

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Відомості про механізм і вимоги до електроприводу рольгангу	6
1.1 Сортамент товстолистого стану 3000	6
1.2 Технологічні вимоги до початкової заготівлі	6
1.3 Прокатка листів в чорновій/чистовій клітях	8
1.4 Обробка прокочуваних листів	13
1.5 Режим прокатки листів в чорновій/чистовій клітях	13
1.6 Опис конструкції та роботи механізму робочого рольгангу перед чорною кліттю	15
2 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна робочого рольгангу	19
2.1 Розрахунок статичних моментів	20
2.2 Розрахунок динамічних моментів і прискорень	24
2.3 Час керування електроприводом	28
2.4 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву	33
3 Вибір силової та перетворювальної техніки робочого рольганга	35
3.1 Вибір та обґрунтування силової частини системи та способу керування електроприводом	35
3.2 Вибір комплектного електроприводу	39
3.3 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя	46
3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електроприводу робочого рольганга	50
3.4.1 Джерела живлення електродвигунів та система захисту	50
3.4.2 Резервування перетворювальної техніки	51
3.4.3 Система керування (АСКТП)	54
4 Синтез системи підпорядкованого керування електроприводом робочого рольгангу	56
4.1 Математичний опис об'єкта керування	56
4.2 Розрахунок основних параметрів елементів системи електроприводу	57
4.3 Синтез регулятора струму	60

4.4 Синтез регулятора швидкості	4
4.4 Синтез регулятора швидкості	64
4.5 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості	68
5 Моделювання системи підпорядкованого керування електроприводом робочого рольгангу в MATLAB/SIMULINK	75
6 Охорона праці	86
6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів	86
6.2 Заходи з техніки безпеки праці та безпечної експлуатації установки.....	88
6.3 Розробка інструкцій з охорони праці	93
6.4 Протипожежна безпека.....	95
Висновок	97
Перелік джерел посилання	98
Додаток А	100

ВСТУП

Рольганги призначені для транспортування металу до прокатного стану, для подання металу у валки і прийому його з валків, для пересування металу до ножиць, пил, правильним і іншим машинам. Загальна довжина рольгангів досить значна, а вага їх сягає 20-30% від загальної маси механічного обладнання прокатного стану. За призначенням рольганги діляться на робочі і транспортні. Робочі рольганги розташовані безпосередньо у робочій клітці стану і служать для подання прокатуваного металу у валки і прийому його з валків. Перші роліки, розташовані праворуч і ліворуч від валків стану (по одному або по два з кожного боку), називають станини.

Транспортні рольганги (підводять і відводять) призначені для зв'язку між собою окремих допоміжних машин і пристроїв стану.

Об'єкт розробки відноситься до робочих рольгангів.

В даний час одними з найбільш поширених і такі, що масово випускаються промисловістю є системи керування електроприводом, побудовані за принципом підпорядкованого регулювання. У порівнянні з попередніми їм системами вони мають більшу швидкодію, виконані на базі уніфікованих елементів, що полегшує проектування і складання.

В умовах швидкого зростання питомої ваги регульованих електроприводів при суворій економії матеріальних і трудових ресурсів переваги електроприводу оцінюються не тільки за ефектом, досягнутому в технологічній сфері, а й за тим, якою ціною вони досягнуті в сфері виробництва і експлуатації обладнання. Тому існує тенденція до глибокої уніфікації пристроїв керування.

Об'єктом розробки у даній дипломній роботі є автоматизований електропривод робочого рольганга перед чорною кліткою товстолистового стану 3000. Вимоги до електроприводу і початкові дані для проектування наведені у відповідних розділах.

1 ВІДОМОСТІ ПРО МЕХАНІЗМ І ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РОЛЬГАНГУ

1.1 Сортамент товстолистового стану 3000

На товстолистовому стані 3000 прокочують листи з вуглецевої, конструкційної, низьколегованої і легованої сталі з тимчасовим опором розриву в холодному стані до 785 Нмм^2 з обрізаною кромкою наступних розмірів, мм:

- товщина листів – від 6 до 50;
- ширина листів – від 1219 до 2650;
- довжина листів – від 5000 до 1 2000.

(Довжина заготовки до 24000 мм).

Розміри листів, граничні відхилення по ним, площа і інші вимоги повинні відповідати вимогам нормативної документації – ДСТУ, технічним умовам, міжнародним стандартам, контрактам.

До складу стану 3000 входять: чотири нагрівальні печі, чорнова кліть «Дуо», чистова кліть «Кварто», дві листопрямильні машини, транспортні рольганги і шлепера, гільйотинні ножиці, дискові ножиці, кромко-крошительні ножиці і гільйотинні ножиці поперечного різання, термічне відділення, в складі якого чотири термічні печі, гартівний прес, спреєрна установка, правильне відділення.

Проектна потужність цеху – 1000 тисяч тонн в рік.

1.2 Технологічні вимоги до початкової заготівлі

Вихідним матеріалом для прокату листів служать сляби, одержувані з обтискного цеху, МНЛЗ і сляби поставляються іншими заводами.

Розміри слябів, мм:

- товщина – від 140 до 320;
- ширина – від 1000 до 1400;
- довжина – від 1500 до 2500;
- маса до 7,5 т.

Раціональні розміри слябів визначають залежно від схеми прокатки на чорновій кліті (уздовж або поперек) і умов нагріву металу в печах. При поздовжній схемі прокатки поздовжня вісі литого і катаного сляба збігається з поздовжньою віссю гуркоту. Для отримання оптимальної форми розкатів служить система керування формою розкатів в плані на чорновій кліті.

Хімічний склад сталі, і граничні відхилення по масовій частці елементів повинні відповідати вимогам діючих стандартів, технічних умов і нарядів-замовлень.

Допуски за розмірами слябів, призначених для прокатки листів повинні бути:

- для катаних слябів:

по товщині 0; 3 мм;

по ширині 0; 10 мм;

по довжині 0; 30 мм.

- для литих слябів:

по товщині 0; 3 мм;

по ширині ± 10 мм;

по довжині -20; +30 мм.

Форма, розміри, граничне відхилення та інші технічні вимоги для слябів повинні відповідати наступним вимогам:

- ромбічність (різниця діагоналей поперечного перерізу) не більше 15 мм;

- серповидність не більше 10 мм на 1 м довжини;

- неплщинність не більше 20 мм на 1 м довжини;

- косина різку (різниця діагоналей великих граней) не повинна перевищувати для катаних слябів – 30 мм, для литих – 10 мм. Допускається не більше 15% катаних слябів однієї плавки з косиною 40 мм.

- розширення слябів на відстані 150 мм від торця при різанні на ножицях – не більше 10% від товщини;

- опуклість (увігнутість) бічних граней слябів – не більше 10 мм на сторону.

Ширина плоскої ділянки на бічних гранях слябів повинна бути не менше 40 % від товщини сляба. Висота задирок при різанні на ножицях – не більше 10 мм.

Загальна серповидність і відхилення від площини не повинні перевищувати добуток допустимої на 1 м серповидності або відхилення від площини на довжину сляба в метрах.

З поверхні слябів вогневою зачисткою видаляються всі дефекти, глибиною не більше 1 мм. На головних качаних слябах з боку протилежному клейму на відстані 300–350 мм від торця на бічній грані роблять часткове (на глибину до 10 мм) видалення глибоких дефектів: плена, розкатане забруднення. Ділянки, що зачищаються, після обробки очищаються від шлаків. Гранична глибина зачистки на широких гранях на слябах товщиною до 140 мм включно – 30 мм, понад 140 мм – 50 мм. При збігу дефектів на протилежних гранях сумарна глибина зачистки цих дефектів не повинна перевищувати відповідно 30 мм і 50 мм. Ділянка з дефектами глибиною понад зазначеної, відрізається, а при неможливості видалення такого дефекту – сляб переводять в брак.

Гранична глибина зачистки на бічних гранях: сляби товщиною до 140 мм включно не зачищаються, понад 140 мм зачищаються на 50 мм. Зачистку дефектів на бічних гранях виробляти по всій їх довжині. При глибині дефектів більш 50 мм робиться один надріз глибиною до 30 мм.

Величина розвалу в місці зачистки дефектів на поверхні слябів повинна бути не менше 1:6 (відношення глибини зачистки дефекту до ширини канавки при зачистці).

Кінці слябів, що відповідні головній і донній частинам злитка, не повинні мати слідів розшарування.

Мінімальна довжина сляба повинна бути не менше 1500 мм. Сляби, прийняті від блюмінга після обробки, повинні бути покладені в штабелі клеймом в одну сторону, рівними рядами. Висота штабеля не повинна перевищувати трьох метрів.

1.3 Прокатка листів в чорновій/чистовій клітках

1.3.1 Прокатка слябів на чорновій клітці

Інформація про сляби, які видаються з нагрівальних печей, передається по комп'ютерній мережі на монітор стану гарячої прокатки. Виданий з печі сляб

по підвідному рольгангу транспортується через камери гідрозбиву окалини до валків. Якщо сляб рухається не по осі рольганга, то він центрується лінійками маніпулятора. Цегла, прокладки та інші предмети, що знаходяться на поверхні сляба видаляються включенням гідрозбиву або вальцювальником.

Прокатка проводиться по поздовжній або поперечній схемам. Вибір схеми прокатки, якщо не вказано в фабрикації схеми прокатки і не передбачено стандартом або технічними умовами, проводиться системою автоматичного керування процесом прокатки. При заданих схемах прокатки з фабрикації оператор вручну вводить в комп'ютер необхідну схему.

Перші два – чотири пропуску виконуються уздовж по довжині сляба:

- при поздовжній схемі прокатки з протяжкою довжина одержуваного розкату не повинна перевищувати 280 мм;

- при поперечній схемі прокатки для отримання необхідної ширини розкату (з урахуванням припуску на обрізку бічних крайок) сумарна величина обтиснень визначається довжиною сляба і необхідної шириною розкату.

Вибір кількості пропусків по довжині сляба, проводиться автоматично програмним забезпеченням, для отримання оптимальної форми розкату. Інформація про схеми прокатки, температурно-деформаційним, швидкісним режимах прокатки на чорновій кліті, виводиться на монітор оператору стану гарячої прокатки.

Після протяжки в довжину розкат повертають (кантують) на 90° за допомогою робочого рольганга з конічними роликками з задньої або передньої сторони кліті і центрують маніпуляторами:

- розбивки ширини – при поздовжній прокатці;

- отримання заданої товщини розкату – при поперечній прокатці.

При поперечній прокатці, після кантування, одночасно з центруванням проводиться вимірювання отриманої довжини сляба – ширини майбутнього листа з припуском на бічну крайку. Якщо довжина (ширина) коротше на 20 мм і більше необхідної, оператор повинен розкантувати сляб назад і протягнути його додатково в довжину, задаючи необхідні обтиски шляхом коригування роз-

мірів розкату в програмі прокатки. Розрахункові значення збільшення довжини розкату при стисненні на 1 мм наведені в таблиці 1.1.

Якщо довжина (ширина) перевищує задану більш, ніж на 30 мм, то даний сляб необхідно катати по поздовжній схемі.

При поздовжній прокатці, після розбивки ширини, розкат повертають на 90° за допомогою конічних роликів, центрують маніпулятором і прокочують далі до отримання заданої товщини підкату для передачі на чистову кліть. Одночасно з центруванням проводиться вимірювання ширини підкату по циферблату лінійок.

Величина припуску на обрізку бічних крайок встановлюється в межах 80–120 мм. Рекомендуються наступні припуски на обрізку бічних крайок:

- для листів товщиною до 20 мм при довжині розкатів 24–30 м припуск 100–120 мм;
- для листів всіх товщин при довжині розкатів до 12 м припуск – 80-100 мм;
- для листів товщиною до 20 мм при довжині розкатів до 24 м припуск – 9-110 мм.

Припуски на крайку вказані при вимірюванні в чорновій кліті. Величина припуску на крайку в рекомендованих вище межах, встановлюється виробничим майстром і вальцювальником стану в кожному окремому випадку в залежності від форми отриманого розкату, роботи чистової кліті, одержуваної довжини розкату і результатів вирізки листів на ножицях.

Режими обтиснень і схеми прокатки розраховуються автоматично і не повинні перевищувати допустимі для кліті.

Товщина розкату, переданого на чистову кліть, в залежності від товщини листа, що прокочуються визначається автоматично для забезпечення рівномірного завантаження чорнової і чистової кліті і повинна бути не менше:

- | | |
|------------|-----------|
| - 6-8 мм | 20-30 мм; |
| - 9-10 мм | 30-40 мм; |
| - 11-15 мм | 40-50 мм; |
| - 16-20 мм | 50-60 мм; |
| - 21-50 мм | 65-90 мм. |

Таблиця 1.1 – Розрахункові значення збільшення довжини розкату при стисненні 1 мм за прохід

Товщина розкату, мм	Збільшення ширини (довжини) розкату при обтисненні 1 мм при ширині, мм											
	1550-1600	1650-1700	1750-1800	1850-1900	1950-2000	2050-2100	2150-2200	2250-2300	2350-2400	2450-2500	2550-2600	2650-2700
190-200	8	9	9	10	10	11	12	13	14	15	16	16
170-180	9	10	10	11	11	12	13	14	15	16	18	17
150-160	10	11	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19
130-140	12	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20	20
110-120	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	24
100-105	15	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
90-95	17	20	21	22	23	24	25	26	28	30	30	32
80-85	20	22	23	25	26	27	28	30	32	34	38	36
70-75	24	25	27	28	30	32	33	35	36	38	39	40
60-65	28	30	31	32	36	38	40	41	42	44	46	46
50-55	32	35	37	39	42	44	46	48	50	52	52	54

Прокатку на чорновій кліті зазвичай закінчують непарним пропуском. Якщо передній кінець розкату загинається настільки, що важко його подати на валки чистової кліті, в цих випадках прокатку необхідно закінчувати парним пропуском.

Розкат прокочують і відправляють на чистову кліть строго по вісі рольганга.

Температура розкатів, що відправляються на чистову кліть повинна бути не менше 1050 °С для сталі з вмістом вуглецю 0,30% і більше, а також для низьколегованих марок сталі, що прокочуються не по режимам контрольованої прокатки.

При прокатці на чорновій лінії з поверхні розкату повинна бути видалена повністю окалина. Видалення окалини проводиться за допомогою верхнього та нижнього гідрозбиву, встановлених перед і за кліттю. У разі неповного видалення окалини гідрозбивом використовують для цієї мети кухонну сіль. Тиск води в системі гідрозбиву окалини при прокатці повинен бути не менше 19,6 МПа (200 атмосфер). Включення гідрозбиву має бути коротким і своєчасним: під час включення сляб повинен переміщатися, щоб виключити місцеве охолодження розкату в місцях удару струменя.

1.3.2 Прокатка листів на чистовій кліті

Прокатка листів на чистовій кліті виробляється строго по середині бочок валків, для чого розкат центрується за допомогою маніпуляторів з обох боків кліті, у всіх пропусках. Центрування проводиться без затримок, щоб уникнути тривалого перебування розкату без руху на роликах і місцевого його охолодження.

Розкат задається суворо по вісі рольганга при швидкості валків не більше 50 об/хв (5,25 рад/с).

При загнутому вгору передньому кінці розкату швидкість захвату зменшується до мінімальної.

За станом переднього кінця розкату стежать оператор і вальцювальник чистової кліті.

При великій зігнутості догори розкат відправляється назад, на чорнову кліть, для пропрасування, про що негайно повідомляється оператору по селектору.

При неможливості повернення на чорнову кліть розкат приймається при максимальному розвороті валків і пропрасовується в зворотному напрямку.

Задана ширина замірюється лінійками маніпулятора, а перед кантуванням розраховується автоматично по довжині розкату.

Задана товщина розкату забезпечується гідронатискальним пристроєм кліті і автоматичним забезпеченням. Під час прокатки вальцювальник чистової кліті повинен ретельно стежити за станом поверхні листів, не допускаючи уковання частинок металу, що відірвалися і сторонніх предметів.

Оператор стану зобов'язаний систематично контролювати ширину розкатів.

1.4 Обробка прокочуваних листів

Після прокатки вже готові листи з транспортного рольгангу за кліттю «Кварто» надходять в правильну машину №1.

Листи проходять через правильні машини РПМ-1 і РПМ-2. Все прокатані на стані розкати проходять гарячу правку в РПМ-1 і РПМ-2.

Далі відбувається охолодження листів.

Це проводиться поштучно під час їх переміщення по транспортним рольгангам і передавальним шлеперам. На транспортному рольгангу листи можуть охолоджуватися за допомогою вентилятора з розпиленням води.

Після охолодження листів відбувається огляд верхньої поверхні, кантування і попереднє маркування листів.

Верхня сторона листів оглядається контролером УТК на транспортному рольгангу перед інспекторським столом. Тут же проводиться періодичне вимірювання товщини листів. При кантуванні листи розташовують паралельно вісі кантувателя на відстані не більше 200 мм від виступів важелів.

Потім листи надходять на ділянку різання де відрізаються кромки листів і ріжуться на мірні довжини. Після порізки на дискових, кромкокришільних і гільйотинних ножицях листи надходять на стелажі видачі. На стелажих видачі проводиться огляд верхньої поверхні листів, зачистка дефектів, перевірка геометричних розмірів, клеймовки, маркування та приймання листів ВТК. Зняті зі стелажів листи укладаються на листообробки на складі листів в штабелі, а по надходженню вагонів в цех вантажаться і відправляються замовнику за призначенням.

1.5 Режим прокатки листів в чорновій/чистовій клітях

Приблизні режими обтисень у чорновій і чистовій клітях при прокатці листів шириною 1500–2500 мм з вуглецевих сталей наведені в таблицях 1.2, 1.3.

1.6 Опис конструкції та роботи механізму робочого рольгангу перед чорною кліттю

1.6.1 Опис конструкції

Кінематична схема рольгангів представлена на рисунку 1.1.

Рольганги перед чорною кліттю містять 12 роликів (секція 44). Ролики – конічні зі зменшенням діаметра бочки ролика від приводного боку до не приводного, цільноковані. Порядкова нумерація роликів в кожному з рольгангів – в напрямку прокатки металу в непарних пропусках. Опори роликів – дворядні сферичні підшипники. Підшипники розташовані в герметичних корпусах, розміщених в литих рамах, і закриті кришками. Рами між собою стягнуті траверсами.

Кожен ролик рольганга перед кліттю індивідуально приводиться в обертання спеціальним двигуном постійного струму зі зниженою частотою обертання (до них підводиться охолоджуюче повітря). При цьому у рольганга перед чорною кліттю двигуни парних роликів розташовані з боку обслуговування, а двигуни непарних роликів – з боку головних приводів чорної кліті. У рольганга за чорною кліттю двигуни парних роликів розташовані на стороні головних приводів, а двигуни непарних роликів – на стороні обслуговування.

Рольганг перед чорною кліттю обладнаний маніпуляторними лінійками, призначеними для центрування сляба (розкату) по поздовжній вісі прокатки.

1.6.2 Опис роботи механізмів

На робочий рольганг перед чорною кліттю надходить черговий сляб, що пройшов очищення від пічної окалини в установці гідрозбиву. Після повної зупинки перед чорною кліттю сляб центрується маніпуляторними лінійками і може бути заданий в прокатку при розведених маніпуляторних лінійках перед і за кліттю, при зупинених натискних гвинтах в кліті і при відсутності розкату з попереднього сляба на робочому рольгангу за кліттю.

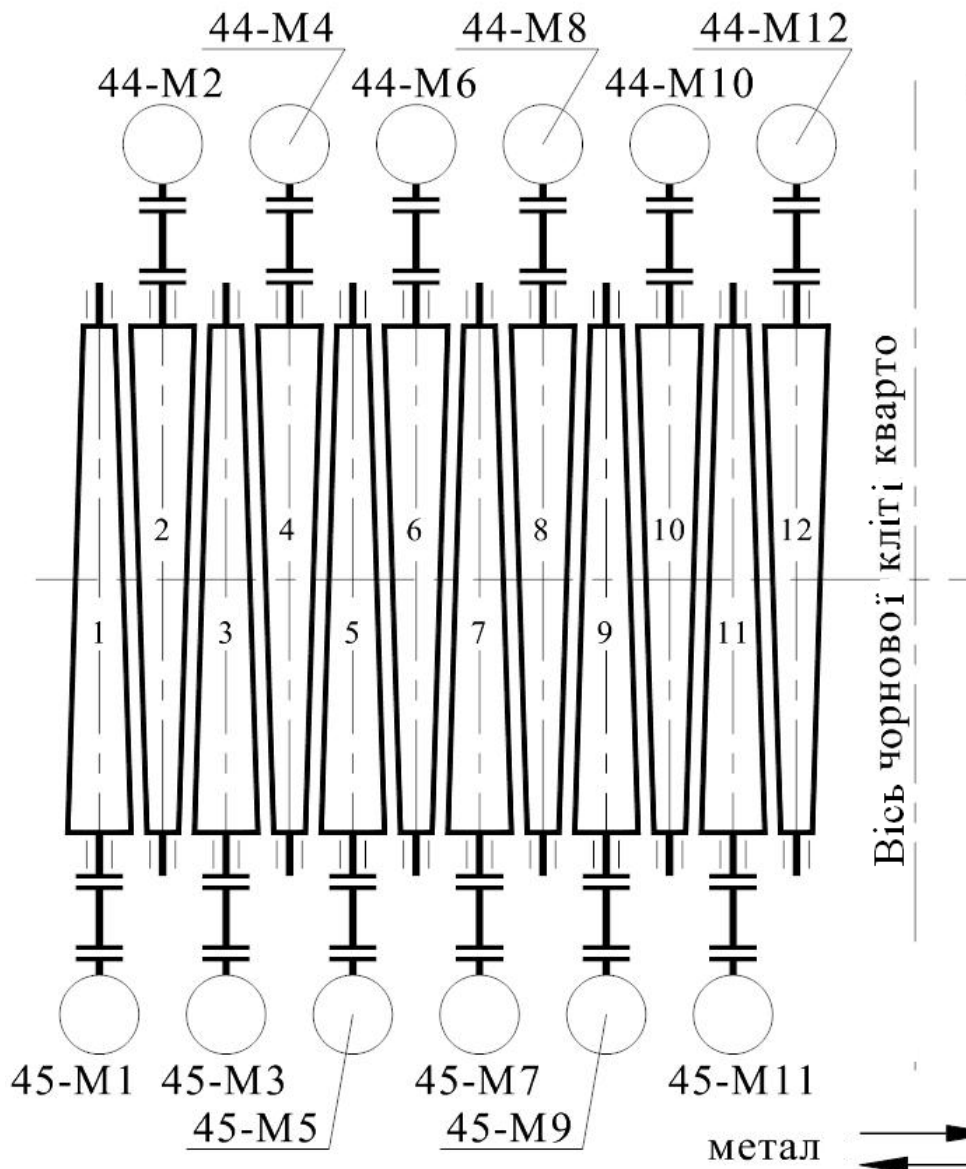


Рисунок 1.1 – Кінематична схема робочого рольганга перед чорною кліттю

Режим прокатки в чорній кліттю – реверсивний. При цьому в кожному конкретному пропуску підтримується рівень швидкості, необхідний за технологією. У загальному випадку: кількість пропусків в чорній кліттю – непарне, а швидкість від пропуску до пропуску збільшується відповідно до зменшення товщини розкату.

У процесі прокатки швидкість подачі металу рольгангом перед кліттю узгоджується зі швидкістю станини роликів і з головним приводом кліттю. Завдання швидкостей рольгангу робітником перед і за кліттю здійснюється системою автоматизації з урахуванням випередження і відставання металу в осередку де-

формації кліті.

Повернення металу в прокатку в парному пропуску можливе після установки нового отвору валків натискними гвинтами, а також після центрування розкату по поздовжній вісі прокатки (маніпуляторними лінійками за кліттю). Обидві згадані операції можуть виконуватися одночасно.

При досягненні довжини розкату, що відповідає ширині майбутнього підкату і готового листа, розкат кантується в плані на 90° і (згодом) центрується по поздовжній вісі прокатки. Поворот розкату в горизонтальній площині здійснюється за рахунок одночасного включення приводів парних і непарних роликів рольганга в протилежних напрямках (короткочасно). Момент закінчення процесу повороту розкату визначається візуально оператором. Можливість повороту розкату в горизонтальній площині передбачається як перед, так і за чорною кліттю.

Після завершення прокатки в чорновій кліті розкат транспортується в напрямку до проміжного рольгангу, звільняючи рольганг робочий за чорною кліттю.

Приводи рольгангів працюють в повторно-короткочасному, реверсивному режимі. Швидкість регулюється зміною величини напруги, що живить якірні ланцюги двигунів.

Технологічні та технічні дані наведено в табл.1.4 та 1.5 відповідно.

Таблиця 1.4 – Вихідні технологічні дані розкату

Найменування та розмірність технічного параметра	Значення параметра
Товщина сляба, мм	200...250...300
Ширина сляба, мм	1500...2800
Довжина сляба, мм	1600...2300
Маса максимальна сляба, кг	до 7500
Товщина мінімальна підкату, мм	20
Маса максимальна підкату, кг	до 7500
Швидкість транспортування розкату, м/с	0,5...3

Таблиця 1.5 – Технічні дані робочого рольганга перед чорнової кліттю

Найменування та розмірність технічного параметра	Значення параметра
Діаметр бочки ролика, мм	410/250
Довжина бочки ролика, мм	4200
Крок роликів, мм	350
Кількість роликів, шт.	12
Маса ролика, кг	3216
Середній діаметр підшипника, мм	
- привідна сторона	235
- непривідна сторона	210

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА РОБОЧОГО РОЛЬГАНГУ

На даний момент в якості приводних електродвигунів електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю товстолистового стану 3000 встановлено двигуни постійного струму без стабілізуючою обмотки типу Д810У2 зі зниженою частотою обертання з технічними даними, наведеними в таблиці 2.1. Двигуни оснащені датчиками швидкості. Рольганг перед кліттю містить 12 конічних роликів. Привід роликів індивідуальний, безредукторний. Перевіримо можливість роботи рольгангу з існуючими двигунами.

Вихідні дані, необхідні для подальших розрахунків, представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Технічні дані електродвигуна Д810У2

Найменування параметра	Чисельне значення
Номінальна потужність, кВт	$P_H = 17,5$
Номінальна напруга, В	$U_H = 220$
Номінальний струм, А	$I_H = 100$
Номінальна частота обертання, об/хв	$n_H = 165$
Каталожна тривалість включення, %	ПВ=100
Максимальний струм перенавантаження (дозволений), А	$I_{max} = 250$
Максимальний обертовий момент, Н·м	$M_{max} = 2900$
Момент інерції якоря, кг·м ²	$J_{дв} = 3,125$

Таблиця 2.2 – Режим прокатки листів 19×2685×13123 мм в чорновій кліті (сляб 250×1300×2060 мм, маса 5,25 т, сталь Х56, температура 850-830 °С)

Товщина листа h , мм		Ширина листа b , мм		Довжина листа L , мм		Швидкість прокатки $V_{пр}$, м/с	
	1		1		1		1
1	217.93	1	1321.3	1	2404.1	1	1.6
2	194.62	2	1324	2	2686.3	2	1.6
3	175	3	2688.6	3	1470.9	3	1.68
4	155.59	4	2691.1	4	1652.6	4	1.68
5	137.04	5	2693.6	5	1874	5	1.68
6	120.19	6	2693.5	6	2135.8	6	1.68
7	107.2	7	2695.2	7	2391.9	7	1.68
8	94.17	8	2695.1	8	2719.9	8	1.68
9	81.68	9	2718.4	9	3098.9	9	1.7
10	70.26	10	2720.2	10	3599.1	10	1.7
11	60	11	2721.9	11	4209.8	11	1.7

Вихідні технологічні і технічні дані механізму рольганга наведені в таблиці 1.4.

2.1 Розрахунок статичних моментів

За час циклу роботи рольганга його електродвигуни навантажені статичними моментами різної величини. При розрахунку виділяють наступні основні статичні моменти: момент холостого ходу, момент транспортування металу по роликam, момент буксування роликів по транспортованому металу [1-3]. Розрахунок ведеться для індивідуального, безредукторного електроприводу.

Момент холостого ходу на приводному валу ролика:

$$M_{х.р} = \frac{9,81m_p d_{ш} \mu_{ш}}{2} = \frac{9,81 \cdot 3216 \cdot 0,222 \cdot 0,007}{2} = 24,6 \text{ Нм}, \quad (2.1)$$

де $m_p = 3216 \text{ кг}$ – маса одного ролика;

$d_{ш} = \frac{0,235 + 0,21}{2} = 0,222 \text{ м}$ – середній діаметр шийки ролика (діаметр цапфи підшипника);

цапфи підшипника);

$\mu_{\text{ш}} = 0,007$ – коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання ролика під дією високих температур металу що транспортується [1, табл. 5.3].

При визначенні холостого ходу необхідно також враховувати втрати в електродвигуні. Момент холостого ходу електродвигуна:

$$M_{\text{х.д}} = 0,07M_{\text{н}} = 0,07 \cdot 1012,8 = 70,9 \text{ Нм}, \quad (2.2)$$

где $M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{17,5 \cdot 10^3}{17,3} = 1012,8 \text{ Нм}$ – номінальний момент електродвигуна;

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 16}{30} = 17,3 \text{ 1/с} \text{ – номінальна швидкість електродвигуна.}$$

Таким чином, повний момент холостого ходу рольганга:

$$M_{\text{х}} = M_{\text{х.р}} + M_{\text{х.д}} = 24,6 + 70,9 = 95,5 \text{ Нм}, \quad (2.3)$$

Момент транспортування металу по роликах:

$$M_{\text{тр}} = 9,81m_{\text{м}} \left(\frac{d_{\text{ш}}}{2} \mu_{\text{ш}} + f \cdot 10^{-2} \right), \quad (2.4)$$

де $m_{\text{м}}$ – маса металу, що приходить на один ролик рольганга, кг;

$f = 0,15 \text{ см}$ – коефіцієнт тертя кочення металу по роликам [1, с. 88].

Для рольгангів з груповим електроприводом величина $m_{\text{м}}$ зазвичай приймається рівній масі злитка $m_{\text{сл}}$. Однак для рольгангів з індивідуальним електроприводом або з груповим електроприводом, але при довгих смугах транспортованого металу, величина $m_{\text{м}}$ має кілька невизначене значення, оскільки залежить від кількості точок дотику металу з роликами рольганга. При цьому істотним є ступінь викривлення металу, що прокочується, точність установки рольганга за рівнем і т.д.

Якщо розкат має ідеальну рівну форму, а утворюючі поверхні роликів один і той самий рівень щодо нульової позначки цеху, можна вважати, що розкат спирається рівномірно на всі ролики рольганга по своїй довжині. В цьому

випадку маса (вага) металу, що припадає на один ролик дорівнює:

$$m_{\text{м.мин}_i} = m_{\text{сл}} \frac{l_{\text{ш}}}{L_i}, \quad (2.5)$$

де $m_{\text{сл}} = 5255,5 \text{ кг}$ – маса сляба розраховується з ширини, товщини і довжини сляба (щільність сталі 7850 кг/м^3);

$l_{\text{ш}} = 0,35 \text{ м}$ – крок роликів;

L_i – довжина листа у кожному проході, м (див. табл. 2.2).

Реально розкат не має рівної форми. У процесі прокатки і транспортування на розкаті мають місце вигини кінців, спучування. Крім того, через похибки у виготовленні роликів, похибки монтажу утворюючі поверхні роликів можуть відрізнятись рівнем щодо нульової позначки цеху. Отже, в реальних умови розкат по своїй довжині не спирається рівномірно на всі ролики рольганга. Тоді під масою металу, обчислену за формулою (2.5), потрібно розуміти мінімально можливу масу металу, що припадає на один ролик.

Для розрахунку маси металу, що припадає на один ролик, зручно користуватися відносною величиною, а саме, знати масу (вагу) металу щодо маси (ваги), відповідного кроку роликів рольганга:

$$\bar{m}_{\text{м}} = \frac{m_{\text{м}}}{m_{\text{м.мин}}}, \quad (2.6)$$

За методикою викладеною в [2] визначаємо відносну масу (вагу) металу $\bar{m}_{\text{м}}$, що припадає на один ролик. Відносна маса розкату при наявності двох загнутих кінців $\bar{m}_{\text{м}} = 1,5$.

Остаточну, масу металу, що припадає на один ролик для кожного проходу $m_{\text{м}_i}$ можна визначити з виразу (2.6) знаючи мінімально можливу масу $m_{\text{м.мин}}$ і відносну масу металу $\bar{m}_{\text{м}}$.

Отримані значення мінімально можливої маси металу (2.5), відносної маси металу, а також масу металу, що припадає на один ролик для кожного проходу зведені в табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Маса металу, що припадає на один ролик рольганга і розрахунок статичних моментів електродвигунів рольганга

$m_{\text{м.мин}_i}$, кг (2.5)		$m_{\text{м}_i}$, кг (2.6)		$M_{\text{тр}_i}$, Нм (2.4)		$M_{\text{с.т}_i}$, Нм (2.7)	
	1		1		1		1
1	765.131	1	1147.696	1	25.656	1	121.121
2	684.753	2	1027.129	2	22.961	2	118.426
3	1250.562	3	1875.843	3	41.934	3	137.399
4	1113.065	4	1669.598	4	37.323	4	132.788
5	981.564	5	1472.346	5	32.914	5	128.379
6	861.247	6	1291.87	6	28.879	6	124.344
7	769.034	7	1153.55	7	25.787	7	121.252
8	676.294	8	1014.441	8	22.677	8	118.142
9	593.582	9	890.373	9	19.904	9	115.369
10	511.086	10	766.63	10	17.138	10	112.603
11	436.945	11	655.418	11	14.652	11	110.117

Повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів (див. табл. 2.4):

$$M_{\text{с.т}_i} = M_x + M_{\text{тр}_i} \quad (2.7)$$

Момент буксування, приведений до валу електродвигуна (см. табл. 2.4):

$$M_{\text{б}} = \frac{9,81 m_{\text{сл}} d_p \mu_{\text{б}}}{2} = \frac{9,81 \cdot 5255,5 \cdot 0,33 \cdot 0,3}{2} = 2552,1 \text{ Нм} \quad (2.8)$$

де $d_p = \frac{0,41 + 0,25}{2} = 0,33 \text{ м}$ – діаметр кінцевого ролика;

$\mu_{\text{б}} = 0,3$ – коефіцієнт тертя при буксуванні [1, табл. 4.2].

Повний момент статичного опору при буксуванні:

$$M_{\text{сб}} = M_x + M_{\text{б}} = 95,5 + 2552,1 = 2647,6 \text{ Нм}. \quad (2.9)$$

Отримані значення моменту транспортування металу по роликам (2.4), а також повного статичного моменту при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів для кожного проходу зведені в таблицю 2.3.

2.2 Розрахунок динамічних моментів і прискорень

Через буксування розкату по роликам неможна розігнати розкат з прискоренням, що перевищує максимально можливе прискорення. Покажемо це теоретично.

Для розгону розкату необхідно подолати силу інерції. Величина сили інерції, що припадає на один ролик, дорівнює

$$F_{\text{ін}} = m_{\text{м}} a, \quad (2.10)$$

де a – лінійне прискорення розкату.

Ця сила не може бути більше сили буксування $F_{\text{ін}} \leq F_{\text{б}}$. Тоді запишемо

$$m_{\text{м}} a \leq G_{\text{м}} \mu_{\text{б}}, \quad (2.11)$$

Оскільки $G_{\text{м}} = m_{\text{м}} g$, де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, то з (2.11) отримаємо вираз для визначення максимально можливого прискорення розкату на рольгангу

$$a \leq g \mu_{\text{б}}, \quad (2.12)$$

З останнього виразу видно, що максимально можливе прискорення розкату на рольгангу визначається коефіцієнтом тертя при буксуванні $\mu_{\text{б}}$. Приймаючи $\mu_{\text{б}} = 0,15 \div 0,3$ [1, 2], отримаємо $a \leq 1,47 \div 2,94 \text{ м/с}^2$. Більше значення прискорення відповідає гарячому металу, менше – холодного.

Момент електродвигуна, що відповідає максимально можливому прискоренню розкату, називають гранично-виправданим моментом. Якщо момент електродвигуна перевищує гранично-виправданий момент, то виникає буксування, в результаті чого погіршується якість поверхні розкату, підвищується знос роликів, але збільшення прискорення розкату не відбувається. Оскільки буксування можливе як при розгоні (прискоренні), так і при гальмуванні (уповільненні), то мають місце два гранично-підтверджуваних моменти – при розгоні і при гальмуванні.

Отримаємо вираз гранично-виправданого моменту електродвигуна при розгоні (прискоренні) ролика рольганга:

$$M_{\text{п.о.р}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{с.т}_i}, \quad (2.13)$$

де $M_{\text{дин}}$ – динамічний момент, необхідний для розгону механізму і розкату з гранично-виправданим прискоренням;

$M_{\text{с.т}_i}$ – повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування й додаткових опорів.

Динамічний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{\text{дин}} = J'_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}, \quad (2.14)$$

де J'_{Σ} – сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна;

$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}$ – кутове прискорення електродвигуна.

Виразимо кутове прискорення електродвигуна через лінійне прискорення розкату,

$$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} = \frac{d\omega_{\text{р}}}{dt} i = \frac{2i}{d_{\text{р}}} \frac{dV}{dt}, \quad (2.15)$$

де $\omega_{\text{р}}$ – кутова швидкість ролика, $1/c$;

i – передавальне число редуктора рольганга, далі опускається, тому що електропривод безредукторний;

$d_{\text{р}}$ – діаметр ролика, м;

$a = \frac{dV}{dt}$ – лінійне прискорення металу на рольгангу, m/c^2 .

Сумарний момент інерції представимо як суму моменту інерції механізму $J_{\text{мех}}$ і моменту інерції розкату $J_{\text{м}}$, отриманого шляхом еквівалентного приведення поступального руху до обертального руху:

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}. \quad (2.16)$$

Приведення поступального руху до обертального руху здійснюється на

підставі закону збереження енергії, а саме – кінетична енергія в обох випадках повинна бути однаковою. У зв'язку з цим запишемо

$$\frac{m_M V_M^2}{2} = \frac{J_M \omega_{дв}^2}{2}, \quad (2.17)$$

звідки знаходимо

$$J_M = m_M \frac{V_M^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (2.18)$$

Підставляючи замість лінійної швидкості металу її вираз через частоту обертання електродвигуна $V_M = \frac{\omega_{дв} d_p}{2}$, отримаємо момент інерції транспортованого злитка, приведений до валу електродвигуна у кожному пропуску

$$J_{M_i} = m_{M_i} \frac{d_p^2}{4}. \quad (2.19)$$

Приймаючи максимально можливе значення лінійного прискорення (2.12), з урахуванням (2.15), (2.16) і (2.19) з (2.14) отримуємо такий вираз для визначення динамічного моменту на валу електродвигуна:

$$M_{дин} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} J'_\Sigma, \quad (2.20)$$

де J'_Σ – сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу двигуна в кожному пропуску.

