

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

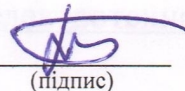
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

«15» червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма

Електротехніка та електротехнології

(назва освітньої програми)

на тему:

«Модернізація електропривода засувки водонапірної мережі»

Виконав: студент

IV курсу, групи 4311

Куліца Павло Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

ст. викл. каф. автоматики, доц. НУК, Фоменко А.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

доц. каф. автоматики, Савченко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

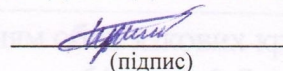
Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Васильєв О.Г. Васильєв
«15» 06 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Куліца Павло Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація електроприводу засувки водонапірної мережі»
керівник роботи Фоменко Андрій Миколайович, старший викладач, доцент НУК,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року
№ 286-УЧ.

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Двигун постійного струму типу ПБСТ з потужністю 0,8 кВт. Напруга живлення 380 В. Двоконтурна система підпорядкованого керування двигуна постійного струму. Час перехідного процесу не більш 0.15с. Еквівалентний момент на валу двигуна 7,3 Нм. Швидкість робочого ходу механізму, та мінімальної робочої подачі 4,8 м/хв. Постійна часу фільтру датчика струму та швидкості 0,66 мс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Опис системи головного водопроводу. 2 Опис комплектного електропривода «Кемток». 3 Розрахунок і аналіз автоматичної системи управління приводу головної засувки. 4 Охорона праці

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

Автоматизована система керування засувками об'єкту. 2 Загальний вигляд головної засувки. 3 Діюча схема системи керування засувкою. 4 Функціональна схема електропривода «КЕМТОК». 5 Структурна схема електроприводу «КЕМТОК» для аналізу динаміки. 6 Графіки статичних і динамічних характеристик приводу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 03 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача завдання</i>	14.02.26	
2	<i>Аналіз існуючої системи керування та техноло- гічного обладнання</i>	28.02.26	
3	<i>Обґрунтування та вибір комплект-ного елект ропривода</i>	21.03.26	
4	<i>Розрахунок нової системи керування та аналіз дин амики</i>	18.04.26	
5	<i>Консультація з розділу охороні праці та НС</i>	25.05.26	
6	<i>Графічна частина та підготовка до-повіді</i>	30.05.26	

Студент

(підпис)

Куліца П.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Фоменко А.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 68 с., 4 р., 38 рис., 2 табл., 1 дод., 13 джерел.

Ключові слова: двигун постійного струму, контур струму, контур швидкості, автоматизована засувка, перехідна характеристика, двоконтурна система, привод постійного струму.

Мета роботи – . проведення модернізації шляхом заміни існуючої системи керування на автоматизований електропривод засувки водонапірної мережі

У першому розділі наведено опис системі головних водопроводів, клапанів замочно-дросельних БРУ-А, БРУК, БРУ-СН, головної водяної засувки та автоматизованої системі керування засувками. Проведено аналіз Діючої системи керування в цілому та окремих механізмів. У розділі 2 наведено загальні відомості про обраний автоматизований електропривод, силова схема, регулятор швидкості, регулятор струму, блок нелінійного струмообмеження БНТО та система імпульсно-фазового управління (СІФУ). Розділ 3 містить постановку задачі автоматизації та математичну модель системи керування с розрахунками. Виконано вибір двигуна і комплектного електроприводу, розрахунок параметрів тиристорного перетворювача, розрахунок параметрів об'єкту регулювання для аналізу динамічних властивостей системи. За результатами дослідження розроблено структурну схему системи керування та отримані статичні та динамічні характеристики та проведений їх аналіз який показав доцільність проведення автоматизації. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додатки містять слайди мультимедійної презентації (додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ОПИС СИСТЕМИ ГОЛОВНОГО ВОДОПРОВОДУ.....	8
1.1 Система головних водопроводів.....	8
1.2 Клапани замочно-дросельні БРУ-А, БРУК, БРУ-СН.....	10
1.3 Головна водяна засувка.....	15
1.4 Автоматизована система керування засувками.....	17
2. ОПИС КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА «КЕМТОК».....	20
2.1 Загальні відомості.....	20
2.2 Силова схема.....	21
2.3 Регулятор швидкості.....	21
2.4 Регулятор струму.....	27
2.5 Блок нелінійного струмообмеження БНТО.....	28
2.6 Система імпульсно-фазового управління (СІФУ).....	31
3. РОЗРАХУНОК І АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДУ ГОЛОВНОЇ ЗАСУВКИ.....	38
3.1 Постановка задачі модернізації.....	38
3.2 Вибір двигуна і комплектного електроприводу.....	38
3.3 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача.....	40
3.4 Обмеження зрівняльних струмів.....	42
3.5 Розрахунок параметрів об'єкту регулювання для аналізу динамічних властивостей системи.....	45
3.6 Побудова статичних характеристик.....	52
3.7 Розрахунок перехідних процесів.....	52
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	58
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників для установки з приводом постійного струму.....	58
4.2 Розрахунок захисного заземлення установки з приводом постійного струму.....	62

4.3 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроустановки з приводом постійного струму.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	68
ДОДАТОК А.....	69

ВСТУП

Розвиток господарства нашої країни безпосередньо пов'язаний з електрифікацією, зокрема все більше і більше значення в системах комплексної механізації та автоматизації відіграє електропривод. У теперішній час автоматизований електропривод є основою комплексної механізації та автоматизації промислових процесів. Автоматизація дозволяє звільнити значну кількість персоналу від постійних чергувань, під час яких у деяких випадках за зміну відбувається усього декілька переключень. Введення автоматичного контролю сприяє покращенню якості обслуговування основного технологічного процесу.

Автоматизація проводиться не тільки на виробничих підприємствах різноманітних галузей господарства а і на обертах критичної інфраструктури. Такими об'єктами є різноманітні системи водоочищення та водопостачання. Робочій процес цих підприємств є безперервним і потребують цілодобового чергування персоналу. Завдяки автоматизації таких підприємств знижується вплив людського фактору при аварійних ситуаціях. І як наслідок знижується кількість аварій на цих об'єктах.

Таким об'єктом є станція водопостачання. Станція є об'єкт насичений різноманітними складними механізмами і для експлуатації необхідна велика кількість персоналу. Сучасна автоматизація дозволяє знизити кількість персоналу і підвищити продуктивність і надійність об'єкту.

Задачею даної кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування і регулювання приводом головної засувки у складі автоматизованої системи керування станції в цілому. В роботі пропонується розроблена система програмного керування системою засувки об'єкту в цілому, та проводиться головної засувки станції.

1 ОПИС СИСТЕМИ ГОЛОВНОГО ВОДОПРОВОДУ

1.1 Система головних водопроводів

На відмітці 10 м на горизонтальних ділянках водоводів встановлені головні водяні засувки - ГВЗ - для регулювання вхідного потоку води.

Загальна дренажний-скидна лінія приєднується безпосередньо до конденсатора мережі. Між регулюючим клапаном і конденсатором встановлений дифузор, в звужену частину якого введено уприскування конденсату.

Дренажно-скидні лінії з головних водопроводів перед ГВЗ вибрані, виходячи з сумарної витрати води 10% від пропускної спроможності одного БРУ-К, тобто для діапазону витрат, в якому регулювання за допомогою БРУ-К неефективно (до 90 т/год).

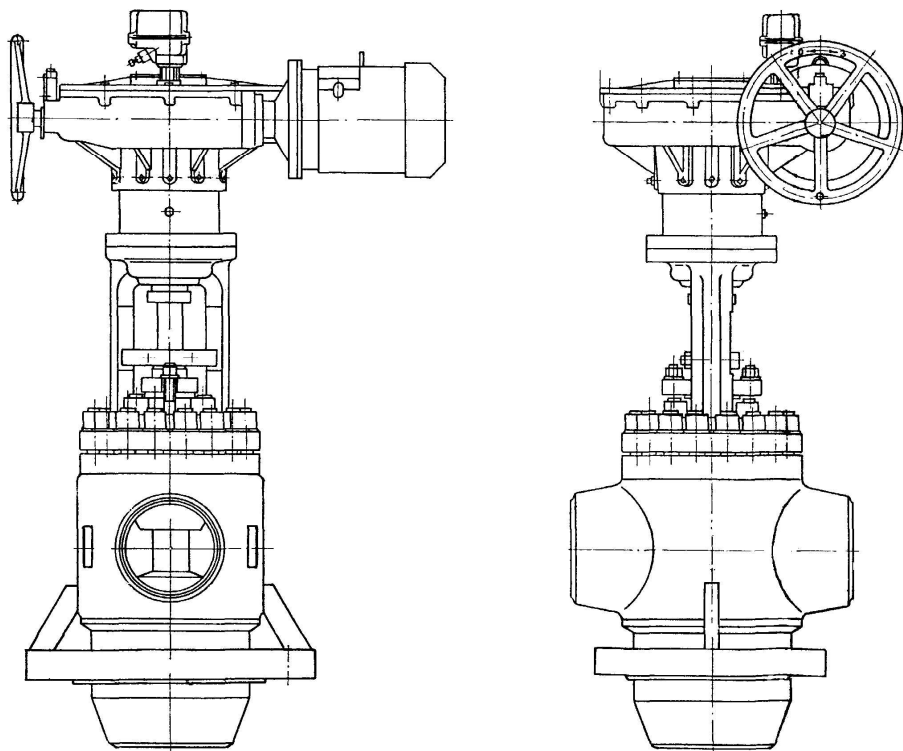


Рисунок 1.1 - БРУ-А Загальний вигляд

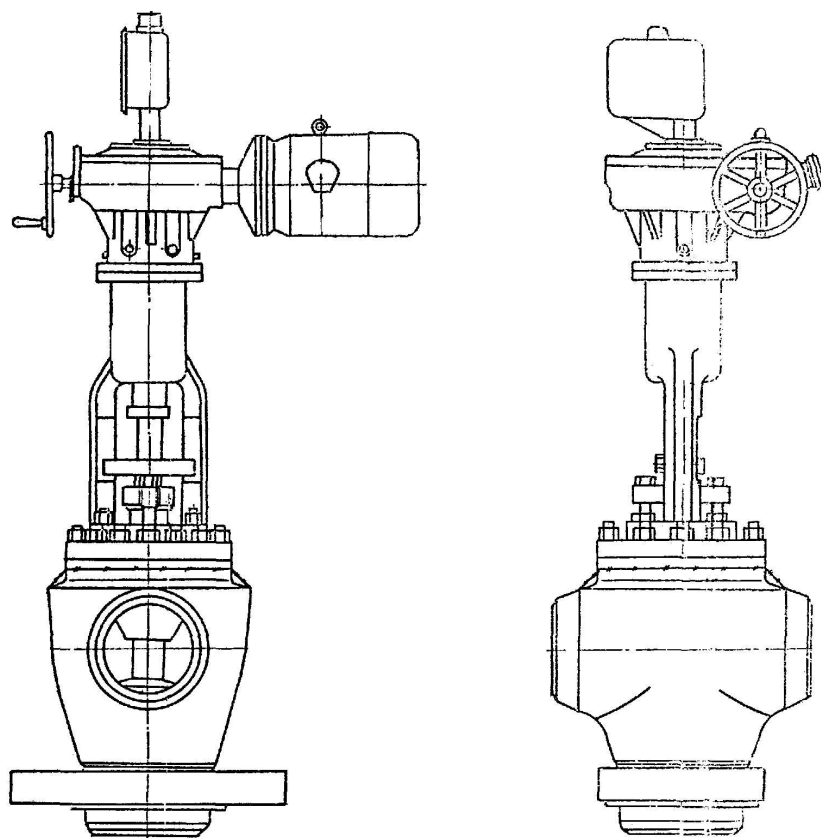


Рисунок 1.2 - БРУ-К Загальний вигляд

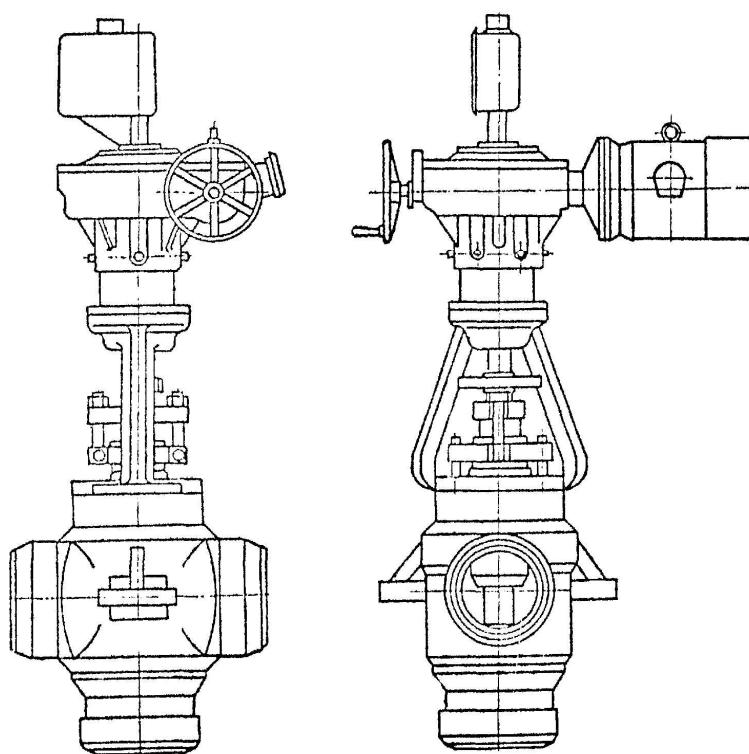


Рисунок 1.3 - БРУ-СН Загальний вигляд

Для відведення дренажу з головних водопроводів в режимі резерву блоку за відсутності вакууму в конденсаторі із загальної дренажний-скидної лінії передба-

чено відгалуження D50 мм в розширювач дренажного бака. На цьому відгалуженні встановлений регулюючий клапан прохідним перетином 5 см² і дросельна шайба діаметром 5 мм.

