cdot 0,225 + \frac{60}{18^2} = 0,478 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - сумарний момент інерції

механізму;

$k = (0,5 \div 1,3)$ - коефіцієнт, що враховує момент інерції редуктора;

$J_{МЕХ} = 60 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції механізму;

$J_{ДВ} = 0,225 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент інерції двигуна ;

$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{7500}{98,96} = 75,788 \text{ Н} \cdot \text{м}$ - номінальний момент;

$M_{c1} = 45,819 \text{ Н} \cdot \text{м}$ - момент навантаження;

$M = 2M_n = 2 \cdot 75,788 = 151,576 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$\omega_{cm1} = \frac{\pi \cdot n_{CT1}}{30} = \frac{\pi \cdot 900}{30} = 94,247 \text{ рад} / \text{с}$$

- встановлені швидкості

$$\omega_{cm2} = \frac{\pi \cdot n_{CT2}}{30} = \frac{\pi \cdot 450}{30} = 47,123 \text{ рад} / \text{с}$$

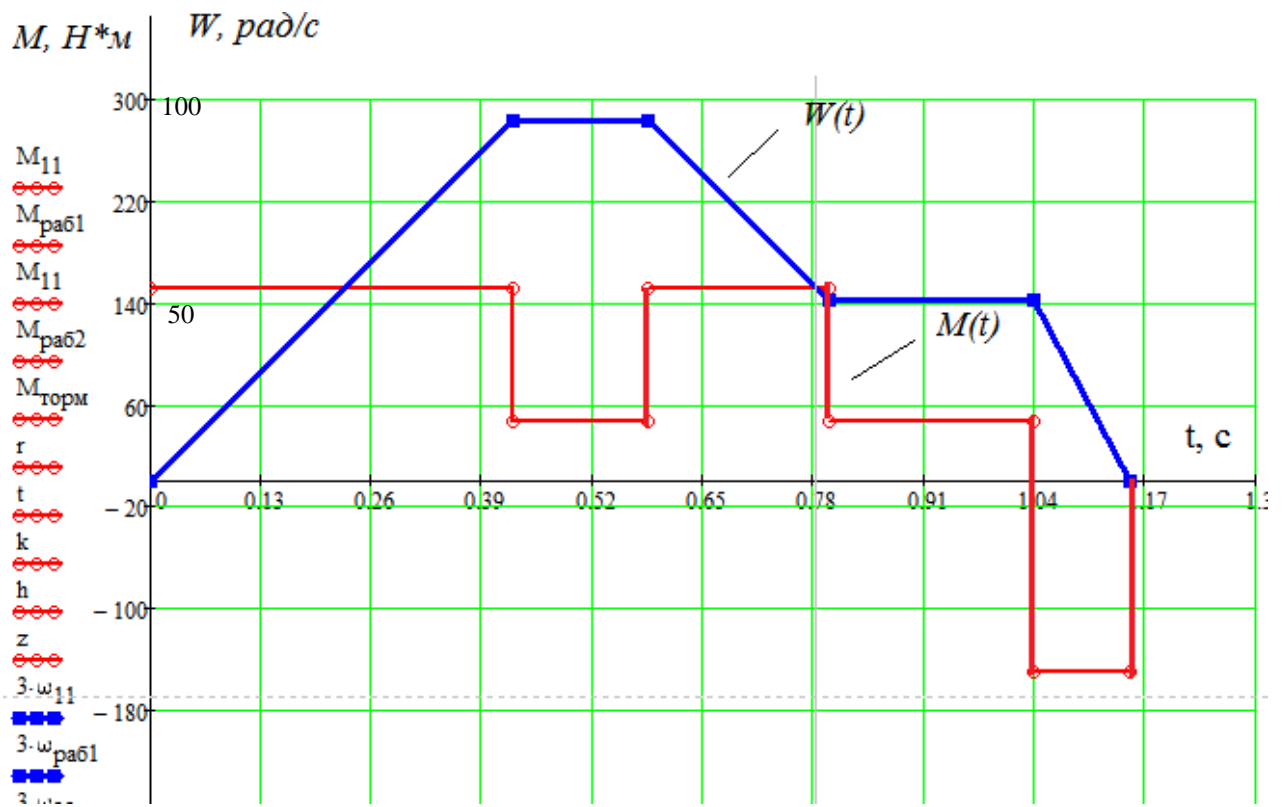
електродвигуна.

$$t_{II1} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (\omega_{cm1} - \omega_{cm2})}{M - M_{c1}} = \frac{0,478 \cdot (94,247 - 47,123)}{151,576 - 45,819} = 0,213 \text{ с};$$

$$t_{II2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{cm2}}{M - M_{c1}} = \frac{0,478 \cdot 47,123}{151,576 - 45,819} = 0,213 \text{ с};$$

$$t_T = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{cm1}}{M + M_{c1}} = \frac{0,478 \cdot 94,247}{151,576 + 45,819} = 0,228 \text{ с};$$

Перехідні процеси $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$ представлені на малюнку 16



Мал. 16 - Графік перехідного процесу по швидкості для цикла роботи при $M=M_H$ не враховуючи пружні зв'язки

Розрахунок електромеханічних перехідних характеристик $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ під час пуску, підвищенні і зниженні навантаження при лінійній зміні завдання

Математичний опис асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α - β в нормальній формі представимо у вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t)] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t)] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot \{ K_m \cdot [\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t)] - M_c \} \end{aligned} \right.$$

Де: $L_e = L_s - \frac{L^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L}{L_r}$, $A_r = \frac{R}{L_r}$, $K_m = 1,5 \cdot K_r \cdot z_p$ – коефіцієнти,

що враховують АД;

$i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$, $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$ – компоненти просторових векторів напруги і струму статора; $\psi_{r\alpha}(t)$, $\psi_{r\beta}(t)$ – компоненти просторового

вектора потокосцеплення ротора; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$,

$L_s = L_{s\sigma} + L_m$, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ – загальна індуктивність обмоток статора і ротора; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора.

Розрахуємо параметри, необхідні для розрахунку динаміки двигуна:
Коефіцієнти розрахунку динаміки двигуна:

$$K_r = \frac{L_m}{L_2} = 0,894; \quad R_r = R_1 + R_2 \cdot K_r^2 = 1,438;$$

$$A_r = \frac{R_2}{L_2} = 19,279; \quad K_m = \frac{3}{2} \cdot K_r \cdot z_p = 4,022.$$

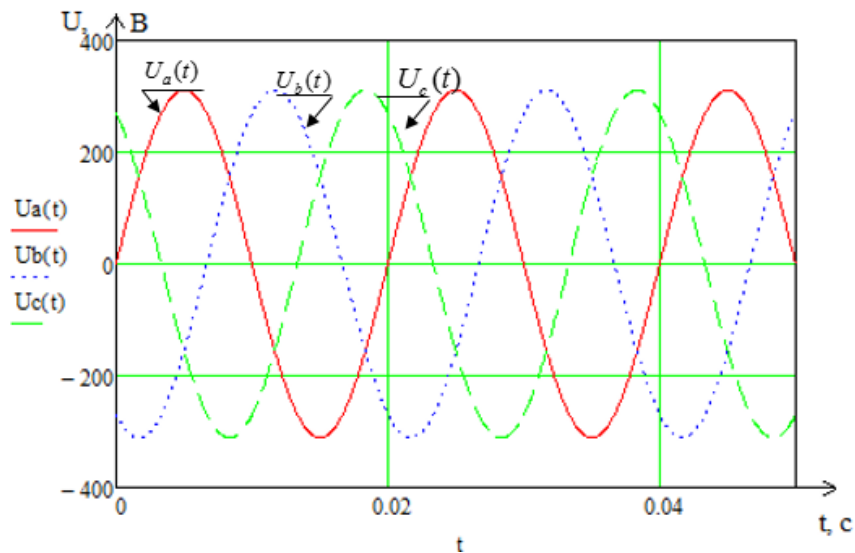
Встановимо трифазну систему напруг статора:

$$U_a(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t);$$

$$U_b(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3});$$

$$U_c(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}).$$

На малюнку 17. Зображено трифазну систему напруг статора.