Момент інерції механізму дорівнює:

$$J_{мех} = J_{дв} + J_p = 3,125 + 43,7 = 46,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

де $J_{дв} = 3,125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції двигуна (див. табл. 2.1);

$J_p = m_p \frac{d_p^2}{8} = 3216 \frac{0,33^2}{8} = 43,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції ролика.

Оскільки максимальне прискорення визначається виразом (2.12), то для гранично-виправданому моменту при розгоні (прискоренні) вираз (2.13) набирає вигляду (див. табл. 2.4):

$$M_{\text{п.о.р}} = (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}_i}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\delta}}{d_p} + M_{\text{с.т}_i} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\delta}}{d_p} J'_{\Sigma} + M_{\text{с.т}_i}, \quad (2.22)$$

Для гальмування (уповільнення) вираз гранично-виправданого моменту має вигляд (див. табл. 2.4):

$$M_{\text{п.о.т}} = M_{\text{дин}} - M_{\text{с.т}_i}, \quad (2.23)$$

чи

$$M_{\text{п.о.т}} = (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}_i}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\delta}}{d_p} - M_{\text{с.т}_i} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\delta}}{d_p} J'_{\Sigma} + M_{\text{с.т}_i}. \quad (2.24)$$

Таблиця 2.4 – Розрахунок динамічних гранично-підтверджуваних моментів електродвигунів робочого рольганга

$J_{\text{м}_i}, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2$ (2.19)		$M_{\text{п.о.р}}, (2.22)$		$\frac{M_{\text{п.о.р}}}{M_{\text{н}}}$		$M_{\text{п.о.т}}, (2.24)$		$\frac{M_{\text{п.о.т}}}{M_{\text{н}}}$	
1		1		1		1		1	
1	31.246	1	1515.012	1	1.496	1	1272.77	1	1.257
2	27.964	2	1453.77	2	1.435	2	1216.918	2	1.202
3	51.07	3	1884.874	3	1.861	3	1610.077	3	1.59
4	45.455	4	1780.112	4	1.758	4	1514.535	4	1.495
5	40.085	5	1679.918	5	1.659	5	1423.161	5	1.405
6	35.171	6	1588.245	6	1.568	6	1339.557	6	1.323
7	31.405	7	1517.986	7	1.499	7	1275.482	7	1.259
8	27.618	8	1447.325	8	1.429	8	1211.04	8	1.196
9	24.24	9	1384.305	9	1.367	9	1153.567	9	1.139
10	20.871	10	1321.45	10	1.305	10	1096.244	10	1.082
11	17.844	11	1264.959	11	1.249	11	1044.726	11	1.032

Видно, що моменти $M_{\text{п.о.р}}$ і $M_{\text{п.о.т}}$ залежать від маси металу, що припадає на ролик. Для гарантованого розгону і гальмування без буксування слід обмежувати момент електродвигуна на рівні мінімального значення моменту, розра-

хованого за виразами (2.22) і (2.24). З виразів для гранично-обґрунтованих моментів видно, що мінімальні значення $M_{п.о.р}$ і $M_{п.о.т}$ мають місце при мінімальній масі металу $m_{м_i}$, що припадає на ролик рольганга. Приймаємо кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів) $\lambda_{пт} = 1$.

Із таблиці 2.4 видно, що кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів) $\lambda_{пт}$ не перевищує кратності гранично-виправданих моментів, що гарантує рух розкату по роликах з прискоренням/уповільненням без прослизання (буксування) і забезпечує необхідну прискорення розгону/гальмування.

2.3 Час керування електроприводом

Розглянемо більш детально процес переміщення злитка при прокатці. У процесі прокатки робота робочого рольганга узгоджується за швидкістю і напрямом обертання з роботою головного приводу чорнової кліті і станиною роликів чорнової кліті. На робочий рольганг перед чорною кліттю надходить черговий розкат. Після повної зупинки перед чорною кліттю розкат центрується маніпуляторними лінійками і може бути заданий в прокатку при розведених маніпуляторних лінійках перед і за кліттю, при зупинених натискних гвинтах в кліті.

Режим прокатки в чорновій кліті – реверсивний. При цьому в кожному конкретному пропуску підтримується рівень швидкості, необхідний за технологією. У загальному випадку: кількість пропусків в чорновій кліті – непарне, а швидкість від пропуску до пропуску збільшується відповідно до зменшення товщини розкату.

Цикл роботи електроприводу робочого рольганга складається з наступних ділянок:

- розгін рольганга з заготівлею;
- переміщення гуркоти по рольгангу;
- гальмування рольганга вхолосту до нуля;
- центрування гуркоти маніпуляторними лінійками (час паузи);
- розгін рольганга вхолосту до транспортної швидкості (реверс);

- переміщення гуркоти по рольгангу в зворотному напрямку;
- гальмування рольганга з заготовкою до нуля.

Робота робочого рольганга при прокатці розкату в третьому-одинадцятим пропусках аналогічна роботі його при прокатці в першому-другому пропусках зі збільшенням довжини листа, що прокочується.

Після завершення прокатки в чорновій кліті розкат транспортується до чистової кліті, звільняючи рольганг за чорною кліттю.

Час розгону і гальмування електроприводу рольганга:

$$t_{\text{п}} = \frac{\Sigma J \omega_{\text{пр}i}}{M_{\text{п}} - M_{\text{с}}}, \quad (2.25)$$

$$t_{\text{т}} = \frac{\Sigma J \omega_{\text{пр}i}}{M_{\text{т}} + M_{\text{с}}}, \quad (2.26)$$

де ΣJ – сумарний момент інерції на валу електродвигуна (при розгоні або гальмуванні рольганга вхолосту $\Sigma J = J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}$; при розгоні чи гальмуванні з заготівкою $\Sigma J = J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}i}$), кг·м²;

$\omega_{\text{пр}i} = \frac{2V_{\text{пр}i}}{d_{\text{р}}}$ – швидкість на валу електродвигуна, що відповідає швидкості

прокатки у кожному пропуску, 1/с;

$V_{\text{пр}}$ – лінійна швидкість прокатки, м/с (див. табл. 2.2);

$M_{\text{п}}$ – середній пусковий момент електродвигуна (для подальших розрахунків приймаємо $M_{\text{п}} = \lambda_{\text{пт}} M_{\text{н}} = 1 M_{\text{н}} = 1012,8 \text{ Нм}$);

$M_{\text{т}}$ – середній гальмівний момент електродвигуна (для подальших розрахунків приймаємо $M_{\text{т}} = \lambda_{\text{пт}} M_{\text{н}} = 1 M_{\text{н}} = 1012,8 \text{ Нм}$);

$M_{\text{с}}$ – статичний момент навантаження на валу електродвигуна (при розгоні або гальмуванні рольганга вхолосту $M_{\text{с}} = M_{\text{х}}$; при розгоні чи гальмуванні із заготівлею $M_{\text{с}} = M_{\text{с.т}i} = M_{\text{х}} + M_{\text{т}p_i}$).

Час транспортування металу (усталеного руху):

$$t_y = \frac{L_i}{V_{\text{пр}_i}}. \quad (2.27)$$

Значення часу пуску $t_{\text{п}}$, часу гальмування $t_{\text{т}}$, часу усталеного руху та час пауз $t_{\text{пауз}}$ для кожного пропуску, розраховані за вищевказаними формулами, зведені в таблицю 2.5.

Кутова швидкість на валу електродвигуна, що відповідає швидкості прокатки (див. табл. 2.5):

$$n_{\text{пр}_i} = V_{\text{пр}_i} \frac{60}{\pi d_p}, \text{ об / мин} \quad (2.28)$$

Таблиця 2.5 – Розрахунок часу роботи ЕП робочого рольганга

$t_{\text{п}}, \text{ с (2.25)}$		$t_{\text{т}}, \text{ с (2.26)}$		$t_y, \text{ с (2.27)}$		$t_{\text{пауз}}, \text{ с}$		$n_{\text{пр}_i}, \text{ об / мин}$	
	1		1		1		1		1
1	0.85	1	0.41	1	1.503	1	2	1	92.599
2	0.496	2	0.826	2	1.679	2	5	2	92.599
3	1.14	3	0.431	3	0.876	3	2	3	97.229
4	0.521	4	0.821	4	0.984	4	2	4	97.229
5	1.001	5	0.431	5	1.115	5	2	5	97.229
6	0.521	6	0.735	6	1.271	6	2	6	97.229
7	0.894	7	0.431	7	1.424	7	2	7	97.229
8	0.521	8	0.671	8	1.619	8	5	8	97.229
9	0.817	9	0.436	9	1.823	9	2	9	98.387
10	0.527	10	0.62	10	2.117	10	2	10	98.387
11	0.739	11	0.436	11	2.476	11	2	11	98.387

Як видно з табл. 2.5, обраний електродвигун забезпечує потрібну максимальну швидкість прокатки. При цьому немає необхідності знижувати поле збудження машин; необхідна швидкість забезпечується зміною напруги на якорі.

На рис. 2.1 – 2.2 наведені тахограми і навантажувальні діаграми роботи електроприводу робочого рольганга (див. табл. 2.4, 2.5) за цикл роботи прокатного стану (прокатка в чорновій кліті), а також для декількох з пропусків.

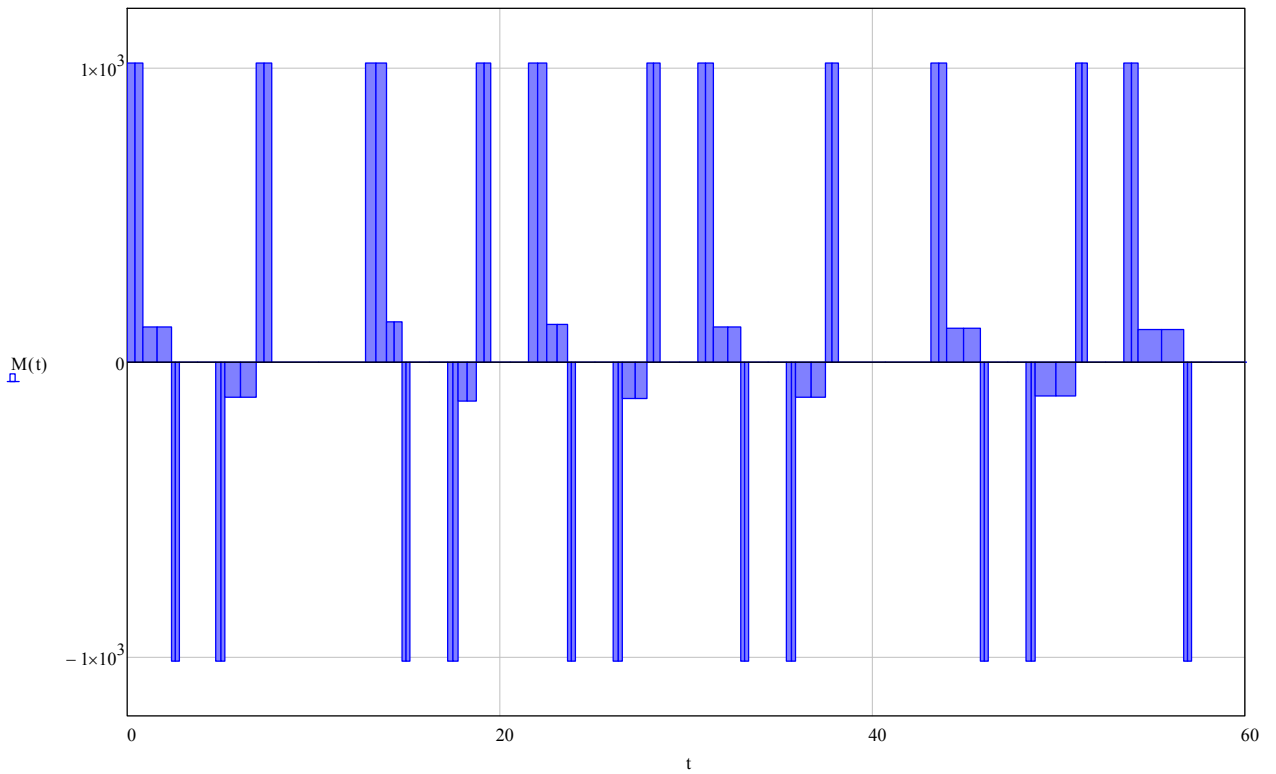
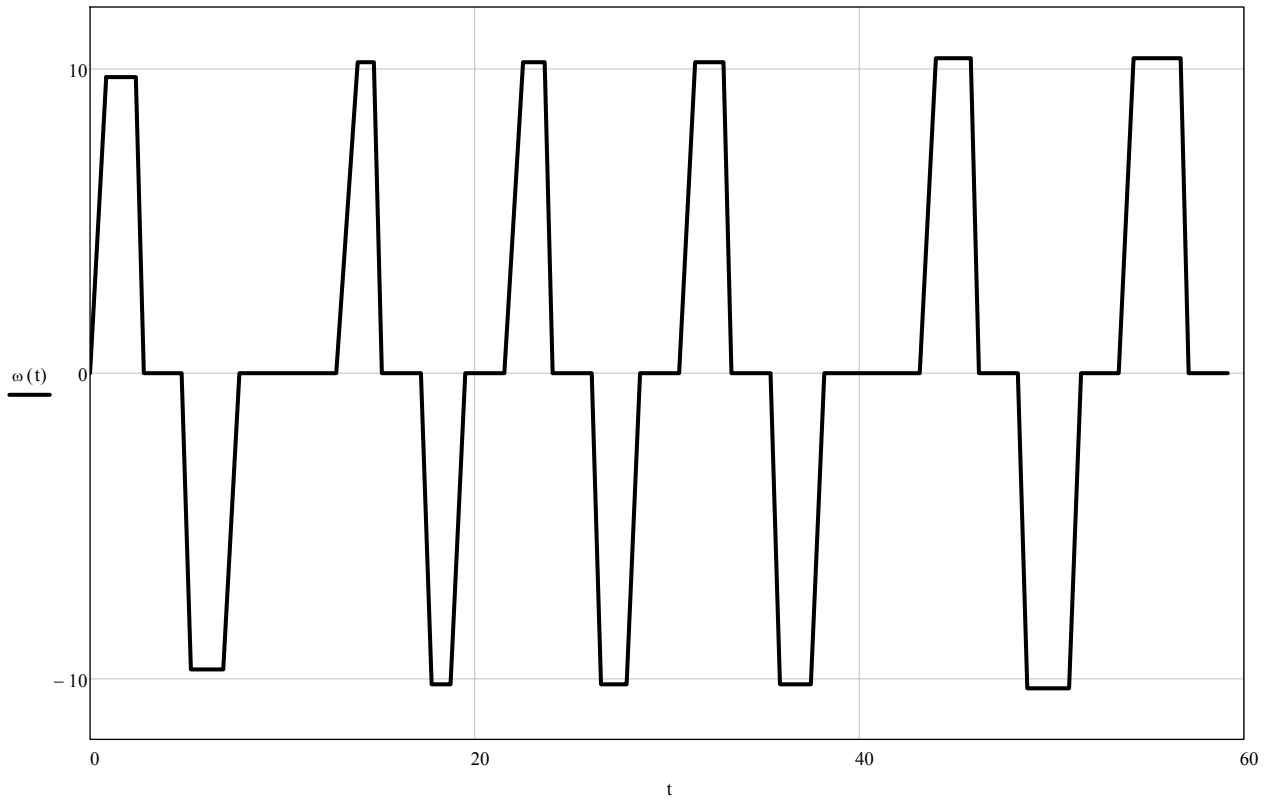
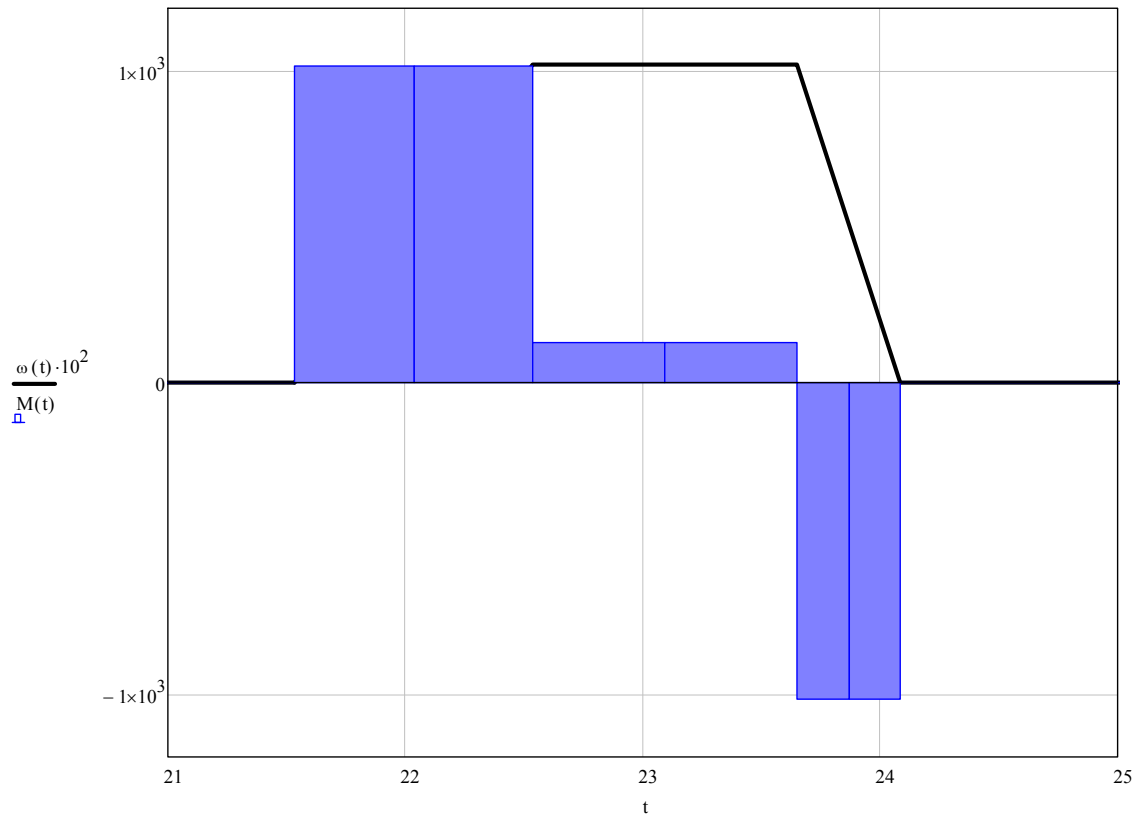
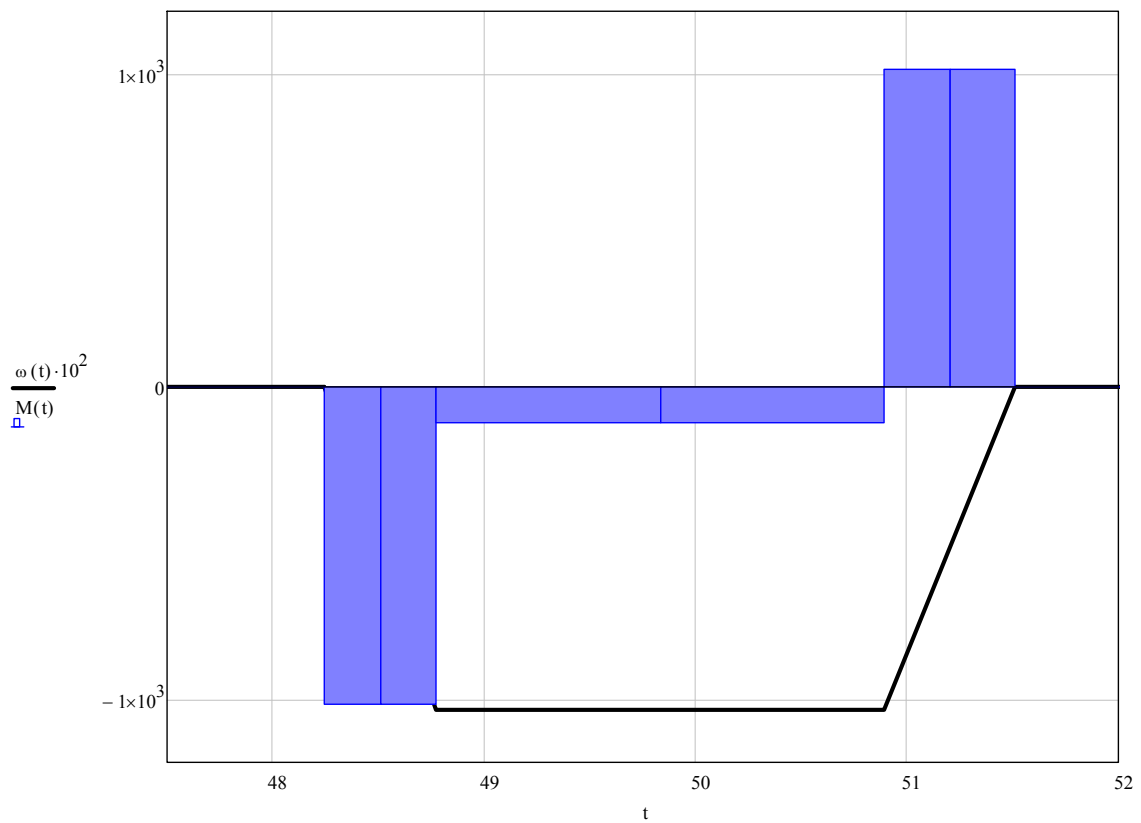


Рисунок 2.1 – Тахограма і навантажувальна діаграма роботи електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю за цикл роботи прокатного стану



п'ятий пропуск



восьмий пропуск

Рисунок 2.2 – Тахограми і навантажувальні діаграми роботи електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю

Цикл роботи електроприводу робочого рольганга складається з наступних ділянок (див. вище): 1 пропуск – розгін рольганга з заготівлею, гальмування вхолосту; 2 пропуск – розгін рольганга вхолосту, гальмування з заготівлею.

Робота робочого рольганга при прокатці розкату в третьому-одинадцятому пропусках аналогічна роботі його при прокатці в першому-другому пропусках зі збільшенням довжини листа що прокочується.

2.4 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву

На рис. 2.1 зображена навантажувальна діаграма електроприводу робочого рольганга перед чорною кліттю. Оскільки в періоди пуску, гальмування і усталеного руху роликів рольганга при прокатці листів швидкість прокатки і швидкість роликів синхронізовані, то буксування о метал відсутнє.

Еквівалентний момент електродвигуна, наведений до фактичного значення тривалості включення $\varepsilon = \Sigma t_{\text{вкл}} / t_{\text{ц}} = 35,16/59,16 = 0,68$:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_{\text{п}}^2 \Sigma t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 \Sigma t_{\text{т}} + M_{\text{с.т}}^2 \Sigma t_{\text{у}}}{\Sigma t_{\text{п}} + \Sigma t_{\text{т}} + \Sigma t_{\text{у}}}} = \quad (2.29)$$

$$= \sqrt{\frac{1012,8^2 \cdot 8,1 + 1012,8^2 \cdot 6,25 + 138,44 \cdot 10^3}{8,1 + 6,25 + 16,89}} = 731,8 \text{ Нм.}$$

Еквівалентний момент, перерахований для ПВ=100% складає:

$$M_{\text{э}100\%} = M_{\text{э}} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k}} = 731,8 \sqrt{\frac{0,68}{1,0}} = 603,5 \text{ Нм} = 0,6 M_{\text{н}}. \quad (2.30)$$

Отримане розрахункове значення еквівалентного моменту показує, що прийняті значення пускового і гальмівного моментів забезпечують інтенсивне протікання перехідних процесів при одночасному допустимому навантаженні електродвигуна по нагріванню. Завантаження електродвигуна становить 60%.

Серед усіх можливих моментів на валу двигуна найбільшим є пусковий момент електроприводу при транспортуванні металу – 1012,8 Нм, що по відношенню до номінального моменту становить $1 M_{\text{н}}$, що допустимо. Таким чином,

обраний електродвигун проходить і по перевантажувальній здатності (максимально допустима кратність струму якоря 2,5).

При прокатці листів інших типорозмірів (при підкатах більшої маси) завантаження двигуна по середньоквадратичного моменту становить 50-80%, що допустимо. Деяка завищена потужність машини пояснюється необхідністю реалізації заданого темпу розгону/гальмування при транспортуванні металу найбільшої маси 7,5 т. Крім того, в разі ручного керування механізмами району прокатної кліти можливі неузгодженості лінійних швидкостей валів головного приводу, станинних роликів, робочих і розкатних рольгангів що призводить до появи буксування роликів об поверхню металу (статичні моменти на двигуні зростають до моментів буксування), викликаючи додатковий нагрів машини. Також буксування роликів о метал виникає при виході розкату з валів кліти з більшою швидкістю через так зване «випередження». Вважаємо, що 35% -го резерву потужності двигуна досить для покриття додаткових моментів.

3 ВИБІР СИЛОВОЇ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ РОБОЧОГО РОЛЬГАНГА

3.1 Вибір та обґрунтування силової частини системи та способу керування електроприводом

Для живлення якірних ланцюгів електродвигунів і обмоток збудження електричних машин постійного струму застосовуються, головним чином, електромашинні генератори (Г) що обертаються, широтно-імпульсні перетворювачі (ШП) на тиристорах і транзисторах і тиристорні перетворювачі (ТП) змінного струму в постійний. Відповідно до цього силова частина електроприводу може бути зібрана за різними схемами: Г-Д, ШП-Д або ТП-Д.

Система Г-Д володіє хорошими регулювальними властивостями, порівняно невисокою питомою вартістю і великим терміном служби. Основною перевагою цієї системи є високий коефіцієнт потужності, крім того, при роботі системи Г-Д не спотворюється форма напруги мережі живлення змінного струму.

До недоліків цієї системи слід віднести: складність, низький ККД через потрібне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки), великий рівень шуму в процесі роботи, необхідність регулярного і ретельного обслуговування.

В даний час система Г-Д має обмежене застосування в зв'язку з масовим впровадженням перетворювачів на тиристорах і транзисторах. У металургійній промисловості використовується в якості електроприводу великої потужності на деякі прокатних станах (наприклад, обтискних).

Переваги системи ШП-Д визначаються перевагами ШП як джерела живлення, а саме:

– високі динамічні властивості (швидкодія, точність, якість регулювання і т.д.) через відсутність у ШП додаткових індуктивностей в ланцюзі навантаження, високої частоти комутації і менш істотних нелінійностей перетворювача;

– широкий діапазон регулювання вихідної напруги (до $1:10^5$);

- високий ККД, оскільки втрати потужності на регулюючому елементі ШПП незначні в порівнянні з втратами потужності в разі безперервного регулювання;

- високий коефіцієнт потужності системи;

- високе використання двигунів по струму через велику частоту комутації і малі пульсації струму якоря;

- низький вихідний опір перетворювача і тому більш жорсткі швидкісні і механічні характеристики двигуна;

- мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим чинником є час провідності ключа, а не величина внутрішнього опору регулюючого елемента, що має місце при безперервному регулюванні;

- малі габарити і маса;

- постійна готовність до роботи.

Разом з тим ШПП притаманні і недоліки:

- імпульсний режим роботи регулюючого елемента призводить до необхідності встановлювати вихідні фільтри, що викликає інерційність процесу регулювання в замкнутих системах;

- високі швидкості включення і виключення струму в силовому ланцюзі ШПП призводять до виникнення радіоперешкод.

В даний час практичне застосування ШПП на напівпровідникових елементах обмежене електроприводами малої і середньої потужності.

В електроприводах середньої і великої потужності широкого поширення набула система ТП-Д. В порівнянні з системою Г-Д ця система електроприводу має низку переваг:

- відсутність обертових частин, безшумність в роботі;

- вищі швидкодія і ККД (ККД системи ТП-Д становить 0,96...0,98, системи Г-Д – 0,76...0,84);

- більш висока точність регулювання завдяки відсутності інерції, що часто забезпечує механізму велику продуктивність і високу якість продукції;

- менша чутливість до впливу газів і забрудненого середовища;
- відсутність складних вентиляційних пристроїв.

Разом з тим у порівнянні з системою Г-Д система ТП-Д має такі недоліки:

- погіршення коефіцієнта потужності пропорційно і зменшення при цьому здатності навантаження ТП, що особливо відчутно в приводах великої потужності;
- при глибокому регулюванні крім зменшення коефіцієнта потужності збільшується амплітуда пульсацій в кривих випрямленої напруги і струму, що може несприятливо позначитися на комутації струму приводного двигуна, викликати розриви струму і коливання швидкості обертання двигуна;
- спотворення форми кривої напруги мережі живлення в результаті комутаційних процесів в ТП, що несприятливо позначається на роботі інших електроустановок, які живляться від цієї мережі, а також на роботі самого ТП, оскільки нерідко мережева напруга використовується в якості опорної.

Особливо відзначимо, що перераховані недоліки системи ТП-Д стають вагомими тільки при великій потужності приводу, однак при цьому і її переваги виступають особливо яскраво.

Тиристорні електроприводи (система ТП-Д) мають високі техніко-економічні показники і експлуатаційні переваги, відповідають сучасним вимогам технологічних процесів і по праву стають головним засобом керованого перетворення електричної енергії в механічну.

Для підтримки системою заданих параметрів на необхідному рівні вони, як правило, будуються замкнутими, а підвищення якісних показників їх роботи досягається введенням спеціальних коригувальних ланок (системи з послідовною, паралельною і змішаною корекцією) або організацією модального керування. Системи з паралельною, послідовною і змішаною корекцією зазвичай представляють собою багатоконтурні системи регулювання. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки.

При застосуванні паралельної корекції підвищується стабільність характеристик системи за рахунок ланок, охоплених зворотнім зв'язком. Вплив перешкод на коригуючий пристрій, включений в ланцюг зворотного зв'язку, знач-

но менше, ніж при включенні його в прямий канал системи, оскільки сигнал знімається з виходу системи, що представляє собою фільтр низьких частот.

Основними недоліками паралельної корекції є відносна складність розрахунку системи і велика трудомісткість налаштування. Контур, утворений місцевим зворотнім зв'язком, може сам по собі виявитися нестійким, виникають також труднощі з підсумовуванням сигналів. Крім того, цю систему слід завжди розглядати як єдине ціле, оскільки в більшості випадків зміна одного з параметрів вимагає перерахунку і перебудови всієї системи.

Системи з послідовною корекцією вигідно відрізняються від систем з паралельною корекцією, особливо при складних структурах об'єкта регулювання, великому числі регульованих параметрів і високих вимогах до якості регулювання. Прості і зручні для практики методи розрахунку і настроювання контурів систем з послідовною корекцією дозволяють навіть при значних погрішності у визначенні динамічних параметрів об'єкта регулювання отримати цілком працездатну систему керування електроприводом. Такі системи вводять в експлуатацію методом послідовного налаштування окремих контурів системи керування (на відміну від систем з паралельною корекцією). Великою перевагою систем з послідовною корекцією є зручність обмеження будь-якого з регульованих параметрів на заданому рівні.

Створення практично безінерційних тиристорних і транзисторних перетворювачів з малою потужністю керування і операційних підсилювачів постійного струму, що застосовуються в якості активних коригувальних ланок, забезпечило широке впровадження систем з послідовною корекцією для керування практично всіма видами металургійного електроприводу постійного струму.

САК з послідовною корекцією розбивається на ряд контурів, число яких дорівнює числу регульованих параметрів системи. Параметрами регулювання можуть бути: напруга перетворювача, сила струму в головному ланцюзі, швидкість електродвигуна, кутове або лінійне положення робочого механізму, натяг металу, що прокочується і ін.

У системі регулювання з послідовною корекцією головним параметром регулювання є той, який визначає основну мету автоматичного регулювання.

Інші параметри – допоміжні, вони підпорядковані головному параметру. Крім того, допоміжні параметри також знаходяться в підпорядкуванні один з іншим. Наприклад, параметр напруги перетворювача підпорядкований параметру струму в головному ланцюзі, а останній підпорядкований параметру швидкості електродвигуна і т.п. Тому системи з послідовною корекцією називають також системами підпорядкованого керування (регулювання).

3.2 Вибір комплектного електроприводу

Привід кожного ролика рольгангу здійснюється від електродвигуна постійною струму закритого виконання. Живлення якірних ланцюгів електродвигунів рольганга здійснюється від комплектного тиристорного електроприводу (КТЕ).

Основними технічними даними комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм $I_{н\text{ тп}}$ та напруга $U_{н\text{ тп}}$. Для багатодвигунних електроприводів при послідовному живленні якірних ланцюгів номінального струму перетворювача береться сумарний струм двигунів, через що зростає його потужність, а отже і його ціна.

Номінальна напруга перетворювача визначається номінальною напругою електродвигуна, яка менше номінальної напруги КТП, визначається за ДСТ 25953-83, на 5-15%, що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості й на безпечне інвертування при зниженні напруги живильної мережі, тобто $U_{н\text{ тп}} = (1,05 \div 1,15)U_{н\text{ дв}}$.

Дотримуючись наведених рекомендацій, вибираємо роздільне живлення якірних ланцюгів. Установлюємо на кожний електродвигун по одному тиристорному перетворювачу.

Для встановлених електродвигунів, з каталогу [8, 9] вибираємо реверсивний комплектний тиристорний електропривод Sinamics DC MASTER (коротко: Sinamics DCM) - це нове покоління приводів постійного струму від Siemens, яке прийшло на заміну SIMOREG DC-MASTER шафового (модульного) виконання, технічні дані якого наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні дані перетворювача постійного струму SINAMICS DC MASTER 6RA8031-6DV62-0AA0

Найменування параметра	Позначення і чисельне значення
Номінальна 3х фазна напруга живлення, В	$U_{н1\ тп} = 400$
Номінальний вхідний струм, А	$I_{н1\ тп} = 104$
Номінальна випрямлена (постійна) напруга, В	$U_{н\ тп} = 420$
Номінальний випрямлений (постійний) струм, А	$I_{н\ тп} = 125$
Номінальна потужність, кВт	$P_{н\ тп} = 53$
Номінальна напруга збудження, В	$U_{в\ тп} = 325$
Номінальний струм збудження, А	$I_{в\ тп} = 10$
Маса, кг	$m_{тп} = 200$

При розробці апаратної частини нового покоління перетворювачів постійного струму Sinamics DCM фірма SIEMENS забезпечила просту заміну перетворювачів SIMOREG DC Master завдяки відповідності номінальних значень струмів і напруг силових ланцюгів і ланцюга керування, близьким габаритними розмірами і схожим набором вхідних/ вихідних сигналів і комунікаційних інтерфейсів. При цьому Sinamics DCM є повноправним представником нового сімейства перетворювачів SINAMICS: в ньому використані уніфіковані модулі розширення, панелі операторів і програмне забезпечення, що дозволяє використовувати єдину середу параметрування перетворювачів і взаємозамінні додаткові компоненти.

Sinamics DC MASTER - це новий член сімейства SINAMICS, що робить можливим використання всього різноманіття програм і компонентів технології змінного струму для приводів постійного струму.

Sinamics DCM є розширеною системою приводу - як для простих, так і для складних застосувань. Sinamics DC MASTER комбінують управління зі зворотним зв'язком і без зворотного зв'язку і силову частину в одному пристрої

і показують себе з найкращого боку, забезпечуючи при цьому компактну, заощаджують місце, компоновку. Для стандартного застосування зі зворотним зв'язком, перетворювач включає стандартну плату управління (Standard CUD). Для застосувань з високими вимогами по продуктивності і інтерфейсів, система може бути розширена додатковою платою управління (Advanced CUD).

Для управління і пуско-налагоджування доступні розширена панель оператора - AOP30 Advanced Operator Panel і проста цифрова панель оператора BOP20. Інтерфейси CUD і кількість входів / виходів можуть бути розширені клемними модулями, такими як TM15 і TM31.

З метою забезпечення особливих умов експлуатації або виконання специфічних завдань може бути замовлений Sinamics DCM з наступними апаратними опціями силових ланцюгів:

- з реверсивним або без випрямляча ланцюга збудження;
- з однофазним вентилятором або без примусової вентиляції;
- з номінальною напругою ланцюга управління 24 В;
- на наднизькі значення напруги ланцюга якоря 10-50 В.

Крім того, в якості базового режиму роботи забезпечується харчування ланцюга якоря перетворювача від однофазної мережі із зазначенням номінальних значень випрямленої напруги і струму ланцюга якоря. Габаритні розміри перетворювачів змінилися незначно, що спрощує проектні та монтажні роботи при модернізації.

Особливості Sinamics DCM: PROFIBUS за замовчуванням / PROFINET опція; різні поєднання плат управління для отримання оптимальної конфігурації; вибір блоків живлення ланцюга збудження; живлення електроніки від + 24 В; ізольована силова частина; вільні функціональні блоки доступні за замовчуванням / DCC (Drive Control Chart Functionality) може бути доданий; можливість живлення від однофазної мережі (заміна для SIMOREG K і інших застарілих перетворювачів); лаковані плати і нікельовані шини для використання в несприятливих умовах; широкий температурний діапазон.

Електрична схема силовій частини комплектного електроприводу та конструкція шафи SIMOREG DC MASTER приведені на рис. 3.1 - 3.3 [8].