Аналогічний дренаж з регулюючим клапаном і дросельною шайбою встановлений також перед стопорними клапанами турбіни.

До складу системи, окрім перерахованого, входять опори і підвіски, елементи КІП, теплова ізоляція.

1.2 Клапани замочно-дросельні БРУ-А, БРУК, БРУ-СН

Клапани встановлені на горизонтальних ділянках паропроводів в положенні штоком вгору, приєднані до трубопроводу за допомогою зварки.

Управління клапанами здійснюється:

- уручну - маховиком електроприводу;
- дистанційно або автоматично - вбудованим електроприводом.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики БРУ-А, БРУ-К, БРУ-СН

Тип клапана	БРУ-А 1115-300/350-Э	БРУ-К 960-300/350-Э	БРУ-СН 1036-300/300-Э
1	2	3	4
Розрахунковий (максимально-робоче) тиск, Мпа (кгс/см ²)	7,8 (80)	7,8 (80)	7,8 (80)
Розрахункова температура, 0 З	300	300	300
Максимальний Мкр на втулці шпінделя, Нм	3000	3000	1400
Потужність електродвигуна, кВт	11,8	11,8	5,6
Хід, мм	120	100	75
Час відкриття електроприводом, с	16	15	10

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Число оборотів маховика електроприводу для відкриття на хід 100 мм (для БРУ-СН - повне відкриття)	350	330	250
Діаметр маховика, мм	500	320	320

Конструкція (див. рисунок 1.4). Корпус 1, в який вварено сідло 2. Сідло має наплавлену поверхню ущільнювача конусної форми.

Кришка 3 з сальниковим набиванням 4 з пресованих асбографітових кілець.

Сальникове набивання ущільнюється через ґрундбуксу 5 і нажимну планку 6 шпильками у БРУ-А, БРУ-К і відкидними болтами 7 у БРУ-СН.

Ущільнення роз'єму кришки з корпусом забезпечується у БРУ-А, БРУ-К зубчатою прокладкою 8, а у БРУ-СН сальниковим набиванням 9.

Шток 10 з наплавленим профільованим кінцем.

У середній частині штока закріплений повзун 11. Повзун перешкоджає обертальному руху штока, забезпечує його поступальну ходу і одночасно є показчиком положення органу, що дроселює, пересуваючись під час роботи уздовж шкали, нанесеної на бугелі 12.

До верхньої частини бугеля кріпиться кришка бугеля 13, на якій вмонтовується вбудований електропривод.

У БРУ-К у верхній частині бугеля, а у БРУ-А і БРУ-СН в кришці бугеля, розміщена масельничка 14 для подачі мастила у вузол переміщення штока 15. Через масельничку запресовується мастило УНІОЛ-1 в кількості 0,65 кг

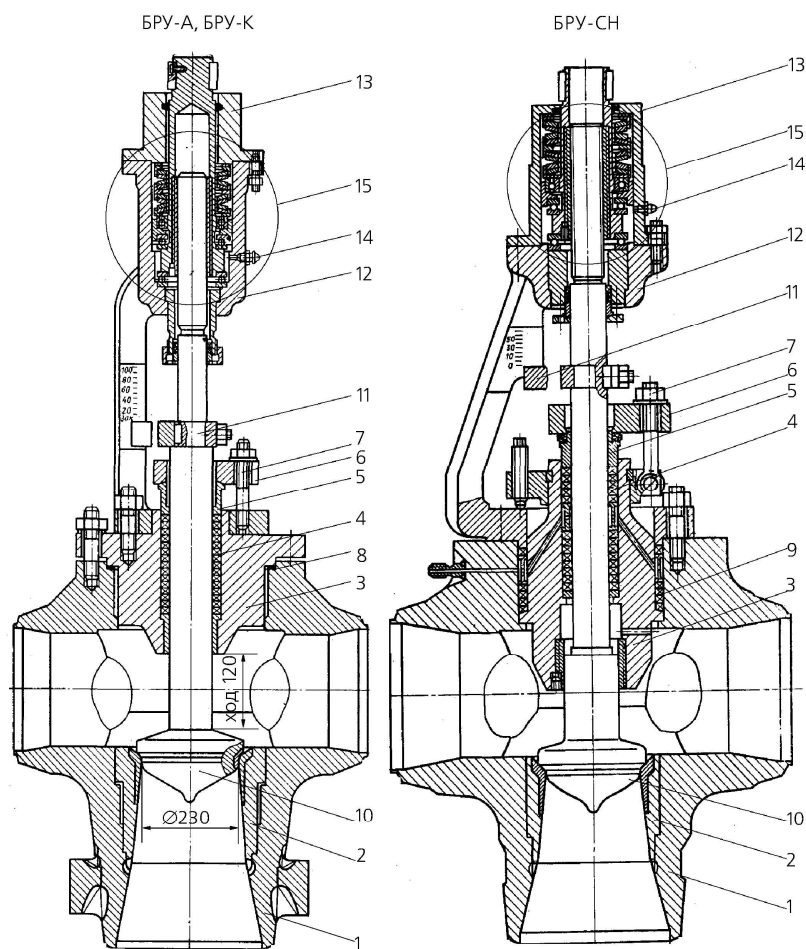


Рисунок 1.4 - Конструкція замочно-дросельних клапанів

1-корпус; 2-седло; 3-крышка; 4,9-сальникове набивання; 5-грундбукса; 6-нажимная планка; 7-відкидний болт; 8-зубчата прокладка; 10-шток; 11-ползун; 12-бугель; 13-крышка бугеля; 14-масленка; 15-узел переміщення штока

Принцип роботи. За допомогою вбудованого електроприводу здійснюється поступальна хода штока. При переміщенні профільованого закінчення штока щодо сидла змінюється площа прохідного перетину для пропуску робочого середовища. Тим самим забезпечується процес того, що дроселює і регулювання витрати.

Як матеріал для наплавлення сидла і штока застосовані сплави, що володіють високій ерозостійкістю, достатньою твердістю і стійкістю проти задирання.

Наявність притертих поверхонь ущільнювачів на сидлі і штоку дозволяє здійснювати щільне закриття прохідного перетину.

В процесі експлуатації клапани можуть знаходитися в частково відкритому, повністю відкритому положенні, а також виконувати функції замочного органу.

Клапани піддаються періодичним оглядам і регламентним роботам в терміни, передбачені графіком залежно від роботи всієї системи.

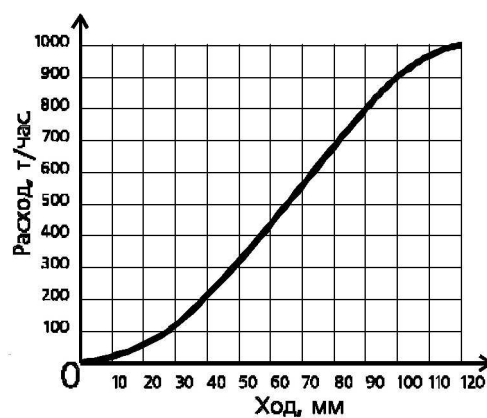
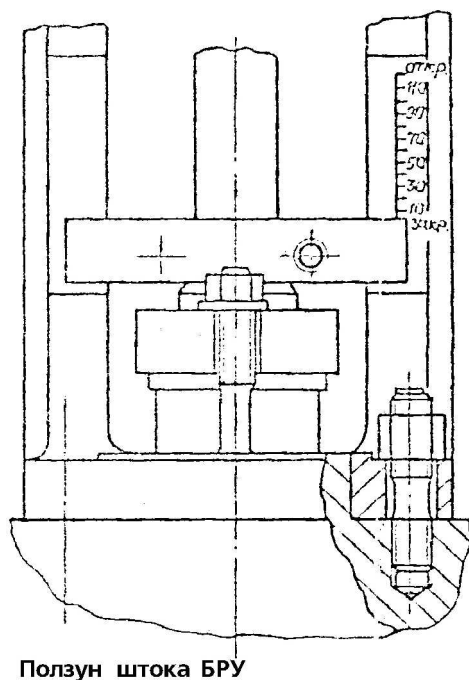


Рисунок 1.5 - Повзун штока БРУ і залежність «хід-витрата»
БРУ-А, БРУ-К

Після БРУ-К послідовно встановлено два пристрої однієї конструкції Ду, що дроселюють, 350/500 мм і 500/800.

БРУ-СН змонтований з дросельним пристроєм Ду 300/600.

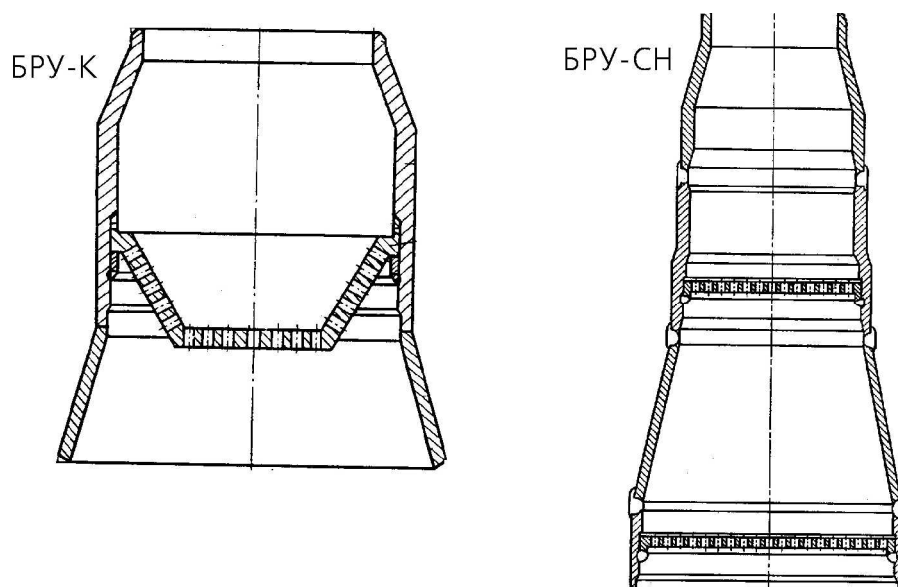


Рисунок 1.6 - Дроселюючі пристрої

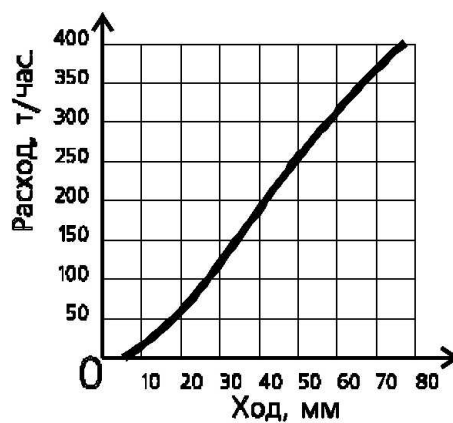


Рисунок 1.7 - Залежність "хід-витрата" БРУ-СН

Таблиця 1.2 – Дроселюючі пристрої БРУК, БРУ-СН

Основні технічні характеристики.				
	Тип	Робочий тиск Р1/Р2, Мпа	Робоча темпе- ратура °С	Тиск гідровипробу- вача, Мпа
БРУ-К	960-350/ 500-III-02	4,4/2,5	260/225	7,6
	960-500/ 800-III-02	2,5/1,5	225/197	4,1
БРУ-СН	1035-300/ 600-III	3,4/1,2	240/190	5,6
Матеріал - сталь 20.				

1.3 Головна водяна засувка

Тип. 973-600-ЭБА.

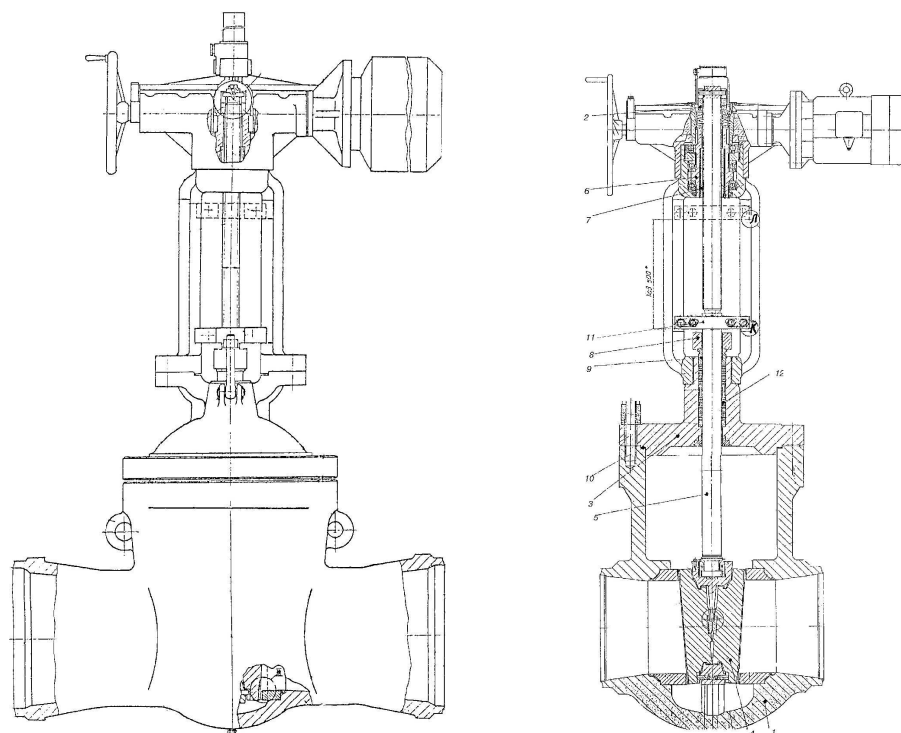


Рисунок 1.8 - Головна водяна засувка. Загальний вигляд (блоки 1, 2,3) -
Конструкція (блок 4)

1-корпус; 2-опорний вузол; 3-кришка; 4-тарілка; 5-шпindelь; 6-втулка шпінделя; 7-втулка різьбова; 8-планка нажимна; 9-грундбукса; 10-прокладка зубчата; 11-ползун; 12-набивка сальникова

Розрахунковий тиск.....	86 кгс/см ² .
Розрахункова температура.....	300°C.
Коефіцієнт гідравлічного опору	0,61.
Номінальний момент на втулці шпінделя.....	280 Нм.
Передавальне число електроприводу.....	35.
Час відкриття (закриття) засувки електроприводом	40 с
уручну маховиком	до 40 хв.