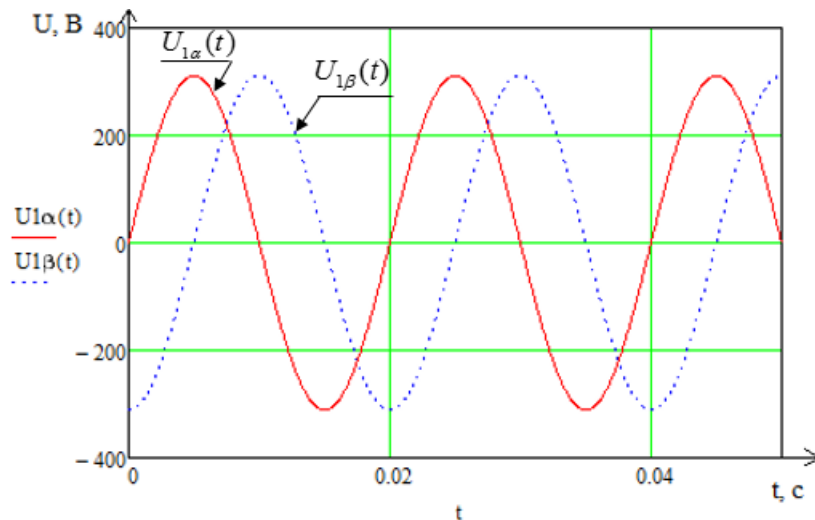


Мал. 17 - Зображена трифазна система напруги статора.

Використовуючи перетворення Кларка, переходимо до двофазної стаціонарної системи координат (малюнку 18):

$$U_{1\alpha}(t) = U_a(t);$$

$$U_{1\beta}(t) = \frac{U_a(t) + 2U_b(t)}{\sqrt{3}}.$$



Мал. 18 - Двофазна фіксована система координат

Розраховуємо перехідні процеси в середовищі Mathcad 15.
Задаємо момент спротиву АД:

$$M_c(t) := \begin{cases} M_n & \text{if } 0.4 \leq t < 1.5 \\ (-M_n) & \text{if } 1.5 \leq t < 1.585 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Кількість точок розрахунку перехідних процесів і шаг знаходимо за методом Ейлера:

$$h := 0.0001 \quad k := 0..20000$$

Початкові нульові умови:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I_{sa_0} \\ I_{sb_0} \\ \psi_{ra_0} \\ \psi_{rb_0} \\ w_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

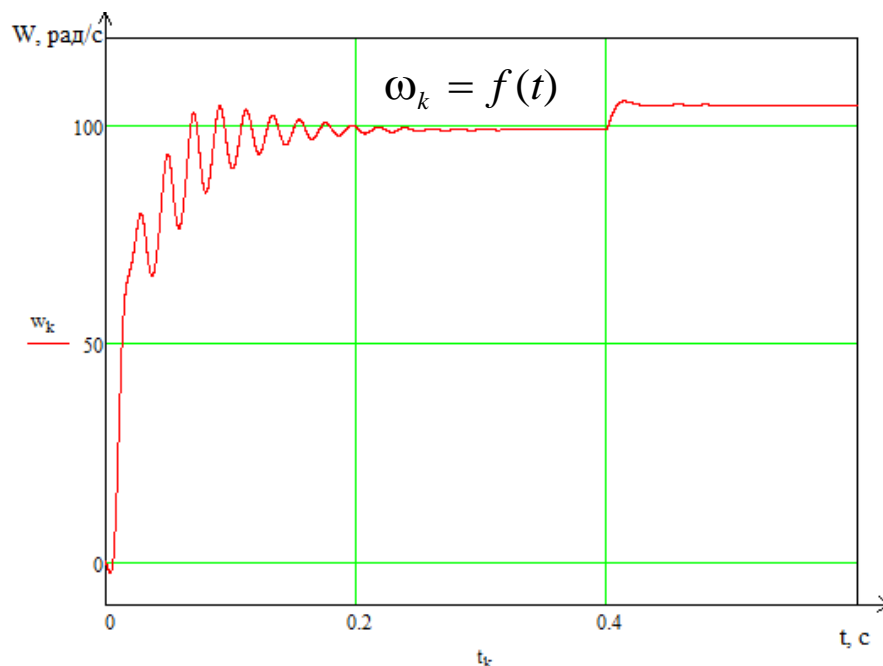
Алгоритм методу Ейлера:

$$\begin{pmatrix} t_{k+1} \\ I_{sa_{k+1}} \\ I_{sb_{k+1}} \\ \psi_{ra_{k+1}} \\ \psi_{rb_{k+1}} \\ w_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_k + h \\ I_{sa_k} + \frac{h}{L_e} \cdot \{U1\alpha(t_k) - R_e \cdot I_{sa_k} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{ra_k} + K_r \cdot z_p \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k}\} \\ I_{sb_k} + \frac{h}{L_e} \cdot \{U1\beta(t_k) - R_e \cdot I_{sb_k} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{rb_k} - K_r \cdot z_p \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k}\} \\ \psi_{ra_k} + h \cdot \{R2 \cdot K_r \cdot I_{sa_k} - A_r \cdot \psi_{ra_k} - z_p \cdot w_k \cdot \psi_{rb_k}\} \\ \psi_{rb_k} + h \cdot \{R2 \cdot K_r \cdot I_{sb_k} - A_r \cdot \psi_{rb_k} + z_p \cdot w_k \cdot \psi_{ra_k}\} \\ w_k + \frac{h}{J} \cdot [K_m \cdot \{\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k}\} - M_c(t_k)] \end{pmatrix}$$

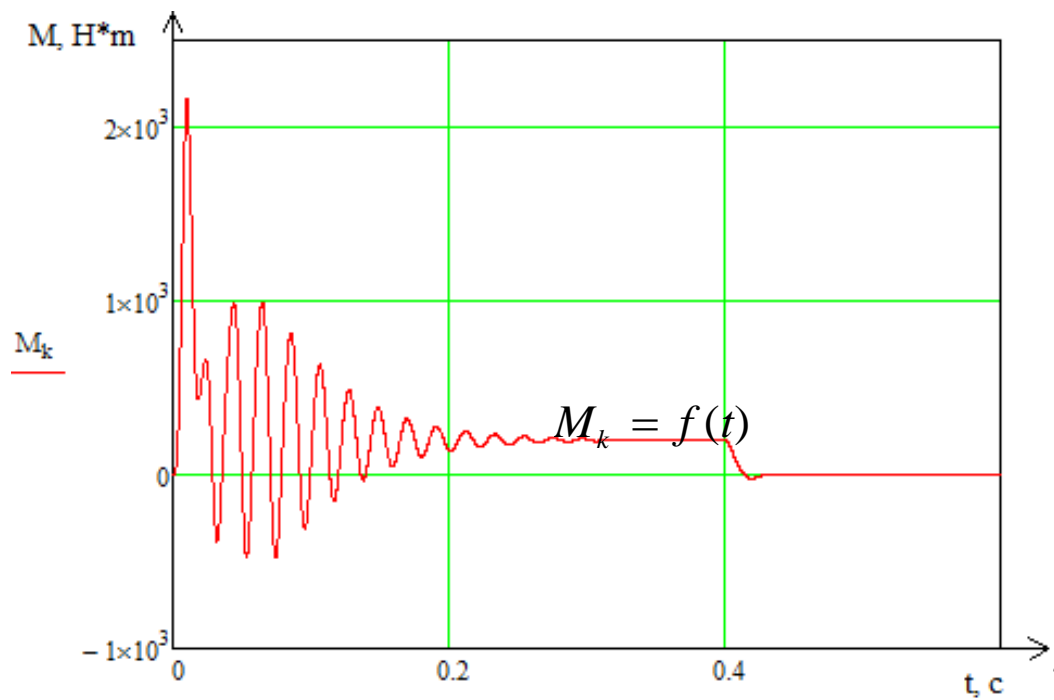
Розрахунковий вираз електромагнітного моменту асинхронного двигуна:

$$M_k := K_m \cdot \{\psi_{ra_k} \cdot I_{sb_k} - \psi_{rb_k} \cdot I_{sa_k}\}$$

Графіки крутного моменту двигуна і кутових частотних перехідних процесів обертання при запуску двигуна на холостому ході, перекиданні і скиданні вантажу показані на малюнках 19 і 20. Динамічна механічна характеристика показана на малюнку 19.