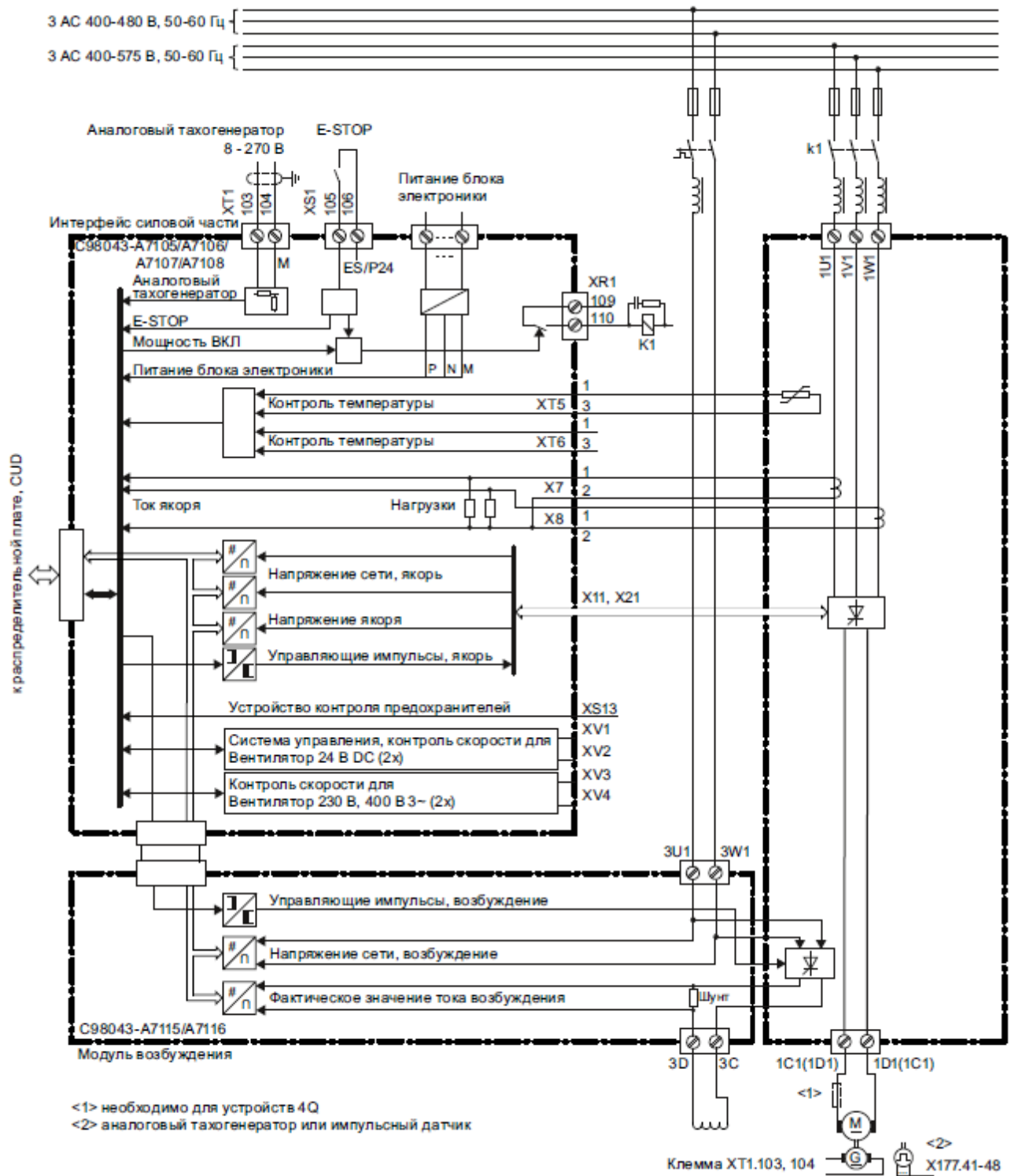


Рисунок 3.1 – Електрична схема підключення перетворювача постійного струму Sinamics DCM

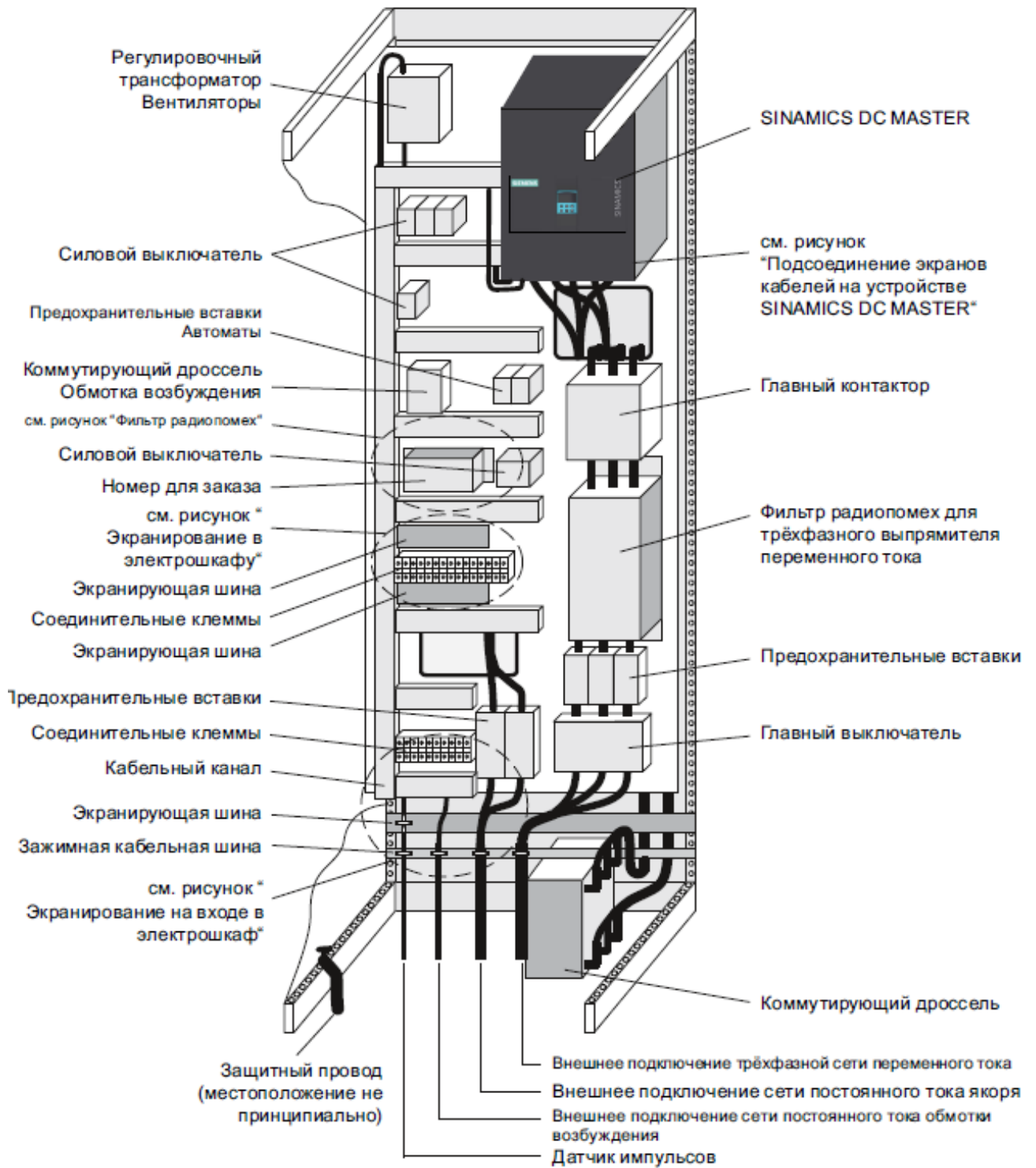
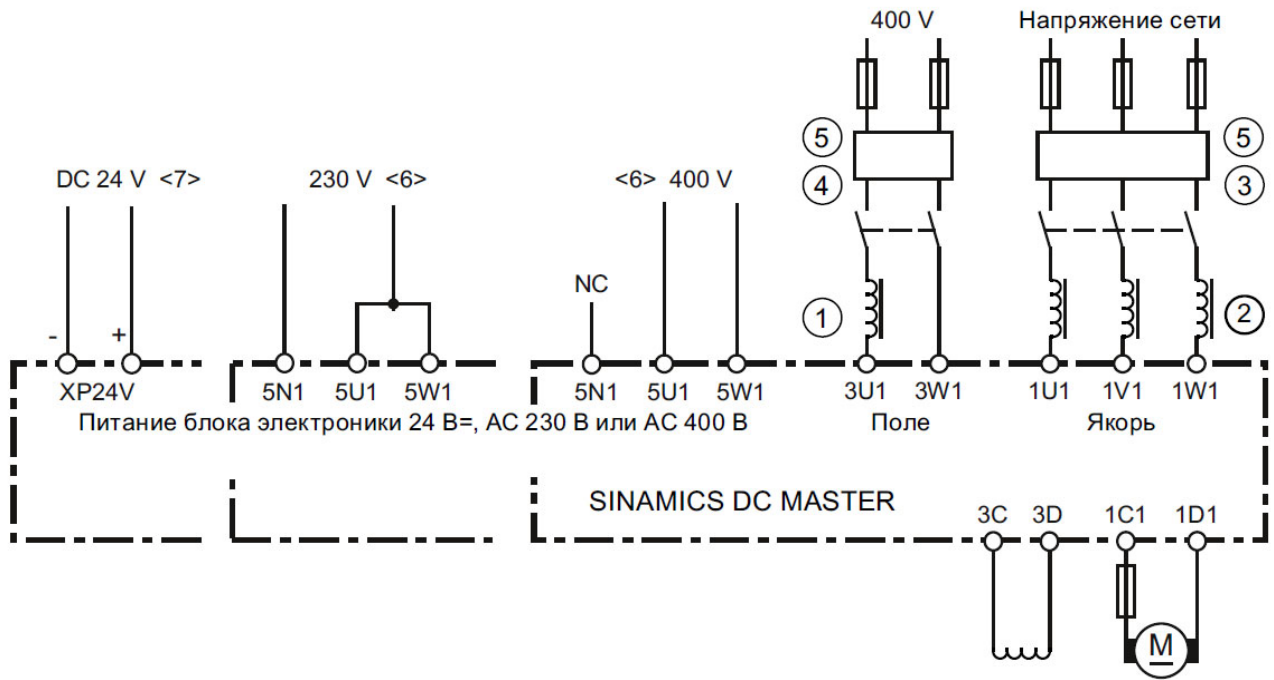


Рисунок 3.2 - Конструкция шкафа комплектного электроприводу постоянного струму Sinamics DCM



- 1 - комутуючі дроселі в ланцюзі обмотки збудження;
- 2 - комутуючий дросель в ланцюзі якоря;
- 3 - фільтр радіоперешкод для ланцюга якоря;
- 4 - фільтр радіоперешкод в ланцюзі обмотки збудження;

Рисунок 3.3 - Розташування компонентів в перетворювачі постійного струму Sinamics DCM

Перетворювачі постійного струму SINAMICS DC MASTER є компактні пристрої з силовими компонентами для живлення ланцюгів якоря і обмотки збудження електродвигуна з керуючою електронікою, а також додатковими модулями (опціями).

У пристроїв з постійним струмом від 15 А до 1200 А силова частина для якоря і обмотки збудження зібрана з електрично ізольованими модулями тиристорів, радіатор з'єднаний з потенціалом землі. У пристроїв з високим постійним струмом силова частина для ланцюга якоря зібрана з таблеткового тиристорів і радіаторами (модулі тиристорів) на потенціалі. Пристрої мають ступінь захисту IP00. Доступ до з'єднувальних клем спереду. Живлення вентиляторів підводиться зверху, живлення обмотки збудження, в залежності від типу пристрою, зверху або знизу.

Всі пристрої SINAMICS DCM оснащуються панеллю керування BOP20, яка розташована на лицьовій стороні. За допомогою панелі BOP20:

- можна виконувати необхідні для введення в експлуатацію настройки;
- можна отримувати індикацію всіх значущих результатів вимірювань;
- неполадки і попередження відображаються;
- можна включати і вимикати привід.

Для живлення якоря використовується зустрічно-паралельне з'єднання двох повністю керованих трифазних мостових схем випрямлення з обмеженням зрівняльних струмів. Для живлення ланцюга обмотки збудження використовується однофазна повністю керована двонапівперіодна мостова схема.

Розрізняють такі варіанти виконання керуючої електроніки (CUD): Standard-CUD та Advanced-CUD (опція), який CUD може бути розширено модулем Profinet (CBE20), має 2 з'єднання DRIVE-CLiQ для підключення додаткових компонентів приводної системи SINAMICS і штекер для додавання другого CUD.

Вільні функціональні блоки (FBLOCKS). Для великого числа додатків для керування приводом потрібна комбінаційна логіка, що зв'язує кілька станів (наприклад, контроль доступу, стан установки) з керуючий сигналом (наприклад, командою ВКЛ). Крім логічного з'єднання для приводних систем також необхідні арифметичні операції і, відповідно, процеси запису в пам'ять. Ці функції реалізуються в формі функціонального модуля «Вільні функціональні блоки». Користувачеві пропонується ряд простих, вільно застосовуваних функціональних блоків:

- логічні функціональні блоки (AND, OR, XOR, інверсний)
- обчислювальні функціональні блоки (суматор, множитель, дільник, формувач абсолютного значення)
- таймерні функціональні блоки (формування імпульсу, стиснення імпульсу,
- затримка включення, затримка вимкнення, подовження імпульсу)
- функціональні блоки записи даних (RS-тригер, D-тригер)

- функціональні блоки комутації (бінарний перемикач, цифровий перемикач)
- регулюючі функціональні блоки (обмежувач, згладжувальний контур, інтегратор, диференціює контур)
- комплексні функціональні блоки (сигналізатор граничного значення, двосторонній з гістерезисом).

Пристрої, що застосовуються в промисловій сфері, повинні мати дуже високою завадостійкістю, і навпаки, відповідати невисоким вимогам до випромінювання перешкод та завад.

Випрямлячі струму SINAMICS DC MASTER - це такі ж компоненти електричного приводу як контактори і перемикачі. Кваліфіковані фахівці повинні об'єднати їх в єдину приводну систему, що складається як мінімум з випрямляча, сполучних кабелів двигуна і двигуна. У більшості випадків необхідні також комутуючі дроселі та запобіжники. Таким чином, від професійно виконаного монтажу також залежить чи дотримується гранична величина чи ні. Для обмеження випромінювання завад відповідно до граничним значенням крім випрямляча струму необхідні як мінімум відповідний фільтр радіоперешкод і комутуючий дросель.

3.3 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя

Силовий трансформатор (СТ) в схемі керованого випрямляча застосовується для узгодження стандартної напруги мережі (~ 380 В; ~6 кВ; ~10 кВ) і напруги навантаження. Зменшення напруги на виході ТП постійного струму за рахунок зміни кута керування в більшості практичних випадків неприпустимо, оскільки це веде до недовикористання по потужності перетворювальної установки і зниження її енергетичних показників (коефіцієнта потужності). Крім того, СТ обмежує струм в режимі короткого замикання, а також швидкість наростання струму як в робочих, так і в аварійних режимах роботи перетворювача.

Для узгодження тиристорних перетворювачів (12 + 1) з мережею живлення з довідника [11] обираємо силовий трансформатор ТСЗП-400/10У3 технічні дані, якого наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні дані силового трансформатора ТСЗП-400/10У3 виконання 4 для живлення перетворювача SINAMICS DCM

Найменування параметра	Позначення та значення
Первинна номінальна потужність, кВ·А розрахункове значення $S_{1н} = 1,045 \cdot 1,35 \cdot U_{2тр} \cdot I_{днтр} \cdot 10^{-3}$	$P_{тр} = 362$
Напруга живильної мережі (мережева обмотка), В	$U_{1тр} = 6000$
Номінальна випрямлена напруга (перетворювач), В	$U_{дн} = 230$
Номінальний випрямлений струм (перетворювач), А	$I_{днтр} = 1250$
Вторинна лінійна напруга (вентильна обмотка) $U_{2лн}$, В	$U_{2тр} = 205$
Вторинний лінійний струм (вентильна обмотка) $I_{2лн}$, А розрахункове значення $I_{2тр} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{днтр}$	$I_{2тр} = 1020$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{хх} = 1600$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{кз} = 4700$
Напруга короткого замикання, %	$U_{кз\%} = 5,3$
Струм холостого ходу, %	$I_{хх\%} = 2,5$

Оскільки пульсації струму, що протікає в якірному ланцюгу, погіршують тепловий режим електродвигуна й умови його комутації, для їх зменшення застосовується згладжувальний дросель. Зменшення пульсацій напруги на затискачах якоря при включенні дроселя пояснюється тим, що на якір подається сума випрямленої напруги мережі і ЕРС самоіндукції дроселя. Крім цього, введення згладжувального реактора призводить до звуження зони переривчастих струмів, що, в свою чергу, призводить до збільшення жорсткості швидкісних характеристик приводу.

Індуктивність згладжувального дроселя, що включається послідовно з якорем двигуна, вибирається з умови виконання двох вимог:

- забезпечення безперервності струму якоря двигуна в певному діапазоні навантажень і частот обертання двигуна;
- обмеження амплітуди змінної складової струму якоря двигуна.

Нижче наведено розрахунок згладжує дроселя [12, приклад 1-24, 1-27].

Значення максимально випрямленої ЕРС (ідеальна випрямлена напруга; напруга на виході перетворювача):

$$E_{d0} = 1,35U_{2 \text{ тр}} = 1,35 \cdot 205 = 276,75 \text{ В} \quad (3.1)$$

де 1,35 - коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2 \text{ тр}}$ - номінальну напругу на вторинній обмотці силового трансформатора, В.

Кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги:

$$\omega_1 = 2\pi f_c m_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6 = 1884,956 \text{ Гц} \quad (3.2)$$

де f_c - частота живильної мережі, Гц; m_ϕ - число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний та повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{2 \text{ тр}}^2}{P_{\text{тр}}^2} = \frac{4700 \cdot 205^2}{(362 \cdot 10^3)^2} = 1,507 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}\%} U_{2 \text{ тр}}}{100 I_{2 \text{ тр}} \sqrt{3}} = \frac{5,3 \cdot 205}{100 \cdot 1020 \cdot \sqrt{3}} = 6,15 \cdot 10^{-3} \quad (3.4)$$

$$x_{\text{а тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = \sqrt{6,15 \cdot 10^{-3} - 1,507 \cdot 10^{-3}} = 5,962 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

де $\Delta P_{\text{кз}}$ - потужність втрат короткого замикання трансформатора, Вт;

$P_{\text{тр}}$ - потужність трансформатора, В·А;

$U_{\text{кз}\%}$ - напруга короткого замикання трансформатора, %;

$I_{2 \text{ тр}}$ - діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А.

Індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму:

$$L_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{а тр}}}{2\pi f_c} = \frac{5,962 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 18,979 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.6)$$

де $x_{a\text{ тр}}$ - повний опір силового трансформатора.

Індуктивність обмотки якоря двигуна визначається за емпіричною формулою:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = 6 \frac{220}{2 \cdot 165 \cdot 100} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

де k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції електродвигуна ($k = 5 \dots 6$ – для некомпенсованих машин);

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга електродвигуна;

$I_{\text{н}}$ – номінальний струм електродвигуна;

$2p = 2$ – число пар полюсів електродвигуна;

$n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна.

Необхідна індуктивність згладжувального дроселя:

$$L_{\text{сд}} = \frac{e_{\text{н}} E_{\text{д0}}}{i_{\text{е}} \omega_1 I_{\text{н дв}}} - (2L_{\text{тр}} + L_{\text{дв}}) = \quad (3.8)$$

$$= \frac{0,24 \cdot 276,75}{0,025 \cdot 1884,956 \cdot 100} - (2 \cdot 18,979 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 10^{-3}) = -25,9 \text{ мГн}$$

де $e_{\text{н}}$ - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої напруги, може бути підрахована за допомогою рівнянь [12, с. 40], або з графіка [12, с. 47 рис. 1.31]. На цьому графіку зображено залежність $e_{\text{н}}$ для мостової трифазної схеми випрямлення в функції кута регулювання α . Приймаємо граничний кут регулювання $\alpha_{\text{max}} = 90$ ел. град, тоді значення $e_{\text{н}} = 0,24$;

$E_{\text{д0}}$ - значення максимально випрямленої ЕРС, В;

$i_{\text{е}}$ - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої струму. $i_{\text{е}} = 0,02 \div 0,05$, нижня межа береться для електроприводу середньої і великої потужності, а верхній - для електроприводу малої потужності [12, с. 46, 59];

ω_1 - кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги, Гц;

$I_{н\ дв}$ - номінальний струм якоря електродвигуна (струм навантаження перетворювача), А (див. табл. 1.3);

$L_{тр}$ - індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму, Гн;

L_a - індуктивність обмотки якоря електродвигуна, Гн (див. табл. 1.3).

Оскільки значення необхідної індуктивності згладжувального дроселя має від'ємне значення (3.8), то в установці згладжувального реактора немає потреби. Індуктивності якоря двигуна та трансформатора досить для згладжування пульсацій, що виникають в роботі електропривода. Це істотно зменшить вагтність і масогабаритні показники електроприводу. З довідників відомо, що двигун серії Д на дані напругу і струму допускає роботу без реактора.

3.4 Опис принципової схеми силового ланцюга електроприводу робочого рольганга

Принципова схема силового ланцюга робочого рольганга перед чорною кліткою приведена на рис. 3.4. Схема підключення електроприводу SINAMICS DC MASTER приведена на рис. 3.5 - 3.6.

3.4.1 Джерела живлення електродвигунів та система захисту

Для живлення електродвигунів використовуються комплектні електроприводи постійного струму SINAMICS DC MASTER 6RA8031-6DV62-0AA0 (див. табл. 3.1) з реверсом струму в якорному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, з лінійним контактором і пристроєм динамічного гальмування, з вбудованим пристроєм збудження двигуна; з програмованими засобами керування, з однозонною системою регулювання швидкості зі зворотним зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості, з мережевими зв'язками Profibus DP і CAN. Система захисту реагує на датчики аварій, а також на аварійні ситуації, що вираховуються програмно.

Система захисту та сигналізації електроприводом забезпечує наступні види захистів:

- -від внутрішніх коротких замикань;
- -від несправностей в мережі власних потреб;
- -при зникненні і неприпустимому зниженні силової напруги;
- -при зникненні і зниженні нижче допустимого рівня струму збудження;
- -при неприпустимому перевищенні напруги на якорі електродвигуна;
- -при неприпустимому перевищенні струму електродвигуна;
- -при виході з ладу запобіжників системи захисту від перенапруг.

Напруга ~ 205 В, 50 Гц (вторинна лінійна напруга) силових ланцюгів надходить на перетворювачі від трансформатора ТСЗП-400 / 10УЗ через автомати розподільної шафи.

Напруга ~ 6 кВ, 50 Гц поступає на трансформатор Т від РУ 6 кВ підстанції, через шафу високовольтного введення ШВВ типу ШВВ-5л.

Напруга ~ 380 В власних потреб і вбудованого збудника надходять від розподільного щита.

3.4.2 Резервування перетворювальної техніки

Принципова схема перемикавання на резервний комплектний електропривод приведена на рис. 3.4. Для резервування робочих комплектних електроприводів 44UZ1-44UZ112 приводів робочого рольганга перед чорною кліткою використовується резервний КЕП 44UZR типу SINAMICS DC MASTER 6RA8031-6DV62-0AA0 (див. табл. 3.1) з реверсом струму в якорному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, з лінійним контактором і пристроєм динамічного гальмування, з вбудованим пристроєм збудження двигуна; з програмованими засобами керування, з однозонною системою регулювання швидкості зі зворотним зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості, з мережевими зв'язками Profibus DP і CAN. Система захисту реагує на датчики аварій, а також на аварійні ситуації, що вираховуються програмно.

Схема перемикавання на резервний перетворювач приведена на рис. 3.4.

Перемикавання на резервний перетворювач одного, який вийшов з роботи КЕП проводиться установкою одного з перемикачів: Q1÷ Q11 якірних ланцюгів двигунів та обмоток збудження двигунів в шафах А1, А2 в положення «Резерв».

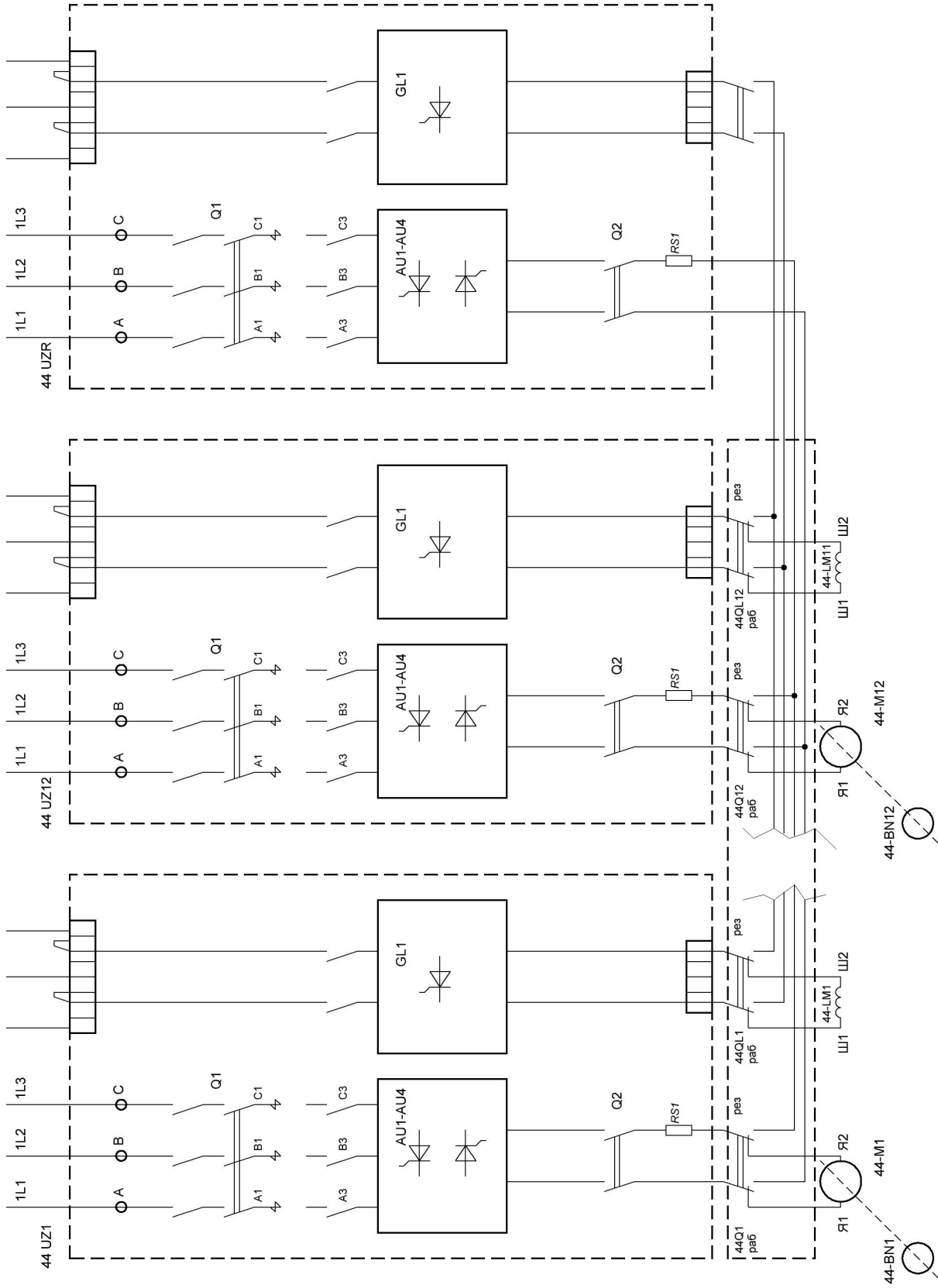


Рисунок 3.4 — Принципова схема силового ланцюгу робочого рольганга (секція 44) перед чорною кліткою

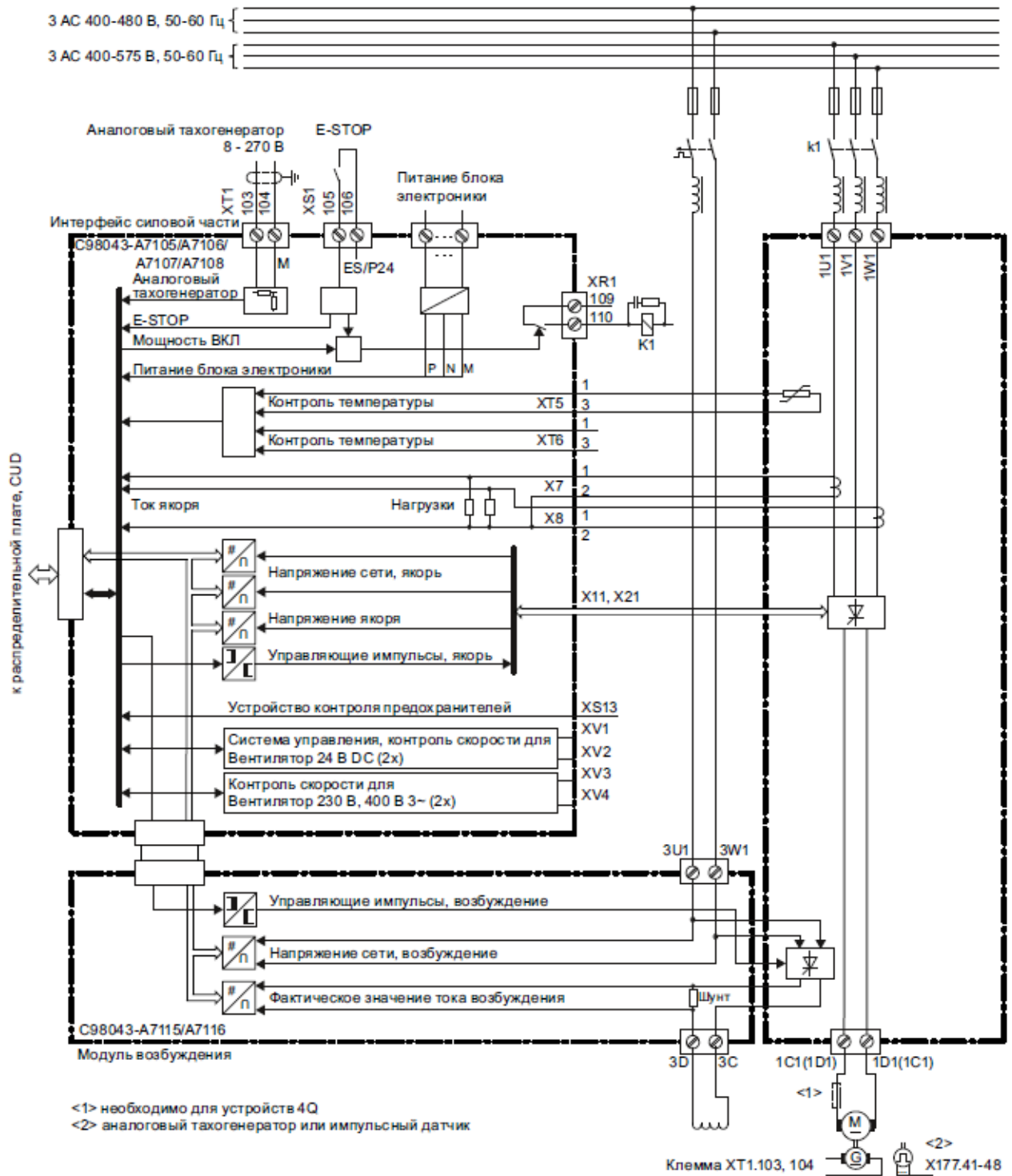


Рисунок 3.5 - Функціональна схема підключення (силова схема)

КЕП SINAMICS DCM серії 6RA80 (струм 60-125 А)

Перемикання електродвигуна на живлення від резервного ТП виробляється при відключеному живленні основних ланцюгів і зупиненому приводі.

3.4.3 Система керування (АСКТП)

Автоматизована система керування технологічним процесом (АСКТП) передбачає два основні режими роботи: ручний та автоматичний. Управління рольгангом здійснюється з поста керування (ПК).

Ручний режим керування використовується при налагодженні, випробуванні, в нештатних та аварійних ситуаціях, а також у випадках тимчасових відмов у роботі. Автоматичний режим керування є основним і містить в собі автоматичну послідовність роботи рольганга в функції наявності металу в відповідному контрольному перетині стану, а також в залежності від режиму роботи.

Передбачається також можливість ручного втручання апаратом ручного керування кожним рольгангом.

Забезпечити два режими роботи рольгангів (як перед, так і за чорною кліттю):

- режим «транспортування» – спільна робота роликів рольганга із забезпеченням синхронного обертання парних і непарних роликів в одну сторону;
- режим «розворот» – одночасне включення двигунів приводів із забезпеченням обертання парних і непарних роликів в протилежних напрямках.

Узгодити швидкість рольгангів зі швидкістю кліті, що примикають рольгангів і станиною роликів (на стороні виходу металу з кліті врахувати випередження металу при прокатці).

Функції системи автоматизації.

Система автоматизації повинна бути інформаційно пов'язана з системами верхнього рівня автоматизації і забезпечувати вирішення наступних завдань:

- зв'язок з іншими локальними системами по супроводу металу і обміну інформацією;
- зв'язок між приводами по шині Profibus через станцію віддаленого вводу/виводу ET200 і іншим радіальним каналам;
- ситуаційно-логічне управління комплексом;
- введення параметрів і вивід на кольорові монітори, друк протоколів (при необхідності);
- локальна діагностика несправності комплексу.

Інші функції при необхідності забезпечуються розробником АСУТП.

Параметри налаштування, що визначають режими роботи приводів, не повинні виходити за допустимі межі.

Технічні засоби, на яких створюється система базової автоматизації, повинні бути максимально уніфіковані і взаємозамінні.

Пульты керування повинні бути інтегрованими (тобто містити як органи керування приводами, так і органи керування, що відносяться до системи автоматизації).

Кількість органів керування і сигналізації повинно бути погоджено між проектувальниками електроприводів і АСУТП в ході проектування.

Апарати на пультах керування повинні бути розподілені за трьома зонами:

- оперативна зона;
- зона апаратури ручного (поштовхового) керування;
- зона підготовки обладнання до роботи.

На кожному з пультів, оснащених сигнальної арматурою, передбачити кнопку для контролю справності сигнальних ламп.

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РОБОЧОГО РОЛЬГАНГУ

4.1 Математичний опис об'єкта керування

При синтезі системи керування приймаються звичайні для систем електроприводу допущення, лінійризуючі силову частину об'єкта керування – двигун і регульоване джерело живлення ланцюга якоря. При математичному описі не враховується вплив пружних елементів, вплив гістерезису, вихрових струмів і реакції якоря. Коефіцієнти передач і сталі часу структурних елементів електроприводу приймаються незмінними.

Об'єктом керування в даній системі виступає перетворювач, електродвигун і механічна частина.

Тиристорний перетворювач як елемент системи регулювання є нелінійним дискретним пристроєм. Його специфічні особливості полягають в наступному. Керування ТП здійснюється дискретно, оскільки після відмикання чергового тиристора зміна сигналу керування протягом деякого інтервалу часу не призводить до зміни напруги ТП. Якщо швидкість зміни кута $d\alpha/dt > \omega_0$, то ЕРС визначається не кутом α , а зміною по кривій напруги живлення останнього тиристора, що проводив струм у зв'язку з неможливістю закрити по ланцюгу керування відкритий тиристор. Останнє явище отримало назву неповної керуваності тиристорного перетворювача.

У зв'язку з цим повне дослідження динамічних характеристик ТП є складним завданням, і на практиці застосовують різного роду спрощення. Найбільшого поширення набули два види моделей тиристорних перетворювачів: безперервна, в якій ТП представляється аперіодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{ТП}}$ і сталої часу $\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ та імпульсна. Надалі, при синтезі САК буде використана безперервна модель тиристорного перетворювача.

Система регулювання обраного тиристорного перетворювача двопроцесорна, всі регулятори (струму якоря, швидкості, ЕДС двигуна, струму збуджен-

ня і т.п.) побудовані з функціональних блоків, реалізованих програмно. Внаслідок того, що швидкодія мікропроцесорів досить високу ресурсів, яких до того ж вистачає для реалізації системи захистів і сигналізації, здійснення моніторингу стану електроприводу, діагностики збоїв і попереджень, інтерфейсу оператора і т.п., синтез системи регулювання може бути здійснений відповідно до традиційного налаштування контурів за модульним і симетричними оптимумами, причому сама система регулювання вважається безперервною. Детальні структурні схеми відповідних контурів регулювання перетворювача SIMOREG DC Master будуть представлені в наступних розділах при синтезі САР.

Таким чином, електродвигун представимо у вигляді трьох типових ланок (рис. 4.1): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина двигуна) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативним зворотним зв'язком по ЕРС двигуна.

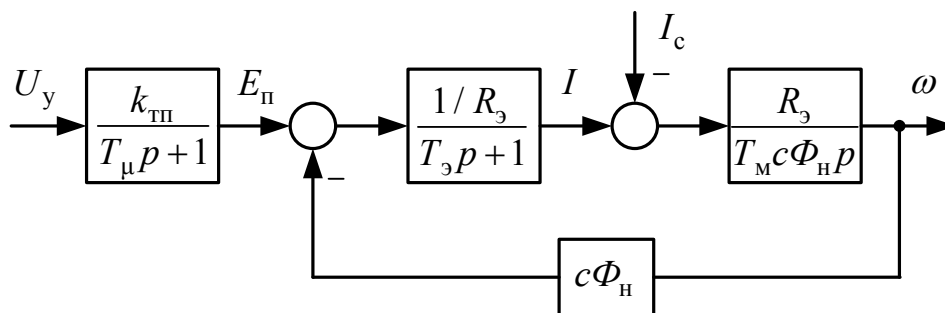


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електропривода

4.2 Розрахунок основних параметрів елементів системи електроприводу

При синусоїдальній опорній напрузі системи імпульсно-фазового керування (СІФУ) перетворювача характеристика вхід-вихід ТП лінійна і коефіцієнт передачі ТП по напрузі розраховується за формулою [16, 17]:

$$k_{\text{ТП}} = \frac{E_{\text{d0}}}{U_{\text{y max}}} = \frac{276,75}{10} = 27,67 \quad (4.1)$$

де E_{d0} – значення максимально випрямленою ЕРС, В.

$U_{\text{y max}} = 10$ В – максимальна керуюча напруга перетворювача.

Сумарний опір якоря обчислимо за наближеною формулою, заснованої на тому що приблизно половина втрат в електродвигуні виділяється у вигляді тепла на активному опорі якоря:

$$\begin{aligned} r_{\text{я.дв}} &= \frac{\Delta P_{\text{н}}}{2I_{\text{н}}^2} = \frac{U_{\text{н}}I_{\text{н}} - P_{\text{н}}}{2I_{\text{н}}^2} = \frac{1-\eta}{2} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \\ &= \frac{1-0,795}{2} \cdot \frac{220}{100} = 0,225 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.2)$$

де $\Delta P_{\text{н}}$ – повні втрати при номінальному навантаженні, які дорівнюють різниці потужностей: споживаної з мережі та номінальній на валу двигуна;

$U_{\text{н}}, I_{\text{н}}$ – номінальні напруга та струм електродвигуна (див. табл. 2.1);

$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}I_{\text{н}}}$ – КПД електродвигуна.

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_{\text{к}} = \frac{m_{\text{ф}} \cdot x_{\text{а}}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 5,962 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 5,694 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (4.3)$$

де $m_{\text{ф}} = 6$ – число фаз випрямлення;

$x_{\text{а}}$ – повний опір силового трансформатора.

Еквівалентний активний опір якорного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_{\text{э}} &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_{\text{к}} + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,225 + 2 \cdot 1,507 \cdot 10^{-3} + 5,694 \cdot 10^{-3} + 22,5 \cdot 10^{-3} = 0,279 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $r_{\text{я.дв}}$ – сумарний опір якоря електродвигуна, Ом;

$r_{\text{тр}}$ – активний опір силового трансформатора, мОм;

$r_{\text{к}}$ – комутаційний опір, мОм;

$r_{\text{ш}} = 0,1r_{\text{я.дв}} = 0,1 \cdot 0,225 = 22,5 \text{ мОм}$ – активний опір кабелю, що з'єднують

ТП з якорем двигуна (загальній ланцюг випрямленого струму).

Еквівалентна індуктивність якiрного ланцюгу системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} L_{\text{э}} &= L_{\text{дв}} + 2L_{\text{тр}} = \\ &= 40 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 18,979 \cdot 10^{-6} = 0,04 \text{ Гн} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$L_{\text{дв}}$ – індуктивність обмотки якоря, Гн;

$L_{\text{тр}}$ – індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму, Гн.