Байпас ГПЗ

На байпасі ГПЗ встановлена засувка Ду 100 Чзем, тип 1010-100-Э-02.

Розрахунковий тиск.....	120 кгс/см ² .
Розрахункова температура.....	250 ° С.

Пробний тиск гідровипробувань	180 кгс/см ² .
Коефіцієнт опору засувки	0,32.
Момент на вихідному валу приводу	280 Нм.
Частота обертання вихідного валу	19,2 об/хв.
Передавальне число електроприводу	68.
Час закриття (відкриття) засувки електроприводом	65 сек.

Разом із засувкою на байпасе ГПЗ змонтований дросельний клапан Ду 150 мм Чзем типу 1097-150-Э-01 з вбудованим електроприводом, основні технічні характеристики якого:

максимальний момент	430 Нм;
частота обертання вихідного валу	20,6 об/хв;
передавальне число	63;
ККД	0,45;
номінальний режим роботи	повторно короткочасний 110 циклов/год.

Для дросельного клапана:

розрахунковий тиск	86 кгс/см ² ;
розрахункова температура	300 ° С;
що максимальний крутить момент на втулці шпінделя	291 Нм;
час повного відкриття (закриття) електроприводом	39 с.

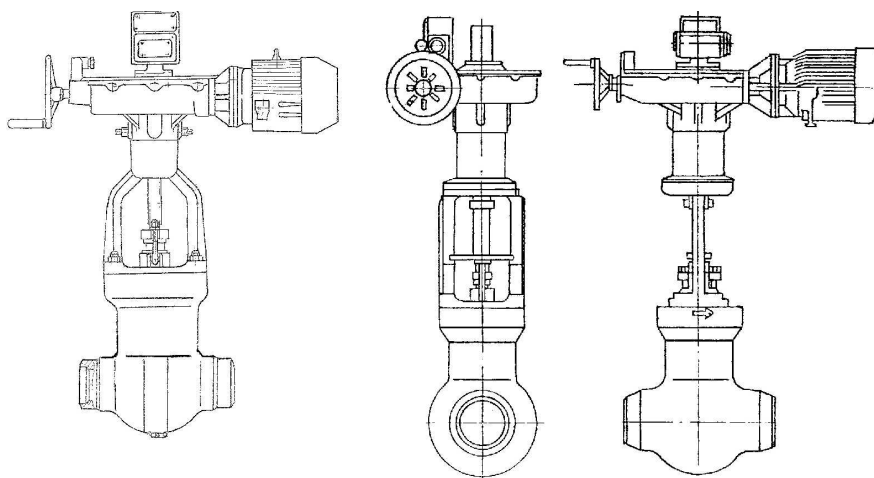


Рисунок 1.9 - Засувка байпаса ГПЗ і дросельний клапан байпаса ГПЗ.

Загальний вигляд

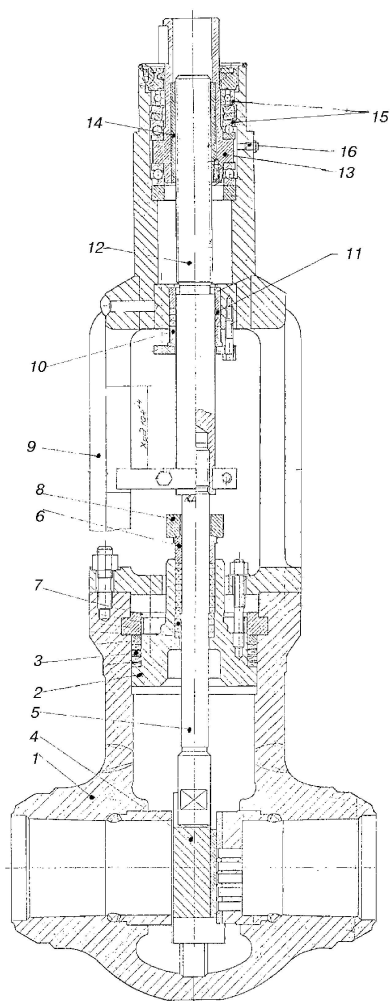


Рисунок 1.10 - Конструкція клапана байпаса ГПЗ

1-корпус; 2-крышка; 3-набивка сальникова; 4-шибер; 5-шток; 6-грундбукса; 7-набивка сальникова; 8-планка нажимна; 9-бугель в зборі; 10-грундбукса; 11-набивка сальникова; 12-шпindel; 13-втулка шпінделя; 14-втулка різьбова; 15-шарикоподшипники; 16-масльонка

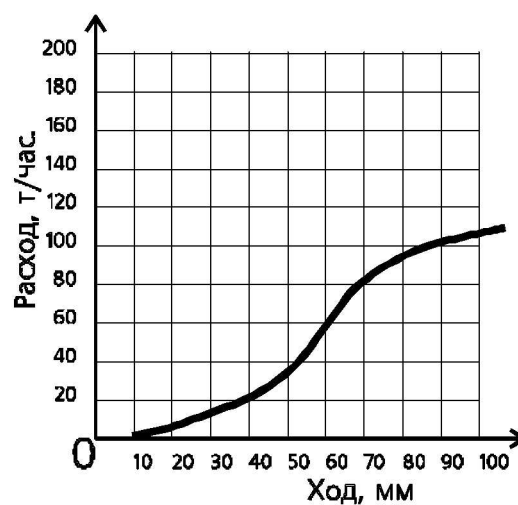


Рисунок 1.11 - Залежність "хід-витрата" клапана байпаса ГПЗ

1.4 Автоматизована система керування засувками

Розробка автоматизованої системи керування засувками станції поділиться на дві частини. Перша частина керування основними засувками станції. Друга частина керування допоміжними засувками.

Допоміжна система засувки необхідна для забезпечення захисту роботи насосної системи при роботі якої недопустимо подачі тиску у зворотньому напрям-

ку до насосу. Так як в системі присутні режими роботи при яких задіяні не всі насоси то в цьому випадку тиск у зворотньому напрямку буде прикладний до тих насосів які не працюють в даний момент. Для виключення такої ситуації насоси доповнюються системою клапанів яка дозволяє перекривати трубопровід при зупинці того чи іншого насосу.

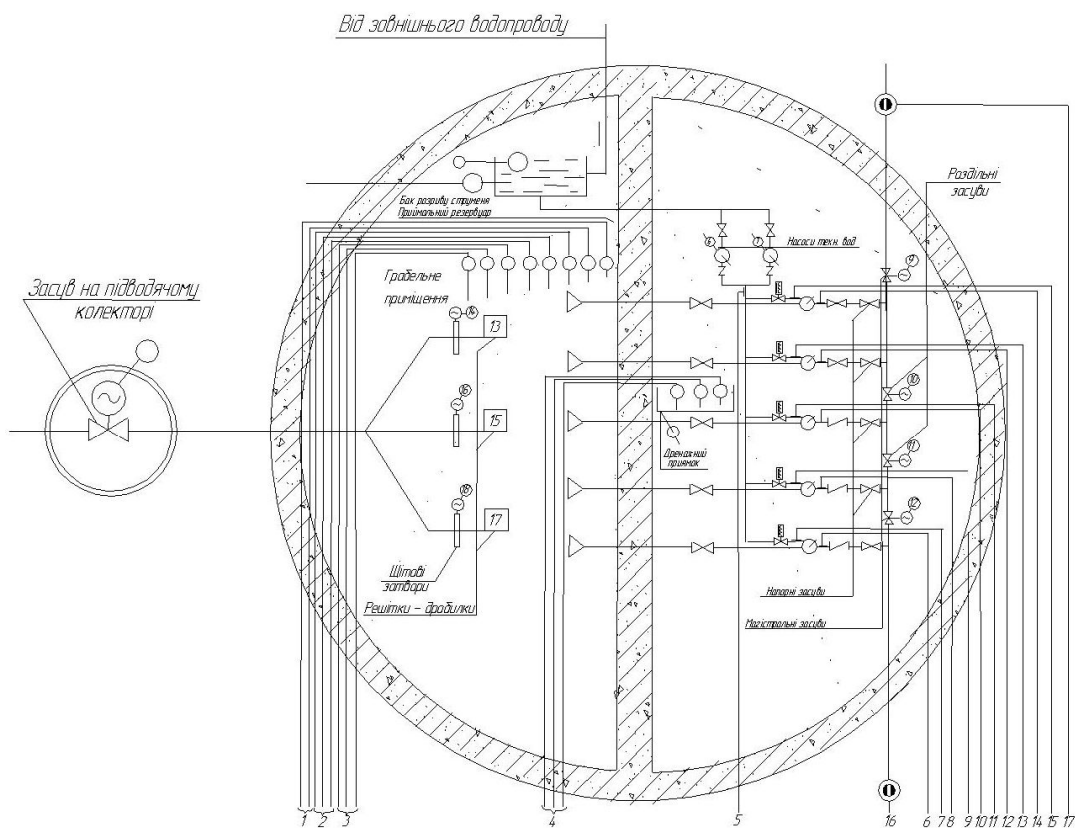


Рисунок 1.12 - Загальна схема станції

Розташування головної засувки приведено на рисунку 1.12. Головна засувка забезпечує регулювання вхідного потоку води в залежності від продуктивності роботи насосів, запобігає затопленню станції в надзвичайних випадках. Засувка повинна забезпечувати як швидкісне перекриття водогону так і здійснювати дроселювання вхідного потоку.

Таким чином система засувки повинна мати дворівневу систему керування, перший рівень керування підсистемами і зв'язок з головною системою керування станцій, другий рівень повинен здійснювати безпосереднє керування контролерами та приводами автоматизованих засувки, здійснювати зв'язок між системами

2 Опис комплектного електропривода «Кемток»

2.1 Загальні відомості

Електроприводи типу «Кемток» виробництва НРБ призначені для використання в системах автоматизованого керування. У комплект привода входять:

- двох координатний тиристорний перетворювач типу 4ЕВ23;
- два високомоментні електродвигуни постійного струму типу МВН;
- силовий трансформатор, спільний для обох координат;
- зрівняльні дроселі;
- блок динамічного гальмування.

Перетворювач являє собою двох координатний модуль, виконаний по блоковій конструкції, що забезпечує вільний доступ до більшості елементів схеми.

Обидва перетворювачі виконані за двоконтурною схемою підлеглого регулювання з пропорційно-інтегральними регуляторами швидкості і струму.

Управління перетворювачами — погоджене нелінійне на низьких частотах обертання і роздільне на високій частоті обертання. Передбачено нелінійне струмообмеження відповідно до комутаційних кривих двигунів і адаптивне регулювання коефіцієнта передачі регулятора швидкості. СІФУ побудовано по вертикальному принципі з лінійною опорною напругою і можливістю регулювання початкового струму якоря.

Блок електронних захистів, загальний для обох координат, забезпечує зручну і безаварійну експлуатацію привода.

Блок-схема привода приведена на рисунку 2.1, де РС - регулятор швидкості; РТ - регулятор струму; АР - адаптивний регулятор; КЗ - коригувальна ланка; МТГ - схема виділення модуля напруги тахогенератора; ФП - функціональний перетворювач, ПЭ - граничний елемент, БНТО - блок нелінійного струмообмеження, Р - регулятор зрівняльного (початкового) струму; СІФУ - система імпульсно-фазового управління; ТП - тиристорний перетворювач; ТР — силовий трансформатор; Я — двигун, ТГ — тахогенератор; Sh — шунт; L — зрівняльні дроселі, OL — захист від тривалого перевантаження по струму; TG — захист від обриву лан-

цюга тахогенератора; CP — захист від неправильного підключення; RD — готовність; ON — сигнал «Робота» (Деблокування привода); БП — блок живлення. Приступимо до докладного опису принципової схеми привода.

2.2 Силова схема

Силовая схема (рисунок 2.2) виконана по реверсивної трєхпульсної протипаралельної схемі випрямлення зі зрівняльними дроселями.

Силовий трансформатор здійснює узгодження напруги електродвигуна з напругою живильної мережі і є загальним для обох силових схем випрямлення. З'єднання обмоток за схемою “Трикутник — зигзаг” виключає потік змушеного намагнічування і, як наслідок, дає економію в сталі.

Передбачено захисні RC-ланцюжки від комутаційних перенапруг.

Шунти В1 і В2 використовуються як датчики струму якоря в системі підлеглого регулювання.

Силові контактори КМ1 і КМ2 включення привода одночасно здійснюють динамічне гальмування при аварійному відключенні перетворювача.

2.3 Регулятор швидкості

Регулятор швидкості РС являє собою класичний Пі-регулятор і виконаний на операційному підсилювачі D51 (рисунок 2.3).

Регулятор має два входи:

1) X2/1, X2/2, X2/3 — для підключення сигналу, що задає, тзад.

У випадку запаювання перемичок М10 і МП забезпечується безпосереднє підключення $U_{\text{зад}}$ до регулятора швидкості.