Мал. 19 - Перехідний процес швидкості при пуску під навантаженням та під час зниження навантаження

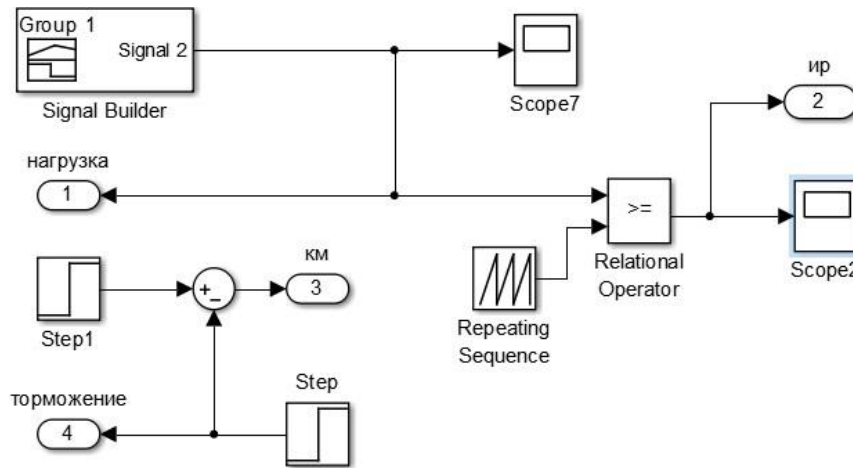


Мал. 20 - Перехідний момент при пуску навантаження і скиданні навантаження

Моделювання електроприводу стрічкового конвеєра на базі ІЧ - АД в комп'ютерному середовищі MATLAB

Система управління стрічковим конвеєром на основі досліджень і розробок

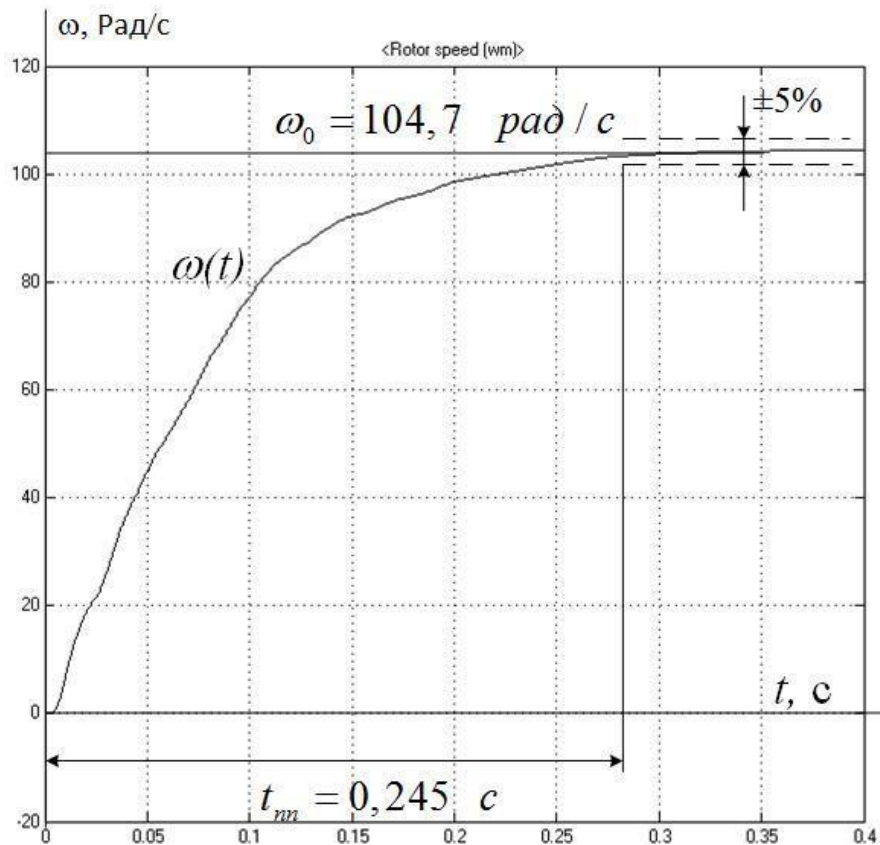
Система управління розроблена в програмному середовищі MATLAB (малюнок 21 а, б).



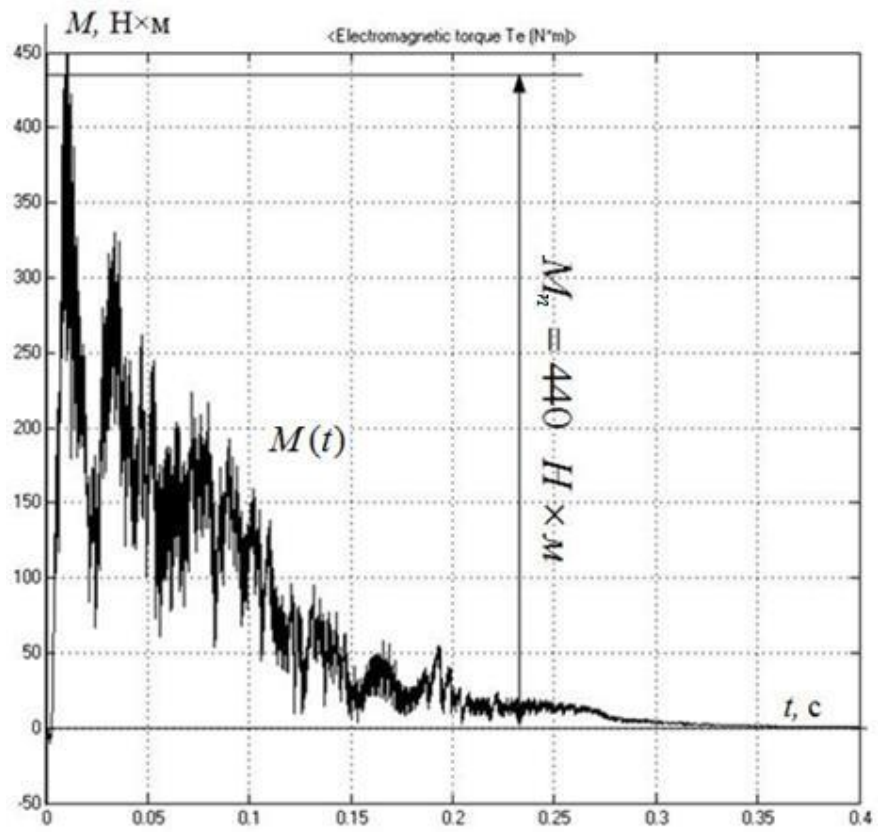
Мал. 21б – Блок системи управління ІР – АД