Електромагнітна постійна часу системи ТП-Д:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = \frac{0,04}{0,279} = 0,144 \text{ с} \quad (4.6)$$

$L_{\text{э}}$ та $R_{\text{э}}$ – еквівалентні індуктивність та опір системи ТП-Д.

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я,дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 100 \cdot 0,225}{17,3} = 11,43 \text{ Вс} \quad (4.7)$$

де $\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 165}{30} = 17,3 \text{ 1/с}$ – кутова номінальна швидкість електро-двигуна.

Електромеханічна постійна часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = \frac{J'_{\Sigma} R_{\text{э}}}{c\Phi_{\text{н}}^2} = \frac{156 \cdot 0,279}{11,43^2} = 0,333 \text{ с} \quad (4.8)$$

де $J'_{\Sigma} = 156 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – сумарний момент інерції системи «двигун-ролик-метал»;

$c\Phi_{\text{н}}$ – коефіцієнт двигуна (постійна двигуна), Вс.

Постійну часу ТП через наявність в ньому і взагалі в системі малих неврахованих інерційні, приймаємо $T_{\mu} \approx 5 \text{ мс}$.

Співвідношення електромеханічної постійної часу до електромагнітної постійна часу $T_{\text{м}} / T_{\text{е}} = 0,333 / 0,114 = 2,92$.

4.3 Синтез регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму враховуємо, що електромагнітна постійна часу T_M набагато більша електромагнітної постійної часу T_3 . Також будемо зневажати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, розглядаючи його її як збурюючим впливом у контурі струму [4, 7].

Структурна схема контуру струму представлено на рисунку 4.2.

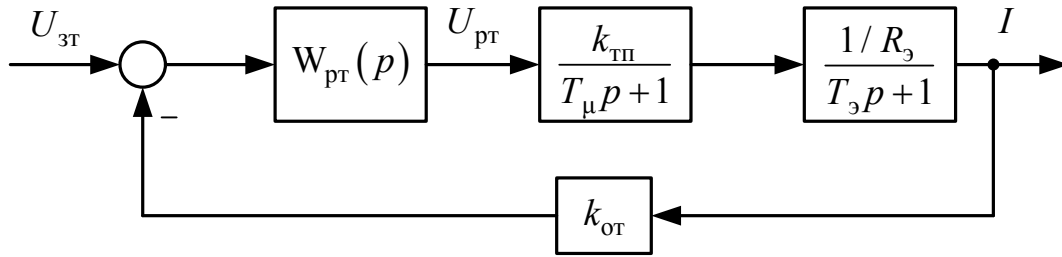


Рисунок 4.2 – Структурна схема контуру струму

На підставі структурної схеми, наведеної на рис. 4.2, та методики, викладеної в [7], можна отримати формули для визначення параметрів ПІ-РТ і передавальну функцію (ПФ) регулятора струму, налаштованого на модульний оптимум (МО):

$$W_{PT}^M(p) = \frac{R_3(T_3p + 1)}{k_{TP}k_{OT}2T_\mu p} = \frac{R_3(T_3p + 1)}{k_{TP}k_{OT}T_{OT}p} = k_{PT\Pi} + \frac{k_{PTИ}}{p} = k_{PT\Pi} + \frac{1}{T_{PT}p} \quad (4.9)$$

Пропорційна, інтегральна частина та постійна часу ПІ-регулятора струму:

$$k_{PT\Pi} = \frac{R_3T_3}{k_{TP}k_{OT}T_{OT}} = \frac{0,279 \cdot 0,144}{27,675 \cdot 0,04 \cdot 0,01} = 3,617 \quad (4.10)$$

$$k_{PTИ} = \frac{1}{T_{PT}} = \frac{R_3}{k_{TP}k_{OT}T_{OT}} = \frac{0,279}{27,675 \cdot 0,04 \cdot 0,01} = 25,177 \text{ 1/c} \quad (4.11)$$

$$T_{PT} = \frac{k_{TP}k_{OT}T_{OT}}{R_3} = \frac{27,675 \cdot 0,04 \cdot 0,01}{0,279} = 0,04 \text{ c} \quad (4.12)$$

де T_3 – електромагнітна постійна часу системи ТП-Д;

k_{TP} – коефіцієнт передачі ТП по напрузі;

$$k_{от} = \frac{U_{зг.маx}}{I_{маx}} = \frac{10}{2,5 \cdot 100} = 0,04 \text{ В/А} - \text{коефіцієнт передачі ланцюга зворот-}$$

нього зв'язка по струму;

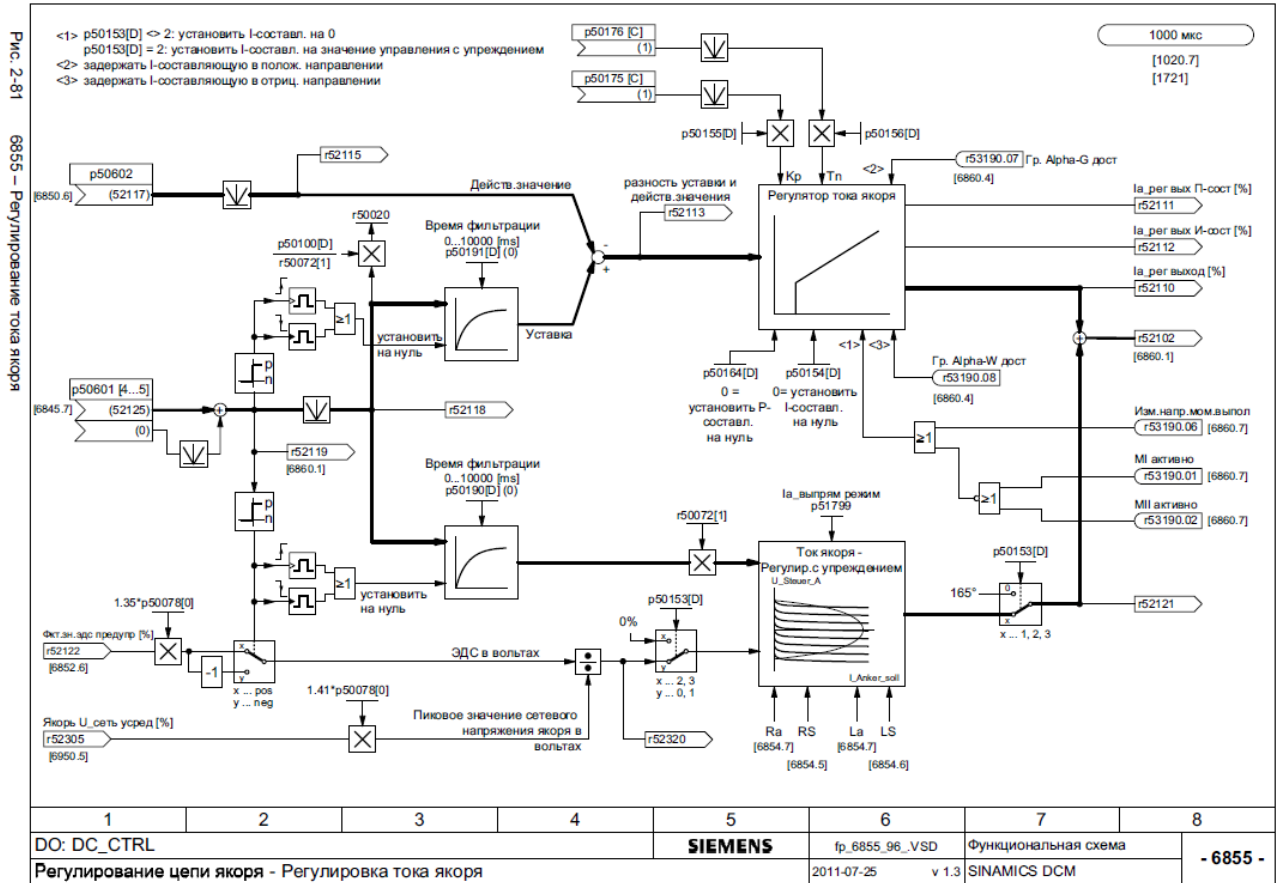
$$U_{зг.маx} = 10 \text{ В} - \text{максимальний сигнал завдання на струм};$$

$I_{маx} = 2,5I_H = 2,5 \cdot 100 = 250 \text{ А}$ – максимально допустимий струм якоря двигуна (струм упору);

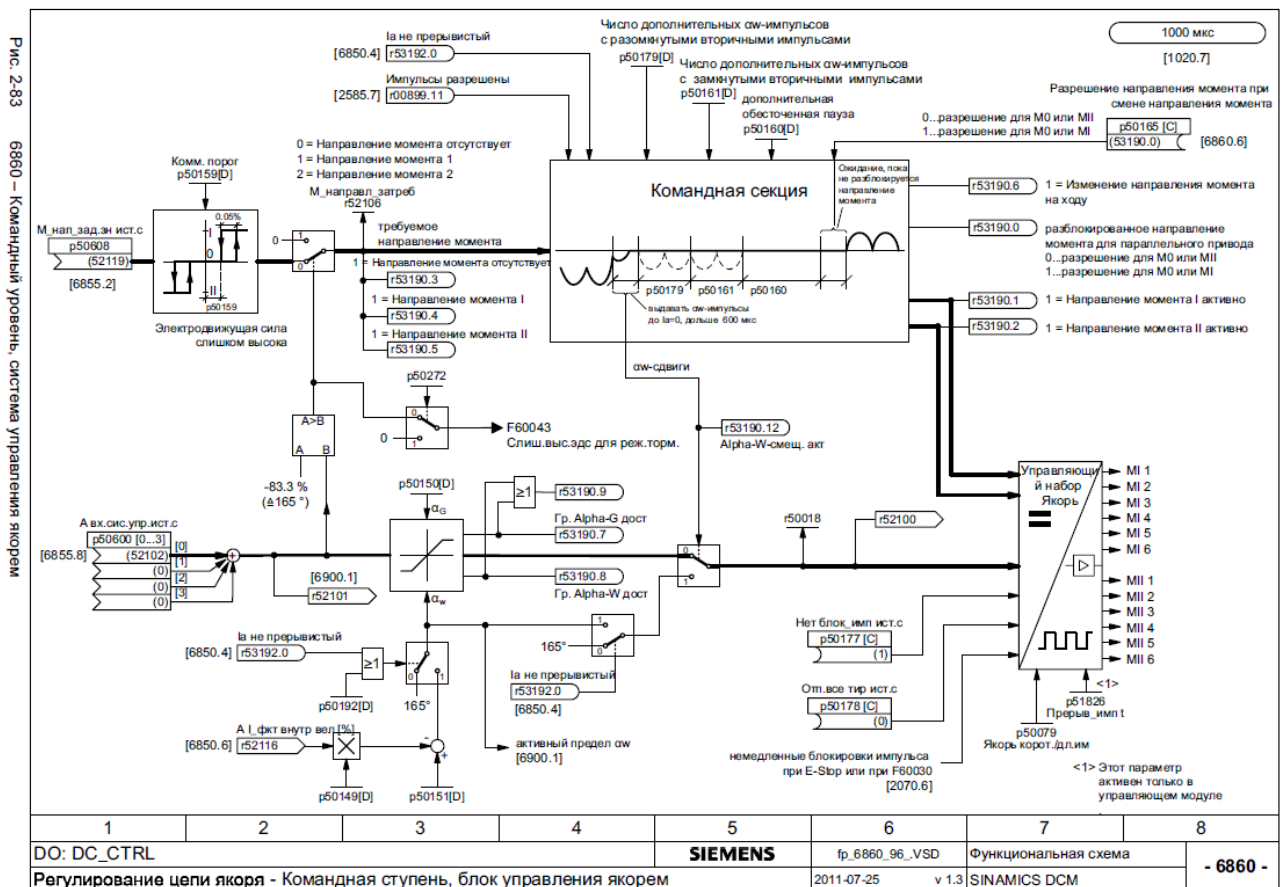
$T_{от} = 2T_{\mu} = 2 \cdot 0,005 = 0,01 \text{ с}$ – постійна часу інтегрування контуру струму при настроюванні на модульний оптимум.

Функціональна схема контуру регулювання струму якоря, реалізована в перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.3. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора струму при налагодженні електроприводу необхідно встановити в параметрах p50175 і 50176 відповідно.

Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якоря двигунів використовується канал формування струму на рис. 4.4. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем А/D, нормується за величиною до 100%, який пропорційний реальному струму.



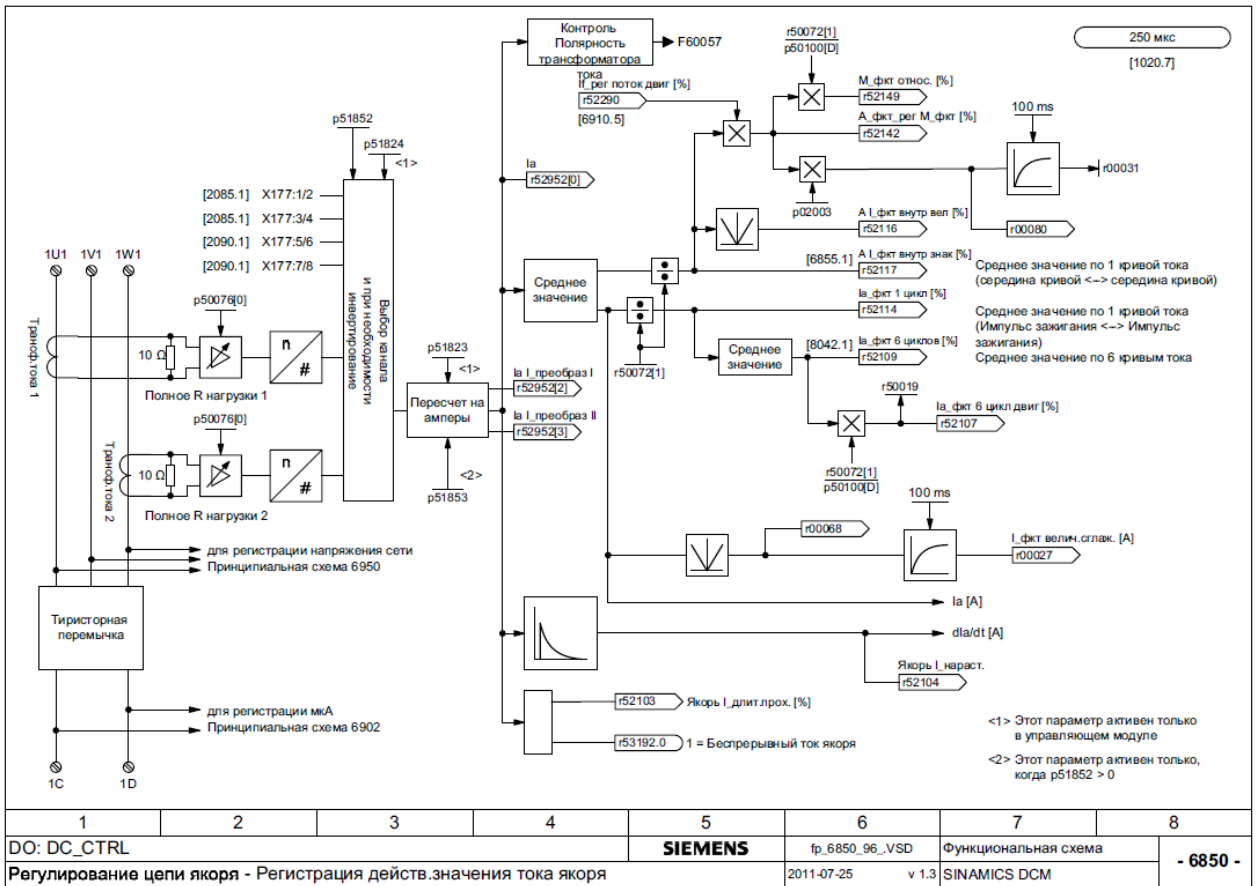
а)



б)

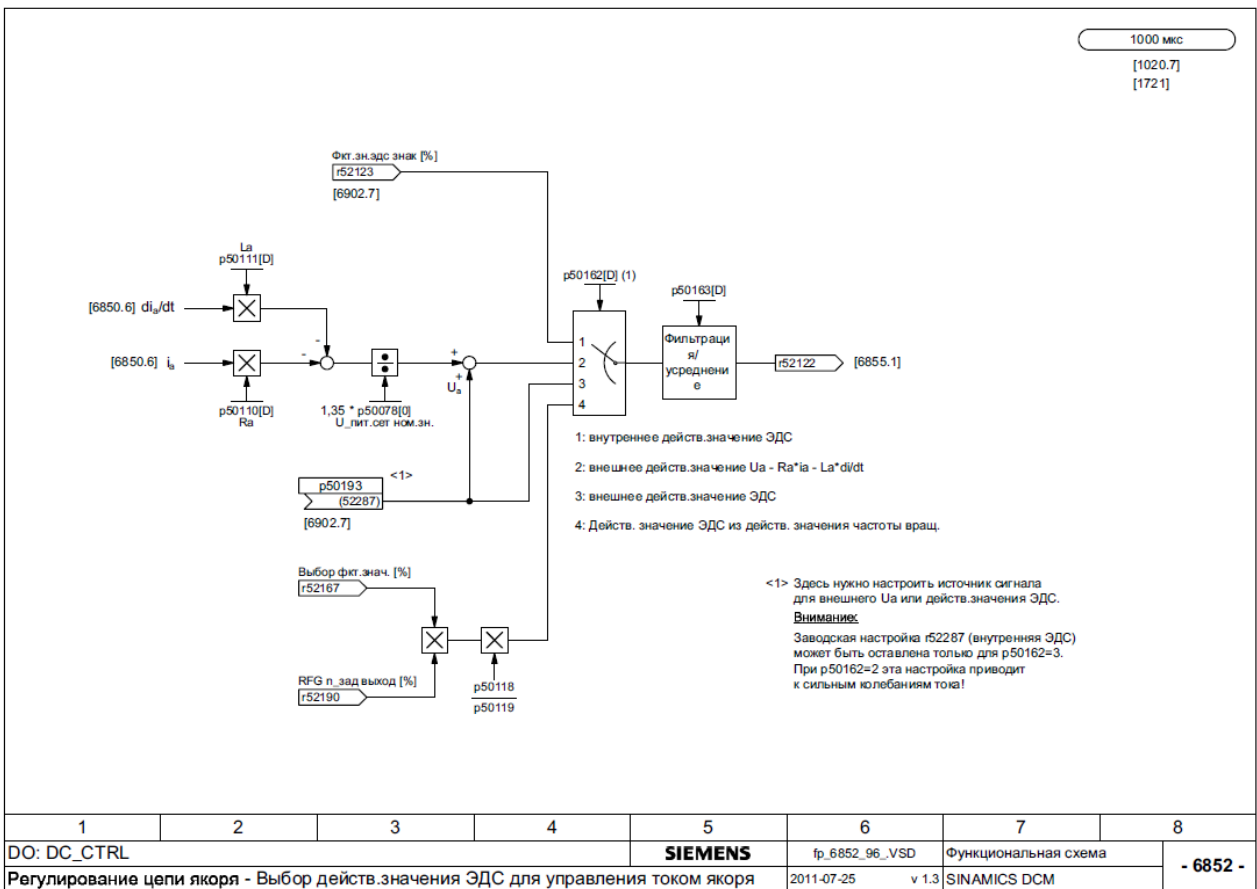
Рисунок 4.3 – Функціональні схеми контуру регулювання струму у перетворювачі SINAMICS DCM

Рис. 2-77 6850 – Регистрация фактического значения тока якоря



а)

Рис. 2-78 6852 – Выбор фактического значения ЭДС для предупреждения тока якоря



б)

Рисунок 4.4 – Канал формування сигналу якорного струму в перетворювачі SINAMICS DCM

4.4 Синтез регулятора швидкості

Структурна схема контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки T_μ – мала стала часу, то добутком $T_{от}T_\mu$ можна знехтувати) приведена на рисунку 4.5.

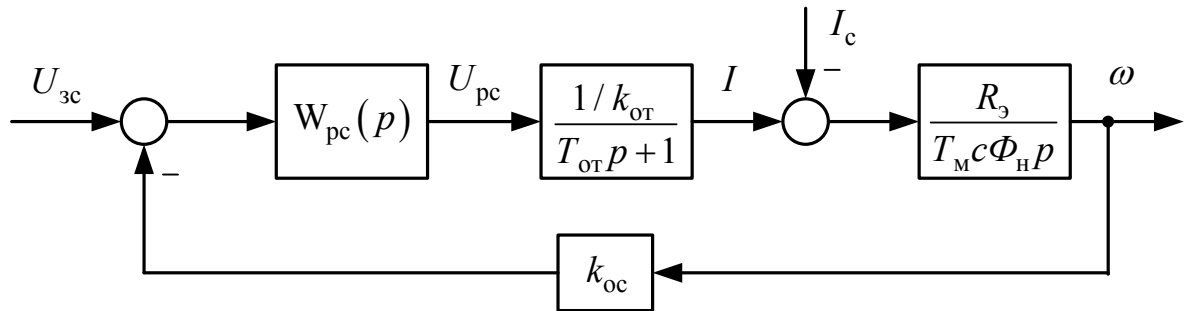


Рисунок 4.5 – Структурна схема контуру швидкості

Оскільки вимоги до статичності – забезпечення статичної помилки регулювання в межах 5%, контур швидкості виконуємо дворазово-інтегруючим (з ПІ-регулятором), тобто здійснюємо налаштування на симетричний оптимум. В цьому випадку передавальна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{рс}^c(p) = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{от}} \frac{4T_{от}p + 1}{4T_{от}p} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} \frac{2T_{ос}p + 1}{2T_{ос}p} = k_{рсП} + \frac{k_{рсИ}}{p} \quad (4.13)$$

Пропорційна, інтегральна частина та постійна часу ПІ-регулятора швидкості:

$$k_{рсП} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_э k_{ос} T_{ос}} = \frac{0,333 \cdot 11,43 \cdot 0,04}{0,278 \cdot 0,578 \cdot 0,02} = 47,164 \quad (4.14)$$

$$k_{рсИ} = \frac{1}{T_{рс}} = \frac{T_м c \Phi_н k_{от}}{R_э k_{ос} 2T_{от}^2} = \frac{0,333 \cdot 11,43 \cdot 0,04}{0,278 \cdot 0,578 \cdot 2 \cdot 0,02^2} = 1179,1 \quad (4.15)$$

$$T_{рс} = \frac{1}{k_{рсИ}} = \frac{1}{1179,1} = 0,848 \text{ мс} \quad (4.16)$$

де $T_м$ с – електромеханічна постійна часу системи ТП-Д;

$$k_{oc} = \frac{U_{zc.max}}{\omega_{max}} = \frac{10}{17,78} = 0,578 \text{ Вс} - \text{коєфіцієнт передачі ланцюгу зворотньо-}$$

го зв'язку по швидкості;

$$U_{zc.max} = 10 \text{ В} - \text{максимальний сигнал завдання на швидкість};$$

$$\omega_{max} = \omega_n - \text{максимальна швидкість електродвигуна};$$

$$T_{oc} = 2T_{от} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ с} - \text{стала часу інтегрування контуру швидкості}$$

при налаштуванні на симетричний оптимум.

Для зниження перерегулювання по швидкості під час налаштування контуру на симетричний оптимум на його вході, встановлюємо фільтр з передаточною функцією:

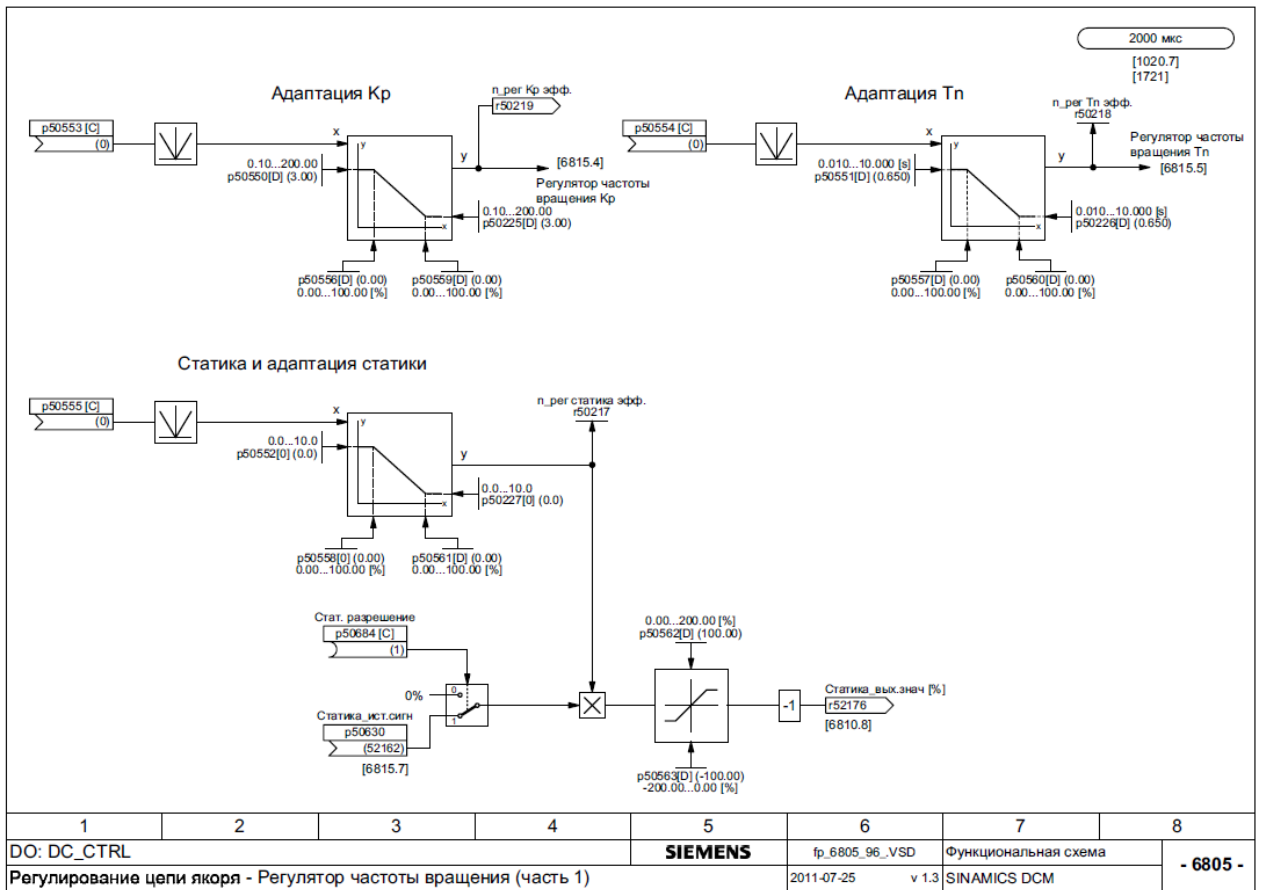
$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} \quad (4.17)$$

де $T_{\phi} = 8T_{\mu} = 2T_{oc} = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ с}$ – стала часу фільтра.

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SINAMICS DCM програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.6. Розраховані величини пропорційної і інтегральної частин регулятора швидкості при налагодженні електроприводу необхідно встановити в відповідних параметрах.

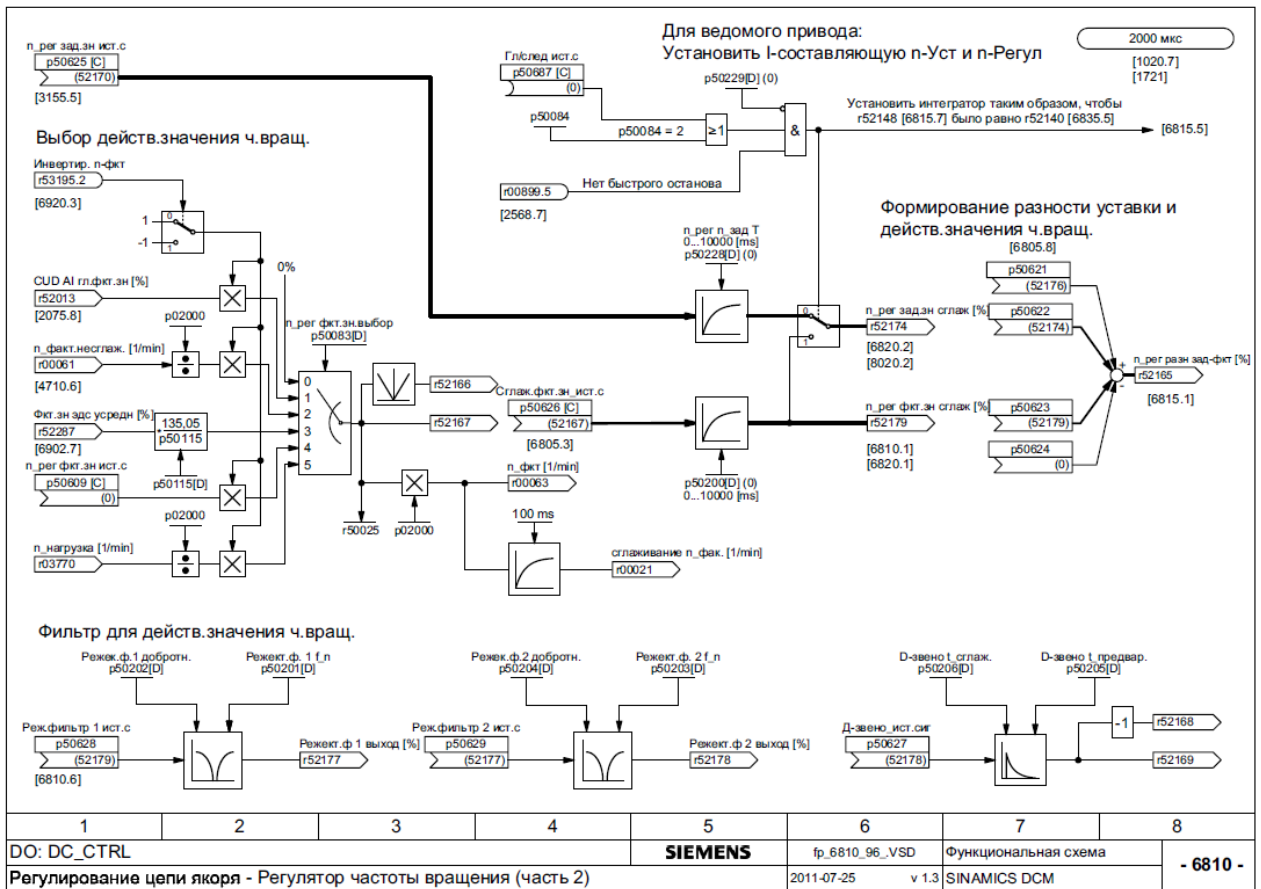
У якості датчика швидкості обираємо імпульсний датчик HOG 10 DN концерну Huebner Berlin – 1024 імпульсу/оберт.

Рис. 2-67 6805 – Регулятор скорости (часть 1)



а)

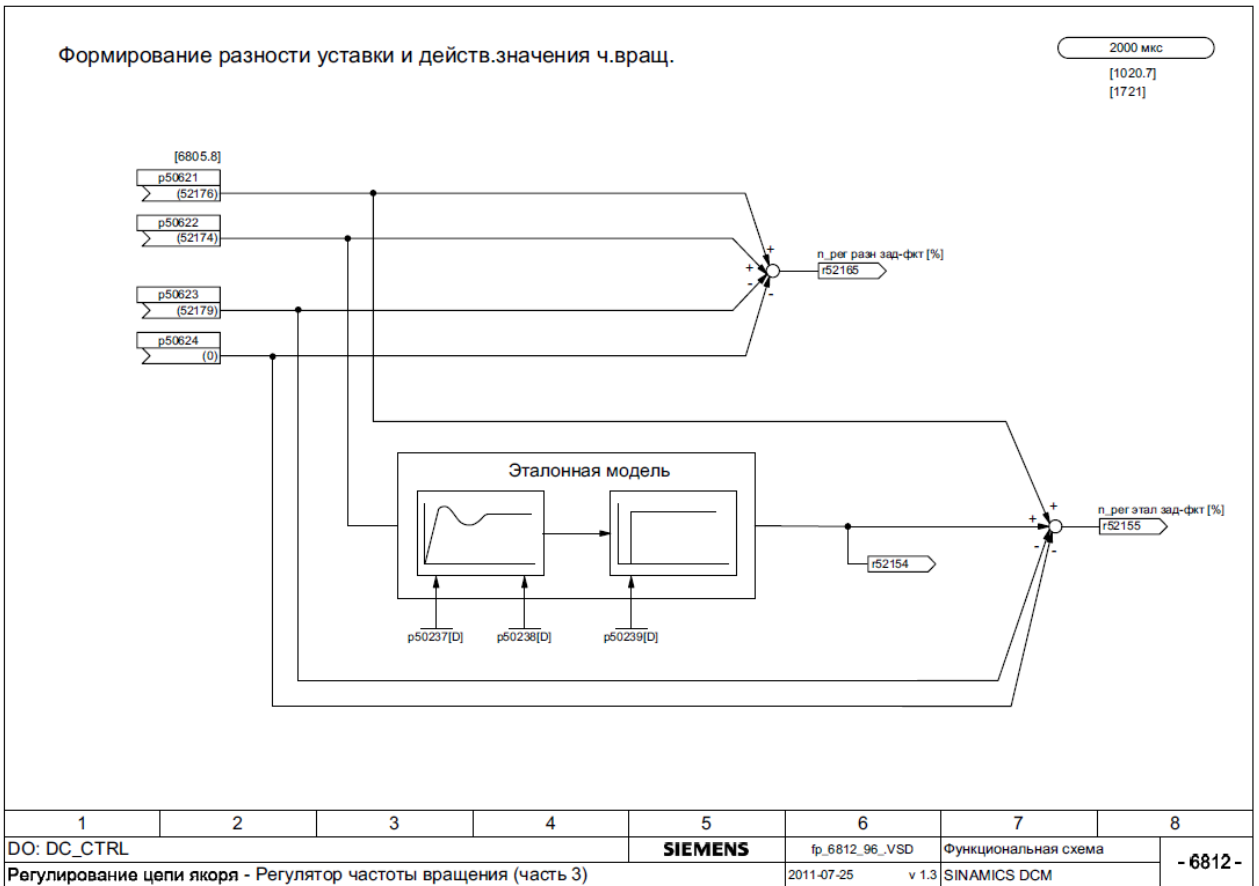
Рис. 2-68 6810 – Регулятор скорости (часть 2)



б)

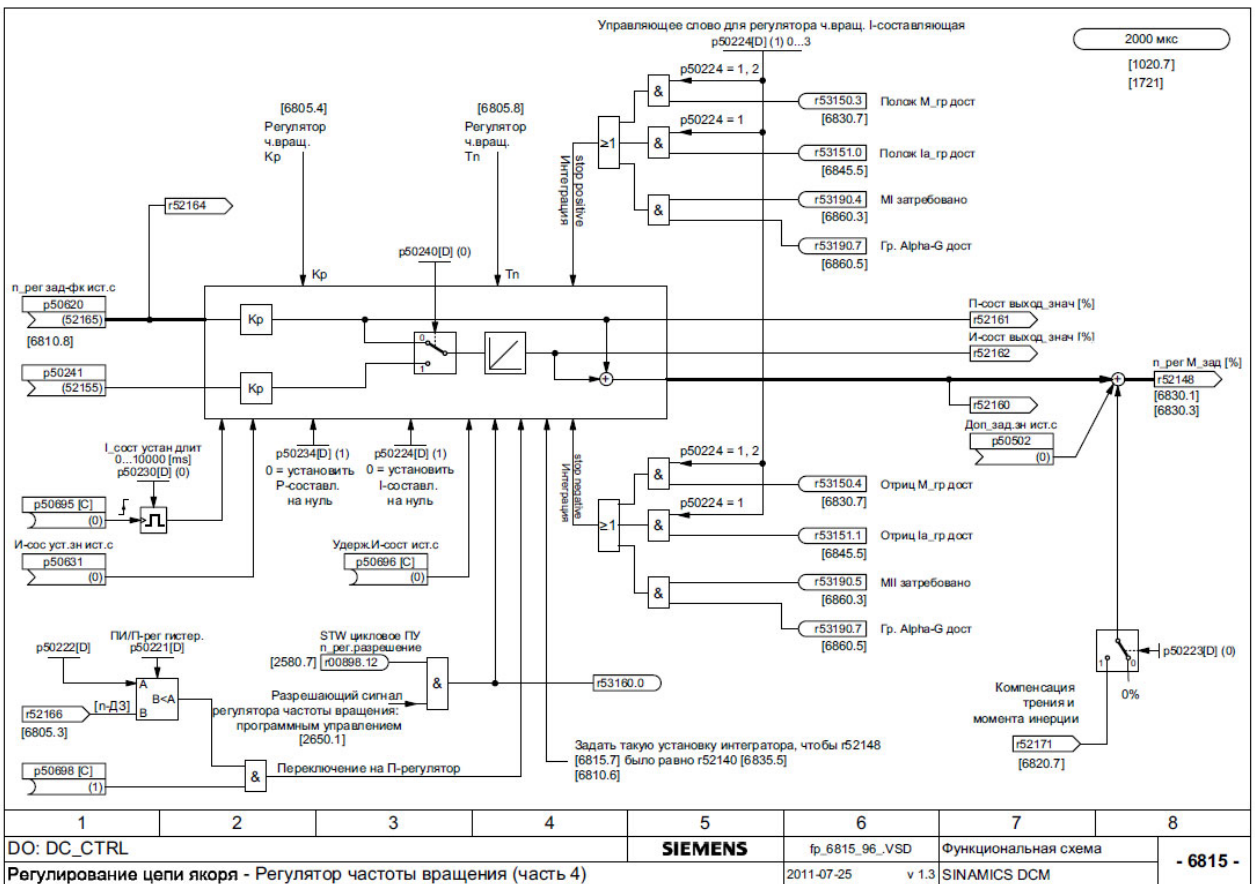
Рисунок 4.6 – Функціональні схеми контуру регулювання швидкості у перетворювачі SINAMICS DCM

Рис. 2.69 6812 – Регулятор скорости (часть 3)



а)

Рис. 2.70 6815 – Регулятор скорости (часть 4)



б)

Рисунок 4.7 – Функціональні схеми контуру регулювання швидкості у перетворювачі SINAMICS DCM

4.5 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону і гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки струмообмеження ($I_{\max} = 2,5I_H$) необхідно на вході регулятора швидкості встановити задатчик інтенсивності швидкості (ЗІШ). Він перетворює ступінчастий сигнал завдання швидкості в сигнал, що лінійно змінюється в часі. Стале значення напруги виходу ЗІШ, яке подається на вхід регулятора швидкості, так само вхідного сигналу. Структурна схема задатчика інтенсивності приведена на рисунку 4.8.