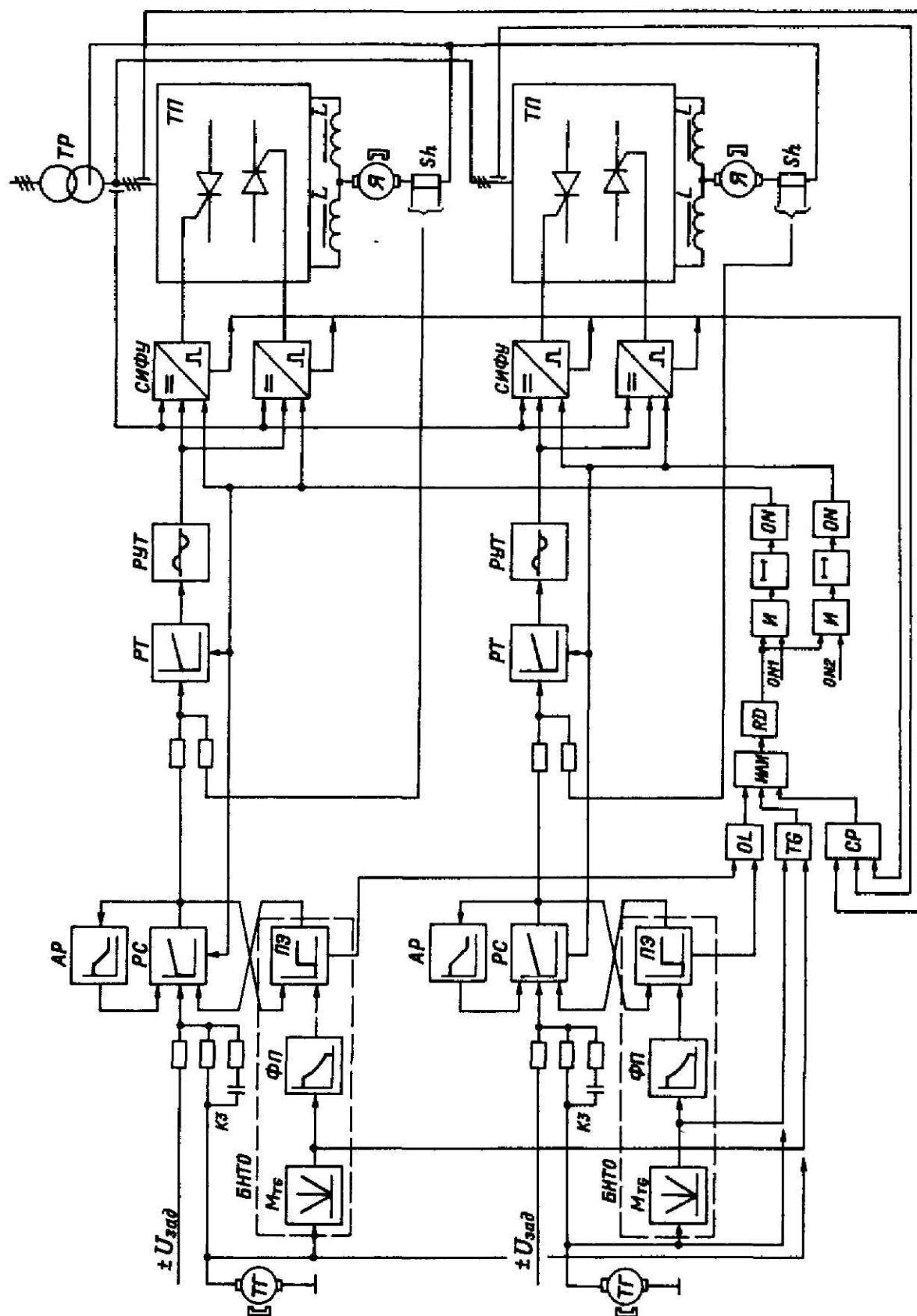


Рисунок 2.1 – Блок – схема привода “Кемток”

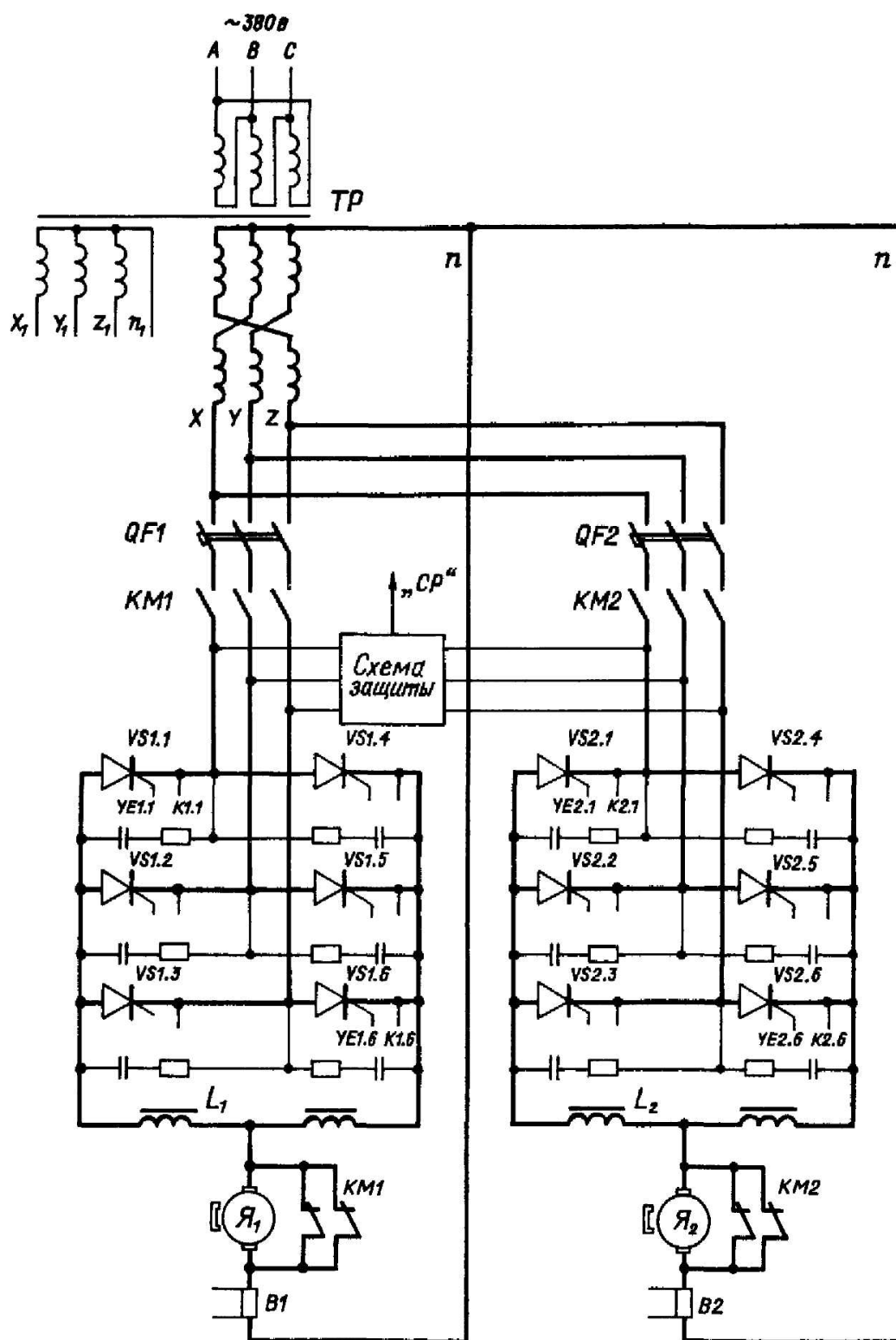


Рисунок 2.2 – Силовая схема

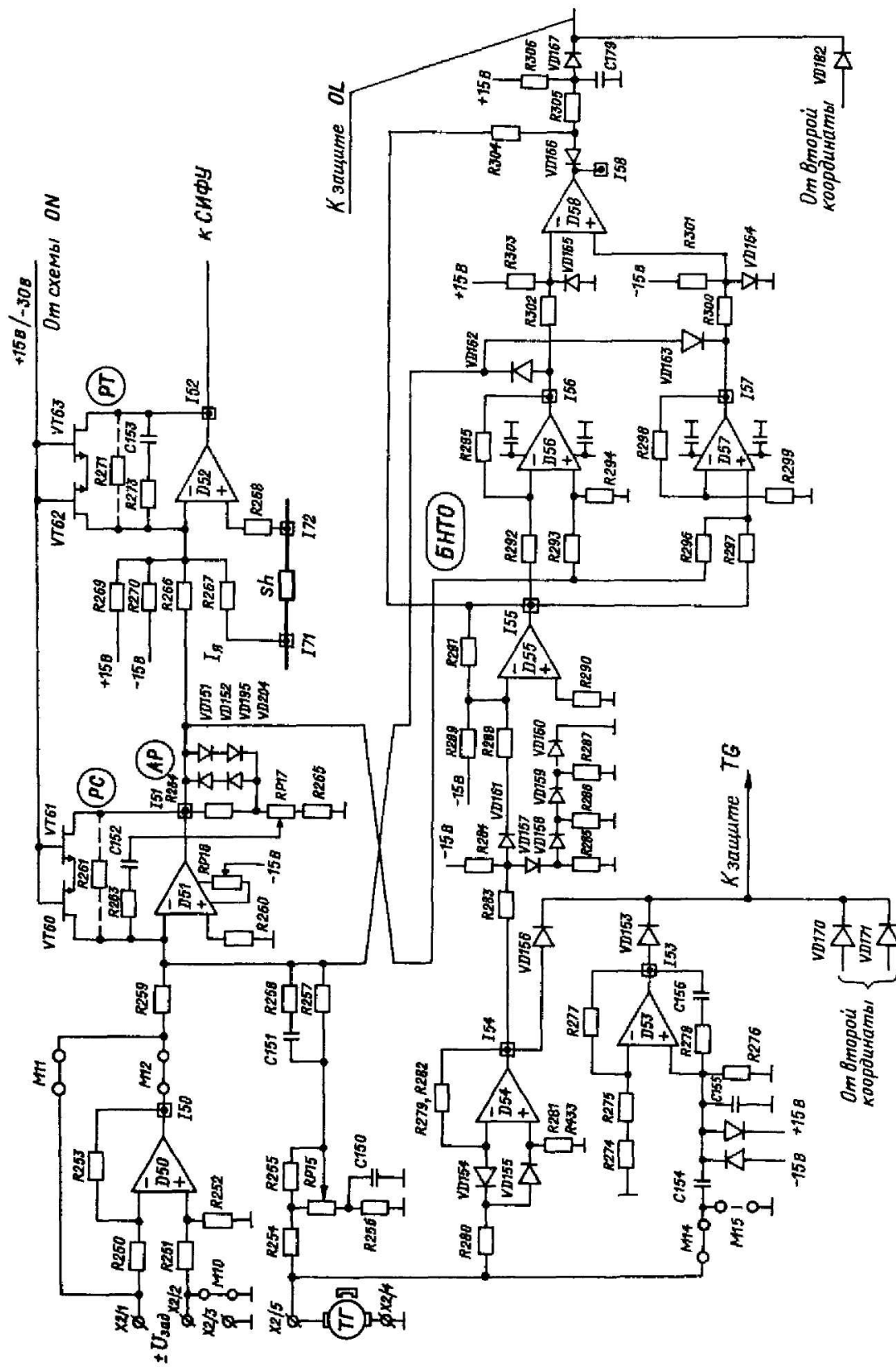


Рисунок 2.3 – Принципова схема регулятора швидкості, регуляторів струму та нелінійного струмообмеження

При відключених M10 і M1 і запаяній перемичці M12 здійснюється диференціальне включення $U_{\text{зад}}$ через ОП D50.

Природно, можливо й асиметричне включення напруги, що задає, з використанням проміжного ОП D50.

2) X2/5, X2/4 — для підключення тахогенератора, тобто сигналу зворотного зв'язку по частоті обертання.

Передатна функція регулятора визначається наступною формулою:

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = -K_{\text{рег}} \frac{1 + pT_{\text{ос}}}{pT_{\text{н}}}$$

де $K_{\text{рег}} = \frac{R264 + RP17 + R265}{RP17 + R265}$ — регульоване потенціометром RP17 доданок

коефіцієнта передачі підсилювача (RP17*-опір частини потенціометра RP17 від движка до нижнього за схемою виводу); $T_{\text{ос}} = R263 \cdot C152$ — постійна часу ланцюга зворотного зв'язку; $T_{\text{н}} = R257 \cdot C152$ — постійна часу ланцюга інтегрування.

Виконавши перетворення передатної функції, можна виділити нерегульовану частину коефіцієнта пропорційного посилення:

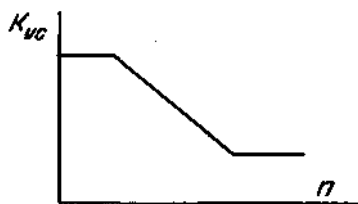
$$W(p) = -K_0 K_{\text{рег}} \frac{1 + pT_{\text{ос}}}{pT_{\text{ос}}}$$

де $K = R263/R257$ — постійна частина коефіцієнта передачі, що не залежить від положення движка потенціометра RP17.

Настроювання перехідного процесу по частоті обертання виробляється шляхом зміни коефіцієнта передачі регулятора. Зміна величини постійних часу $T_{\text{ос}}$ і $T_{\text{н}}$ робити не рекомендується, тому що вони підібрані на заводі-виготовлювачі виходячи з фактичної електромеханічної постійної часу електродвигуна і приведення навантаження $T_{\text{э}}$ й оптимальності перехідного процесу.

Резистор R261 є налагоджувальним. Його запаювання робить РС пропорційним, що досить зручно при первісному пуску привода.