Пуск ЕП на холостому ході

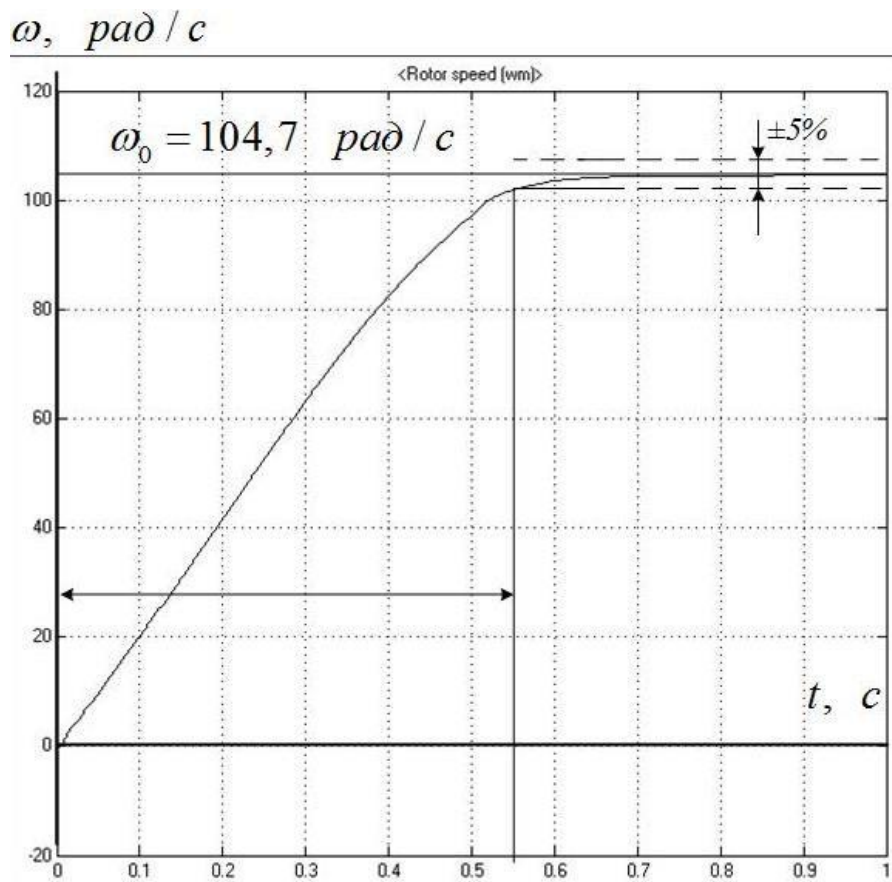
Змодельовано електропривод на холостих обертах і забезпечимо а) прямий пуск і б) плавний пуск. Плавний пуск виконується плавно, збільшуючи робочий цикл γ транзисторного ключа. Пуск напряму здійснюється за рахунок того, що одразу подається кінцеве значення скважності γ на транзисторний ключ. Результати моделювання представлені на малюнках 22а-б и 23а-б.



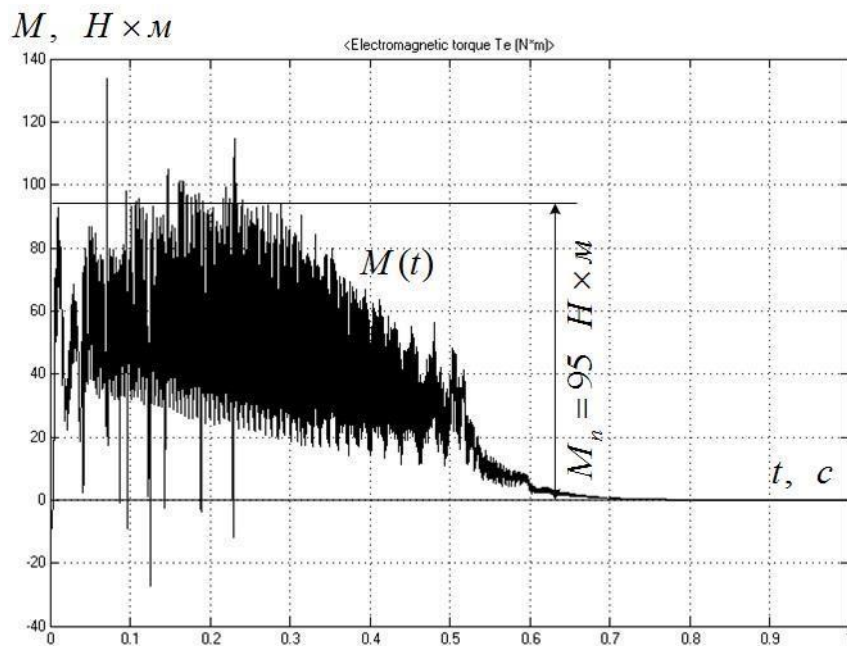
Мал. 22а – залежність швидкості від часу $\omega(t)$ під час пуску напряму