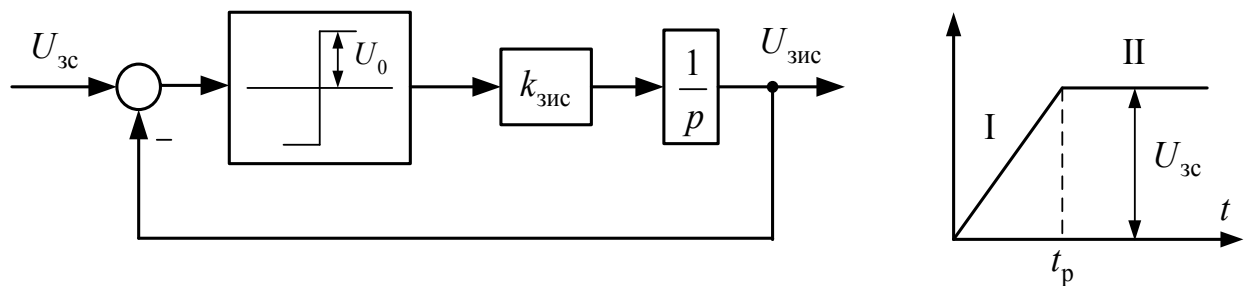


Рисунок 4.8 – Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідну напругу задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

$$U_{\text{зис}}^I = U_0 k_{\text{зис}} t_p = \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{м}} c \Phi_{\text{н}}} \frac{I_{\text{дин}} U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{з.уст}}} t_p \quad (4.18)$$

II ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{II}} = U_{\text{зс}} \quad (4.19)$$

де $I_{\text{дин}} = 1,5I_H = 1,5 \cdot 100 = 150$ А – заданий динамічний струм;

$\omega_{\text{з.уст}} = \omega_{\text{н}} \text{ 1/c}$ – усталена швидкість (швидкість транспортування злитка),

відповідна $U_{\text{зс}}$;

$U_{\text{зс}} = 10$ В – напруга на вході ЗІШ (напруга, що задається);

$U_0 = 10$ В – полиця релейного елемента.

Зі співвідношення (3.24) визначимо час розгону двигуна до сталої швидкості:

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_H}{R_\Omega} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} = \frac{0,333 \cdot 11,43}{0,279} \cdot \frac{17,3}{150} = 1,57 \text{ с} \quad (4.20)$$

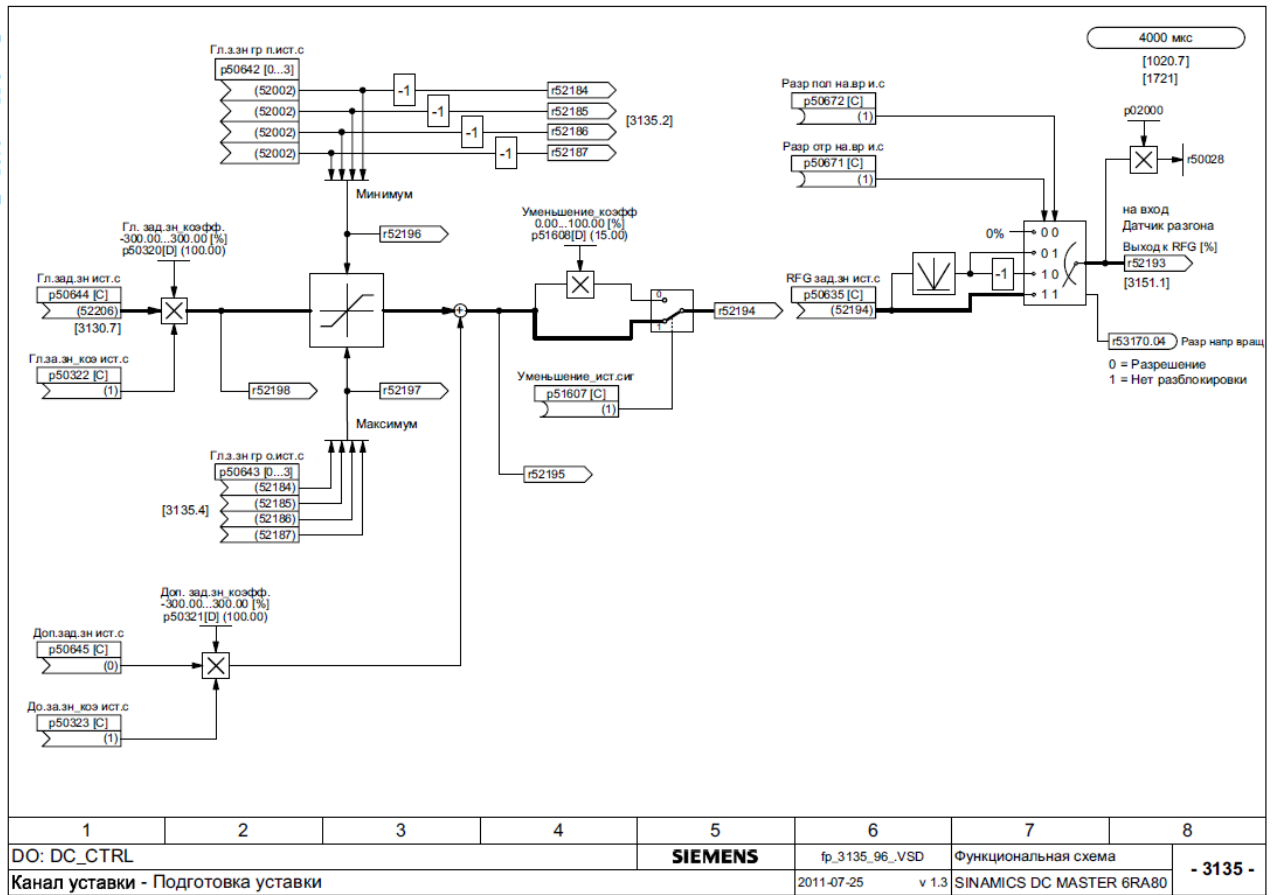
Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p} = \frac{10}{1,57} = 6,36 \text{ В/с.} \quad (4.21)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SINAMICS DCM програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 4.9.

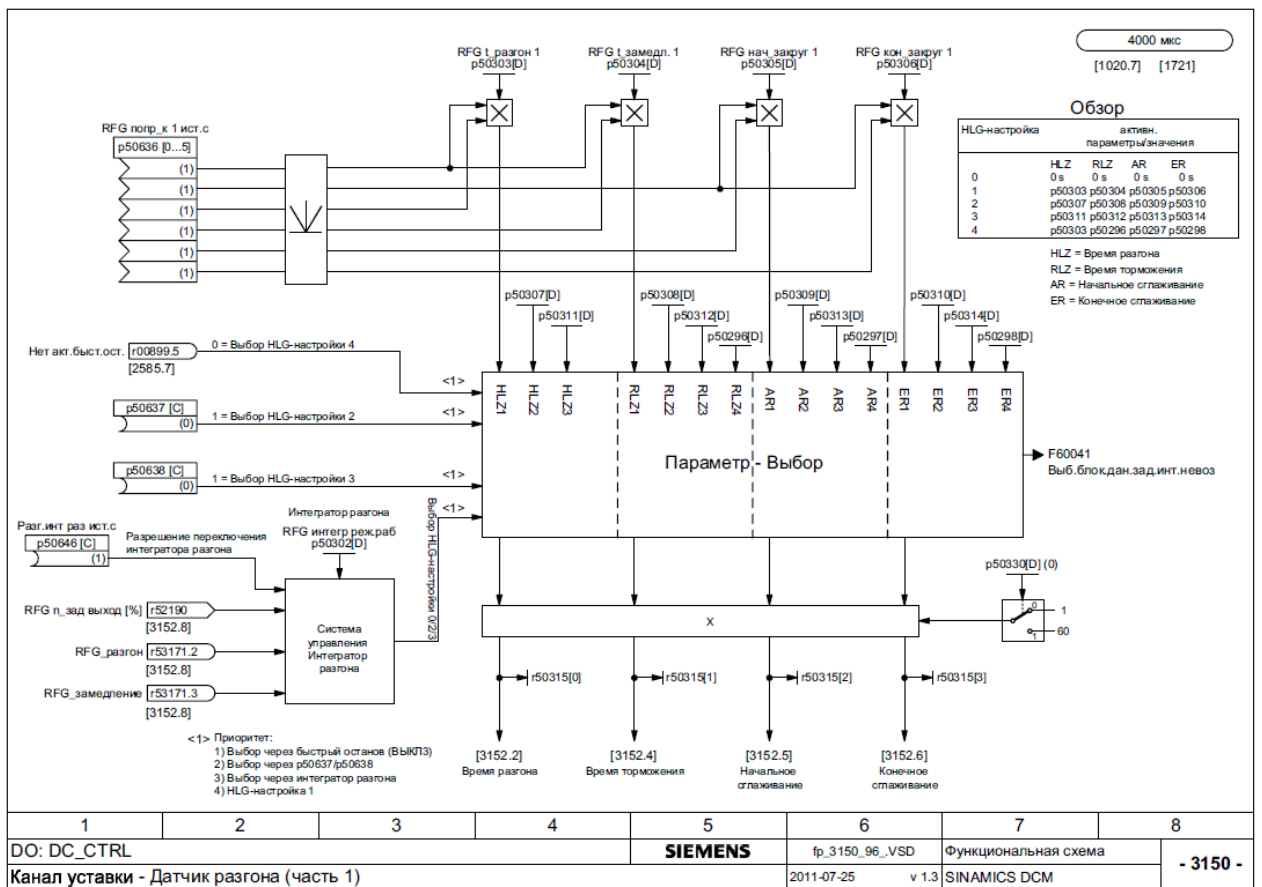
На рисунку 4.11 наведена структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводу рольгангу.

Рис. 2-55 3135 – Подготовка заданного значения



а)

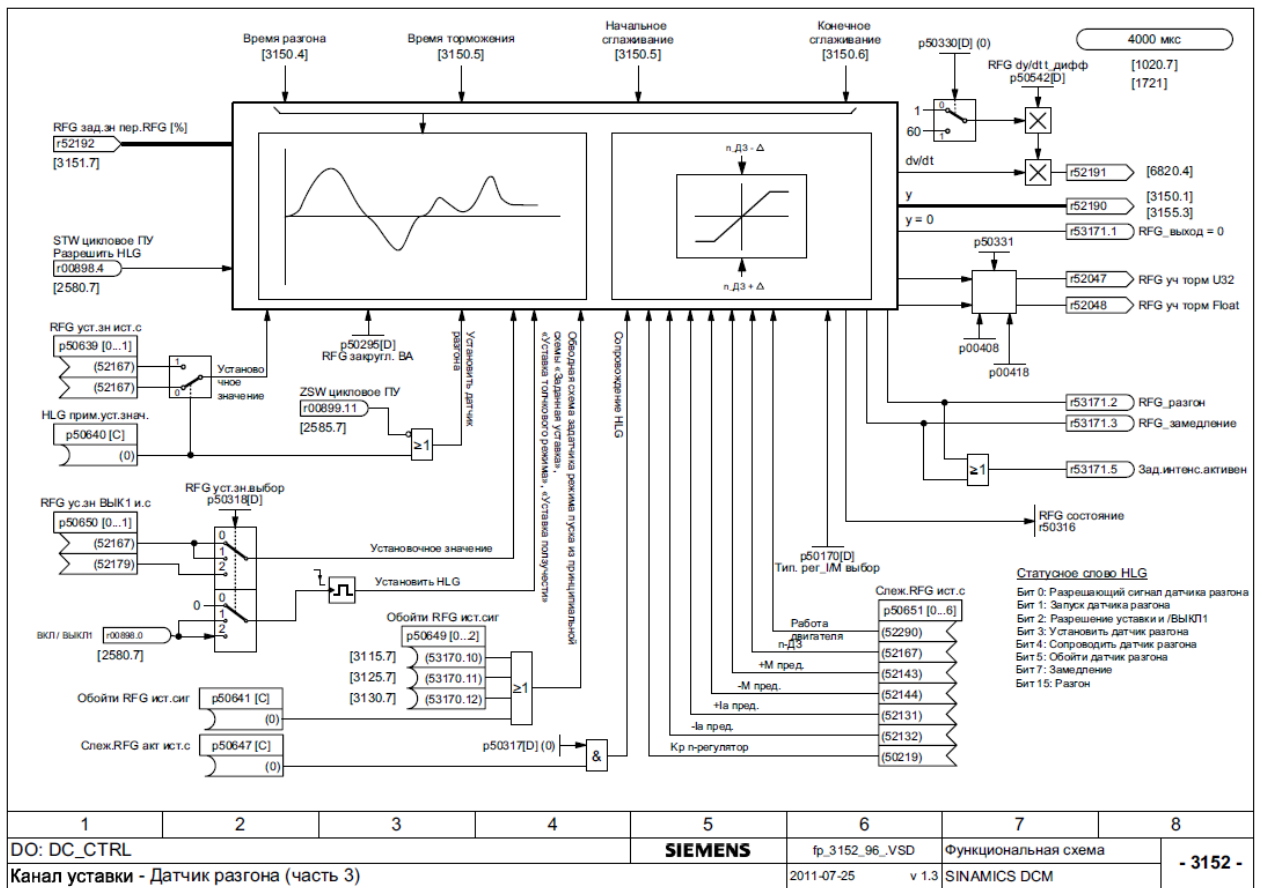
Рис. 2-56 3150 – Датчик разгона (часть 1)



б)

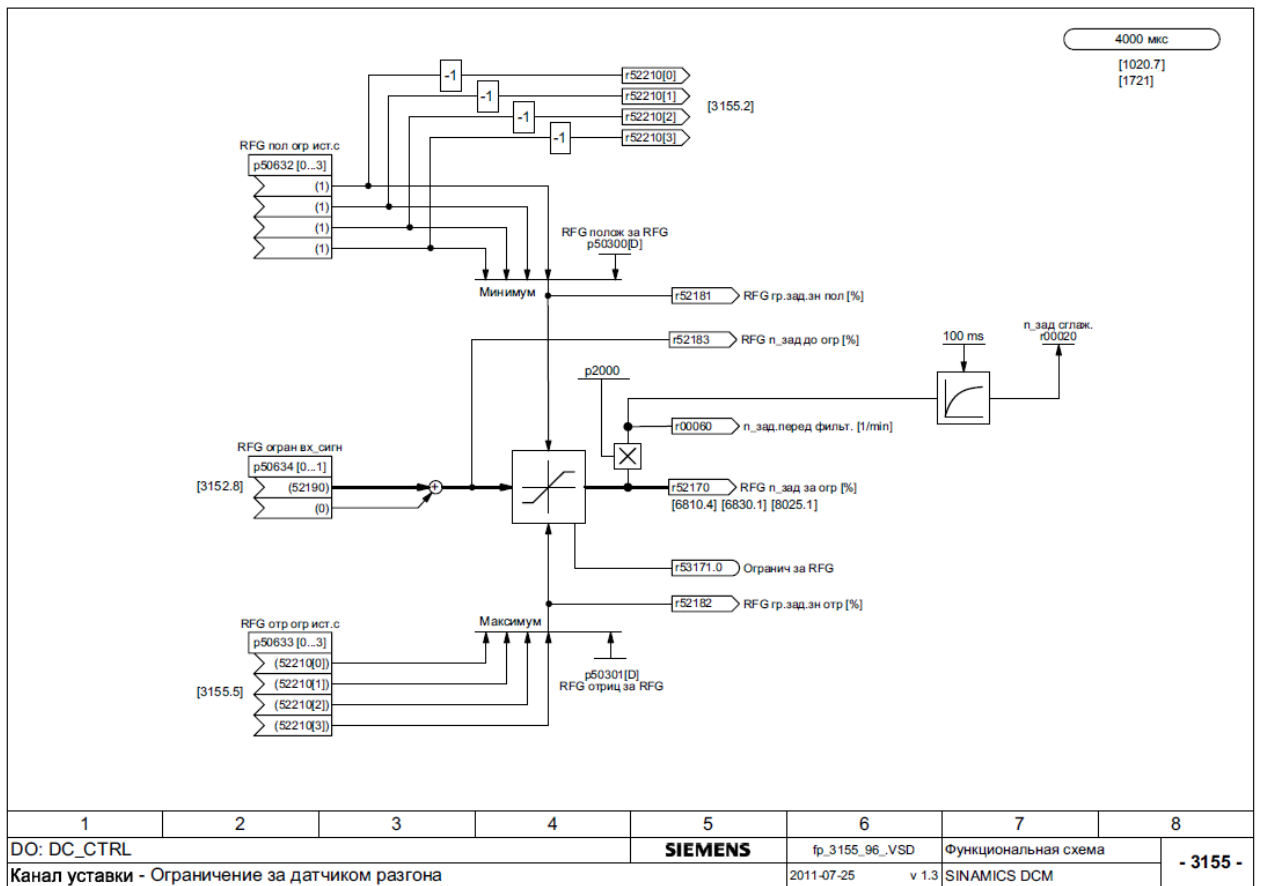
Рисунок 4.9 – Формування головного завдання швидкості у перетворювачі SINAMICS DCM

Рис. 2-58 3152 – Задатчик интенсивности (часть 3)



а)

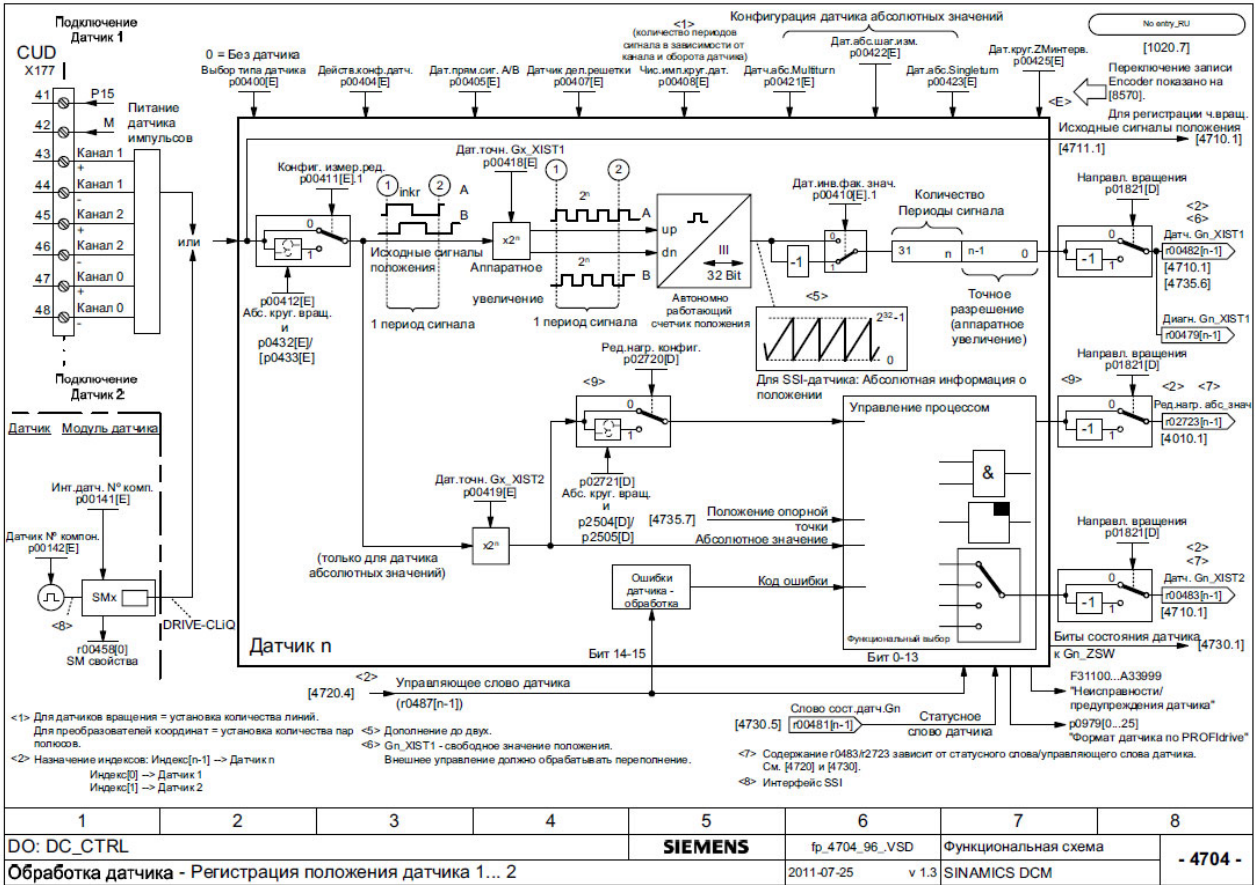
Рис. 2-59 3155 – Ограничение за датчиком разгона



б)

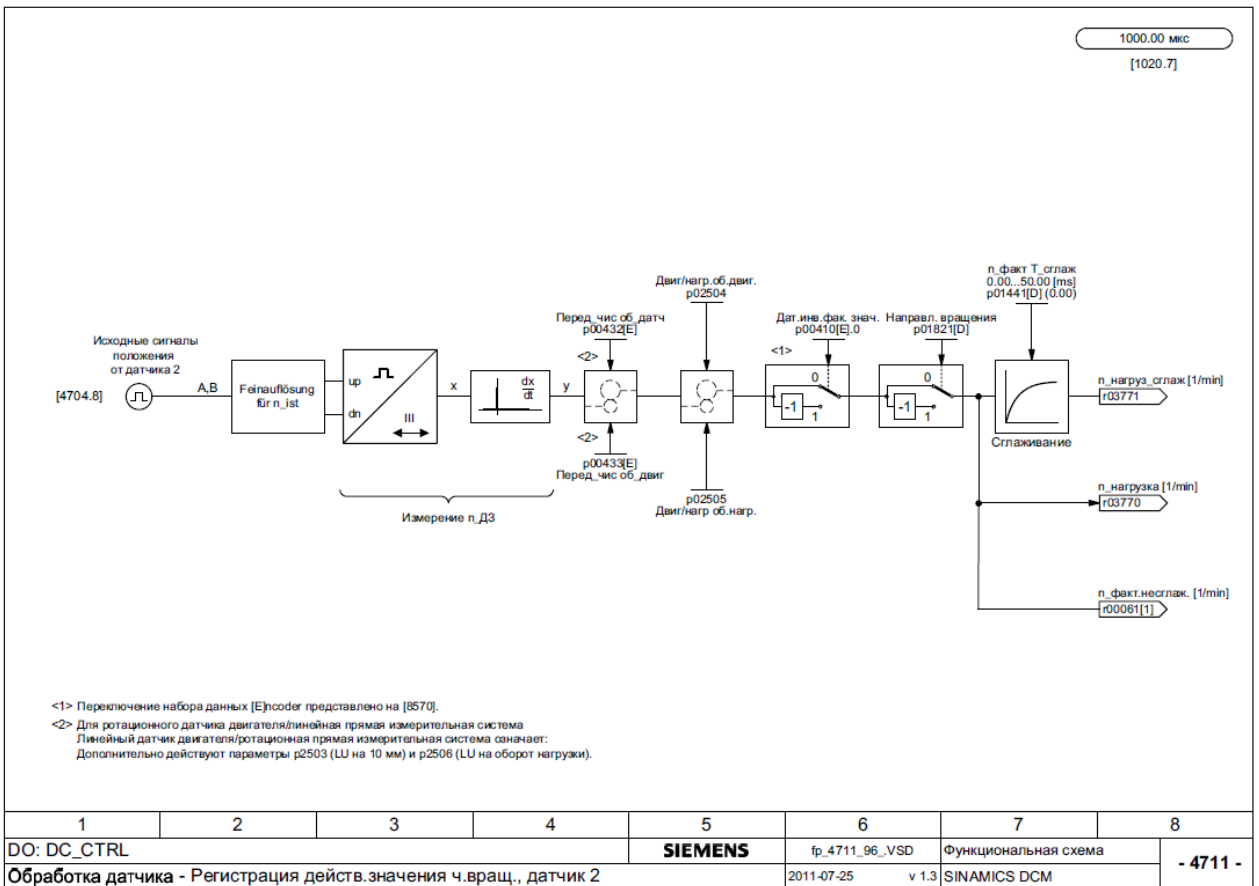
Рисунок 4.10 – Функціональні схеми задатчика інтенсивності швидкості у перетворювачі SINAMICS DCM

Рис. 2-60 4704 - Регистрация положения датчик 1... 2



а)

Рис. 2-62 4711 - Регистрация фактического значения числа оборотов датчик 2



б)

Рисунок 4.10 – Обработка сигналу з датчика швидкості перетворювачі SINAMICS DCM

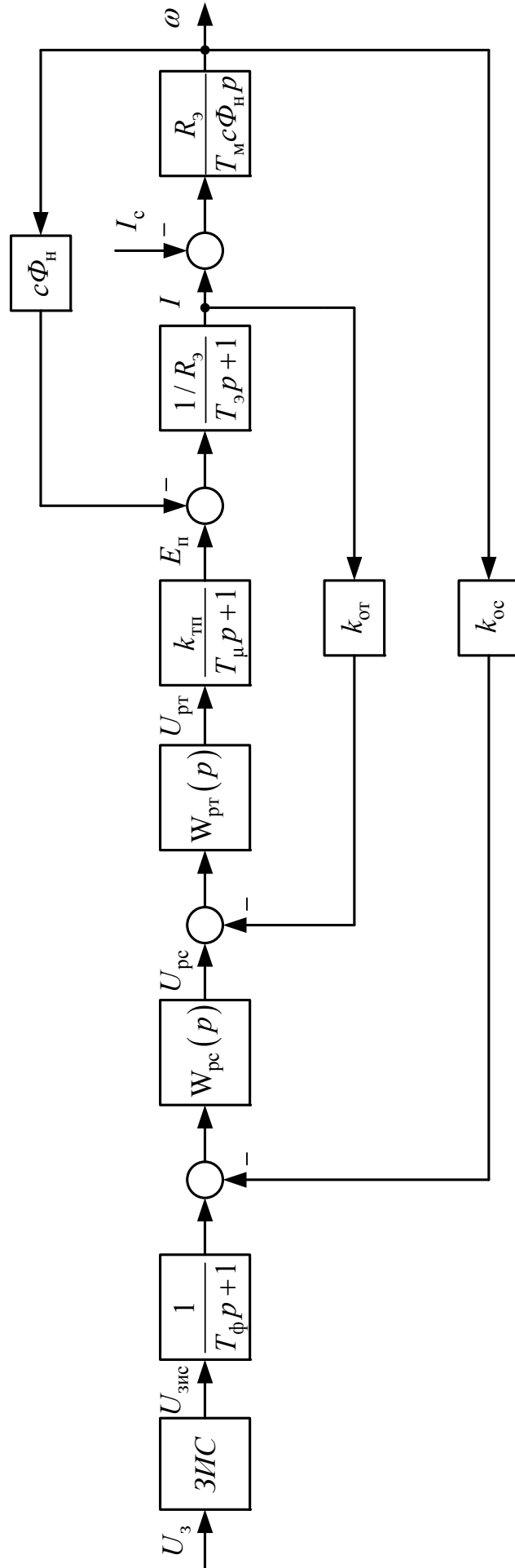


Рисунок 4.11 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

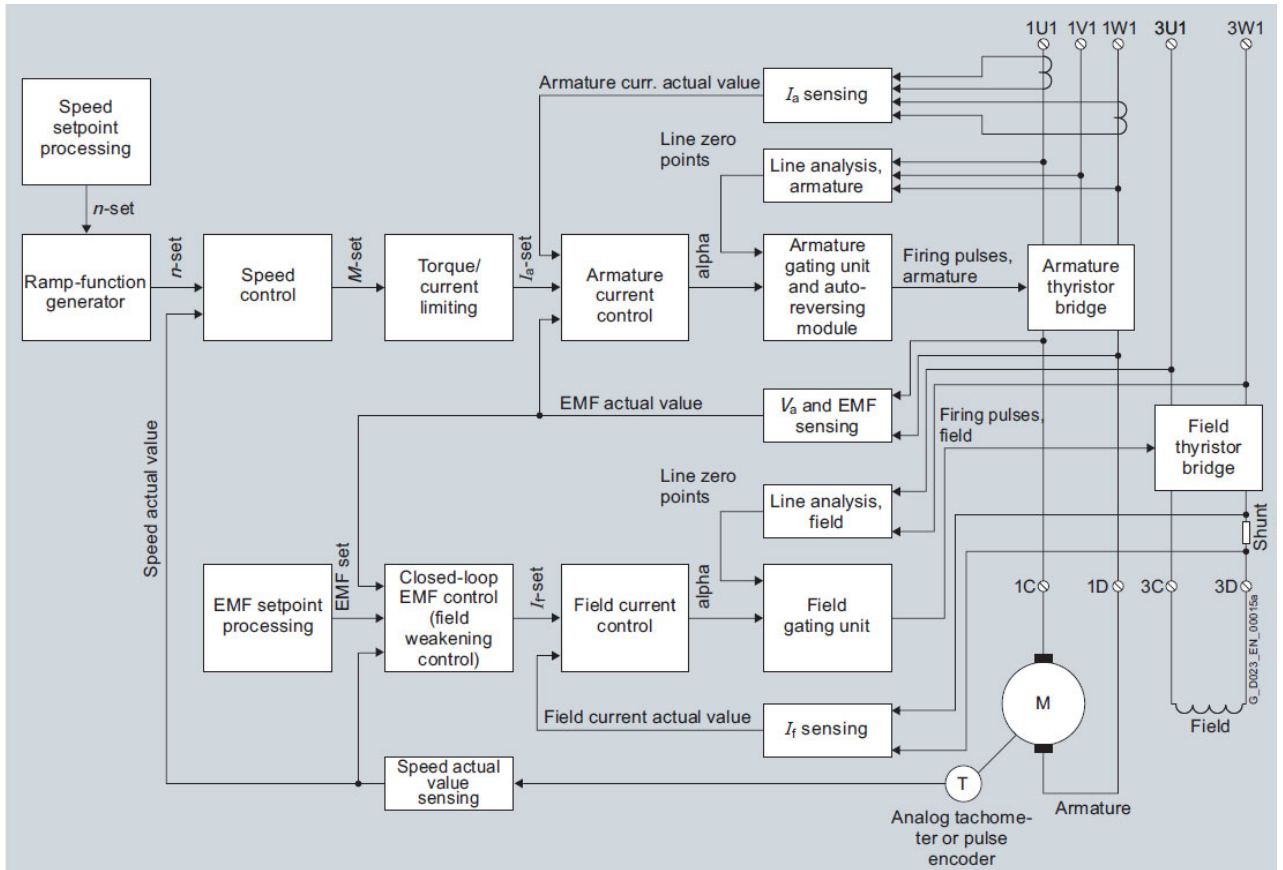


Рисунок 4.12 – Функціональна схеми системи підпорядкованого керування електроприводу SINAMICS DCM

5 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РОБОЧОГО РОЛЬГАНГУ В MATLAB/SIMULINK

Цифрове моделювання розрахованої системи здійснюється в середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування електроприводом станинних роликів, що має в своєму складі ПІ-регулятор струму, ПІ-регулятор швидкості і задатчик інтенсивності швидкості наведена на рис. 5.1. Внутрішні структури підсистем (Subsystem) типових вузлів схеми наведені на рис. 5.2 – 5.4.

При реалізації регуляторів струму і швидкості в цифровій моделі враховувалося їх насичення. Наприклад, при побудові моделі ПІ-регулятора недостатньо обмежити тільки його вихідну напругу за допомогою блоку Saturation, оскільки внутрішня інтегральна складова блоку при цьому може накопичувати в перехідному процесі значення, що перевершують передбачуваний поріг насичення. З цієї причини використання стандартного блоку PID-Controller, представленого в бібліотеці Simulink Extras/Additional Liner неприпустимо. Моделі регуляторів коректно враховують поріг насичення регулятора В (див. рис. 5.3).

Графіки перехідних процесів (швидкість обертання двигуна; струм якірного ланцюга системи; ЕРС силового перетворювача; вихідна напруга регулятора положення; вихідна напруга регулятора швидкості; вихідна напруга регулятора струму; вихідна напруга задатчика інтенсивності швидкості) отримані як за номінальними параметрами об'єкта керування, так і при їх варіації наведено на рис. 5.5 – 5.17.

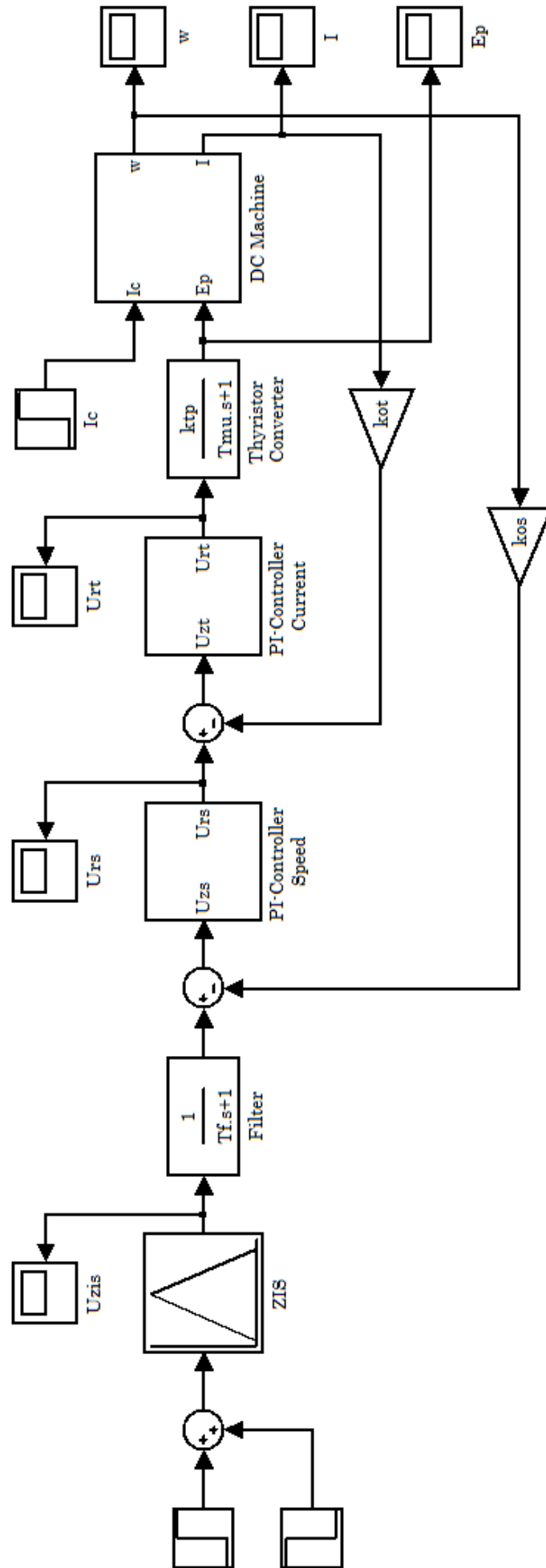


Рисунок 5.1 – Simulink-модель швидкісної системи підпорядкованого керування

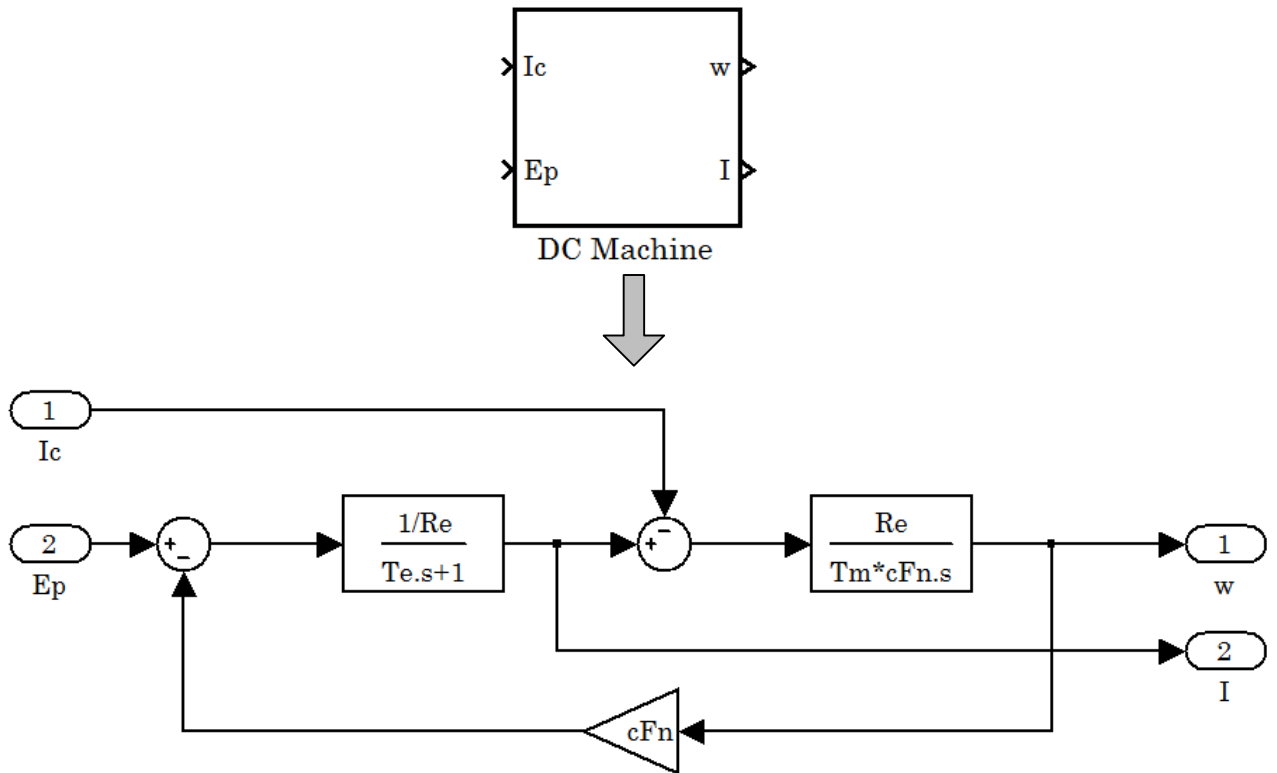


Рисунок 5.2 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

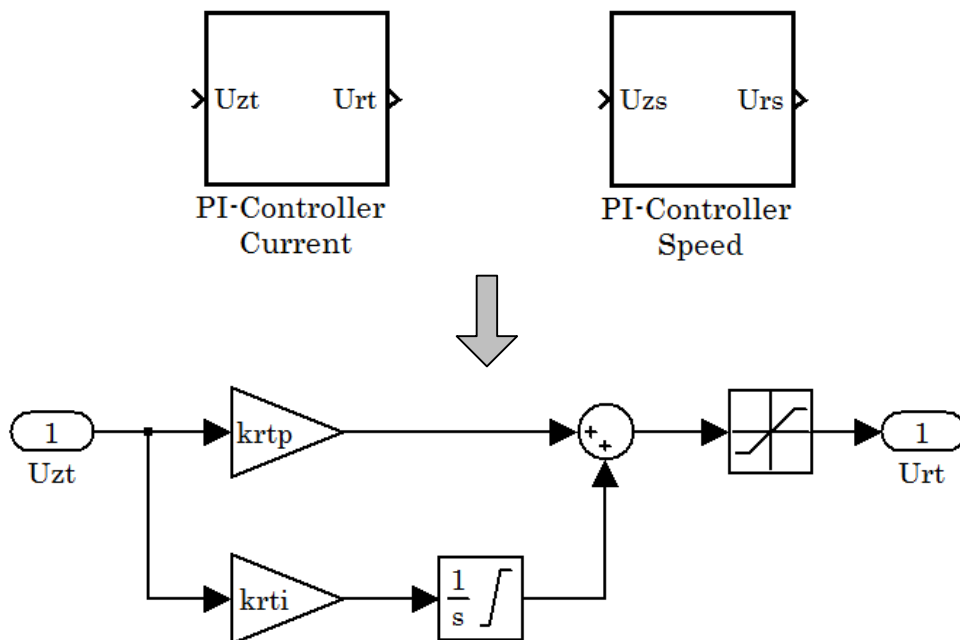


Рисунок 5.3 – Підсистема «ПІ-регулятор» струму (PI-Controller Current) і швидкості (PI-Controller Speed), що враховує поріг насичення регулятора