Балансування підсилювача здійснюється потенціометром RP16 у ланцюзі живлення негативної полярності.

Рисунок 2.4 – Залежність $K_{yc}=i(n)$

Ключем на польових транзисторах VT60 і VT61, керованим від схеми захисту, виконується блокування регулятора.

У ланцюзі зворотного зв'язку по частоті обертання передбачений коригувальний ланцюжок на елементах R258, 3151, що здійснює диференціювання сигналів тахогенератора.

Цим досягається зменшення величини перерегулювання в кривій перехідного процесів.

Регулювання максимальної частоти обертання електродвигуна здійснюється зміною глибини зворотного зв'язку потенціометром RP15. При недостатності глибини регулювання варто змінити величину резистора R254.

Відмінною рисою регулятора швидкості електропривода «Кемок» є наявність адаптивного регулювання коефіцієнта передачі у функції частоти обертання (рисунок 2.1). Адаптація здійснюється за рахунок нелінійності характеристик діодів VD151, VD195, VD152 і VD204, включених паралельно резисторові R264 у ланцюзі регулювання коефіцієнта передачі РС.

На малій частоті обертання вихідна напруга РС мало, діоди замкнені і не впливають на коефіцієнт пропорційного посилення регулятора, величина якого в середнім положенні потенціометра RP17 складає

$$K = K_0 K_{pez} = \frac{R263}{R257} \frac{R264 + RP17 + R265}{RP17 + R265}$$

При великій частоті обертання, у залежності від полярності вихідної напруги РС, цілком відкривається одна з пар діодів VD151, VD195 або VD152, VD204, і шунтує резистор R264. Приймаючи опір пари діодів у прямому напрямку рівним 3 кОм, одержимо

$$K \simeq 4,53 \frac{3+10+2,7}{5+2,7} = 4,53 \cdot 2 \approx 9.$$

На середніх частотах обертання відбувається плавна зміна величини опору діодних пар і, отже, коефіцієнта передачі.

Введення адаптації дозволяє компенсувати нелінійність вихідної характеристики тиристорного перетворювача, забезпечуючи високу якість перехідних процесів у всій зоні регулювання частоти обертання.

2.4 Регулятор струму

Регулятор струму РТ виконаний у виді пропорційно-інтегрального регулятора на ОП D52 (рисунок 3.3).

Вхідним сигналом РТ, тобто завданням на струм, є вихідна напруга регулятора швидкості. Сигнал зворотного зв'язку по струму двигуна знімається із шунта, включеного в ланцюзі якоря двигуна, і подається на РТ через резистор R267.

У схемі регулятора струму не передбачено ніяких регулювань, тому що в силу комплектності привода його настроювання на конкретний електродвигун виробляється на заводі-виготовлювачі.

Постійна часу ланцюга зворотного зв'язку РТ $T_{oc} = R273 \cdot C153$ компенсує електромагнітну постійну часу якорного ланцюга.

Запаюванням налагоджувального резистора R271 регулятор можна зробити пропорційним.

Ключ на польових транзисторах VT62 і VT63 призначений для блокування регулятора.

При необхідності підключенням резисторів R269 або R270 можна задати початкове значення струму якоря при зупиненому двигуні, тобто створити початковий момент, наприклад, що утримує вертикальні координати від падіння.

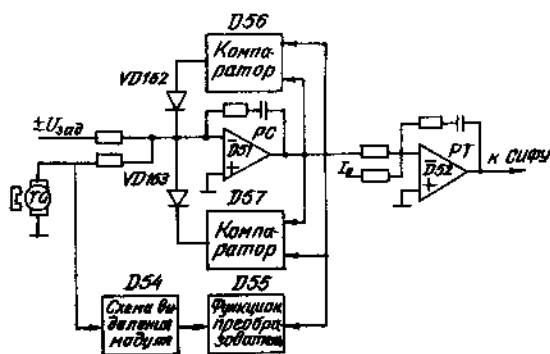
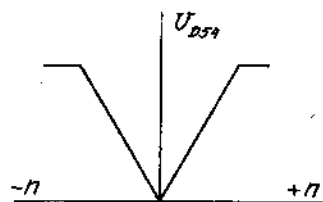


Рисунок 2.5 – Блок-схема БНТО

Рисунок 2.6 – $U_{MTT}=f(n)$

Вихідна напруга РТ є керуюча для системи імпульсно-фазового керування.

2.5 Блок нелінійного струмообмеження БНТО

Призначений для обмеження гранично припустимого струму якоря у функції частоти обертання і відповідно до комутаційної кривої двигуна .

Принцип роботи БНТО пояснюється блок-схемою рисунок 2.5.

Регулятор швидкості РС охоплений двома ланцюгами зворотного зв'язку, виконаними на ОУ D56 і D57, на входи яких подаються напруга виходу t/p_c і напруга функціонального перетворювача $U_{фп}$, виконаного на ОП D55.

Вихідна напруга функціонального перетворювача є функцією частоти обертання двигуна, причому форма кривій $U_{фп} = f(n)$ копіює комутаційну криву електродвигуна.

Якщо $U_{pc} < U_{фп}$, то вихід ланцюгів зворотного зв'язку має полярність, що замикає діоди VD162 і VD163, і струмообмеження не працює.

При $U_{pc} > U_{фп}$ відкривається один з діодів — VD162 або VD163 — у залежності від напрямку обертання, шунтую вхід регулятора швидкості. Унаслідок цього зменшується напруга на виході РС, тобто завдання для регулятора струму РТ, і відбувається обмеження величини струму до припустимого на даній частоті обертання значення.

Принципова схема БНТО приведена на рисунку 2.2.

Операційний підсилювач D54 призначений для виділення модуля напруги тахогенератора $U_{\text{тг}}$, напруга на його виході завжди позитивно і пропорційно частоті обертання (рисунок 2.5).

Коефіцієнт передачі схеми виділення модуля однаковий для обох полярностей напруги тахогенератора і складає 0,25.

Для позитивної полярності (діод VD154 закритий, діод VD155 відкритий):

$$K_{+} = \frac{R_{281}}{R_{280} + R_{281}}$$

Для негативної полярності (діод VD154 відкритий, діод VD155 закритий):

$$K_{-} = \frac{R_{282}}{R_{280}}$$

Напруга модуля 1 (ЛГ1 подається на вхід схеми функціонального перетворювача. При нульовій частоті обертання під дією негативної напруги зсуву, подаваного через резистор R284, діоди VD161 і VD157 замкнені і напруга на вхід функціонального перетворювача не надходить.

Величина $U_{\text{фп}}$ визначається зсувом, подаваним на вхід, що інвертує, через резистор R289, і дорівнює:

$$U_{\text{фп}} = -(U_{\text{см}} \frac{R_{291}}{R_{289}})$$

У крапці А при невеликій частоті обертання відкривається діод VD161 і напруга на виході починає визначатися наступним рівнянням:

$$U_{\text{фп}} = -(U_{\text{см}} \frac{R_{291}}{R_{289}} + U_{\text{вх.фп}} \frac{R_{291}}{R_{289}})$$

де $U_{\text{вх.фп}}$ — вхідна напруга функціонального перетворювача в крапці загальних анодів вентилів VD161 і VD157.

Оскільки опір резистора $R_{288} = 30$ кому, тобто значно менше, ніж опір R289, та вихідна напруга з ростом $U_{\text{вх.фп}}$ різко падає.

Величина $U_{\text{вх.фп}}$ не є пропорційної напрузі модуля тахогенератора $U_{\text{тг}}$, а визначається коефіцієнтом передачі адаптивного дільника напруги, утвореного резистором R283 і ланцюжком VD157, R285, VD158, R286, VD159, R287 і VD160. В

міру росту частоти обертання послідовно відкриваються діоди VD157...VD160, зменшуючи величину напруги $U_{\text{вх.ФП}}$.

Темп зменшення вихідної напруги ФП сповільнюється, що формує комутаційну криву $U_{\text{ФП}} = f(n)$, показану на рисунку 2.6.

В ідеальному випадку це крива постійної потужності, реально — на високій частоті обертання потрібно трохи зменшити навантаження, а на низькою її можна збільшити.

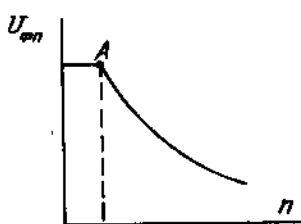


Рисунок 2.7 – Залежність $U_{\text{ФП}} = f(n)$

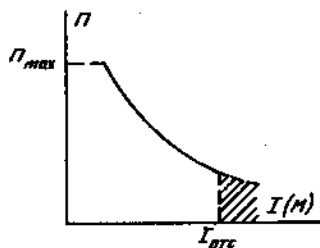


Рисунок 2.8 – Залежність $I_{\text{доп}} = F(n)$

Заштрихована за струмом відсічення $T_{\text{отс}}$ зона не використовується, тому що на практиці максимальний струм досягається в гіршому випадку на 3-м пульсі і при цьому двигун досягає такої частоти обертання, що вже потрібно обмежувати струм. Максимальна величина струму відсічення звичайно $I_{\text{отс}} = (4...6) I_{\text{ном}}$.

Здатність двигуна витримувати великі перевантаження — до $(10...12) I_{\text{ном}}$ — говорить лише про загальну якість двигунів, їхньої захищеності від розмагнічування і не може бути реалізована на практиці.

Робота компараторів D56 і D57 описується наступними рівняннями і пояснень не вимагає:

$$U_{D56} = \frac{R294}{R292} \frac{R292 + R295}{R293 + R294} U_{PC} - \frac{R295}{R292} U_{\text{ФП}}$$

$$U_{D57} = \frac{R297}{R299} \frac{R299 + R298}{R297 + R296} U_{PC} + \frac{R295}{R292} \frac{R296}{R299} \frac{R299 + R298}{R297 + R296} U_{\text{ФП}}$$

або, підставляючи чисельні значення,

$$U_{D56} = U_{PC} - U_{\text{ФП}} \quad \text{і} \quad U_{D57} = U_{PC} + U_{\text{ФП}}$$

т. к. всі опори резисторів R292...R299 рівні 10 кому.

При роботі струмообмеження компаратор D58 переходить у стан позитивного насичення. Якщо час роботи БНТО перевищить величину уставки таймера на конденсаторі C179, то виробляється сигнал захисту перетворювача від перевантаження.

Резистор R304 утворить додатковий ланцюг заряду конденсатора C179, чим досягається визначена адаптація роботи захисту. В міру зниження частоти обертання, наприклад, при роботі на упор заряд конденсатора здійснюється швидше.

Канал регуляторів другого перетворювача працює аналогічно.

2.6 Система імпульсно-фазового управління (СІФУ)

Призначена для формування і синхронізації подачі управляючих імпульсів на силові тиристори.

СІФУ виконане за вертикальним принципом і складається з трьох однакових каналів для кожної з фаз живлення (рисунок 2.9) Характерною особливістю структури побудови СІФУ є наявність каналу, загального для обох перетворювачів генератора пилкоподібної напруги.

Діаграма роботи СІФУ приведена на рисунку 2.10.

Напруга синхронізації U_x (U_y , U_z) подається на входи каналів СІФУ з ділників силової напруги, утворених резисторами R20 і R5, R25 і R6, R30 і R7 відповідно (рисунок 2.15). Це напруга ланцюжками RP1, C31 затримується приблизно на 32 електричних градуса (1,8 мсек) і поступає на інверсний вхід компаратора D3 і інверсний вхід компаратора D4 (рисунок 2.11).

Примітка. Тут і далі розглядається тільки один канал першого перетворювача СІФУ.

За рахунок подачі на протилежні входи компараторів різнополярних напруг зсуву, регульованих потенціометром RP7, взаємоінверсні вихідні напруги D3 і D4 перекривають одна одну. Схема «И», виконана на діодах VD27 і VD28, формує короткий негативний імпульс, який запускає чекаючий генератор пилкоподібної напруги, виконаний на ОП D5 і транзисторі VT1. Амплітуда пилкоподібної напруги регулюється потенціометром RP2.