Мал. 22б – залежність моменту від часу $M(t)$ за умови пуску напрямую



Мал. 23а – залежність швидкості від часу $\omega(t)$ при плавному пуску

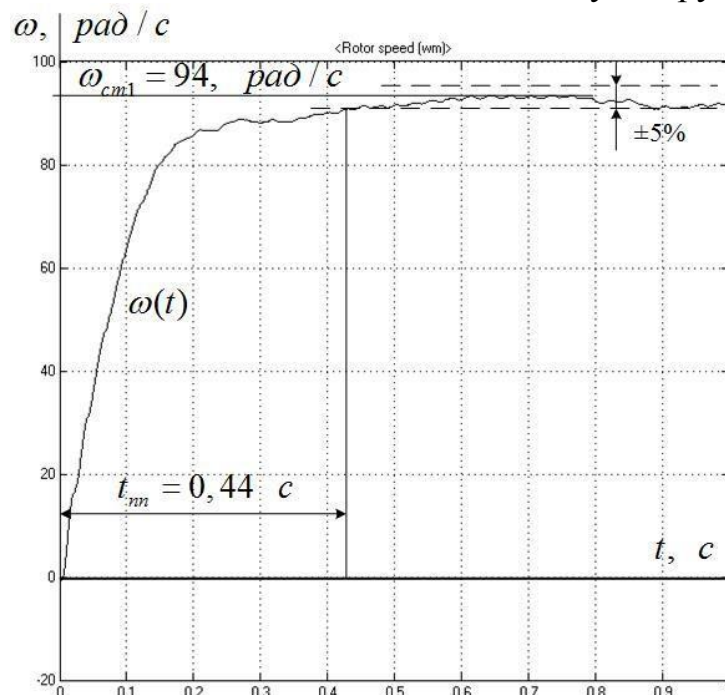


Мал. 23б залежність моменту від часу $M(t)$ при плавному пуску

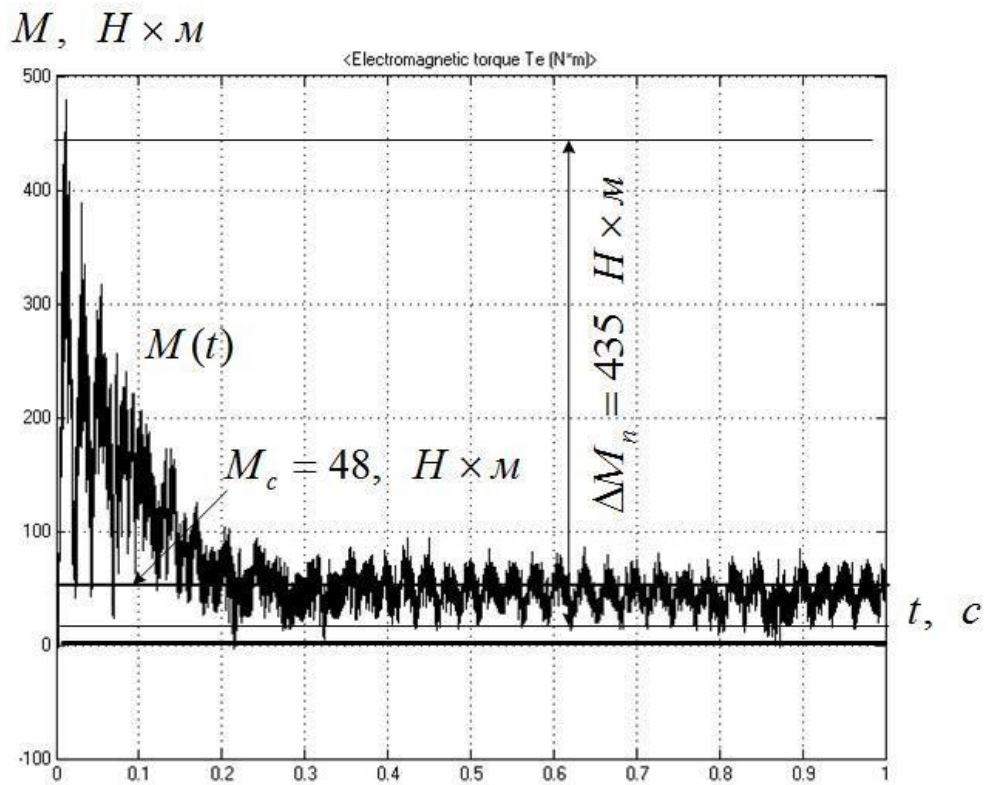
Проаналізував отримані характеристики, видно, що момент двигуна при плавному пуску значно менше, ніж при прямому пуску двигуна, що позитивно сказується на механічній частині приводу. Но при цьому час прехідного процесу t_{nn} збільшується.

7.1. Пуск ЕП під навантаженням

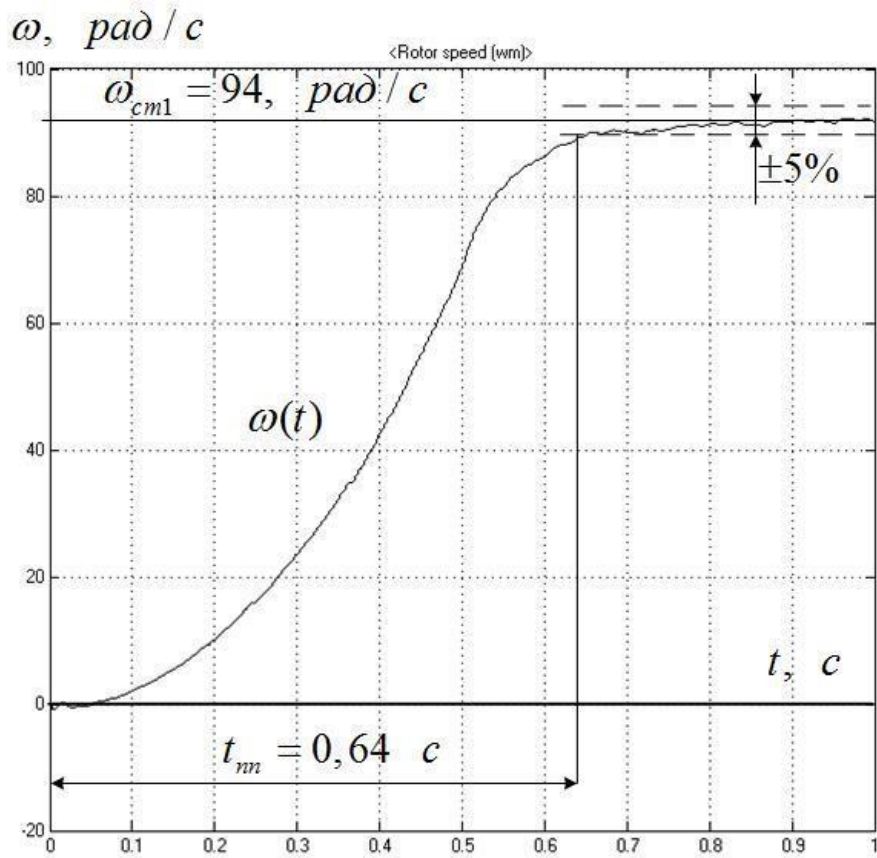
Виконуємо пуск електродвигуна під навантаженням напряму і плавно. Для цього подаємо навантаження на ЕП. На малюнках 24а – б і 25а – б представлені залежності швидкості, моменту і струму від часу.



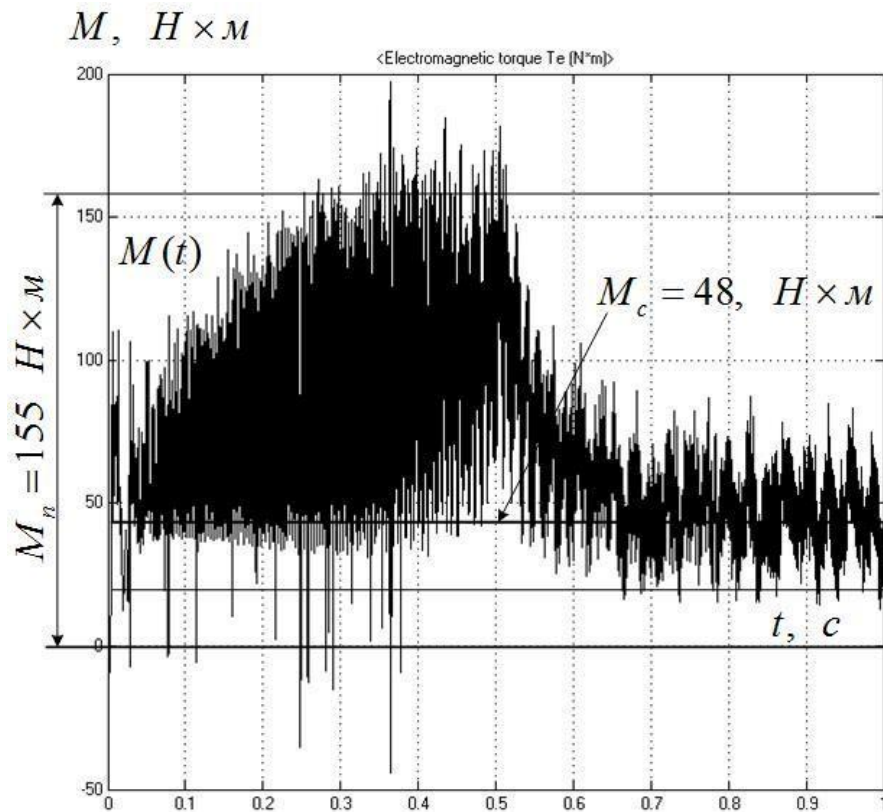
Мал. 24а – Залежність швидкості від часу $\omega(t)$, прямий пуск під навантаженням



Мал. 24б – залежність моменту від часу $M(t)$ при прямому пуску під навантаженням



Мал. 25а – залежність швидкості від часу $\omega(t)$ при плавному пуску під навантаженням



Мал. 25б – залежність моменту від часу $M(t)$ при плавному пуску під навантаженням

Проаналізувавши отримані характеристики зробимо висновок, що при плавному пуску, момент набагато менше, ніж при прямому пуску, що сприятливо позначається на механічній частині привода, але при цьому час перехідного процесу $t_{пн}$ збільшується