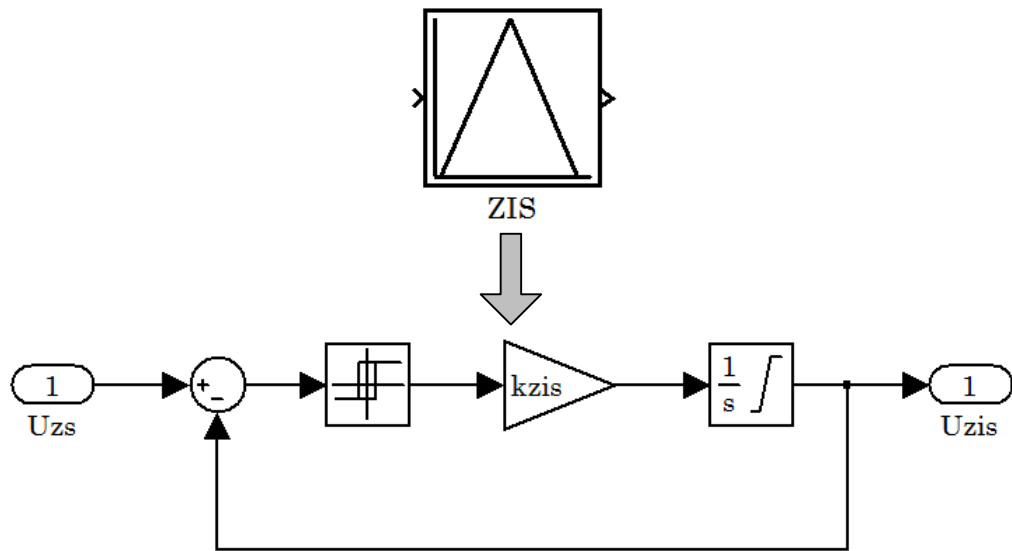


Рисунок 5.4 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), що реалізує раціональну динаміку

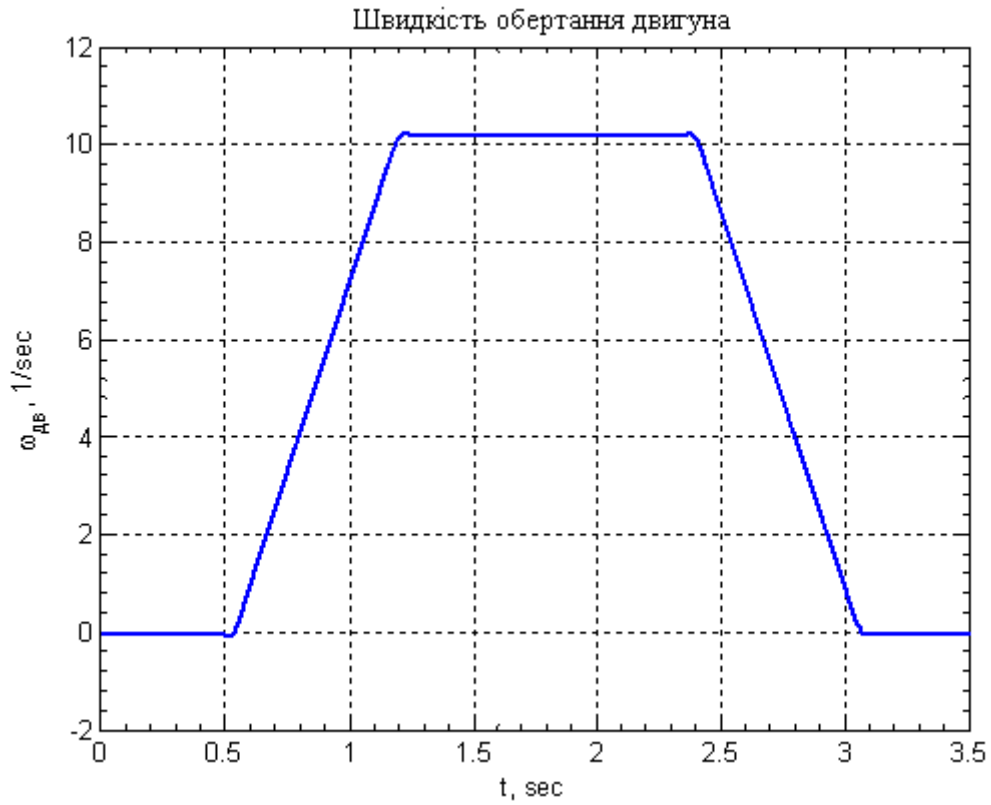


Рисунок 5.5 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ($I_c = 0,3I_H$)

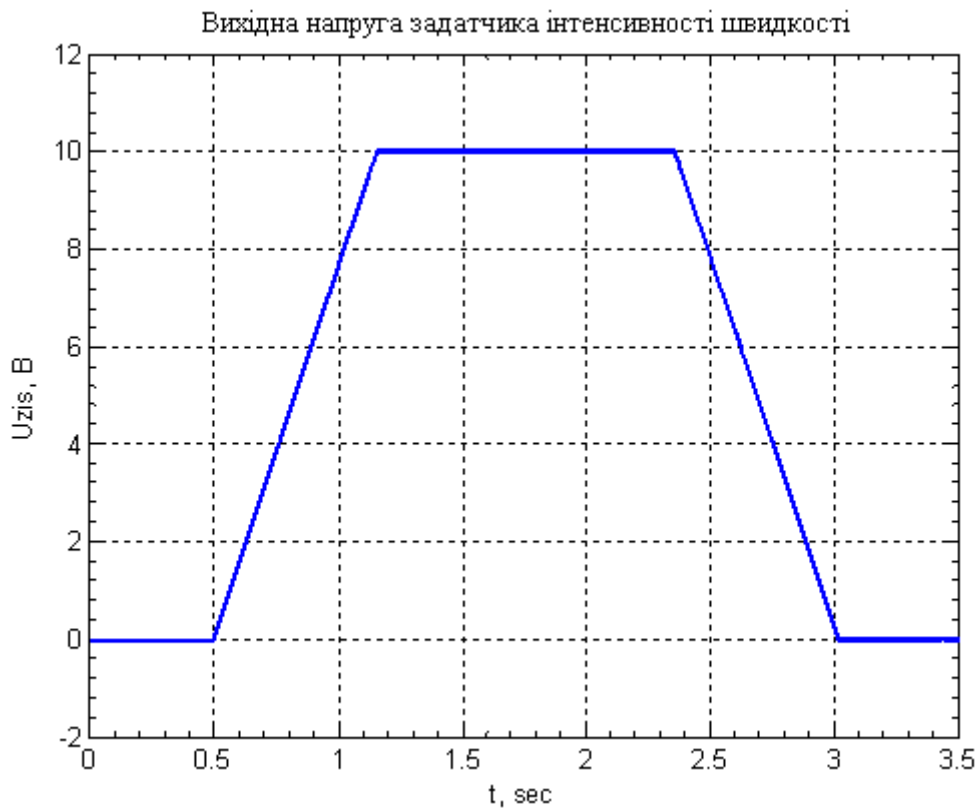


Рисунок 5.6 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості ($I_c = 0,3I_H$)

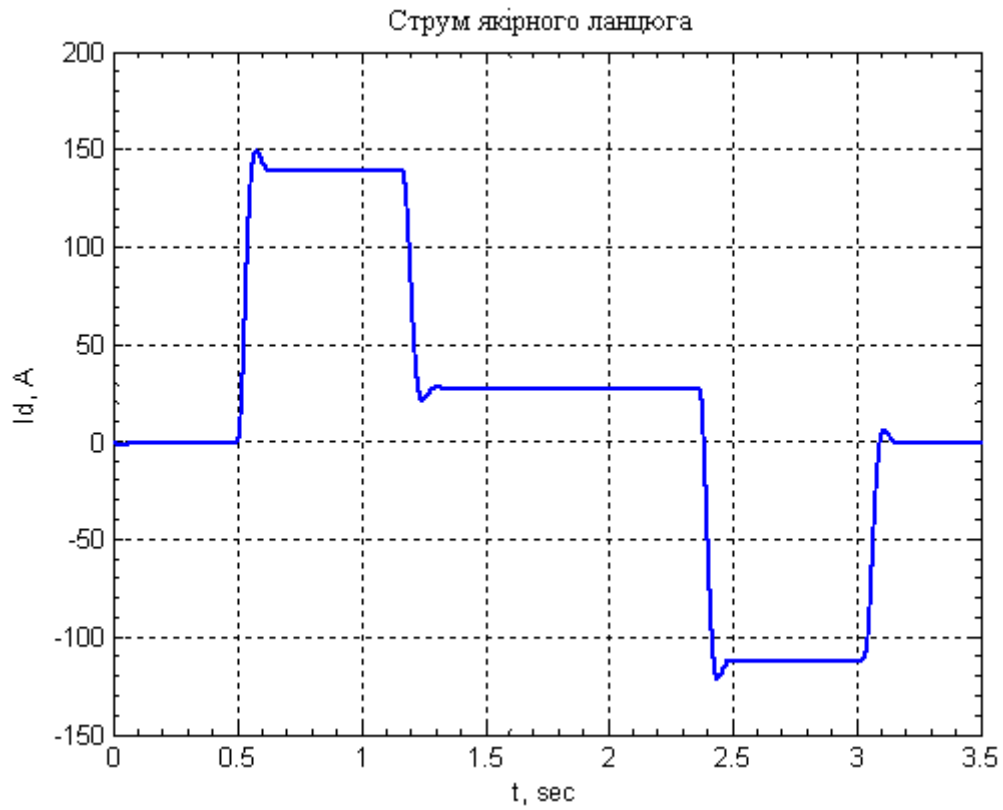


Рисунок 5.6 – Графік перехідного процесу струму якоря ($I_c = 0,3I_H$)

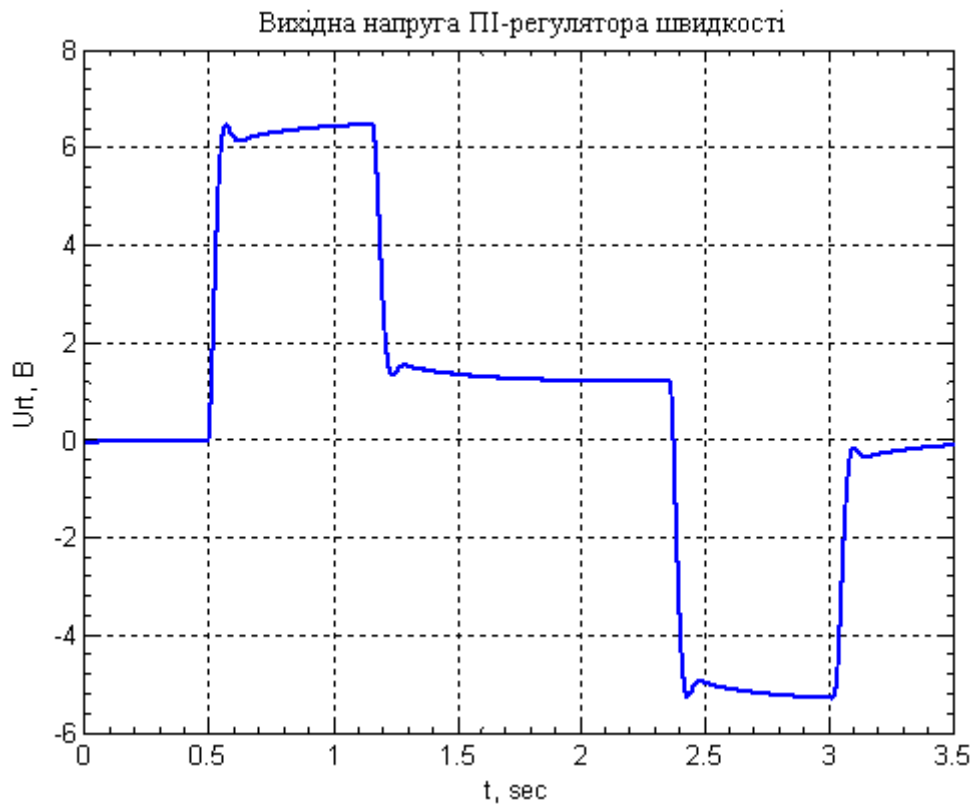


Рисунок 5.7 – Графік перехідного процесу напруги
ПІ-регулятора швидкості ($I_c = 0,3I_H$)

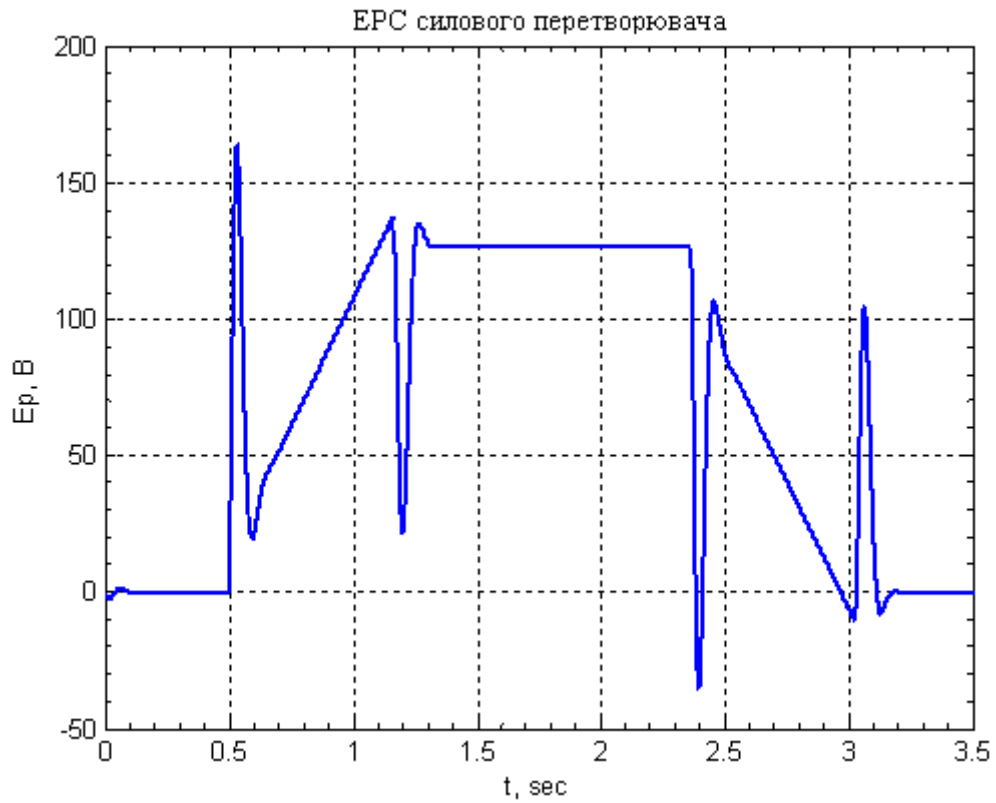


Рисунок 5.8 – Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного перетворювача ($I_c = 0,3I_H$)

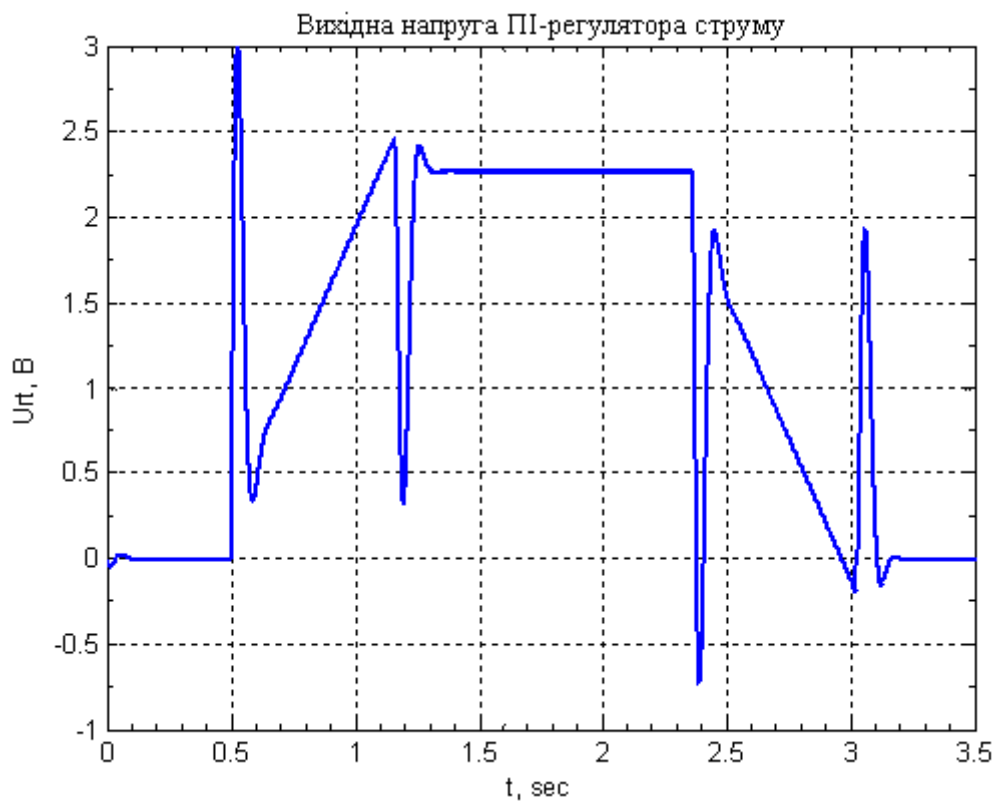


Рисунок 5.9 – Графік перехідного процесу напруги ПІ-регулятора струму ($I_c = 0,3I_H$)

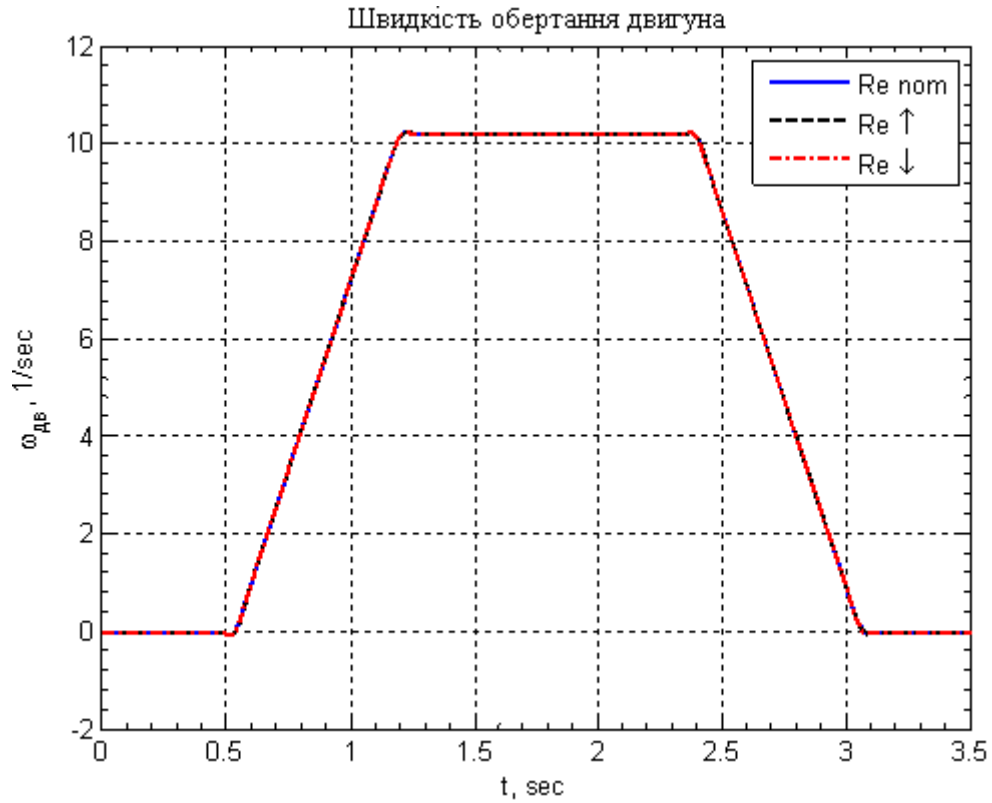


Рисунок 5.10 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні R_s у 2 рази

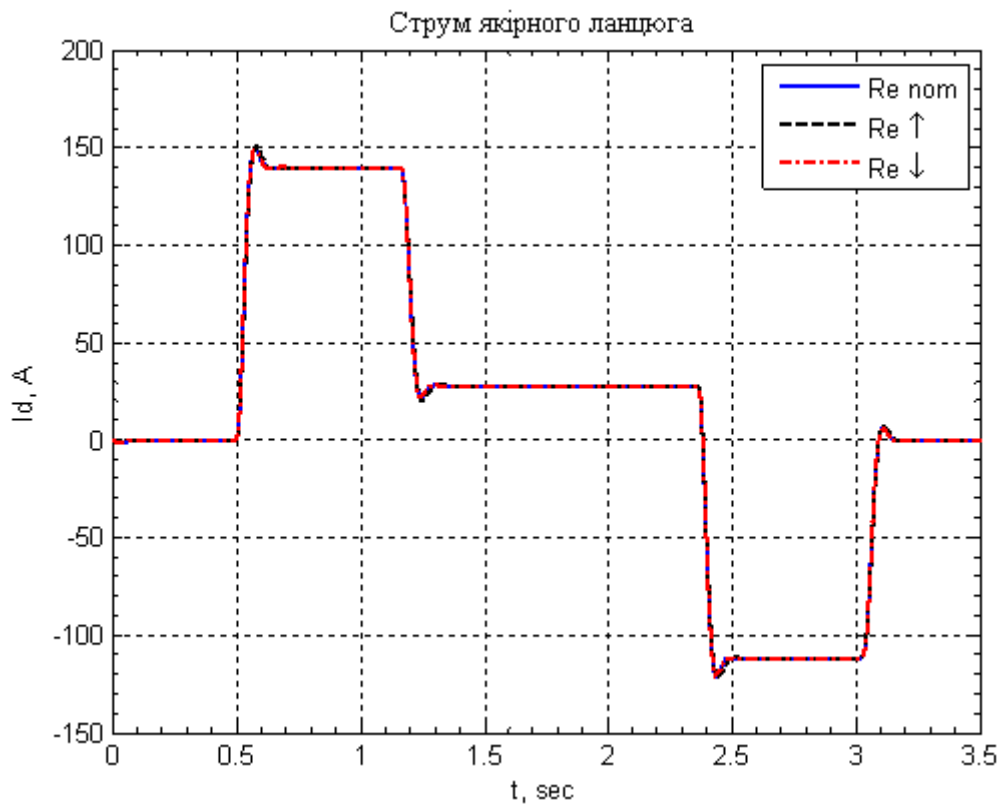


Рисунок 5.11 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні R_s у 2 рази

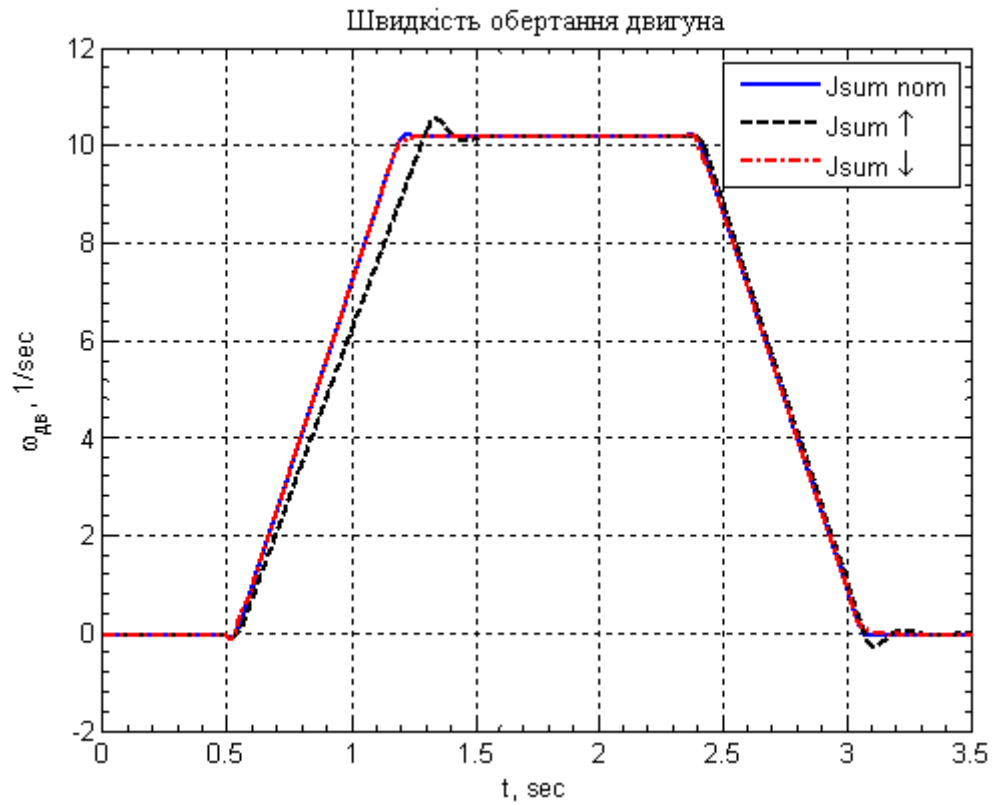


Рисунок 5.12 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні J'_{Σ} у 2 рази

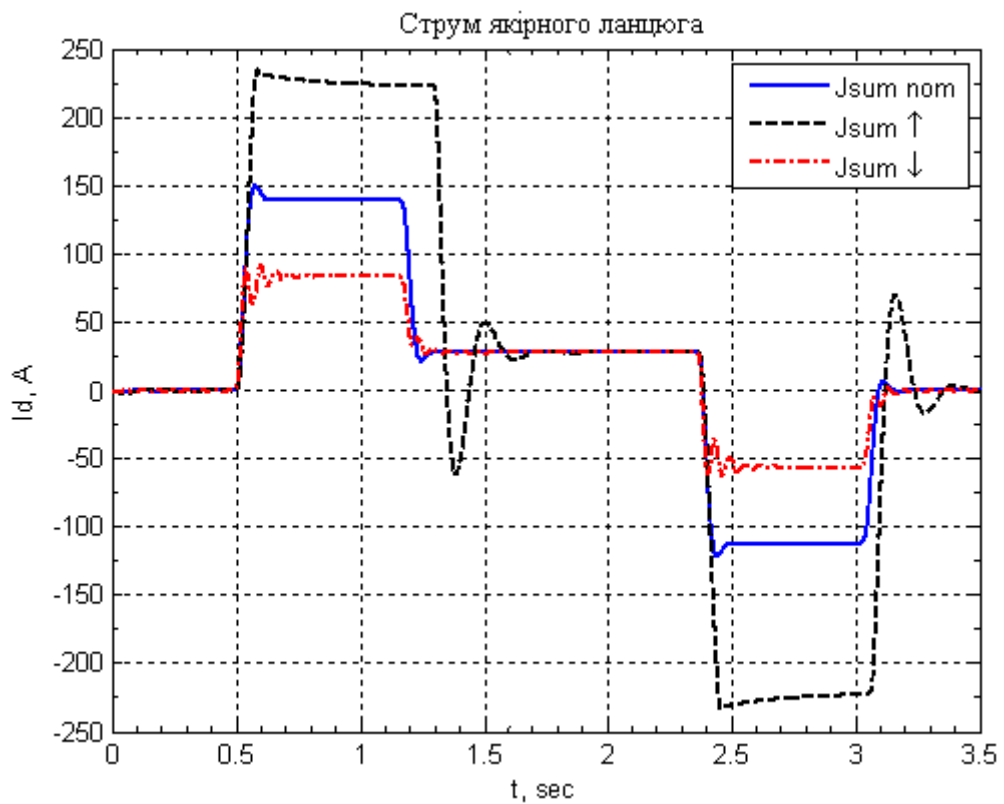


Рисунок 5.13 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні J'_{Σ} у 2 рази

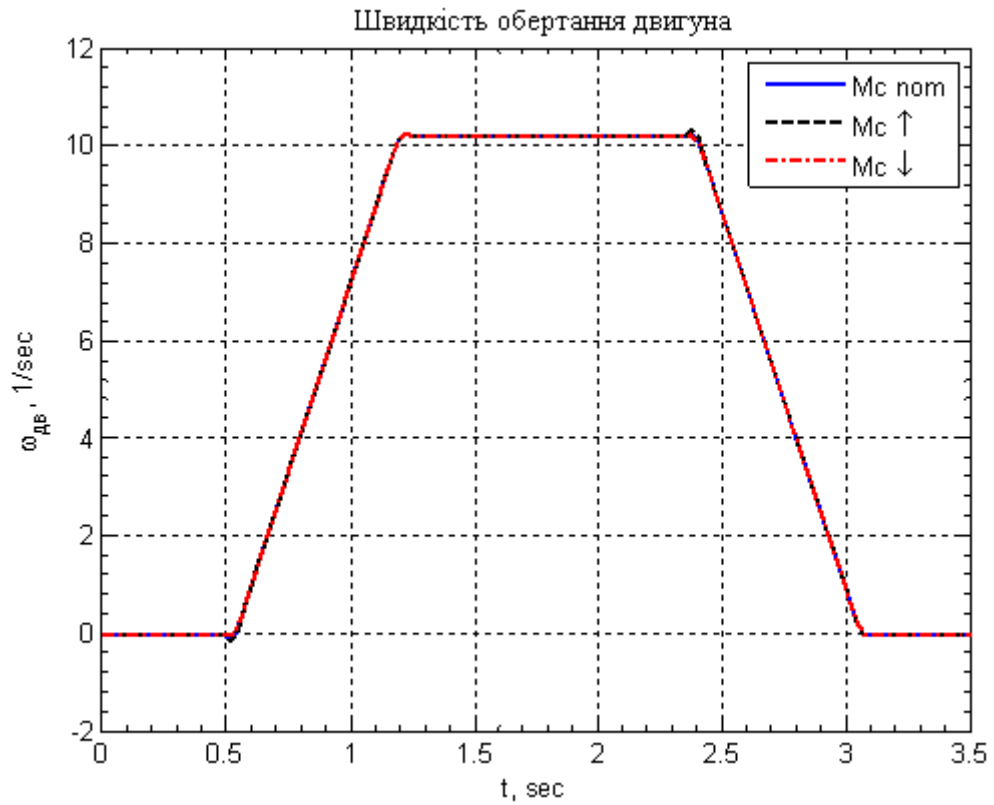


Рисунок 5.14 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні M_c у 2 рази

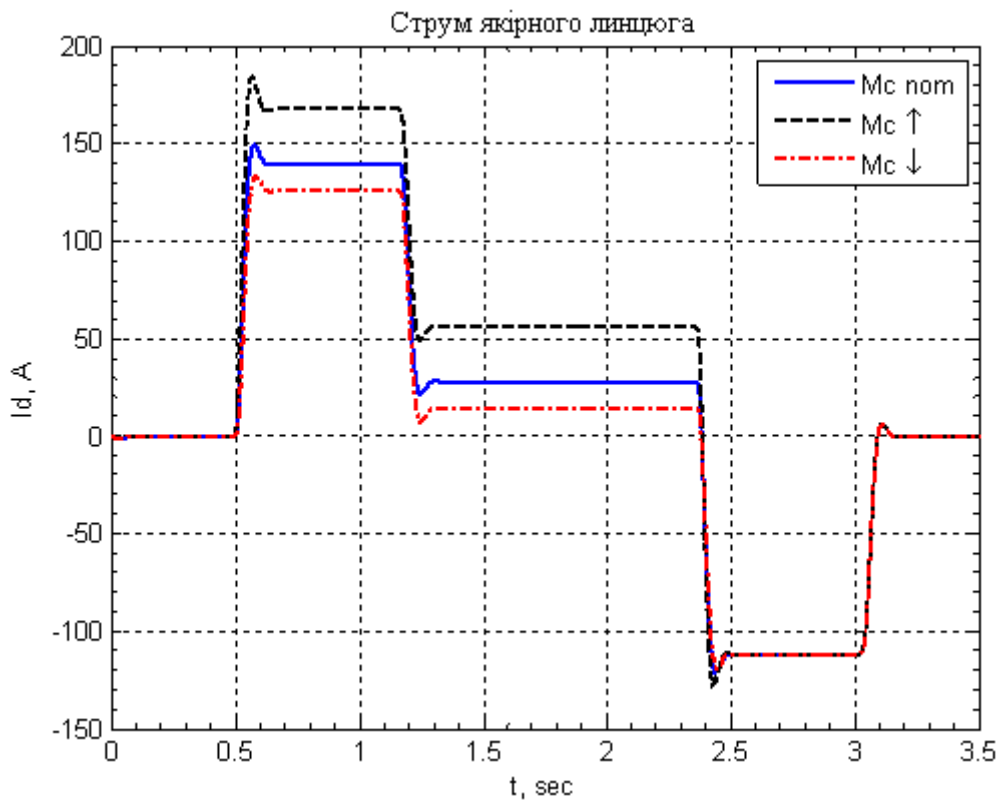


Рисунок 5.15 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні M_c у 2 рази

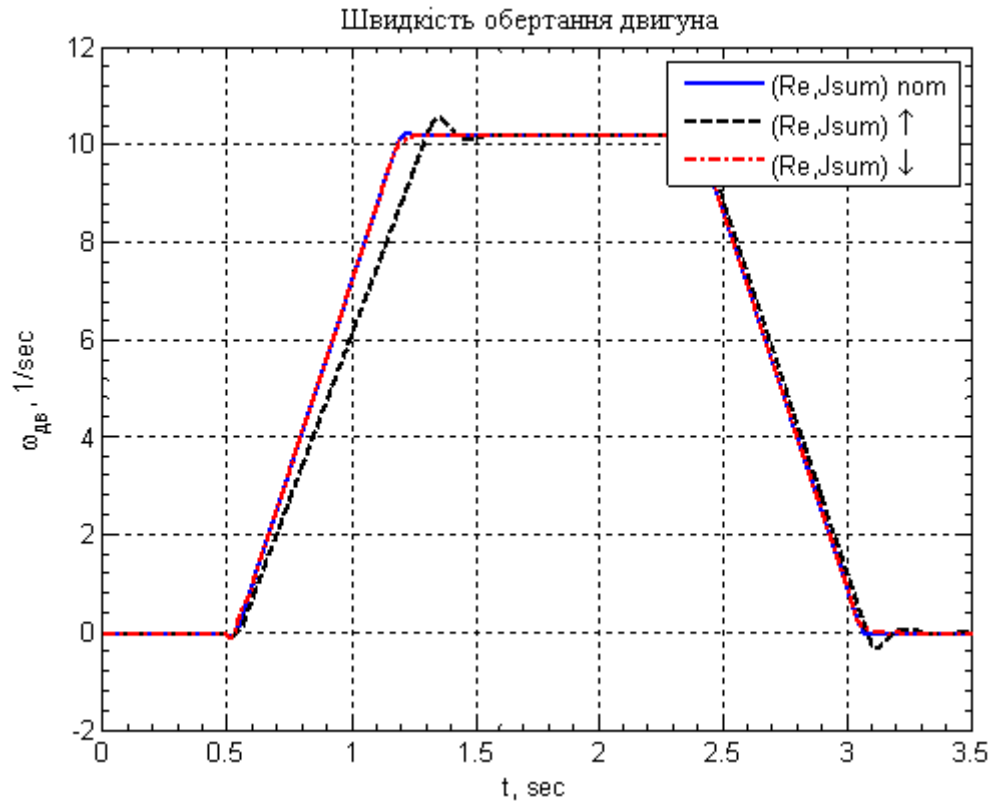


Рисунок 5.16 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при одночасній зміні R_s і J'_Σ у 2 рази

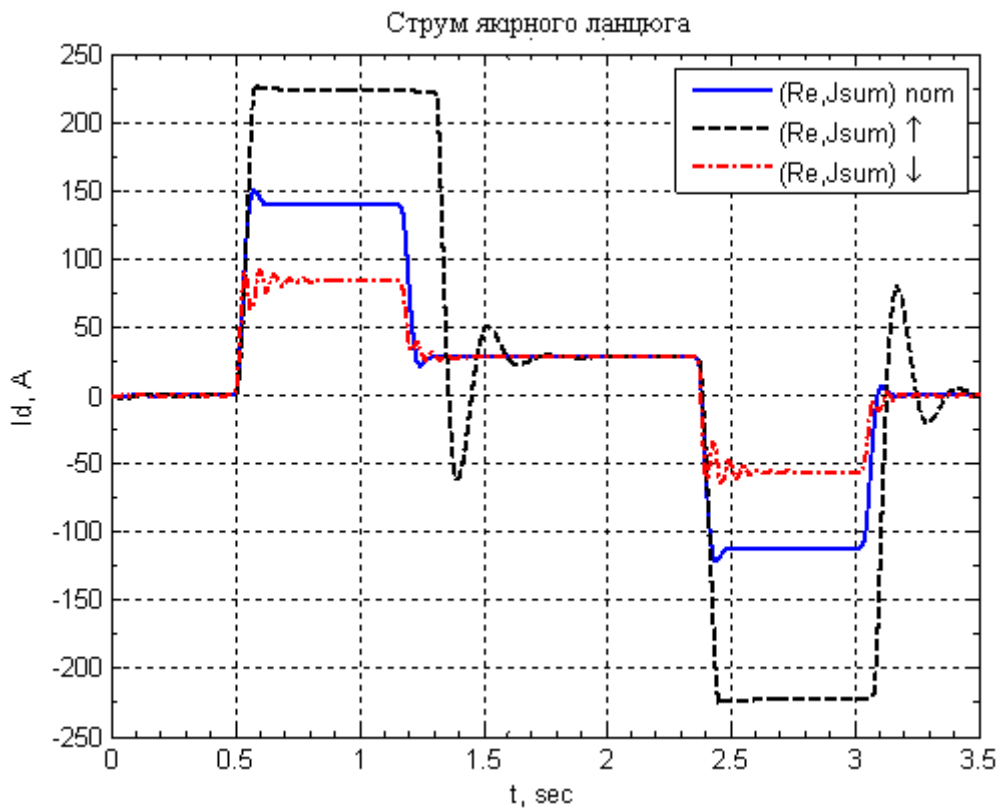


Рисунок 5.17 – Графік перехідного процесу струму якоря при одночасній зміні R_s і J'_Σ у 2 рази

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів

Виробництво на комбінаті характеризується впливом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть бути постійними, метушні-кається періодично або випадково. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори – це фактори, вплив яких на працюючих в умовах виробництва призводить до захворювання або травми.