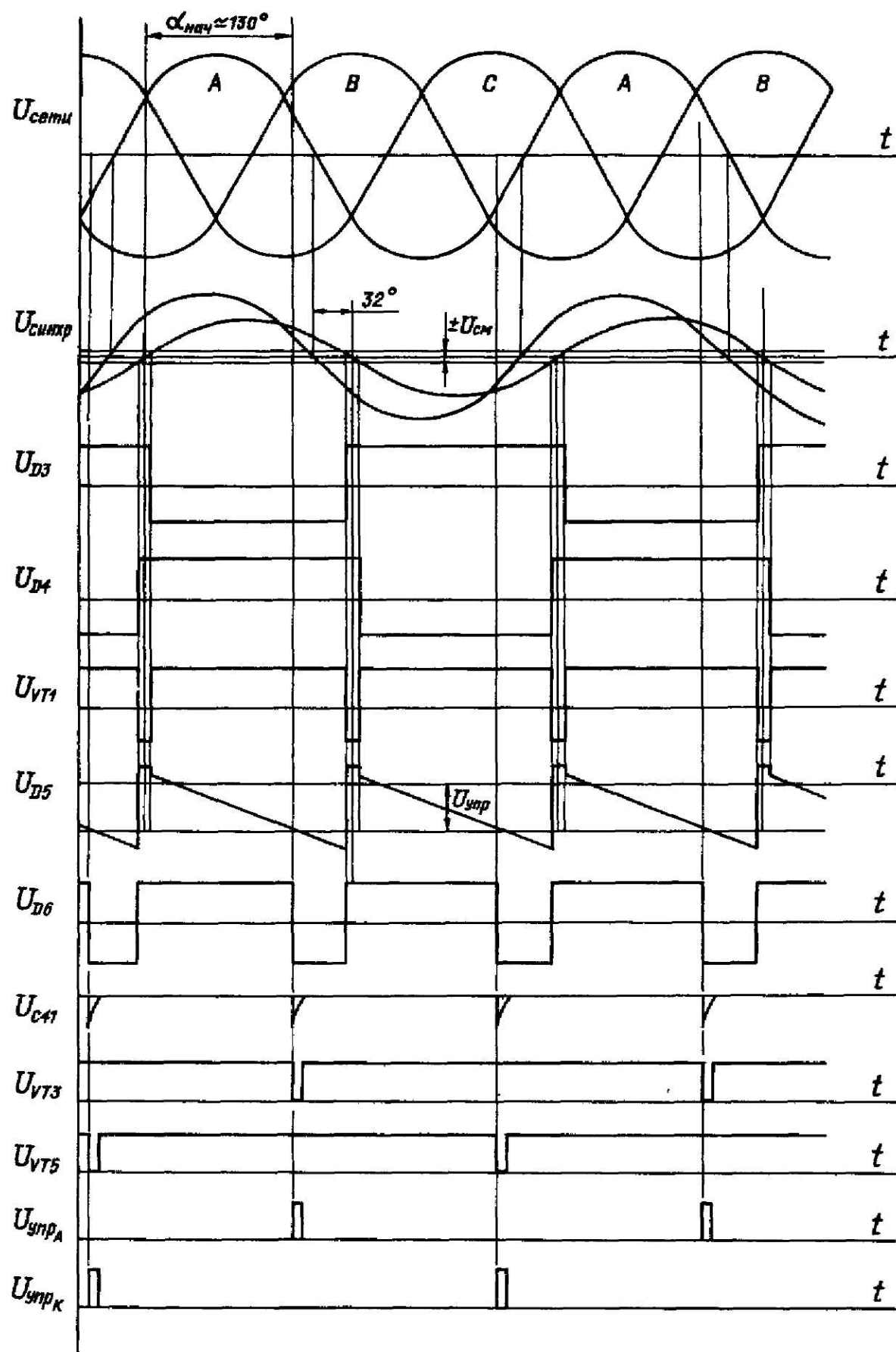


Рисунок 2.10. – Діаграма роботи СІФУ

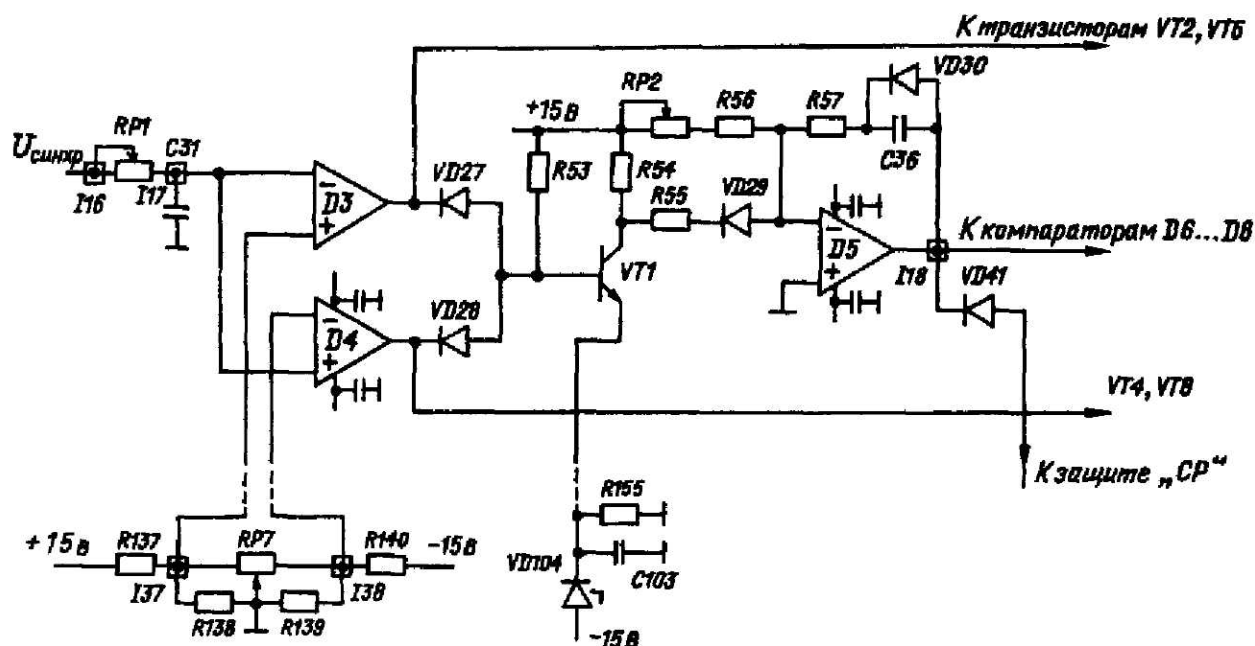


Рисунок 2.11 – Схема компараторів і генератора пилкоподібної напруги

Резистор R57 і діод VD30 формують позитивний імпульс пилкоподібної напруги.

На компараторах D6 і D7 здійснюється порівняння величини пилкоподібної напруги з різнополярною управляючою напругою, що поступає з ОП D25 (анодна група) і D24 (катодна група). У момент рівності цієї напруги компаратори D6 і D7 переходять з позитивного стану насичення в негативне. Цей перепад диференціюється конденсаторами C41 і C44, негативний імпульс на виході яких відкриває транзистор VT2 або VT4 (той, у якого на другому діодному вході VD32 або VD36 негативна напруга з виходу компаратора D3 або D4).

Транзистори VT2 і VT4 відкривають силові підсилювачі VT3 або VT5 відповідно, навантаженням яких є імпульсні трансформатори управління тиристорами (рисунок 2.12). Передбачено блокування імпульсів СІФУ від схеми захисту через транзистор VT28.

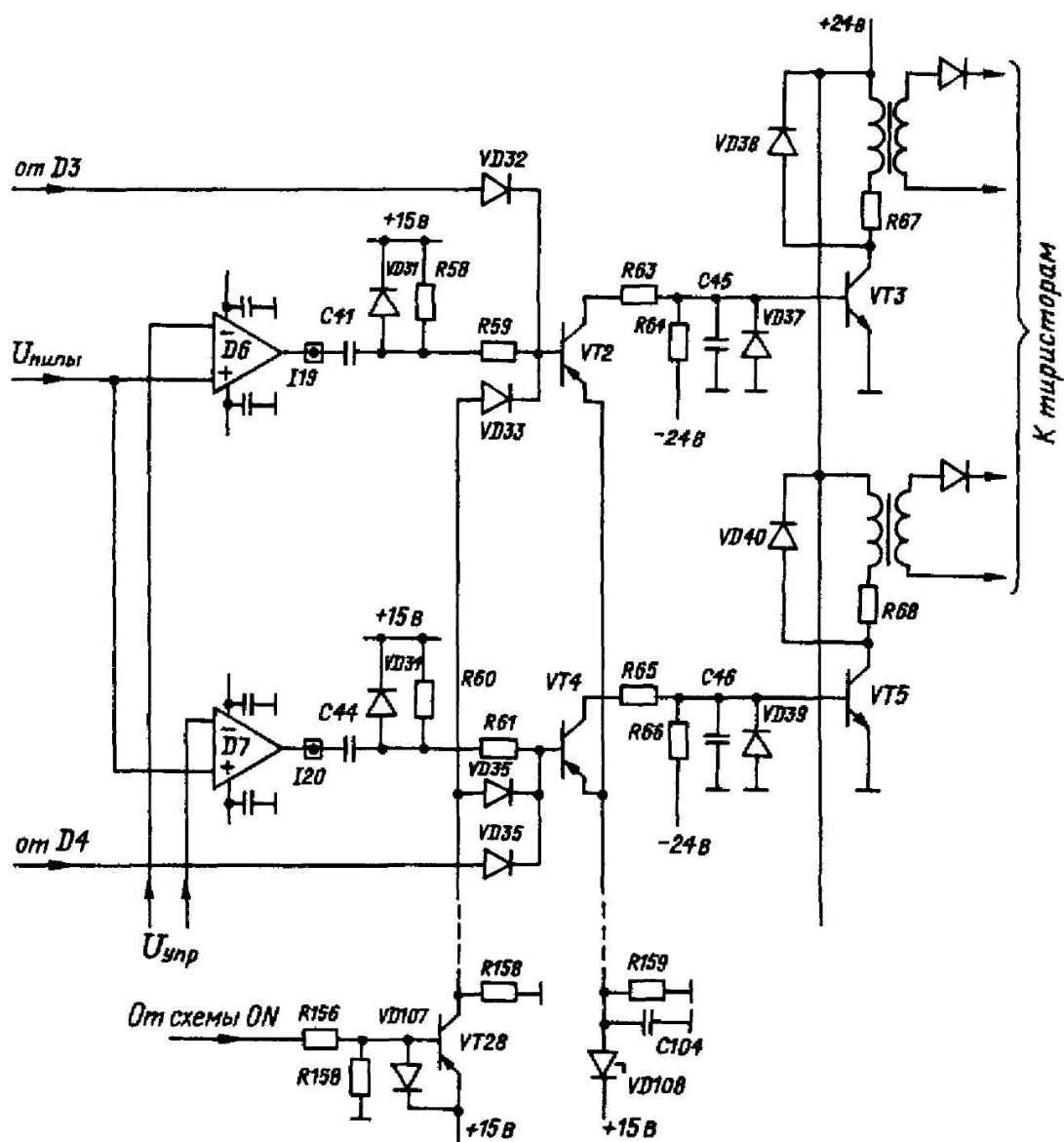


Рисунок 2.12 – Схема вихідних каскадів СІФУ

Розділення каналів управління тиристорами анодної і катодної груп здійснюється ОП D25 і D24 (рисунок 2.13), вхідним сигналом яких є вихідна напруга регулятора струму РТ. На входах ОП D25 і D24 відбувається підсумовування напруги зсуву позитивної полярності, регульованого потенціометром RP8, і напруги $U_{РТ}$, причому за рахунок включення діодних ланцюгів VD103, R151 і VD102, R146 забезпечується різний темп зсуву імпульсів, що управляють, в групах тиристорів.

При позитивній напрузі, що управляє $U_{РТ}$ вихідна напруга ОП D25 і D24, а також компараторів D6 і D7 визначаються таким чином:

$$U_{D25} = -U_{PT} - U_{cb}; U_{D24} = +0.5U_{PT} - U_{cm}$$

$$U_{D6} = K_0(-U_{znn} + U_{PT} + U_{cm}); U_{D7} = K_0(-U_{znn} + 0.5U_{PT} + U_{cm})$$

Аналогічно при негативній напрузі, що управляє, — U_{PT} :

$$U_{D25} = +0.5U_{PT} - U_{cb}; U_{D24} = -U_{PT} - U_{cm}$$

$$U_{D6} = K_0(-U_{znn} - 0.5U_{PT} + U_{cm}); U_{D7} = K_0(-U_{znn} + U_{PT} + U_{cm})$$

З виразів видно, що зсув імпульсів інверторної групи, що управляють, управо відбувається швидше, ніж забезпечується зменшення зрівняльних струмів і перехід від узгодженого управління до роздільного за рахунок «зриву» генерації імпульсів, що управляють, при $|U_{PT} + U_{cm}| > |U_{ГПН}|$.

Регулюючи величину зсуву на входах ОП D25 і D24, можна встановити бажану величину початкового струму якоря. Стандартне регулювання передбачає $\alpha_{нач} = 130^\circ$.