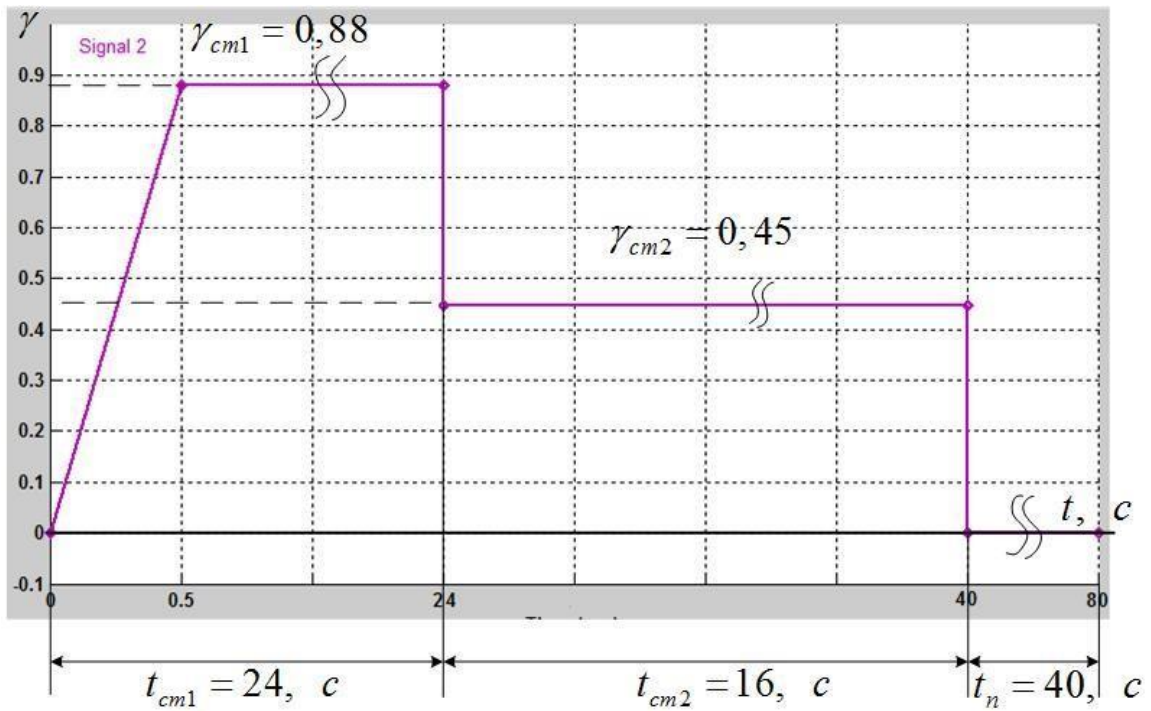
7.2. Цикл роботи ЕП стрічкового конвеєра

Змодулюємо в системі програмування MATLAB 2013a цикл роботи стрічкового конвеєра.

Дві швидкості електропривода необхідні для того, щоб наповнити ємність сипучим вантажем з більш високою точністю. Поки ємність порожня, насипаємо вантаж з більшою швидкістю, по мірі заповнення ємності швидкість зменшується, що дозволяє більш точно дозувати сипучі вантажі.

Двигун електропривода працює в 2 швидкості, $\omega_{cm1} = 94 \text{ рад/с}$,
 $\omega_{cm2} = 47 \text{ рад/с}$.

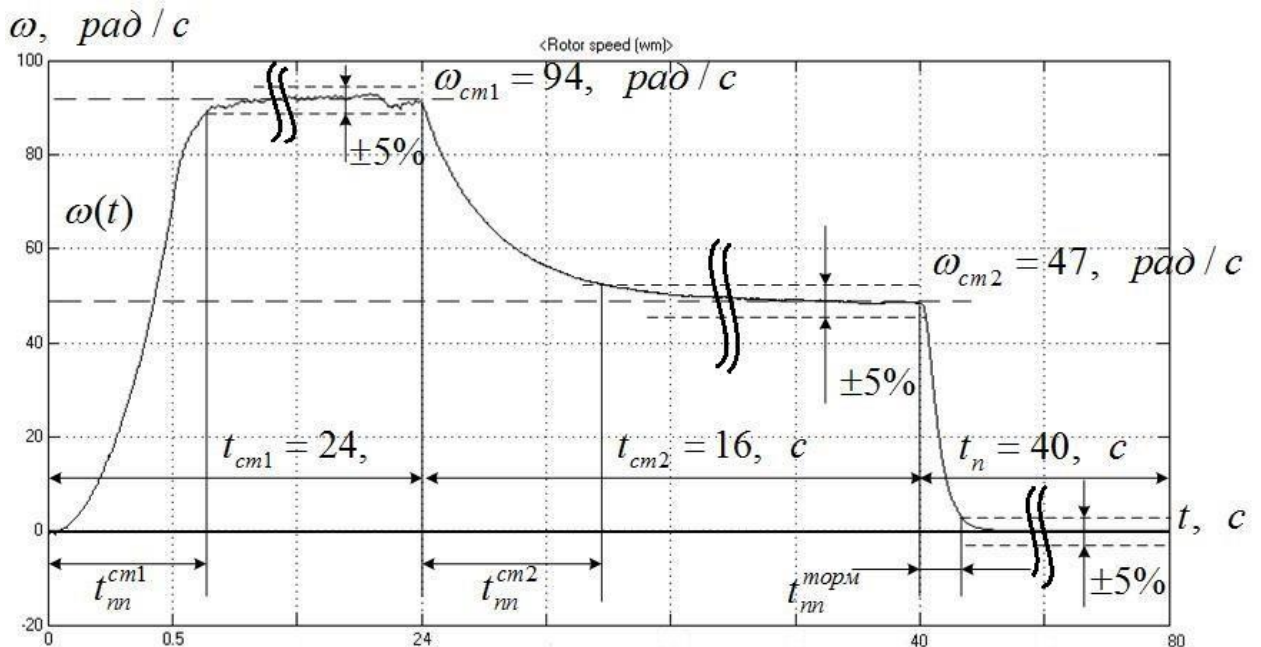
Забезпечимо плавний пуск за допомогою плавної зміни прогальності імпульсів γ . Далі для забезпечення необхідної швидкості, встановлюємо потрібне значення $\gamma_{cm1} = 0,88$, $\gamma_{cm2} = 0,45$ (малюнок 26).