До шкідливих факторів належать:

- мікроклімат;
- вібрація;
- виробничий шум;
- електромагнітне випромінювання;
- запиленість.

Постійно діючими небезпечними і шкідливими виробничими факторами на території комбінату, є рухомі і обертові частини механізмів і обладнання, вантажопотоки, теплові випромінювання, шум, вібрація і т.п. Тимчасовими періодично діючими небезпечними і шкода-ними виробничими факторами є: розпечений метал, запиленість, загазованість і т.д. Велика розмаїтість небезпечних і шкідливих виробничих факторів вимагає постійного їх обліку, аналізу, вибору засобів і методів для їх запобігання або зменшення їх впливу на робітників. Це здійснюється шляхом розробки нормативів, постійного обліку за виконанням цих нормативів, введенням засобів колективного та індивідуального захисту, виконанням вимог техніки безпеки.

Сучасні прокатні цехи є складними виробничими комплексами, оснащеними різноманітним механічним, електричним і підйомно-транспортним устаткуванням, обслуговування якого вимагає чіткого дотримання правил безпеки та норм виробничої санітарії.

Прокатне виробництво відрізняється від інших металургійних виробництв високою швидкістю технологічних операцій, інтенсивністю вантажопотоків і різноманітністю метеорологічних умов на різних ділянках.

Безперервність технологічного процесу вимагає одночасного виконання різних за характером операцій, таких як нагрівання, прокатка, транспортування і складування металу. Виконання цих операцій строго регламентовано за часом як графіком виконання виробничого плану, так і умовами безпеки. Так, недостатній нагрів заготовки перед прокаткою може привести до поломки валків і аварії на стані.

До аналогічних наслідків може призвести і передчасна подача заготовки до стану, її охолодження на приймальному рольгангу. До травмування обслуговуючого персоналу може привести збільшення швидкості прокатки на одній кліті, оскільки це призведе до обриву гуркоту або утворення петлі. Окремі ділянки прокатного цеху різко відрізняються один від одного по метеорологічним умовам. На ділянках нагріву, прокатки і транспортування гарячого металу теплові випромінювання набагато перевищують санітарні норми, має місце знижена вологість повітря, в той час як на інших ділянках температурні умови відповідають зовнішнім.

Для прокатних цехів характерна також велика протяжність і розкиданість механізмів, що обслуговуються, мають дистанційне керування і розташованих на висоті і в підвальних приміщеннях, що знижує видимість і чутність світлової та звукової сигналізації, ускладнює прийом попереджувальних сигналів. Згідно міждержавного стандарту ГОСТ 12 ГОСТ 12.0.003-74, небезпечні і шкідливі виробничі фактори за природою дії поділяються на:

- фізичні;
- хімічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Для даної установки шкідливі фактори фізичної природи можна розділити на кілька основних груп:

- рухомі машини і механізми; рухомі частини виробничого обладнання; пересуваються вироби, заготовки, матеріали;
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;

- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- відсутність або нестача природного світла.

6.2 Заходи з техніки безпеки праці та безпечної експлуатації установки

Говорячи про техніку безпеки праці персоналу обслуговуючого на-режимних пристрій і прокатну кліть в цілому, слід, в першу чергу, виділяти правила для персоналу який обслуговує електроустановки, правила для персоналу обслуговуючого механічну частину, ну і звичайно правила загальні для всіх трудящих в металургійній галузі.

Нормативними документами встановлюються наступні вимоги до електроустановок:

- Всі електроустановки металургійних виробництв повинні знаходитися в технічно справному стані, що забезпечує безпечні умови праці і функціонування технічних пристроїв.

- Експлуатація електрообладнання металургійних виробництва повинна проводитися відповідно до НПА та ТНПА, що встановлюють вимоги технічної експлуатації електроустановок споживачів і техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів.

- Для кожної електроустановки повинні бути складені експлуатаційні схеми режимів роботи. Всі зміни, що вносяться до схеми електричних з'єднань, а так само зміни місць установки заземлення повинні бути відзначені в схемі з обов'язковим зазначенням, ким, коли і з якої причини внесено ту чи іншу зміну.

Експлуатаційні електричні схеми та зміни, що вносяться до них, має затверджувати особа, відповідальна за електрогосподарство підприємства.

- В електричних схемах повинна бути передбачений захист електроустановок від перевантаження і короткого замикання, а так само захист персоналу від впливу електромагнітного поля.

- Під час виконання робіт, пов'язаних з небезпекою ураження електричним струмом або впливу електромагнітного поля, повинні застосовуватися за-

собі захисту.

- У електрифікованих інструментів, переносних електричних ламп, знижувальних трансформаторів та перетворювачів частоти електричного струму перед застосуванням повинні бути перевірені відсутність замикання на корпус, стан ізоляції проводів живлення і справність заземлювального проводу.

Переносний електрифікований інструмент повинен відповідати вимогам міждержавних стандартів безпеки праці, зберігатися в коморі (інструментальній) і видаватися робочим на період роботи. Електрифікований інструмент напругою вище 42 В повинен видаватися в комплекті із засобами індивідуального захисту.

Особи, що обслуговують і ремонтують електроустановок повинні знати і дотримуватися вимог діючих ПУЕ.

Технічне обслуговування двигунів постійного струму:

Під час експлуатації двигуна необхідно вести його технічне обслуговування, яке за видами і періодичності ділиться на 3 групи:

- Загальний нагляд;
- Технічний огляд;
- Профілактичний ремонт.
- Загальне спостереження полягає в періодичному контролі режиму роботи, стану контактів, нагріву, чистоти двигуна.

- Технічний огляд проводити не рідше одного разу на два місяці. Під час технічного огляду потрібно очистити двигун від пилу і бруду, перевірити надійність заземлення і з'єднання з приводним механізмом.

Профілактичний ремонт двигуна виробляти в залежності від виробничих умов, але не рідше одного разу на рік.

При профілактичному ремонті проводити розбирання двигуна, продувку, внутрішнє очищення, заміну мастила, підшипників, перевірку надійності заземлення і всіх з'єднань, перевірку стану ввідних решт.

Розбирання двигуна проводиться в такому порядку:

- а) від'єднуються від двигуна струмопровідні дроти;

- б) від'єднують двигун від приводного механізму;
- в) знімається напівмуфта з вала за допомогою знімного пристосування, відвернути болти, що кріплять кожух двигуна і зняти кожух;
- г) зняти зовнішнє кільце вала, що замикає вентилятор. Зняти вентилятор за допомогою віджимних болтів, вийняти шпонку;
- д) відвернути болти, що кріплять кришку підшипників до переднього і заднього підшипниковий щитам, і зняти кришки;
- є) відвернути болти, що кріплять передній щит, розташований з боку приводу, і задній щит, розташований на звороті приводу;
- ж) вивести задній щит із замку станини, подати ротор легкими поштовхами в сторону заднього щита і підтримуючи його вивести обережно з статора, щоб не пошкодити лобові частини обмотки;
- з) покласти вийнятий ротор з заднім щитом на дерев'яну підставку, щоб уникнути його пошкодження.

Підшипники знімають тільки в разі їх заміни, для цього:

- а) зняти пружинні кільця, що фіксують положення підшипника на валу;
- б) зняти мастильний диск і підшипник за допомогою знімача;
- в) очистити і ретельно промити бензином або гасом поверхні під підшипник;
- г) нагріти підшипник в чистому мінеральному маслі до температури 70-800 С;
- д) насадити нагрітий підшипник на вал до упору внутрішнього кільця вала.

Збирають двигун в послідовності зворотному розбиранні.

При насадці муфти на вал нагріти його до температури 80-1000С. Перевірити рукою обертання вільно ротор після складання двигуна. Ротор повинен обертатися без особливих зусиль, шуму, стуку, і заїдань і в кінцевому підсумку перевіряють опір ізоляції обмотки відносно корпусу.

Загальними вимогами безпеки для всіх прокатних станів є:

- головний пост керування прокатним станом повинен мати переговорний зв'язок і сигналізацію з машинним залом і з постами керування допоміжних агрегатів. Пуск в хід стану повинен проводитися після подачі відповідного сигналу;
- пуск стана в несправному стані, а також при відсутності або несправно-

сті захисних і запобіжних пристроїв забороняється;

- при необхідності переходу через головний сполучний вал кожної кліті прокатного стану (далі – стан) повинні встановлюватися перехідні містки з огороженням;

- на безперервних станах замість окремих містків через з'єднувальні вали кожної кліті до кається влаштування одного суцільного містка уздовж всіх клітей з драбинами для спуску до кожної з клітей;

- виробляти усунення несправностей вузлів і механізмів станів під час прокатки металу забороняється;

- непрацюючі калібри валків повинні закриватися щитами;

- перевірка калібрів, зазору між валками, а так само положення проводок повинна проводитися за допомогою відповідного оснащення;

- регулювання зазору між валками на нових станах повинна бути механізована;

- замір профілю прокочуваного металу на ходу стана повинен здійснюватися тільки дистанційно з використанням відповідних вимірювальних приладів;

- на станах «тріо» при наявності системи гідравлічного зрівноважування середнього валка проміжки між траверсою приводу і станиною кліті повинні бути закриті огорожувальними щитами.

- при ручному завданні металу у валки кліщі вальцювальників повинні відповідати сортаменту металу, що прокочується і бути в справному стані. Для охолодження кліщів близько станів повинні бути встановлені ємності з проточною водою, температура якої не повинна перевищувати 45 °С;

- конструкція підйомно-гойдаючих столів повинна виключати можливість падіння з них металу, що прокочується;

- для запобігання травмуванню працюючих бічні поверхні підйомно-гойдаючих столів повинні бути обшиті листовим металом. При верхньому положенні столу обшивка не повинна бути вище плитового настилу робочого місця;

- для ремонту і огляду механізмів підйомно-гойдаючими столами повинні бути влаштовані приямки з похилими сходами;

- у випадках, коли пристрій приямків з похилими сходами неможливий,

допускається влаштування збоку підйомно-гойдаючих столів колодязів з вертикальними сходами або скобами;

- під час огляду і ремонту механізмів, розташованих під підйомно-гойдаючими столами, стан повинен бути зупинений, а підйомно-гойдаючий стіл надійно закріплений;

- проміжки між роликами рольгангів, за винятком робочих рольгангів у блюмінгів і слябінгів, повинні бути перекриті;

Далі перераховані основні правила для блюмінгів і слябінгів:

- для захисту працюючих від відлітають при прокатці частинок окалини і шлаку з боків кліті блюмінга (слябінга) проти прорізи в станині і збоку робочих рольгангів має бути встановлено відповідне захисне огороження (захисні щити, сітчасту огорожу);

- показчик натискного пристрою кліті блюмінга (слябінга) повинен бути доступний для регулювання і добре освітлений. При рясному паротворенні для поліпшення видимості повинен бути передбачений віддув пару за допомогою вентилятора;

- таврування блюмів і слябів після різання повинно проводитися автоматично клеймувальною машиною;

- керування машиною має бути дистанційне;

- роботи з навантаження і прибирання обрізу повинні виконуватися відповідно до вимог технологічної інструкції;

- при навантаженні обрізу в залізничні вагони місця навантаження повинні бути огорожені;

- під час пересування вагонів для установки під скидний жолоб повинні подаватися звукові сигнали. На ділянці навантаження повинні бути встановлені відповідні знаки безпеки;

- при збиранні обрізу в коробки переповнювати їх забороняється;

- для спостереження за навантаженням обрізу у вагони пости керування повинні бути обладнані телевізійними установками, а конвеєр обрізу – дистанційним керуванням.

6.3 Розробка інструкцій з охорони праці

До самостійної роботи електриком допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли відповідну підготовку, в тому числі на групу з електробезпеки не нижче III-ї, а також не мають протипоказань за станом здоров'я.

Особи, допущені до роботи електриком, повинні проходити обов'язковий медичний огляд і інструктаж з охорони праці.

Особи, допущені до роботи електриком, зобов'язані дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку, встановлені режими праці і відпочинку.

Особам, які обслуговують електроустановки, повинні видаватися засоби індивідуального захисту: діелектричні рукавички, покажчик напруги, інструмент з ізольованими ручками, діелектричний килимок.

Персонал зобов'язаний дотримуватися правил пожежної та електробезпеки, знати місця розташування первинних засобів пожежогасіння та пристроїв, що відключають (рубильників). Електрощитова кімната повинна бути оснащена вуглекислотним вогнегасником.

При обслуговуванні електроустановок можливий вплив на робітників наступних небезпечних виробничих факторів:

- ураження електричним струмом при дотику до струмоведучих частин без засобів індивідуального захисту, а також при несправності ізоляції або заземлення;
- травми при падінні з висоти під час роботи з використанням драбин або сходів.

Про кожний нещасний випадок з працівником потерпілий або очевидець нещасного випадку зобов'язаний негайно повідомити адміністрацію установи.

У процесі роботи електрик зобов'язаний дотримуватися правил використання засобів індивідуального захисту, особистої гігієни, тримати в чистоті робоче місце.

Особи, які допустили невиконання або порушення інструкції з охорони праці, притягуються до дисциплінарної відповідальності відповідно до правил внутрішнього трудового розпорядку і, при необхідності, піддаються позачергову перевірку знань норм і правил охорони праці.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- підготувати до роботи засоби індивідуального захисту, перевірити їх справність і відсутність зовнішніх пошкоджень;
- переконатися в наявності і цілісності заземлюючих провідників корпусів обслуговуються електроустановок;
- зняти напругу з ділянки електричного кола, електроустановки, які користувач може обслуговувати або ремонту і повісити на відключає пристрій попереджувальний плакат «Не включати – працюють люди».

Вимоги безпеки під час роботи:

- обслуговування і ремонт електроустановок виробляти за наказом (розпорядженням) керівника установи відповідно до переліку видів робіт, які виконуються в порядку поточної експлуатації електроустановок;
- залучати учнів до обслуговування і ремонту електроустановок заборонено;
- не торкатися проводів і інших струмоведучих частин, що знаходяться під напругою без засобів індивідуального захисту;
- наявність напруги в мережі перевіряти тільки покажчиком напруги;
- перегорілі плавкі вставки замінити тільки на калібровані на номінальну для даної мережі навантаження при знятій напрузі;
- очищення світильників від пилу повинна проводитися: в кабінетах (класах) – не рідше двох разів на рік, в навчальних майстернях і спортивних залах – не рідше двох разів на місяць;
- роботи з обслуговування та ремонту електроустановок з використанням драбин проводити двома особами. Драбини і сходи повинні бути випробувані і їх нижні кінці обладнані гумовими або сталевими наконечниками, при цьому забороняється: працювати з двох верхніх сходинок, ставити їх на хитке, нестійке підставу, прив'язуватися запобіжним поясом до сходів.

Вимоги безпеки після закінчення роботи:

- переконатися в безпеці подачі напруги і включити відмикаючий пристрій;
- привести в порядок робоче місце, закрити на замки електричні щити;

- прибрати на місце інструмент, засоби індивідуального захисту та ретельно вимити руки з милом.

Вимоги безпеки при аварійних ситуаціях:

- у разі порушення або несправності заземлення корпусу електрообладнання припинити роботу і усунути несправність;

- у разі замикання і загоряння електропроводки негайно відімкнути живлення електроустановки, а полум'я гасити піском, вуглекислотним або порошковим вогнегасником;

- при ураженні електричним струмом негайно відключити напругу і при відсутності дихання і пульсу у потерпілого зробити йому штучне дихання чи непрямий масаж серця до відновлення дихання і пульсу, при необхідності відправити потерпілого в найближчий лікувальний заклад і повідомити про це адміністрацію установи.

6.4 Протипожежна безпека

Протипожежні заходи повинні відповідати положенням Закону України «Про пожежну безпеку в Україні», затвердженим 14.06.95. Ці положення обов'язкові для виконання всіма органами влади, підприємствами, установами, посадовими особами та громадянами.

У виробничих приміщеннях, на підстанціях і в електромашин приміщення повинні бути первинні засоби вогнегасіння, які застосовує обслуговуючий персонал для ліквідації пожежі до прибуття викличної пожежної частини. Для гасіння пожеж можна використовувати воду, водяну пару, повітряно-механічну піну і спеціальні хімічні засоби (вуглекислота). Для гасіння пожеж застосовуються: вогнегасник типу УП-1М, вуглекислотні-брометилові вогнегасники, а також найпростіші засоби такі як пісок, азбестова тканина і т.д. Протипожежні вогнегасники вивішуються на видних місцях.

Організаційні заходи зводяться до наступного:

- забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої діяльності посадових осіб, працівників, знаходить відображення в трудових договорах;
- керівником підприємства визначаються обов'язки посадових осіб, зок-

рема забезпечення пожежної безпеки, призначаються відповідальні за пожежну безпеку окремих ділянок технологічного та інженерного обладнання;

- на підприємстві повинні бути розроблені загальна інструкція та заходи пожежної безпеки для всіх пожежонебезпечних установок, ділянок і т.д. Електроустановки (можливість їх застосування, монтаж, налагодження, експлуатація) повинні відповідати вимогам правил улаштування електроустановок, правил технічної експлуатації та інші.

Електричні машини з нормально іскристими частинами повинні розміщуватися на відстані не менше одного метра від горючих матеріалів, відділятися екранами.

Електродвигуни, світильники, проводи, розподільні пристрої необхідно не рідше одного разу на місяць очищати від пилу.

При електрозварювальних роботах устаткування зварювальних установок повинно відповідати умовам навколишнього середовища; потрібно використовувати спеціальні трансформатори, для підводки струму до держателя установки ручного дугового зварювання використовувати зварювальний дріт в гумовій оболонці.

У разі пожежі на робочому місці необхідно сповістити пожежну охорону і аварійні служби за допомогою засобів зв'язку або в усній формі. У разі необхідності відключити обладнання, електроустановки. При можливості гасити пожежу існуючими засобами пожежогасіння, евакуювати людей. Після прибуття пожежних розрахунків надавати допомогу в створенні рукавних ліній, участь в евакуації матеріальних цінностей та виконувати роботи відповідно до розпоряджень керівника пожежогасіння.

ВИСНОВОК

У ході проектування була розглянута технологія роботи, призначення і особливості роботи електроприводу робочих рольгангів перед чорною кліткою товстолистового стану 3000. Була розрахована потужність двигуна, динамічні і статичні моменти навантаження. В результаті розрахунку було обрано/перевірено двигун типу Д810У2. В ході розрахунку були знайдені необхідні значення динамічного моменту розгону і гальмування електроприводу, що забезпечують необхідну динаміку механізму.

Для живлення якоря і обмотки збудження двигуна обраний цифровий комплектний електропривод концерну Siemens типу SINAMICS DC MASTER шафового виконання, призначений для керування електродвигунами постійного струму. Для узгодження перетворювача з мережею живлення обраний силовий трансформатор ТСЗП-400/ 10У3.

У проєкті розраховані параметри системи підпорядкованого керування. На основі структурної схеми електропривода була розроблена математична модель. Проведено моделювання роботи ЕП в середовищі Matlab/Simulink, з номінальними параметрами, а також при варіації опору якорного ланцюга, еквівалентній індуктивності і сумарного моменту інерції, тим самим отримана оцінка якості перехідних процесів при зміні її динамічних процесів. Отримані перехідні процеси свідчать про правильність налаштування системи. Досліджуваний електропривод з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним вимогам.

Спроектвана система забезпечує резервування, тобто в аварійних режимах, або при проведенні ремонтів може працювати від резервної перетворювальної техніки. Розроблені узагальнена функціональна та структурна схеми системи підпорядкованого керування електроприводу. Впроваджувана система побудована на найсучаснішому обладнанні з урахуванням нових досягнень техніки й промисловості.

У розділі «Охорона праці» розглянуто аналіз шкідливих і небезпечних факторів, заходи з техніки безпеки праці та безпечної експлуатації установки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зеленов А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов / А.Б. Зеленов. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.
2. Переходченко В.А. Расчет мощности электродвигателей широкополосных станов горячей прокатки / В.А. Переходченко. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 384 с.
3. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие / В.С. Коцюбинский. – Алчесвк: ДГМИ, 2002. – 150 с.
4. Гарнов В.К. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии / В.К. Гарнов, В.Б. Рабинович, Л.М. Вишневецкий ; Под ред. Д.С. Ямпольского. – 2-е изд., доп. и перераб. – М: Металлургия, 1977. – 191 с.
5. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: Учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
6. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф. Проектирование систем автоматического управления электроприводами / В.Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко. – Минск: Высшая шк., 1986. – 143 с.
7. Решмин Б.И. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования / Б.И. Решмин, Д.С. Ямпольский. М.: Энергия, 1975. – 184 с.
8. Руководство по эксплуатации SINAMICS DCM DC Converter. - Издание 1/2012
9. Справочник по параметрированию SINAMICS DCM. - Издание 10/2011.
10. Технологическая инструкция по прокатке металла в толстолистовом стане 3000.
11. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзоров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутра. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

12. А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
13. Пілецький В.Т. Вибір елементів реверсивних тиристорних перетворювачів електроприводів постійного струму. – К.: ІСДО, 1994. – 148 с.
14. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: Изд-во: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
15. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowersystem и Simulink. – М: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
16. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.
17. Шевченко І.С. Динаміка складних електромеханічних систем: Навч. посібн. – І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Алчевськ: ДонДТУ, 2008. – 171 с.
18. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей / Главное управление государственного энергетического надзора. – 4 –е изд., пераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
19. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. - 2-е узд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. 1984. – 448 с.
20. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1982. – 800 с.

Додаток А

Технічні данні перетворювача SINAMICS DC Master

SINAMICS DCM

DC Converter and Control Module

DC Converter

Technical specifications (continued)

SINAMICS DC MASTER converters for 400 V 3 AC, 15 to 125 A, four-quadrant operation

	Type	6RA8013-6DV62-0AA0				
		6RA8018-6DV62-0AA0	6RA8025-6DV62-0AA0	6RA8028-6DV62-0AA0	6RA8031-6DV62-0AA0	
Rated armature supply voltage ¹⁾	V	400 V 3 AC (+15/-20 %)				
Rated armature input current	A	12	25	50	75	104
Rated supply voltage, electronics power supply	V	380 (-25 % ... 480 V (+10 %) 2 AC; $I_n = 1$ A or 190 (-25 % ... 240 V (+10 %) 2 AC; $I_n = 2$ A				
Rated fan supply voltage	V	Self-ventilated				
Rated fan current	A					
Air flow	m ³ /h					
Sound pressure level ²⁾	dB (A)					
Rated field supply voltage ¹⁾	V	400 V 2 AC (+15/-20 %)				
Rated frequency	Hz	45 ... 65				
Rated DC voltage ¹⁾	V	420				
Rated DC current	A	15	30	60	90	125
Overload capability	$x \times I_n$	1.8				
Rated power	kW	6.3	12.6	25	38	53
Power loss at rated DC current	kW	0.13	0.18	0.25	0.32	0.41
Rated DC field voltage ¹⁾	V	max. 325				
Rated DC field current	A	3	5	10		
Normal ambient temperature in operation ³⁾	°C	0 ... +45				
Storage and transport temperature	°C	-40 ... +70				
Installation altitude above sea level ³⁾		≤ 1 000 m for rated DC current				
Dimensions						
• Width	mm	268				
• Height	mm	385				
• Depth	mm	221			252	
Weight, approx.	kg	11			14	

7 ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯНЬ РУХУ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

На механічну частину електропривода діють:

- 1) електромагнітний момент двигуна, M ;
- 2) статичний момент, створений робочими органами механізмів, M_c .

Статичний момент складається із суми моментів корисного навантаження ΣM_{KH} , необхідних для виконання роботи, та суми моментів втрат $\Sigma \Delta M$, в тому числі механічних втрат у двигуні

$$M_c = \Sigma M_{KH} + \Sigma \Delta M. \quad (7.1)$$

Моменти корисного навантаження в різних механізмах мають різний характер, але з них можна виділити типові. Крім того, основною координатою електропривода є швидкість, тому важливою є залежність статичного моменту від швидкості

$$M_c = f(\omega) \quad \text{або} \quad \omega = f(M_c). \quad (7.2)$$

Ця залежність (7.2) називається *механічною характеристикою* механізму (двигун має також механічну характеристику). За своєю природою та за характером взаємодій з електроприводом усі статичні моменти розділяються на *активні* та *реактивні*.

1) *Активний* момент створюється зовнішніми, по відношенню до двигуна, джерелами енергії (сила вітру, сила тяжіння, потенціальна сила тощо) незалежно від напрямку руху електропривода. Сила тяжіння F вантажу механізму підйому завжди направлена до центру Землі, рис.7.1,а.

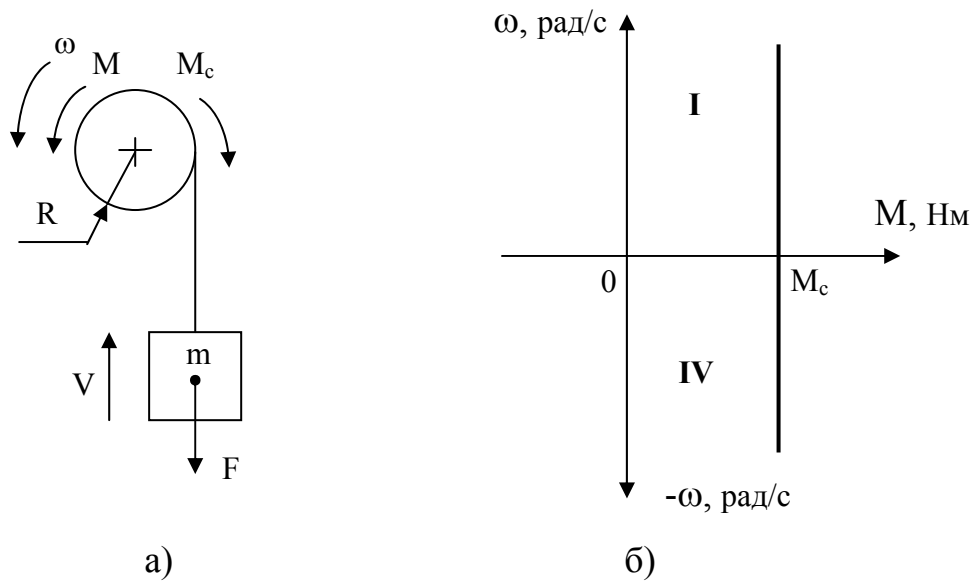


Рис.7.1

Статичний момент, який створює сила тяжіння, дорівнює

$$M_c = F \cdot R = mgR \quad (7.3)$$

де R – радіус барабана лебідки;

і пропорційно залежить від маси вантажу m , тому змінюється від нуля і до максимального значення M_{cmax} при зміні маси від нуля і до m_{max} . Цей статичний момент (7.3) не залежить від величини й напрямку швидкості, тому його механічна характеристика представляє собою пряму, розташовану в I-ому та IV-ому квадранті (четверті) площини, рис.7.11, б. Якщо підйомний механізм врівноважено, наприклад, ліфт із противагою, то момент може змінюватись в більш широкі межі, рис.7.12. В цьому випадку активний статичний момент дорівнює

$$M_c = m_1 g R - m_2 g R = (m_1 - m_2) g R, \quad (7.4)$$

де m_2 – незмінна маса противаги.

Якщо $m_1=0$, то $M_{cmin} = -m_2gR$. При $m_1=m_2$ момент $M_c=0$, а при $m_1=m_{1max}$ момент дорівнює максимальному додатному значенню $M_{cmax}>0$. Діапазон зміни статичного моменту вказано на рис.7.2.

2) *Реактивний* момент діє завжди проти напрямку руху, тому він змінює знак при зміні напрямку швидкості.

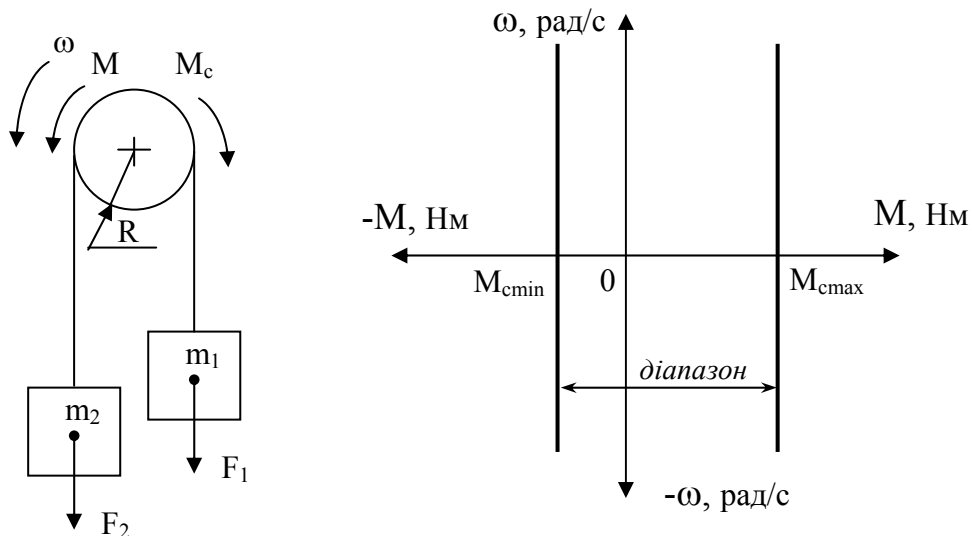


Рис.7.2.

Реактивний момент виникає як реакція на рушійний момент, створений двигуном або іншими активними силами, в тому числі силами інерції. За видом залежності від швидкості реактивний момент умовно розділяється на момент:

- сухого (кулонівського) тертя;
- в'язкого тертя;
- вентиляторного типу.

Момент *сухого (кулонівського) тертя* M_{co} змінює стрибком своє значення на протилежне при зміні напрямку руху, рис.7.3.

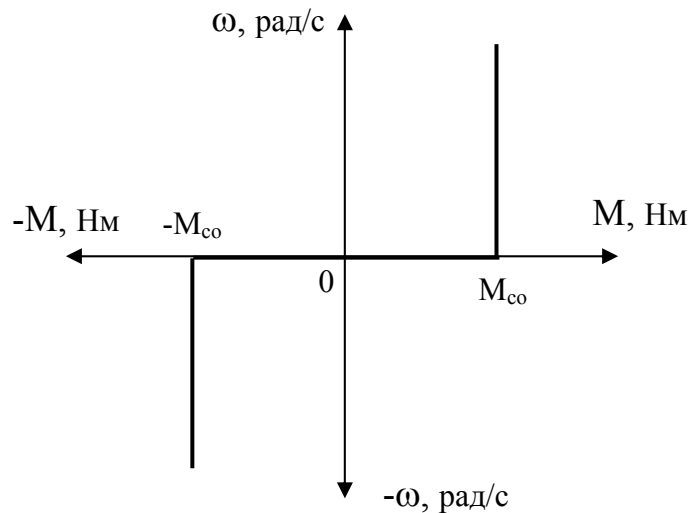


Рис.7.3.

При цьому величина моменту не залежить від швидкості. На електропривод найчастіше діє саме момент сухого тертя, який описується наступною залежністю

$$M_c = \begin{cases} M_{co} \text{sign} \omega, & \text{якщо } \omega \neq 0; \\ M, & \text{якщо } \omega = 0 \text{ та } |M| \leq M_{co}; \\ M_{co} \text{sign} M, & \text{якщо } \omega = 0 \text{ та } |M| > M_{co}. \end{cases} \quad (7.5)$$

В механізмах реальних момент сухого тертя має більш складний характер, так як момент зрушення може бути в декілька разів більшим за момент руху. Технологічні процеси обробки деталей на верстатах мають схожий вигляд, наприклад, момент різання на токарному верстаті, рис.7.14

$$M_c = F_z \cdot R_p. \quad (7.6)$$

де F_z – зусилля різання;
 R_p – радіус різання.

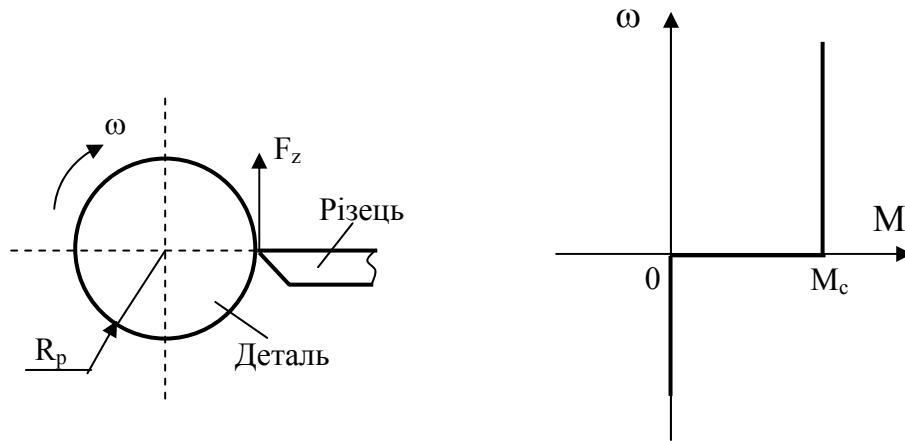


Рис.7.4.

Момент *в'язкого тертя* лінійно залежить від швидкості, рис. 7.5

$$M_c = \beta \cdot \omega, \quad (7.7)$$

де β - коефіцієнт пропорційності.

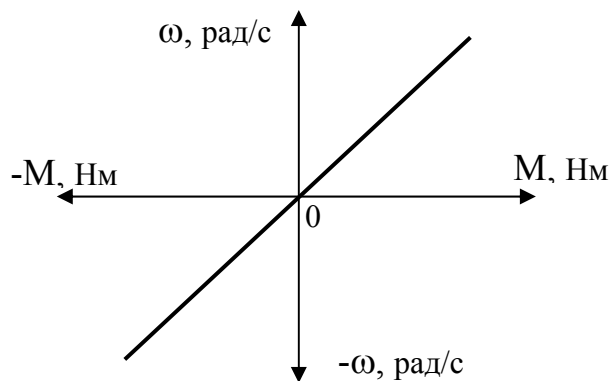


Рис.7.5.

На практиці окремо цей вид моменту зустрічається рідко. Найчастіше він присутній у моменті реального тертя.

Момент *вентиляторного типу* залежить від квадрата швидкості й створюється струминними машинами (вентилятори, насоси), рис.7.

$$M_c = \beta \cdot \omega^2. \quad (7.8)$$

В механізмах цей момент найчастіше діє разом із моментом сухого тертя, рис.7.16. Деякі механізми, наприклад, відцентрові насоси, які працюють на протитиск, мають залежність від швидкості вище другої степені.

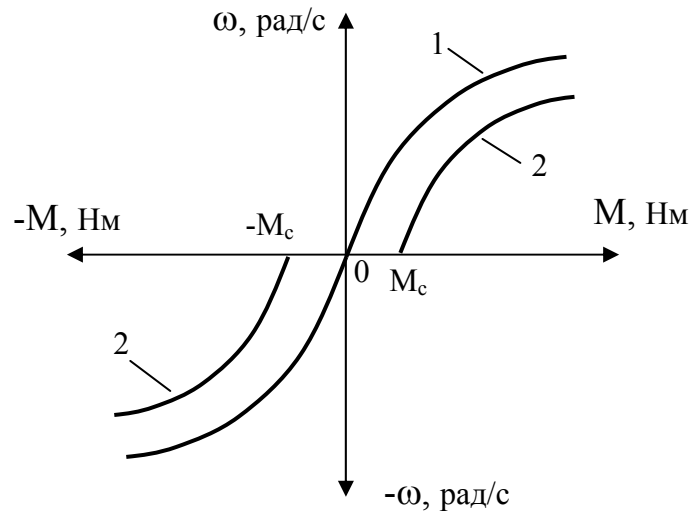


Рис.116 - Ідеальний вентиляторний момент -1, вентиляторний момент разом із моментом сухого тертя - 2.

Навантаження може бути періодичним. Найчастіше такий характер мають кривошипно-шатунні, кулісні та інші механізми, в яких радіус приведення залежить від кута повороту вала

$$M_c = M_{c_{\max}} \sin(k\omega_{\text{сеп}} t), \quad (7.9)$$

де $\omega_{\text{сеп}}$ – середня швидкість двигуна;
 k – коефіцієнт повтору коливань навантаження;
 t – час.

При обчисленні значення статичного моменту при приведенні моментів та сил до валу двигуна потрібно враховувати втрати в елементах кінематичного ланцюга (редуктори, ремінні передачі тощо). Найпростіше це зробити за допомогою сумарного ККД ланцюга, обчисленого на основі номінальних ККД цих елементів, вказаних у їх паспортних даних

$$\eta_{\text{мех}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots \quad (7.10)$$

Для точнішого визначення реального ККД і відповідно статичного моменту потрібно використовувати залежності ККД елементів від навантаження. Якщо знаки швидкості та статичного моменту протилежні, то при приведенні момент корисного навантаження ділиться на сумарний ККД

$$M_c = M_{\text{кн}} / (i \cdot \eta_{\text{мех}}) + \Delta M_{\text{дв}}, \quad (7.11)$$

а якщо знаки моменту та швидкості співпадають, то множиться

$$M_c = M_{\text{кн}} \cdot \eta_{\text{мех}} / i - \Delta M_{\text{дв}}, \quad (7.12)$$

де $\Delta M_{\text{дв}}$ – механічні втрати у двигуні.

Наприклад, для підйомного механізму активний статичний момент при підйомі вантажу M_{c1} не співпадає за напрямком із швидкості, тому його значення більше моменту при опусканні вантажу M_{c2} на величину сумарного моменту втрат ΔM , рис.7.7.

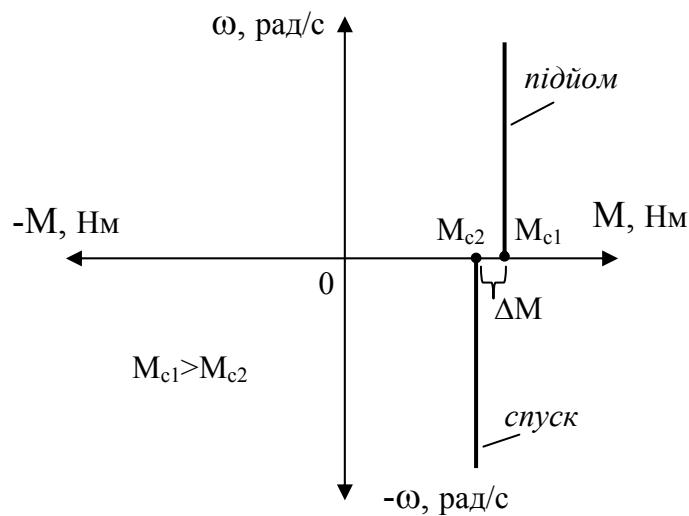


Рис.7.7.