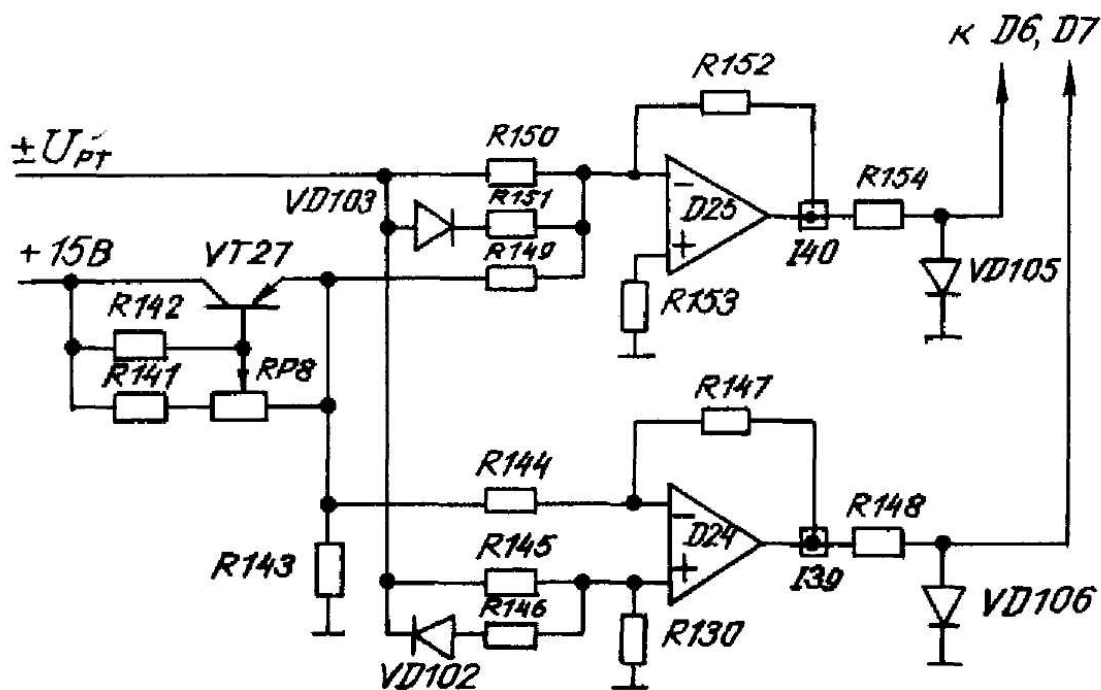


Рисунок 2.13. – Схеми керування каналами СІФУ

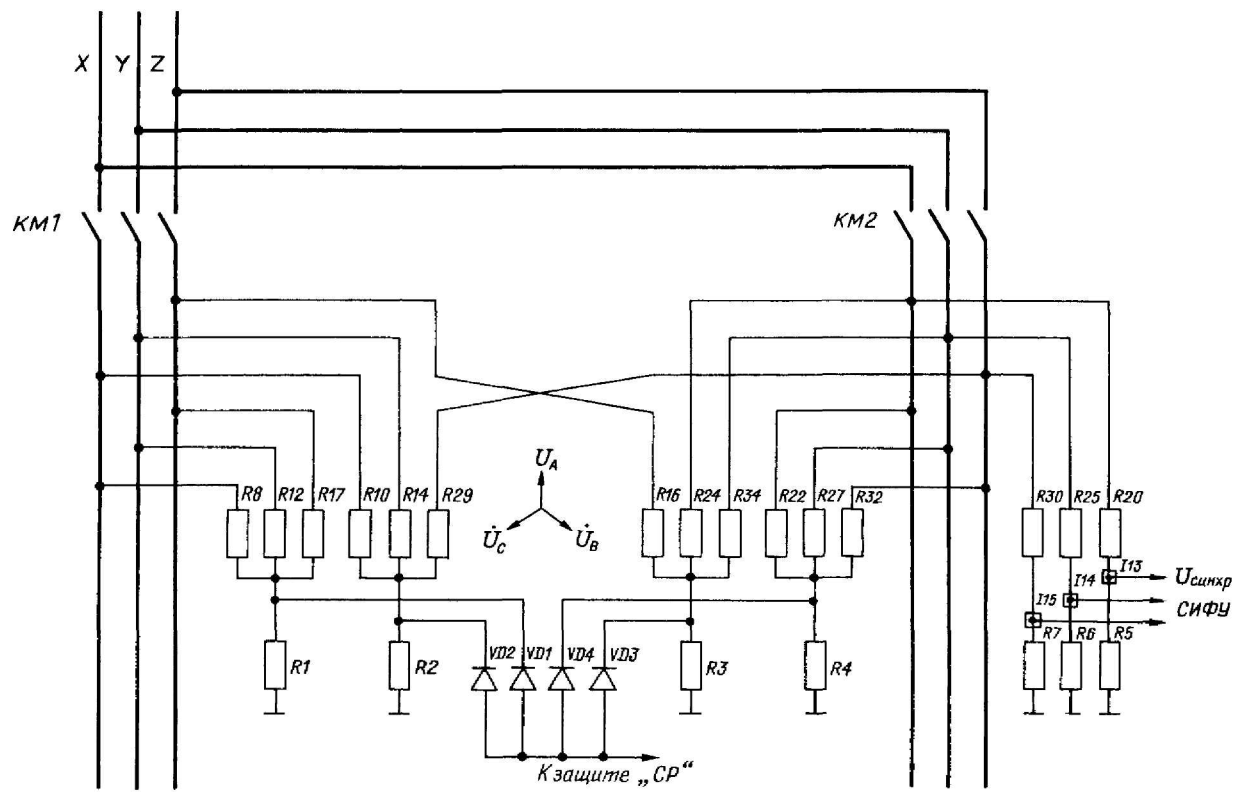


Рисунок 2.14. – Схема виділення управляючого сигналу захисту СР

3 Розрахунок і аналіз автоматичної системи керування приводу головної засувки

3.1 Постановка задачі модернізації

Метою даного кваліфікаційної роботи є аналіз та модернізація приводів головної дросельної засувки, на насосній станції водопостачання, шляхом вилучення нерегульованого асинхронного електроприводу та встановлення регульований високомоментний електропривод постійного струму. Така модернізація дозволить отримати наступні переваги в порівнянні з існуючим:

1. Можливість плавного регулювання величини зазору, що створюється засувкою, що дає можливість виключити використання послідовно включених дроселів.
2. Підвищується надійність електроприводу.
3. Зменшує час повного закриття засувки.
4. Створюється можливість централізованого автоматичного управління засувками за допомогою ЕОМ.

3.2 Вибір двигуна і комплектного електроприводу

Первинним етапом розрахунку приводу є вибір виконавчого двигуна. Від правильного вибору двигуна залежать забезпечення всіх технологічних режимів обробки і необхідних динамічних характеристик, а також конструкція механічної частини приводу.

У приводі головної водяної засувки двигун має наступні параметри:

$$M_e = 8 \text{ Н*м};$$

$$n = 1000 \text{ хв}^{-1};$$

Замість існуючого двигуна встановлюємо високомоментний двигун, який вибираємо за умовами:

$$M_{\text{дв.ном}} > M_e = 8 \text{ Н*м} - \text{номінальний момент двигуна};$$

$n_{\max} = 1000$ об/хв - максимальна частота обертання двигуна;

Вибираємо двигун ПБВ100L з наступними параметрами:

Номинальний момент $M_H = 10,5 \text{ Н*м};$

Максимальна частота обертання $n_{\max} = 2000$ об/хв;

Номинальна частота обертання $n_H = 1000$ об/хв;

Номинальна напруга $U_H = 56 \text{ В};$

Опір якоря при 15°З $R_{\text{я}} = 0,139 \text{ Ом};$

Індуктивність якоря $L_{\text{я}} = 0,8 \text{ мГн};$

Момент інерції якоря $J_{\text{я}} = 0,013 \text{ кг*м}^2;$

Постійна ЕДС $C_{\text{дв}} = 0,044 \text{ В/(об/хв)}$

Максимальна робоча частота обертання: $n_{p.\max} = 2000$ об/хв;

Мінімальна робоча частота обертання: $n_{p.\min} = 1000$ об/хв;

Сумарний момент інерції приводу:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{сум}} + J_{\text{я}} = 0.05 + 0.012 = 0,062 \text{ кг*м}^2;$$

Вибір комплектного електроприводу:

Вибір комплектного електроприводу для приводу проводиться по :

1) $P_{\text{нп}}$ - номінальній потужності використовуваного двигуна;

2) $U_{\text{нп}}$ – номінальній напрузі електроприводу

$$U_{\text{нп}} \geq U_{\text{мах.эд}},$$

де $U_{\text{мах.эд}}$ – максимальна напруга на двигуні, необхідне для забезпечення $n_{\text{мах}}$ при швидкому переміщенні робочого органу. Для двигунів з незалежним збудженням $U_{\text{мах}}$ визначуваний із співвідношення :

$$U_{\text{мах.эд}} / n_{\text{мах}} = U_H / n_H$$

$$U_{\text{мах.эд}} = \frac{n_{\text{мах}} \cdot U_H}{n_H} \quad U_{\text{мах.эд}} = 112 \text{ В}$$

Приймаємо $U_{\text{нп}} = U_{\text{мах.эд}} = 112 \text{ В}.$

Номинальний струм електроприводу вибирається з урахуванням номінального струму двигуна:

$$I_{\text{нп}} \geq 2 \cdot I_{\text{н}} \quad I_{\text{нп}} := 2 \cdot I_{\text{н}} \quad I_{\text{нп}} = 48 \text{ A}$$

Оберемо комплектний електропривод «Кемток».

3.3 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача

До розрахункових параметрів тиристорного перетворювача відносяться :

$R_{\text{эп}}$ – еквівалентний внутрішній опір ТП;

$L_{\text{эп}}$ – еквівалентна індуктивність ТП;

$E_{\text{оп}}$ – ЕДС ТП при повністю відкритих тиристорах ($\alpha=0$).

Приймаємо $E_{1\phi} = 220 \text{ В}$, отже $E_{2\phi}$ знаходимо по $E_{\text{оп}} = 1,1 U_{\text{нп}} = 123 \text{ В}$.

$$E_{2\phi} := \frac{E_{\text{оп}}}{1.17} \quad E_{2\phi} = 105.299 \text{ В}$$

$$k_{\text{тр}} := \frac{E_{2\phi}}{E_{1\phi}} \quad k_{\text{тр}} = 0.479$$

Потужність трансформатора

$$P_{\text{н.оп}} := U_{\text{нп}} \cdot I_{\text{нп}} \quad P_{\text{н.оп}} = 5376 \text{ Вт}$$

$$S_{\text{т}} := 1.46 P_{\text{н.оп}} \quad S_{\text{т}} = 7848.96 \text{ Вт}$$

Номінальні струми первинної і вторинної обмотки:

$$I_{1\text{н}} := \frac{S_{\text{т}}}{E_{1\phi}} \quad I_{1\text{н}} = 35.677 \text{ А}$$

$$I_{2\text{н}} := \frac{S_{\text{т}}}{E_{2\phi}} \quad I_{2\text{н}} = 74.54 \text{ А}$$

По струму вторинної обмотки і потужності вибираємо трансформатор ТСП-25/0.7-УХЛ4, дані трансформатора приведені нижче:

Напруга вентильної обмотки $U_{\text{в}} = 205 \text{ В}$

Струм вентильной обмотки $I_{\text{в}} = 82 \text{ А}$

Напруга перетворювача $U_{\text{пр}} = 230 \text{ В}$

Струм перетворювача	$I_{\text{ПР}} = 100 \text{ A}$
Потужність холостого ходу	$P_{\text{ХХ}} = 2100 \text{ Вт}$
Потужність короткого замикання	$P_{\text{КЗ}} = 1100 \text{ Вт}$
Напруга короткого замикання	$U_{\text{КЗ}} = 5,5\%$
Потужність трансформатора	$S_{\text{T}} = 29,1 \text{ кВт}$
Напруга вторинних обмоток	$U_{\text{C0}} = 380 \text{ В}$
Струм холостого ходу	$I_{\text{ХХ}} = 8\%$

Активний опір фаз трансформатора:

$$R' := \frac{P_{\text{КЗ}}}{3 \cdot I_{2\text{H}}^2} \quad R' = 0.066 \text{ Ом}$$

$$R'_{\phi} := \frac{R'}{2 \cdot k_{\text{тр}}^2} \quad R'_{\phi} = 0.144 \text{ Ом}$$

$$U := U_{\text{КЗ}} \cdot E_{1\phi} \quad U = 12.1 \text{ В}$$

Реактивний опір фази трансформатору:

$$Z := \frac{U}{I_{1\text{H}}} \quad Z = 0.339 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X := \sqrt{Z^2 - R_{\phi}^2} \quad X = 0.307 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{аф}} := \frac{X}{2 \cdot k_{\text{тр}}^2} \quad X_{\text{аф}} = 0.67 \text{ Ом}$$

Визначимо індуктивний опір живлячої ВП мережі, яке для трифазної нульової схеми рівне $X_{\text{а}} = X_{\text{аф}} = 0,67 \text{ Ом}$.

Еквівалентний внутрішній опір тиристорного перетворювача:

$$R_{\text{эп}} := \frac{m'}{2 \cdot \pi} \cdot X_{\text{а}} + R_{\phi} \quad R_{\text{эп}} = 0.784 \text{ Ом}$$

Номінальний струм тиристорного перетворювача відповідно до схеми:

$$I_{\text{пн}} := \frac{I_{2\text{н}}}{0.58} \quad I_{\text{пн}} = 128.517\text{А}$$

Еквівалентна індуктивність тиристорного перетворювача :

$$L_{\text{эп}} := \frac{X_{\text{а}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{с}}} \quad L_{\text{эп}} = 2.133\text{мГн}$$

де $f_{\text{с}}$ – частота мережі ($f_{\text{с}} = 50$ Гц).

3.4 Обмеження зрівняльних струмів

Зрівняльні реактори застосовуються для обмеження зрівняльних струмів при сумісному управлінні вентиляними групами. У комплектному ЕП застосовано сумісне управління. При узгодженому сумісному управлінні індуктивність струмообмежувальних реакторів визначається по формулі:

$$L_{\text{ур}} := K_{\text{д}} \cdot \frac{E_{\text{фм}}}{\omega_{\text{с}} \cdot I_{\text{ур}}} - L_{\text{эп}} \quad L_{\text{ур}} = 17.617\text{мГн}$$

де $\omega_{\text{с}} = 2\pi f_{\text{с}} = 314 \text{ с}^{-1}$; $E_{\text{фм}} = \sqrt{2}E_{2\phi}$ - амплітуда фазній ЕДС.

$$E_{\text{фм}} = 149 \text{ В};$$

Діюче значення зрівняльного струму: $I_{\text{ур}} = 0,2 I_{\text{н}} = 4,8 \text{ А}$.

Величину $L_{\text{ур}}$ визначимо для максимального значення $K_{\text{д}}$ при відомому діапазоні зміни α . Оскільки перетворювач, що розраховується, використовується для широкорегулюємого ЕП, із зміною α від 0^0 до 90^0 , для трифазної зустрічно-паралельної схеми найбільше значення $K_{\text{д}} = 0,62$ при $\alpha = 60^0$.

Для трифазної нульової схеми $K_{\text{д}} = 0,2$ при $\alpha = 60^0$.

Одержимо $L_{\text{ур}} = 18 \text{ мГн}$.

Обмеження струму при однофазному перекиданні інвертора

Вибираємо низькочастотні тиристори по граничним значенням параметрів режиму :

- відповідно максимальному значенню середнього струму у відкритому стані I_{oc} (A);

$$I_B = 0,33 I_{нп} = 15,84 \text{ A};$$

I_{oc} повинен бути не менше I_B , тобто $I_{oc} \geq 15,84 \text{ A}$.