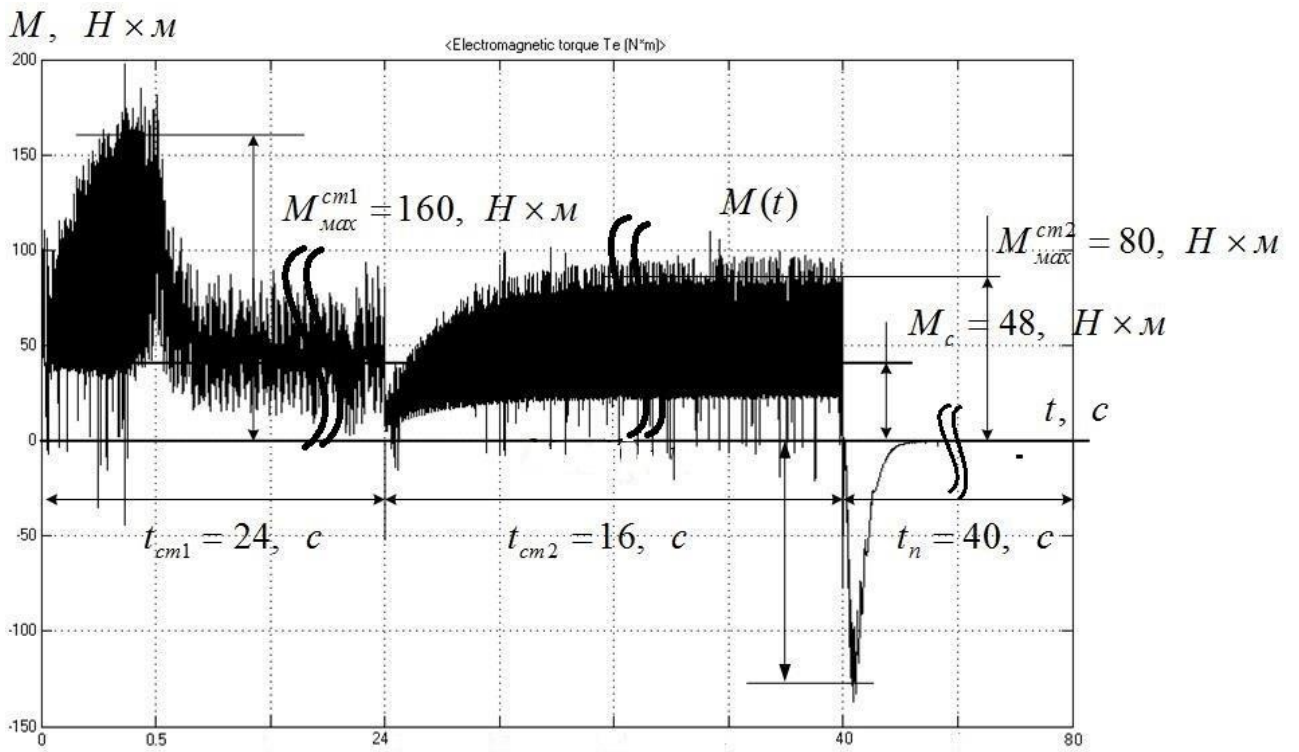
Мал. 26 – Графік залежності $\gamma(t)$

Встановивши необхідні значення шпаруватості імпульсів, щоб переконатися в правильності роботи електропривода, знімемо залежності швидкості моменту та струму від часу $\omega(t)$, $M(t)$.

Дані залежності представлені на малюнках 27, 28.

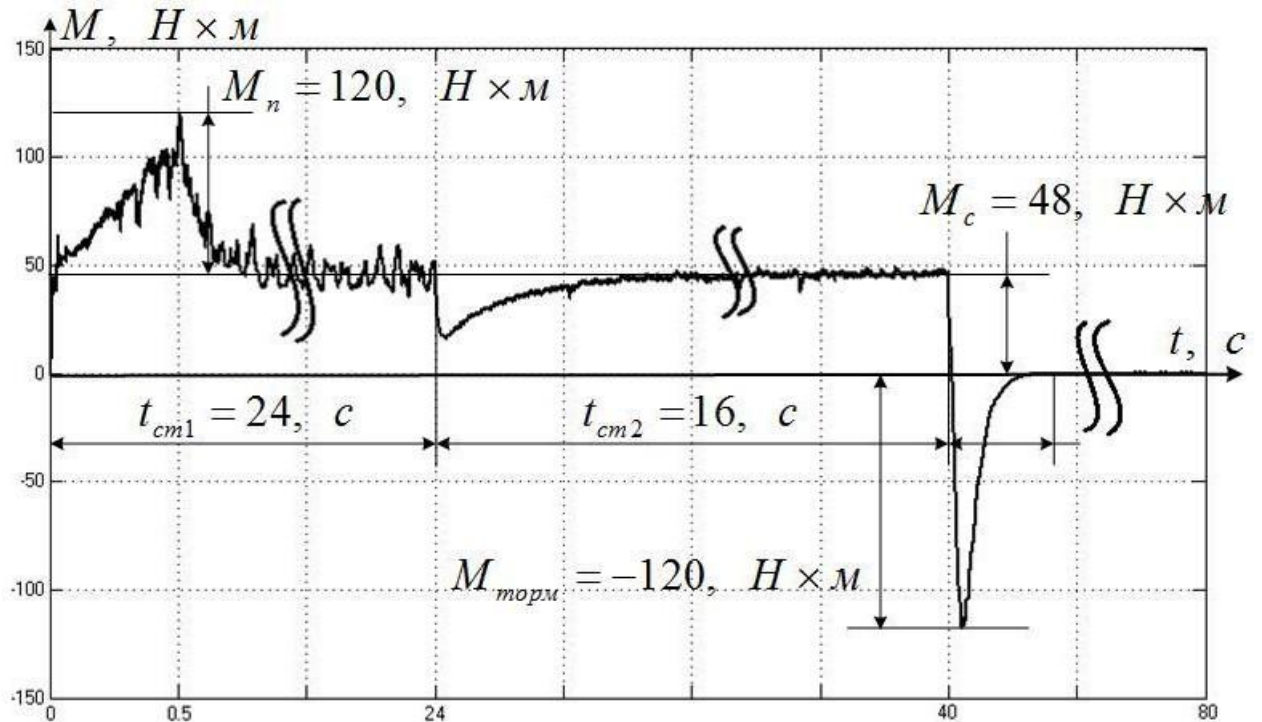


Мал. 27 Графік залежності швидкості від часу $\omega(t)$ за цикл роботи електроприводу



Мал. 28 – графік залежності моменту від часу $M(t)$ за цикл роботи електроприводу

Для того щоб позбутися пульсацій, необхідно збільшити частоту імпульсу, для цього в системі управління в блоці Repeating sequence збільшуємо частоту пульсації методом підбору. На малюнку 29 отримано графік залежності моменту від часу $M(t)$ при збільшеній частоті пульсації.



Мал. 29 - графік залежності моменту від часу $M(t)$ за цикл електроприводу при збільшеній частоті пульсації

Проаналізувавши отримані графіки залежностей швидкості та Моменту від часу $\omega(t)$, $M(t)$, можна зробити висновок, що модель електроприводу виконана правильно, оскільки були отримані необхідні швидкості обертання двигуна за допомогою імпульсного регулювання. Забезпечуючи плавний пуск, досягли невисоких значень моменту на валу двигуна, що сприятливо впливає на механічну частину приводу. Стрибки моменту пояснюються тим, що використовується імпульсне регулювання з частотою комутації ключа 5000 Гц.

8. Енергетика асинхронного електропривода

Активна енергія

Встановлений руховий режим: Корисна витрата енергії (механічна робота):

$$A_{2(1)} = M_{c1} \cdot \omega_{c1} \cdot t_{p1} = 45,819 \cdot 46,1 \cdot 16 = 33810 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$A_{2(2)} = M_{c2} \cdot \omega_{c2} \cdot t_{p2} = 45,819 \cdot 94,247 \cdot 24 = 103600 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Де: $\omega_{r1,2}$, $t_{p1,2}$ – кутова швидкість і час встановленого режиму. [17, с. 648] Постійна складова витрати енергії:

$$\Delta A_{c1} \approx \Delta P_{cn} \left(\frac{\omega_{c1}}{\omega_n} \right)^2 = 215,571 \cdot \left(\frac{46,1}{98,96} \right)^2 = 46,828 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$\Delta A \approx \Delta P_{c2} \left(\frac{\omega_{c2}}{\omega_n} \right)^2 = 215,571 \cdot \left(\frac{94,247}{98,96} \right)^2 = 195,528 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$\Delta P_{cn} = \Delta P_{n1} - \Delta P_{vn} = 1429 - 1213 = 215,571 \text{ Вт} - \text{постійні витрати потужності}$$

$$\Delta P_n = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) = 7500 \cdot \left(\frac{1}{0,84} - 1 \right) = 1429 \text{ Вт} - \text{повні витрати потужності}$$

$$\Delta P_{vn} = 3I_0^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2' = M_H \cdot (\omega_0 - \omega_n) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = 98,96 \cdot (104,72 - 98,96) \cdot \left(1 + \frac{0,9}{0,798} \right) = 1213 \text{ Вт}.$$