Момент механічних втрат у двигуні $\Delta M_{\text{дв}}$ складає всього 1÷5% від номінального моменту двигуна, тому при розрахунках він часто нехтується.

Реальний статичний момент конкретного ЕП для всіх його трьох типових розрахункових схем: три-, дво-, одномасової, рис.7.6 – рис.7.8, має одне незмінне значення

$$\begin{aligned} M_c &= M_{c1} + M_{c2} + M_{c3} \\ M_c &= M_{c1} + M_{c2} \\ M_c &= M_{c1} \end{aligned} \quad (7.13)$$

але розподіляється між масами відповідно до реальних умов, наприклад, для тримасової схеми, рис.7.8.

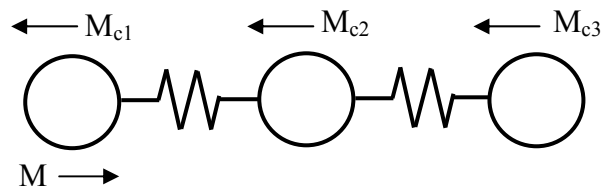


Рис.7.8.

Важливим є завдання знаків моментів у формулах, представлених у скалярній формі. Момент двигуна M береться із знаком “+”, якщо його дія співпадає з напрямком швидкості ω , та із знаком “-“, якщо не співпадає. Знак статичного моменту M_c , який діє проти напрямку швидкості, а це завжди реактивний момент та інколи активний, береться із знаком швидкості. Активний статичний момент, який є рушійним, тобто діє в напрямку швидкості, береться із знаком, протилежним до швидкості.

7. Рівняння руху механічної частини електропривода

Механічну частину ЕП можна представити системою твердих тіл, рух яких обмежений механічними зв’язками. Найбільш загальною формою

запису диференційних рівнянь, які описують рух такої системи, є відоме рівняння Лагранжа 2-го роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_K}{\partial q_i} = Q_i' - \frac{\partial W_{\Pi}}{\partial q_i} - \frac{\partial W_D}{\partial \dot{q}_i}, \quad (7.14)$$

- де W_K – кінетична енергії системи;
 W_{Π} – потенціальна енергії системи;
 W_D – енергія дисипації (розсіювання) системи;
 Q_i' - узагальнена сила;
 q_i – узагальнена координата;
 $\dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt}$ - узагальнена швидкість;
 i – кількість рівнянь, яка визначається степенем вільності механічної системи.

В механічній частині електропривода кожна маса обертається на осі, тобто має одну степінь вільності, тому кількість рівнянь дорівнює кількості мас розрахункової схеми. Для обертального руху узагальненою координатою є кут повороту валу $q_i = \varphi_i$ [рад], а узагальненою швидкістю – кутова швидкість валу $\dot{q}_i = \omega_i$ [рад/с]. Відповідно для поступального руху це – лінійне переміщення $q_i = S$ [м] та лінійна швидкість $\dot{q}_i = V$ [м/с].

7.7. Рівняння руху та структурна схема одномасової розрахункової схеми механічної частини електропривода

Розрахункова схема представляється однією масою із сумарним моментом інерції J , на яку діють момент двигуна M та статичний момент

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = M - M_c,$$

яке остаточно має вигляд

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (7.18)$$

де $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right]$ - кутове прискорення маси.

Рівняння (7.18) називається *основним рівнянням* руху ЕП. Воно вірно описує рух у цілому, коли вплив пружних зв'язків несуттєвий. На основі рівняння (7.18) складається передаточна функція та структурна схема жорсткої механічної частини. Так як входом є різниця моментів $M - M_c$, а виходом швидкість ω , то після заміни

$$\frac{d}{dt} \Rightarrow p, \quad Jp\omega = M - M_c$$

передаточна функція має вигляд

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp}. \quad (7.19)$$

Як видно з (7.19) механічна частина являє собою інтегруючу ланку, рис.7.10

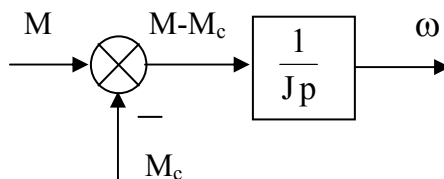


Рис.7.10.

Якщо вихідною координатою механічної частини є кут повороту, то структурна схема на рис.7.10 доповнюється інтегратором, рис.7.11,

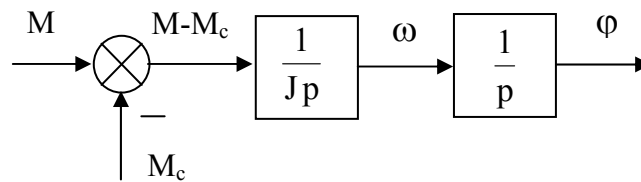


Рис.7.11

так як $\frac{d\phi}{dt} = \omega$, $p\phi = \omega$ і остаточно передаточна функція дорівнює

$$W(p) = \frac{\phi(p)}{\omega(p)} = \frac{1}{p} \quad (7.20)$$

Аналогічно складається рівняння для поступального руху на основі розрахункової схеми, показаної рис.7.12.

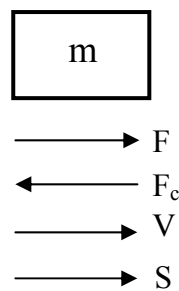


Рис.7.12.

В результаті рівняння руху має вигляд

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_c, \quad (7.21)$$

де $\frac{dV}{dt} = a \left[\frac{m}{c^2} \right]$ - лінійне прискорення маси;

на основі якого з урахуванням рівняння для лінійного переміщення

$$\frac{dS}{dt} = V \quad (7.22)$$

складається структурна схема для лінійного руху механічної частини ЕП, рис.7.13.

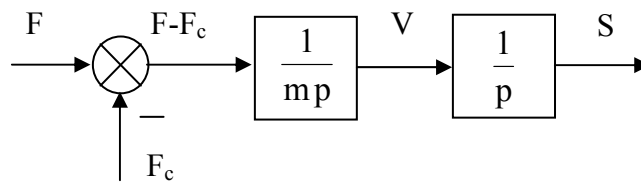


Рис.7.13.

7.2. Рівняння руху та структурна схема двомасової розрахункової схеми без врахування внутрішнього в'язкого тертя

Перша маса характеризується моментом інерції J_1 , на яку діють момент двигуна M та статичний момент M_{c1} . На другу масу, яка має момент інерції J_2 , діє статичний момент M_{c2} , рис.7.24.

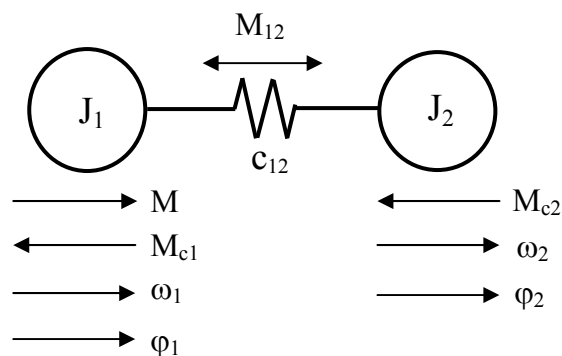


Рис.7.14.

Кінетична енергія даної системи дорівнює $W_K = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$,

потенціальна - $W_{\Pi} = \frac{c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2}$, дисипації - $W_D = 0$. Рівняння Лагранжа складається для кожної маси. Для першої маси похідна потенціальної енергії за кутом

$$\frac{\partial W_{\Pi}}{\partial \varphi_1} = -c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (7.23)$$

та похідна кінетичної енергії за швидкістю

$$\frac{\partial W_K}{\partial \omega_1} = J_1 \omega_1. \quad (7.24)$$

Узагальнена сила

$$Q'_1 = M - M_{c1}. \quad (7.25)$$

Після підстановки (7.23)-(7.25) у (7.14) отримується рівняння руху першої маси механічної частини електропривода

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_1 \omega_1) + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) &= M - M_{c1} \quad \text{або} \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1}. \end{aligned} \quad (7.26)$$

Аналогічно для другої маси похідна потенціальної енергії за кутом

$$\frac{\partial W_{\Pi}}{\partial \varphi_2} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (7.27)$$

та похідна кінетичної енергії за швидкістю

$$\frac{\partial W_K}{\partial \omega_2} = J_2 \omega_2, \quad (7.28)$$

узагальнена сила

$$Q'_2 = -M_{c2}. \quad (7.29)$$

і рівняння руху другої маси

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(J_2 \omega_2) - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) &= -M_{c2} \quad \text{або} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c2}. \end{aligned} \quad (7.30)$$

У рівняннях руху мас (7.26) і (7.30) момент

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (7.31)$$

є пружним моментом взаємодії двох мас, які рухаються. Похідна пружного моменту дорівнює

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = c_{12} (\omega_1 - \omega_2). \quad (7.32)$$

Наведені рівняння (7.26), (7.30), (7.32) описують рух електропривода, представленого двомасовою розрахунковою схемою

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{c1} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} (\omega_1 - \omega_2) \end{cases} \quad (7.33)$$

На основі рівнянь (7.33) складається структурна схема кожної ланки та системи в цілому, рис.7.15.

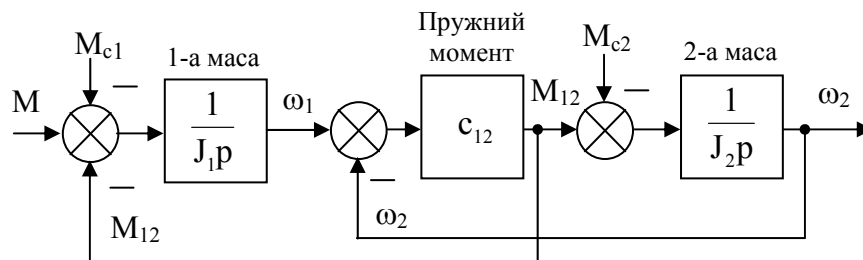


Рис.7.15.

Для систем керування положенням робочих органів механізмів потрібна інформація про переміщення мас φ_1 та φ_2 . Для цього рівняння (7.33) доповнюється інтеграторами (7.20) і набувають наступного вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{c1} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_{c2} \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1 \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2 \\ M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \end{array} \right. \quad (7.34)$$

Структурна схема, яка відповідає рівнянням (7.34), представлена на рис.7.16.

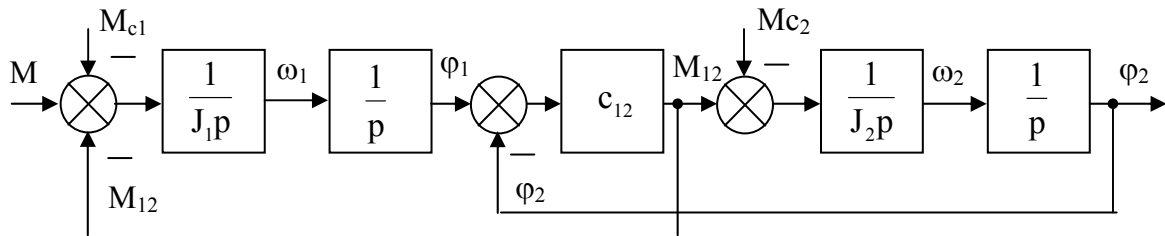


Рис.7.16.

7.3. Рівняння руху та структурна схема двомасової розрахункової схеми механічної частини електропривода з урахуванням внутрішнього в'язкого тертя

Сили внутрішнього в'язкого тертя поглинають енергію коливань, обумовлену пружним зв'язком, тобто призводять до затухання коливань мас, проте величина цих сил незначна, тому вони суттєво на рух не впливають. Розрахункову схему механічної частини електропривода для цього випадку показано на рис.7.27.

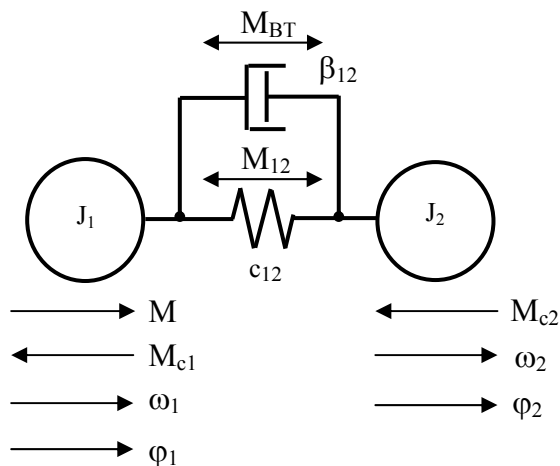


Рис.7.17.

Кінетична енергія даної системи дорівнює $W_K = \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$, потенціальна - $W_{\Pi} = \frac{c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2}$, дисипації - $W_D = \frac{\beta_{12} (\omega_1 - \omega_2)^2}{2}$. Після складання рівняння Лагранжа аналогічно (7.23)-(7.32) отримується система рівнянь (7.35), яка описує рух механічної частини електропривода згідно рис.7.17.

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{вт} - M_{c1} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} + M_{вт} - M_{c2} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} (\omega_1 - \omega_2) \\ M_{вт} = \beta_{12} (\omega_1 - \omega_2) \end{cases} \quad (7.35)$$

Останнє рівняння в системі (7.35) визначає момент внутрішнього в'язкого тертя $M_{вт}$. Відповідна структурна схема представлена на рис.7.18.

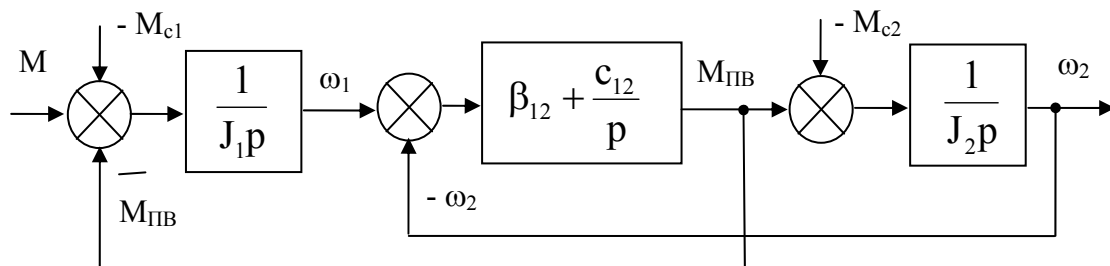


Рис.7.18.

Структурна схема реалізує реально існуючий у природі сумарний пружно-в'язкий момент $M_{пв}=M_{12}+M_{вт}$. Якщо для аналізу потрібно окремо виділити пружний момент M_{12} та момент в'язкого тертя $M_{вт}$, то структурна схема представляється згідно рис.7.19.

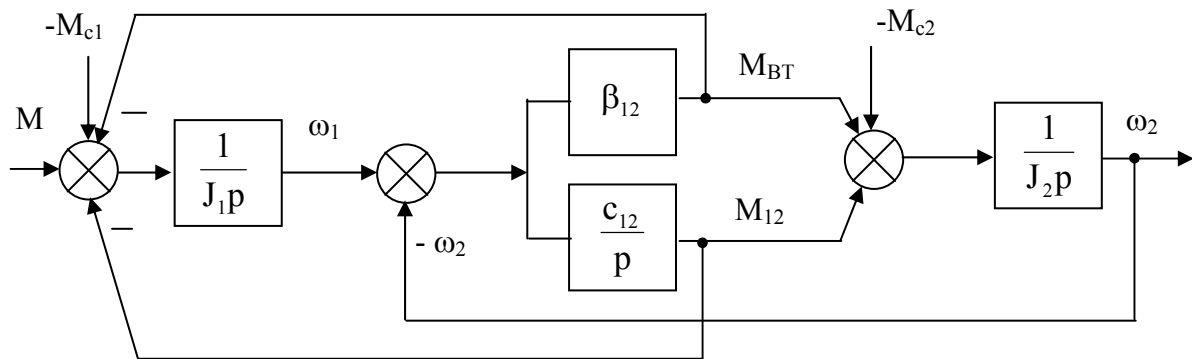


Рис.7.19.

7.4. Рівняння руху та структурна схема двомасової розрахункової схеми механічної частини електропривода із зазором без врахування внутрішнього в'язкого тертя

Елементи механічної частини (шестерні редуктора, муфти тощо) можуть мати механічні зазори, обумовлені неточністю виготовлення деталей чи їх зносом. Зазор може бути вибраним (замкненим), якщо всі деталі щільно дотикаються одна до одної, або розімкненим, частково чи повністю. В останньому випадку окремі групи елементів рухаються незалежно. Наявність зазорів негативно впливає на рух механічної частини, так як призводить до ударів, інтенсивного зносу елементів та зниженню точності керування. При розробці розрахункової схеми зазори приводяться як переміщення до однієї швидкості згідно (7.5), (7.6). При описанні системи із зазором за допомогою рівняння Лагранжа обов'язково повинен враховуватися пружний зв'язок. Якщо пружність не враховується, то адекватне математичне описання потрібно розробляти на основі закону збереження імпульсу. Розрахункова схема представлена на рис.7.20.

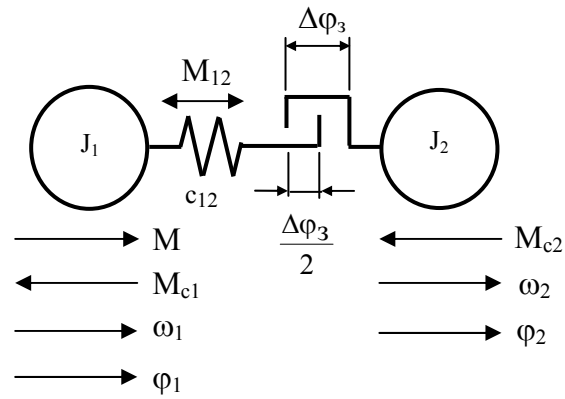


Рис.7.20.

Наявність зазору обумовлює нелінійність пружного моменту, рис.7.27.

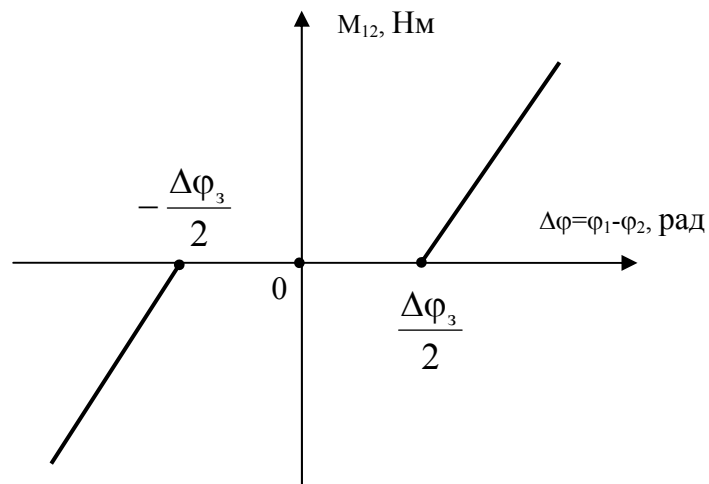


Рис.7.27.

Усі інші рівняння аналогічні рівнянням двомасової схеми без зазору (7.34)

$$\begin{aligned}
 J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M - M_{12} - M_{c1} \\
 J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{12} - M_{c2} \\
 \frac{d\phi_1}{dt} &= \omega_1 \\
 \frac{d\phi_2}{dt} &= \omega_2
 \end{aligned}
 \tag{7.36}$$

$$M_{12} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |\varphi_1 - \varphi_2| = |\Delta\varphi| \leq \Delta\varphi_3 / 2 \\ c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_3 / 2), & \text{якщо } (\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta\varphi > \Delta\varphi_3 / 2 \\ c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\varphi_3 / 2), & \text{якщо } (\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta\varphi < -\Delta\varphi_3 / 2 \end{cases}$$

На основі системи рівнянь (7.36), яка описує рух системи із зазором, складається відповідна структурна схема, рис.7.22.

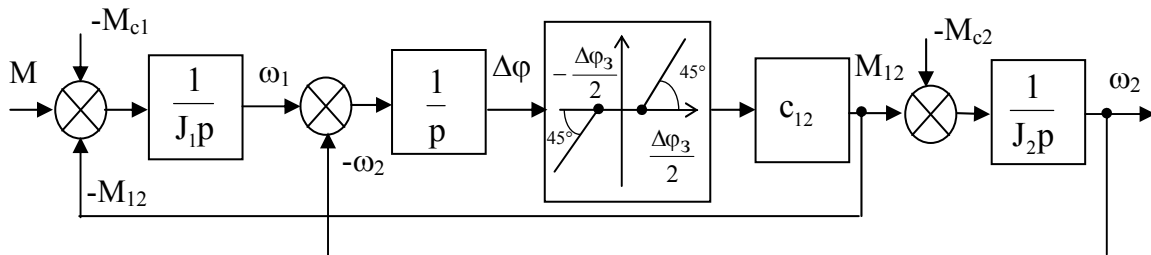


Рис.7.22.

7.5. Рівняння руху та структурна схема двомасової розрахункової схеми механічної частини електропривода із зазором та урахуванням внутрішнього в'язкого тертя

Розрахункова схема представлена на рис.7.23. В даному випадку пружний момент M_{12} та момент внутрішнього в'язкого тертя $M_{ВТ}$ характеризуються нелінійною залежністю. Сумарний пружно-в'язкий момент визначається наступною формулою

$$M_{ПВ} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \text{sign}\Delta\varphi \neq \text{sign}\Delta\omega \text{ та } |M_{ВТ}| > |M_{12}|; \\ M_{ВТ} + M_{12}, & \text{якщо } \text{sign}\Delta\varphi = \text{sign}\Delta\omega \text{ або } |M_{ВТ}| \leq |M_{12}|, \end{cases} \quad (1.58)$$

де $M_{12} = c_{12} F_1(\varphi)$ – пружний момент;
 $M_{ВТ} = \square_{12} \square \square F_2(\varphi)$ – момент в'язкого тертя;
 F_1 та F_2 – нелінійні функції;

$$F_1(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta\varphi| \leq \frac{\Delta\varphi_3}{2}; \\ \Delta\varphi - \frac{\Delta\varphi_3}{2} & \text{при } \Delta\varphi > \frac{\Delta\varphi_3}{2}; \\ \Delta\varphi + \frac{\Delta\varphi_3}{2} & \text{при } \Delta\varphi < -\frac{\Delta\varphi_3}{2}, \end{cases}$$

$$F_2(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta\varphi| \leq \frac{\Delta\varphi_3}{2}; \\ 1 & \text{при } |\Delta\varphi| > \frac{\Delta\varphi_3}{2}. \end{cases}$$

Система рівнянь, яка описує рух даної механічної частини, аналогічна (7.36), але до неї замість останнього рівняння підставляється (7.38).

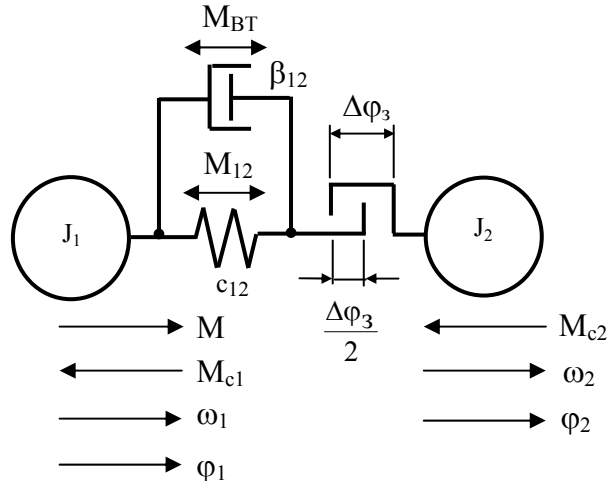


Рис.7.23.

Відповідна структурна схема показана на рис.7.24.

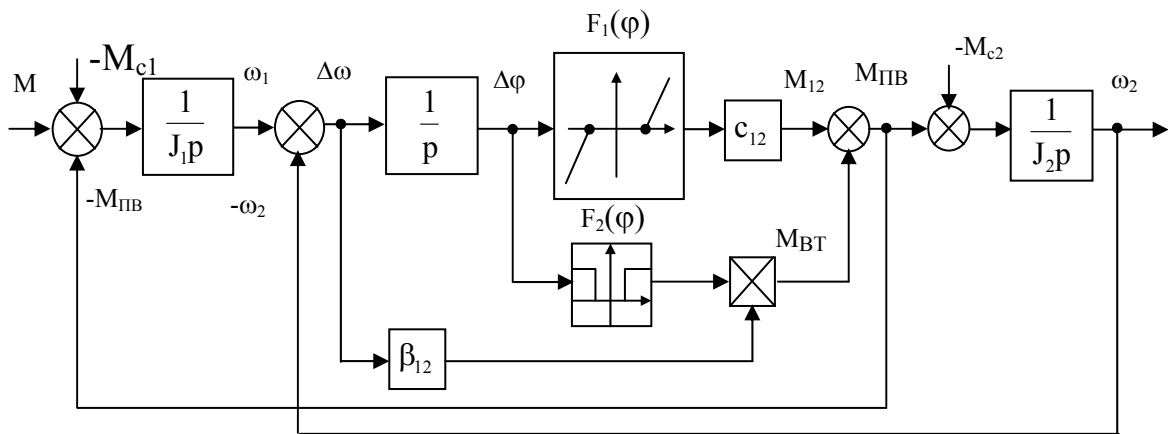


Рис.7.24.

7.6. Рівняння руху механізмів із нелінійним кінематичним зв'язком

Ряд механізмів мають нелінійні кінематичні зв'язки, в яких радіус приведення параметрів залежить від кута повороту валу

$$\rho(\varphi) = R_k \sin \varphi, \tag{7.39}$$

наприклад, кривошипно-шатунний механізм, рис.7.25. Узагальненою координатою є кут повороту вала φ . Узагальнена сила дорівнює

$$Q' = M - M_c - F_c \rho(\varphi) = M - M_{c\Sigma}(\varphi), \quad (7.40)$$

де $M_{c\Sigma}(\varphi) = M_c + F_c R_k \sin \varphi$ – сумарний статичний момент.

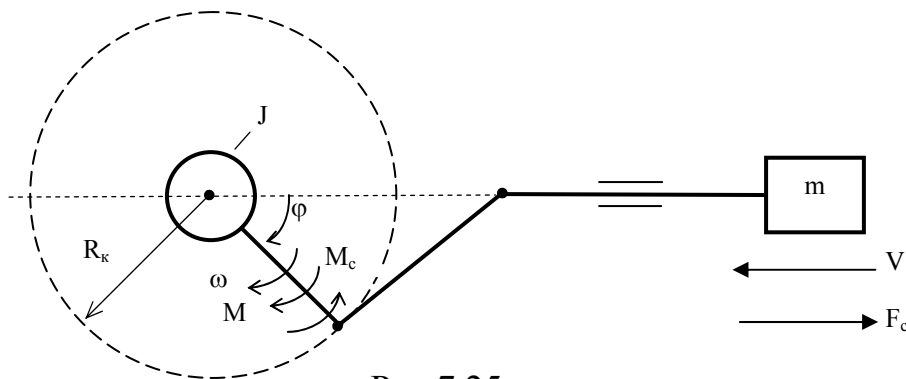


Рис.7.25.

Кінетична енергія системи визначається наступним виразом

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{mV^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{m\rho^2(\varphi)\omega^2}{2} = J_\Sigma(\varphi) \frac{\omega^2}{2}. \quad (7.41)$$

На основі (7.40) та (7.41) складається рівняння Лагранжа, яке описує рух кривошипно-шатунного механізму

$$J_\Sigma(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_\Sigma(\varphi)}{d\varphi} = M - M_{c\Sigma}(\varphi). \quad (7.42)$$

Рівняння руху (7.42) містить момент інерції J_Σ та статичний момент $M_{c\Sigma}$, які залежать від кута повороту вала, тобто періодично змінюються. Це ускладнює аналіз та синтез системи керування електроприводом.

7.2 Динамічні властивості пружної механічної частини електропривода

Аналіз властивостей пружної механічної частини електропривода проводиться на найбільш розповсюдженій двомасовій розрахунковій схемі без врахування внутрішнього в'язкого тертя. Аналіз здійснюється за

керуючою змінною, якою є момент двигуна \mathbf{M} . При цьому збурення, тобто статичний момент не враховується $M_{c1}=M_{c2}=0$. Після таких спрощень відповідна структурна схема, яка представлена на рис.7.25, приймає вигляд, рис.7.26.

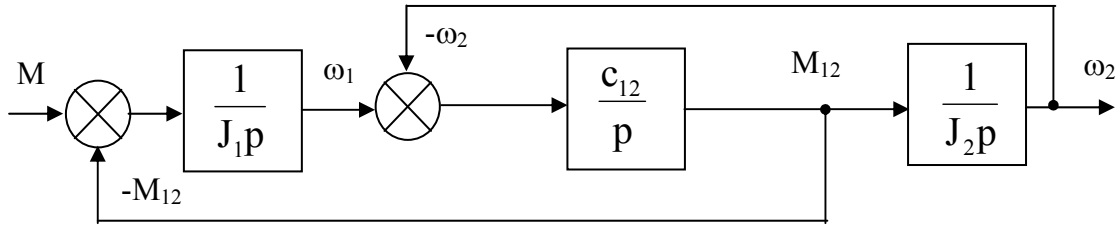


Рис.7.26.

Для проведення аналізу здійснюється структурне перетворення. Для цього вузол із пружним моментом \mathbf{M}_{12} переноситься на вихід схеми, рис.7.27.

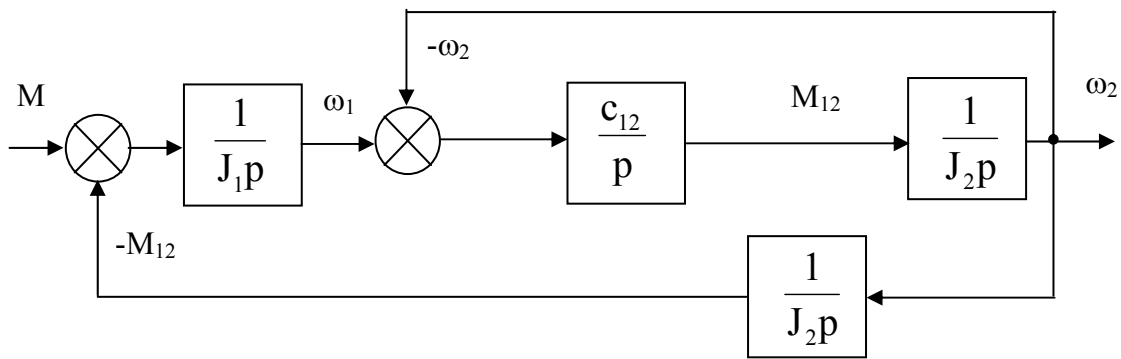


Рис.7.27.

На основі цієї структурної схеми визначається передаточна функція, яка зв'язує вихідну координату – швидкість другої маси ω_2 із швидкістю першої маси ω_1

$$W_2(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_1(p)} = \frac{\frac{c_{12}}{p} \frac{1}{J_2 p}}{1 + \frac{c_{12}}{p} \frac{1}{J_2 p}} = \frac{1}{\left(\frac{J_2}{c_{12}}\right) p^2 + 1}. \quad (7.43)$$

Передаточна функція $W_2(p)$ являє собою ідеальну коливальну ланку.

Для визначення передаточної функції, яка зв'язує швидкість першої маси ω_1 з керуючою змінною – моментом двигуна \mathbf{M} , структурна схема (7.27) представляється у наступному вигляді, рис.(7.28).

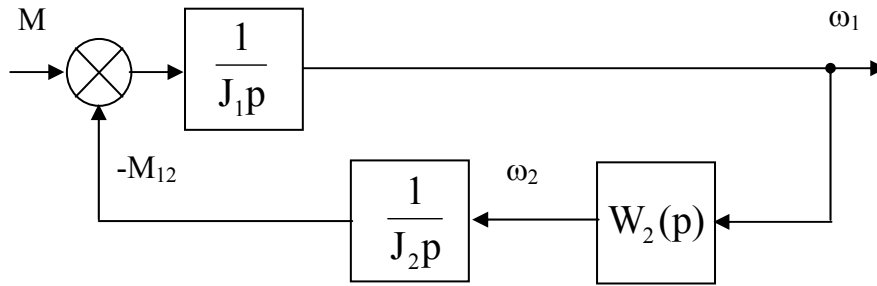


Рис.7.28.

Відповідна передаточна функція дорівнює

$$W_1(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{\frac{1}{J_1 p}}{1 + \frac{1}{J_1 p} J_2 p \frac{1}{\left(\frac{J_2}{c_{12}}\right) p^2 + 1}} = \frac{\left(\frac{J_2}{c_{12}}\right) p^2 + 1}{J_\Sigma p \left(\frac{J_1 J_2}{c_{12} J_\Sigma} p^2 + 1\right)}, \quad (7.44)$$

де $J_\Sigma = J_1 + J_2$ – сумарний момент інерції системи.

Передаточна функція $W_1(p)$ представляє собою послідовне з'єднання інтегруючої ланки, ідеальної коливальної ланки та ідеальної форсуючої ланки другого порядку.

Загальна передаточна функція пружної механічної частини, яка визначає результуючий зв'язок між $\omega_2(p)$ і $M(p)$, дорівнює добутку отриманих функцій

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = W_1(p) \cdot W_2(p). \quad (7.45)$$

Таким чином, початкова структурна схема двомасової розрахункової механічної частини електропривода представляється наступним чином, рис.7.29, рис.7.30.

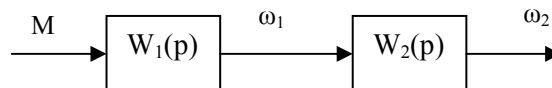


Рис.7.29.

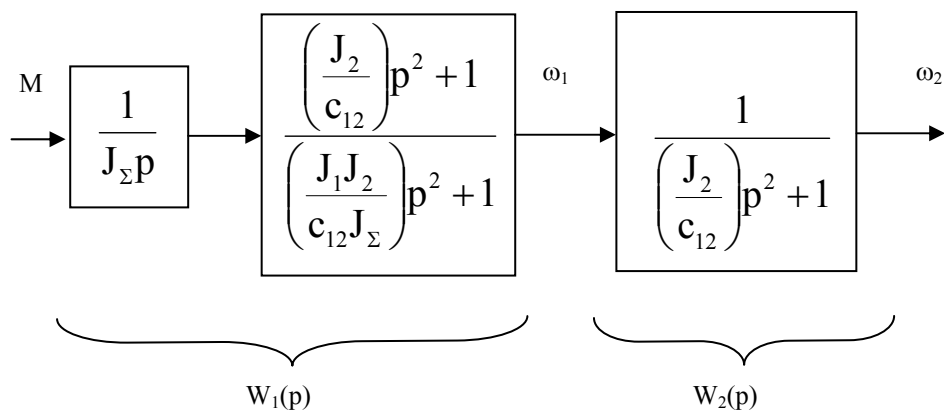


Рис.7.30.

Після скорочення однакових чисельника $W_1(p)$ та знаменника $W_2(p)$ структурна схема приймає вигляд, рис.7.37.

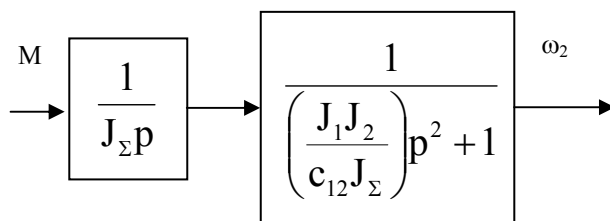


Рис.7.37.

На основі структурної схеми, показаної на рис.1341, записується характеристичне рівняння системи

$$J_{\Sigma} p \left(\frac{J_1 J_2}{c_{12} J_{\Sigma}} p^2 + 1 \right) = 0, \quad (7.46)$$

яке має три корені, із них один нульовий $p_1=0$ та два уявні

$$p_{23} = \pm j \sqrt{\frac{c_{12} J_{\Sigma}}{J_1 J_2}} = \pm j \Omega_{12},$$

$$\text{де } \Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12} J_{\Sigma}}{J_1 J_2}} - \text{резонансна частота системи}; \quad (7.47)$$

Для зручності аналізу вводяться наступні параметри:

$$\gamma = \frac{J_{\Sigma}}{J_1} - \text{співвідношення мас}; \quad (7.48)$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{c_{12}}{J_2}} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}} - \text{резонансна частота другої маси}. \quad (7.49)$$

Після цього передаточні функції (7.33), (7.34) можна записати у наступному вигляді

$$W_1(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \frac{\left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2}\right) p^2 + 1}{\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2}\right) p^2 + 1}, \quad (7.50)$$

$$W_2(p) = \frac{1}{\left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2}\right) p^2 + 1}. \quad (7.51)$$

Так як функція $W_1(p)$ (7.50) вміщує інтегруючу ланку

$$W_{\text{інт}}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \quad (7.52)$$

з найбільшою сталою часу системи, що дорівнює сумарному моменту інерції J_{Σ} , то ця інтегруюча ланка й визначає характер руху в цілому. При незмінному значенні моменту двигуна $M = \text{const}$ швидкість першої маси (двигуна) ω_1 змінюється за лінійним законом. Якщо частота коливання моменту двигуна наближається до частоти резонансу системи Ω_{12} , обумовлену ідеальною коливальною ланкою (знаменник функції $W_1(p)$)

$$W_{\text{кол}}(p) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2}\right) p^2 + 1},$$

то можливе суттєве збільшення амплітуди коливань. Але на цей процес впливають параметри форсуючої ланки (чисельник функції $W_1(p)$)

$$W_{\text{фор}}(p) = \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + 1.$$

Якщо момент інерції механізму незначний, тобто $J_2 \ll J_1$, то $\gamma \approx 1$ і форсуюча ланка компенсує дію коливальної. Крім того, якщо жорсткість зв'язку c_{12} велика, то резонансна частота Ω_{12} зміщується у високочастотну область за частоту зрізу системи і суттєво не впливає на рух, так як його характер визначається низькочастотною областю сформованою інтегруючою ланкою (7.52).

Функція $W_2(p)$ (7.51) представляє собою коливальну ланку і при коливаннях моменту, близьких до резонансної частоти Ω_{12} немає факторів, які б ослабили значні коливання другої маси (робочого органу).

Таким чином, якщо потрібно отримати задану якість керування робочим органом чи в системі керування використовуються зворотні зв'язки за координатами механізму, то обов'язково потрібно враховувати пружний зв'язок і при синтезі системи використовувати двомасову розрахункову схему. Якщо ж $J_2 \ll J_1$ чи жорсткість зв'язку достатньо висока і в системі керування не використовуються зворотні зв'язки за координатами другої маси, то механічну частину можна спростити до одномасової, не враховуючи пружність.

В реальних системах завжди присутні дисипативні сили внутрішнього в'язкого тертя, які демпфують коливання, проте природне затухання незначне і суттєво не впливає на рух системи в цілому, хоча й зменшує величину резонансних піків.

Більш детальний аналіз динамічних властивостей пружної системи здійснюється за допомогою амплітудно-фазо-частотних характеристик.