ΔP_{vn} - змінні витрати

$$B = 1 + \frac{2 \cdot I_0 \cdot (X_1 + X_2')}{U_1} = 1 + \frac{2 \cdot 14,2 \cdot (0,663 + 1,165)}{220} = 1,213 \cdot 10^3;$$

Змінні складові витрати енергії:

$$\Delta A_{v1} = 3 \cdot [I_0^2 R_1 + (I_2')^2 \cdot (R_1 + R_2')] \cdot t_{p1} = 3 \cdot [14,2^2 \cdot 0,9 + 11,641^2 \cdot (0,9 + 0,798)] \cdot 16 = 19760 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$\Delta A_{v2} = 3 \cdot [I_0^2 R_1 + (I_2')^2 \cdot (B \cdot R_1 + R_2')] \cdot t_{p1} = 3 \cdot [14,2^2 \cdot 0,9 + 11,641^2 \cdot (1,236 \cdot 0,9 + 0,798)] \cdot 24 = 31700 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_d'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \sqrt{\left(0,9 + \frac{0,798 + 18,697}{0,055} \right)^2 + (0,663 + 1,165)^2}$$

=11,641A.

Споживана енергія: $A_1 = A_2 + \Delta A_c + \Delta A_v$

$$A_{1(1)} = 33810 + 46,828 + 19760 = 53610 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$A_{1(2)} = 103600 + 195,527 + 31700 = 135500 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$A_1 = 189200 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Перехідний режим електричного гальмування:

$$\Delta A_{\text{сдин}} \approx [\Delta P_{\text{сн}} \left(\frac{\omega_{\text{кр}2}}{\omega_n} \right)^2 + U_B I_B] \cdot t_T = \left[\left(\frac{70,815}{98,96} \right)^2 + 220 \cdot 14,2 \right] \cdot 0,228 = 747,131 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$\Delta A_{\text{вдун}} = 3 \cdot (I'_{2\alpha})^2 \cdot (R_1 + R'_2) \cdot t_T = 3 \cdot (3,5)^2 \cdot (0,9 + 0,798) \cdot 0,228 = 14,228 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$A_T = \Delta A_{\text{сдин}} + \Delta A_{\text{вдун}} = 747,131 + 14,228 = 761,358 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Реактивна енергія

Споживання реактивної енергії за цикл:

$$A_p = 3 \cdot [I_0^2 (X_1 + X_\mu) + (I_2')^2 \cdot (X_1 + X_2')] \cdot t_{p1} + 3 \cdot [I_0^2 (X_1 + X_\mu) + (I_2')^2 \cdot (X_1 + X_2')] \cdot t_{p2} =$$

$$3 \cdot [14,2^2 (0,663 + 15,445) + (11,641)^2 \cdot (0,663 + 1,165)] \cdot 16 +$$

$$+ 3 \cdot [14,2^2 (0,663 + 15,445) + (11,641)^2 \cdot (0,663 + 1,165)] \cdot 24 =$$

$$= 273300 \text{ Вт} \cdot \text{с}$$

X_μ – індуктивний опір намагнічувального контуру двигуна

$$X_\mu \approx \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_0} \right)^2 - R_1^2 - X_1};$$

Енергетичні показники електропривода

Енергетичний (середньоцикловий) ККД:

$$\eta = \frac{\sum A_2}{\sum A_1 + \sum A_{\text{мех}}} = \frac{137500}{189200 + 761,358} \cdot 100\% = 72,4\%.$$

Где: $\sum A_1$ – сумарна витрата енергії із мережі за цикл ;

$$\sum A_2 \rightarrow \dots$$

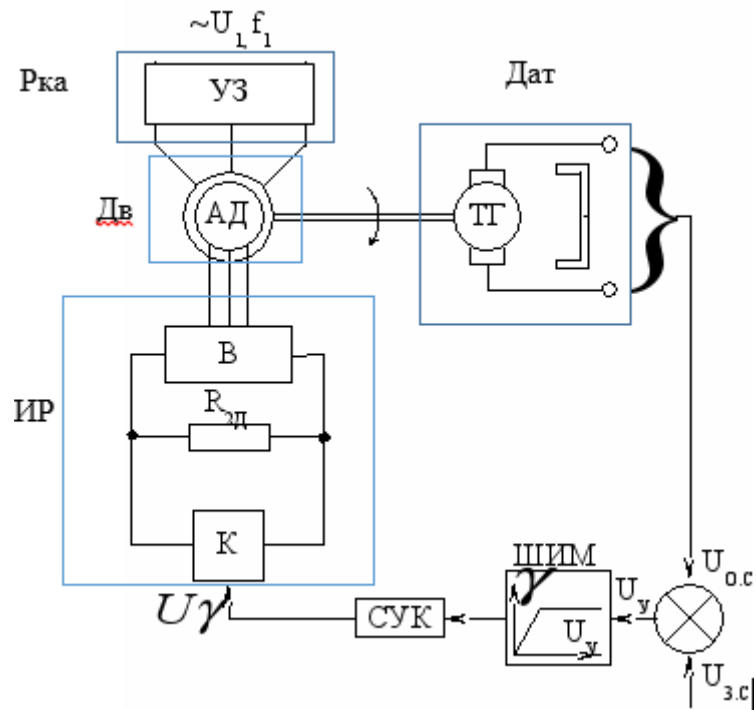
Енергетичний (середньоцикловий) коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{\sum A_1}{\sqrt{(\sum A_1)^2 + (\sum A_p)^2}} = \frac{189200}{\sqrt{(189200)^2 + (273300)^2}} = 0,69.$$

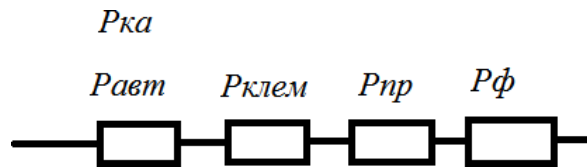
9. Розрахунок надійності системи.

Розрахунок виконується на підставі коефіцієнтів, отриманих за допомогою аналізу статистичних даних виходу з ладу різних вузлів, що входять до системи електроприводу. [17, с. 677]

На малюнку 30 представлено розподіл елементів на блоки.



Мал.30 – Функціональна схема управління



Мал.31 – Вузли схеми управління

Розрахунок ефективності окремих вузлів.

Еквівалентний елемент дорівнюватиме добутку всіх його складових – через те, що елементи з'єднані послідовно.

Где: $P_{ка}$ – ймовірність безвідмовної роботи комутаційної апаратури;
 $P_{пр} = 0,999$ – провідники;
 $P_{филт\text{р}} = 0,995$ – фільтр;
 $P_{авт} = 0,993$ – автоматичний вимикач;
 $P_{клем} = 0,991$ – клеми.

$$P_{ка} = P_{клем} \cdot P_{пр} \cdot P_{филт\text{р}} \cdot P_{авт} = 0,991 \cdot 0,999 \cdot 0,995 \cdot 0,993 = 0,978.$$

Ймовірність якісної роботи:

- Імпульсного регулятора $P_{ир} = 0,985$;
- Системи управління $P_{су} = 0,984$;
- Асинхронного двигуна $P_{ад} = 0,981$;
- Дачиків $P_{дат} = 0,993$;

Повна ймовірність якісної роботи системи:

$$P = P_{ир} \cdot P_{су} \cdot P_{ад} \cdot P_{дат} = 0,978 \cdot 0,985 \cdot 0,984 \cdot 0,981 \cdot 0,993 = 0,923$$