- по імпульсній напрузі, що повторюється, в закритому стані $U_{зпс}$;

$$U_{обр.мах} = 2,09 E_{оп} = 257 \text{ В.}$$

$$U_{зпс} \geq U_{обр.мах}; \quad U_{зпс} \geq 257 \text{ В.}$$

За даними умовами вибираємо низькочастотний тиристор Т112-16-1.

- для вибраного тиристора знаходимо ударно-неповторяючийся струм у відкритому стані $I_{oc.удр}$;

$$I_{oc.удр} = 200 \text{ А.}$$

При короткому замиканні на стороні постійного струму струмообмежувальний реактор повинен обмежити швидкість наростання аварійного струму, щоб він не перевищив небезпечного для тиристорів значення в перебігу власного часу спрацьовування захисних пристроїв. Обмеження струму через вентилі може бути одержано за рахунок індуктивності розсіяння обмоток трансформатора і індуктивності в ланцюзі постійного струму.

Необхідна величина загальної індуктивності для нульової схеми :

$$L_{\Sigma}^{K3} \approx 2,1 U_{2\phi} / (\omega_c (I_{доп} - I_{нач}));$$

де $I_{нач}$ – початковий струм у момент короткого $I_{нач} = I_B$ при максимальному навантаженні ЕП; $I_{доп}$ – максимально допустимий в перебігу напівперіоду струм вентиля; $I_{доп} = I_{oc.удр}$.

$$I_{нач} = 15,84 \text{ А}; \quad I_{доп} = 200 \text{ А}; \quad U_{2\phi} = E_{2\phi} = 105 \text{ В};$$

$$\text{Одержимо } L_{K3\Sigma} = 0,004 \text{ Гн.}$$

Індуктивність додаткового реактора :

$$L_{др} = L_{\Sigma}^{K3} - (L_{ур} + L_{эп}) = -0,016 \text{ Гн,}$$

$$\text{де } L_{эп} = X_A / \omega_c = 0,0018 \text{ Гн.}$$

Ми одержали негативну індуктивність додаткового реактора. Це означає, що індуктивність зрівняльного реактора і індуктивність ЕП досить велика для об-

меження швидкості зростання аварійного струму. Тому не потрібно встановлювати додатковий реактор.

Пульсації випрямленої напруги приводять до пульсацій випрямленого струму, які погіршують комутацію двигуна і збільшують його нагрів. У симетричних мостових і в нульових схемах найбільшу амплітуду мають основні гармоніки ($k=1$).

Амплітуди гармонік вищої кратності ($k=2, 3$) значно менше, а дія реакторів на них більш ефективніше, тому розрахунки індуктивності дроселя для цих схем ведеться тільки по основній гармоніці, тобто при $k=1$.

Визначимо максимально можливу величину амплітудного значення гармонічних складових випрямленої напруги E_{nm} при $\alpha=80^\circ$.

$K = 1$ – основна гармоніка.

$p = 3$ - число пульсацій за період.

$$E_{nm} := E_{оп} \cdot \frac{2 \cdot \cos(\alpha)}{k^2 \cdot p'^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot p'^2 \cdot \tan(\alpha)^2} \quad E_{nm} = 91.153В$$

При відомій амплітуді основної гармоніки E_{nm} і допустимому діючому значенню основної гармоніки струму $P(1) = 10\%$ необхідна величина індуктивності ланцюга випрямленого струму може бути визначена по формулі:

$$L_{\Sigma\Pi} := \frac{E_{nm} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot k \cdot p' \cdot \omega_c \cdot P_I \cdot I_B} \quad L_{\Sigma\Pi} = 4.317Гн$$

Індуктивність додаткового реактора :

$$L'_{др} := L_{\Sigma\Pi} - (L_{я} + L_{ур} + L_{\Sigma\Pi}) \quad L'_{др} = 4.297Гн$$

Остаточна величина додаткового реактора в ланцюзі якоря двигуна визначається по найбільшому значенню $L_{др} = 4,48$ Гн. Тоді еквівалентна індуктивність якірного ланцюга двигуна :

$$L_{\Sigma} := L_{я} + L_{ур} + L_{\Sigma\Pi} + L'_{др} \quad L_{\Sigma} = 4.317Гн$$

3.5 Розрахунок параметрів об'єкту регулювання для аналізу динамічних властивостей системи

Еквівалентний опір якірного ланцюга двигуна:

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma\Pi} + \beta_T (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}) 1,5; \quad R_{\Sigma} = 1,084 \text{ Ом}$$

де $\beta_T = 1,24$ – температурний коефіцієнт.

Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}; \quad T_{\Sigma} = 4,141 \text{ с};$$

Електромеханічна постійна часу якірного ланцюга двигуна:

$$T_M = \frac{J_{\text{пр}} \cdot R_{\Sigma}}{C_{\text{дв}}^2}; \quad T_M = 0,327 \text{ с};$$

Вибираємо СІФУ з арккосинусной характеристикою $\alpha = \arccos(U_y)$. Статична характеристика такого ТП лінійна

$$K_{\Pi} = \frac{E_{\text{оп}}}{U_{y_{\text{max}}}} \quad K_{\Pi} = 12,32;$$

де $U_{y_{\text{max}}} = 10\text{В}$ – напруга управління на вході ТП, відповідне максимальній ЕПС на виході $E_{\text{оп}}$.

Для практичних розрахунків передавальну функцію ТП можна представити у вигляді інерційної ланки :

$$W_{\text{MN}}(p) = \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi} p + 1}$$

де T_{Π} – постійна часу ТП, $T_{\Pi} = \frac{1}{pf_c} = 6.67 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

$$\text{Одержимо } W_{\text{MN}}(p) = \frac{12,32}{6.67 \cdot 10^{-3} p + 1}.$$

Система підлеглого регулювання є багатоконтурною системою з каскадним включенням регуляторів. При цьому число регуляторів і контурів регулювання рівне числу регульованих параметрів. У двоконтурній схемі (рисунк 4.1) вихідний сигнал регулятора швидкості, включений в зовнішній контур, є задаючим для

регулятора струму, включеного у внутрішній контур. Налаштування регуляторів проводиться незалежно і послідовно від внутрішнього контуру до зовнішнього.

Контур струму складається з об'єкту регулювання – ланцюга якоря двигуна, силового перетворювача і регулятора струму. Контур замикається зворотним зв'язком по величині напруги, що знімається з датчика струму в ланцюзі якоря.

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$K_T = \frac{U_{\text{ОСТ.МАХ}}}{I_{\text{ДВ.МАХ}}},$$

де $U_{\text{ост}} = 10 \text{ В}$ – напруга зворотного зв'язку по струму;

$I_{\text{ДВ.МАХ}}$ – максимально допустимий струм двигуна в перехідних процесах.

Для високомоментного двигуна $I_{\text{ДВ.МАХ}} = 2 I_{\text{Н}} = 48 \text{ А}$.

Одержуємо $K_T = 0,159$.

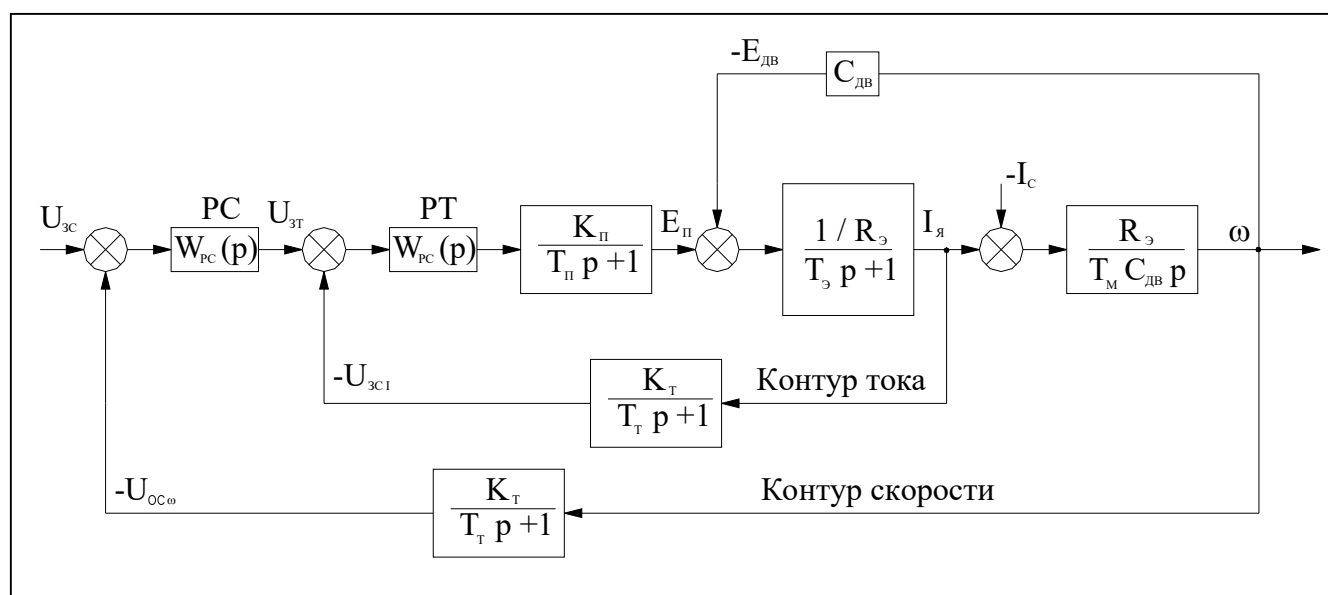


Рисунок 3.1 - Двоконтурна система підлеглого регулювання

Оскільки об'єкт регулювання в контурі струму представлений аперіодичними ланками, застосовується ПІ-регулятор струму, який настраюється по модульному (технічному) оптимуму. При стандартній настройці контура струму звично нехтують внутрішнім зворотним зв'язком по ЕРС, що справедливо, тому що елек-

тромагнітна і електромеханічна постійні двигуна значно перевершують постійну часу ВП ($T_{\Pi} = 0,0067$ с), і $T_{\mu} \gg T_{\Sigma}$.

Передавальна функція об'єкту регулювання контуру струму, приведеного до контуру з одиничним зворотним зв'язком:

$$W_{\text{обт}}(p) = \frac{K_{\Pi} K_{\Sigma}}{T_{\mu} p + 1} \cdot \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\Sigma} p + 1};$$

Об'єкт містить велику постійну часу T_{Σ} і малу T_{μ} , яку називають некомпенсованою малій постійній часу.

$$T_{\mu} = T_{\Pi} + T_{\text{дт}} = 7.01 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Передавальна функція оптимізованого контуру при настройці на модульний (технічний) оптимум:

$$W_{\text{опт}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)};$$

Для отримання перехідного процесу в контурі струму, відповідного настройці на МО, визначимо передавальну функцію регулятора струму з рівності:

$$W_{\text{рт}}(p) \cdot W_{\text{об.т}}(p) = W_{\text{опт}}(p);$$

$$W_{\text{рт}}(p) = W_{\text{опт}}(p) / W_{\text{об.т}}(p) = \frac{R_{\Sigma} (T_{\Sigma} p + 1)}{2T_{\mu} p K_{\Sigma} K_{\Pi}} = K_{\text{рт}} + \frac{1}{T_{\text{рт}} p};$$

Тобто для відповідності перехідного процесу в контурі регулювання струму перехідному процесу в контурі оптимальній структурі, необхідний ПІ-регулятор струму з коефіцієнтом передачі $K_{\text{рт}}$ і постійній часу $T_{\text{рт}}$:

$$K_{\text{рт}} = \frac{R_{\Sigma} T_{\Sigma}}{2T_{\mu} K_{\Sigma} K_{\Pi}} = 0,223;$$

$$T_{\text{рт}} = T_{\Sigma} / K_{\text{рт}} = 0,03 \text{ с.}$$

Передавальна функція розімкненого ланцюга контуру струму:

$$W_{\text{ркт}}(p) = W_{\text{рт}}(p) \cdot W_{\text{обт}}(p) = W_{\text{рт}}(p) \frac{K_{\Sigma} K_{\Pi} / R_{\Sigma}}{(T_{\Sigma} p + 1)(T_{\mu} p + 1)}$$

Розрахунок параметрів регулятора струму

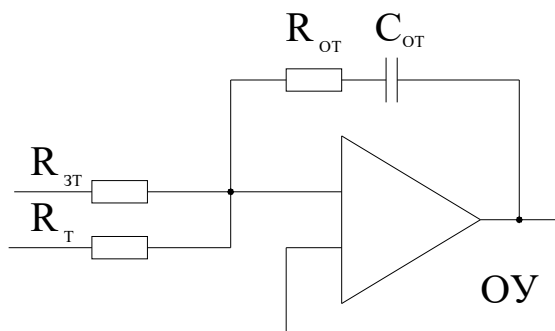


Рисунок 3.2 - ПІ – регулятор струму

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунок 3.2) можна задатися величиною місткості $C_{oc} = 1,6$ мкФ.

Постійна часу зворотного зв'язку регулятора:

$$T_{PT}^* = T_{\vartheta} = R_{oc} C_{oc};$$

звідки визначимо $R_{oc} = \frac{T_{PT}^*}{C_{oc}} = 4.148$ кОм;

Решта параметрів:

$$R_{зт} = T_{PT}^* / (K_{PT} C_{oc}) = T_{PT} / C_{oc}; \quad R_{зт} = 18.6 \text{ кОм};$$

Виберемо номінальний струм шунта з умови: $I_{нш} \geq I_{нп}$

$$I_{нш} = 100 \text{ А.}$$

Коефіцієнт передачі датчика струму якоря:

$$K_{дя} = (10 / 75 \cdot 10^{-3}) = 133.33;$$

Коефіцієнт передачі шунта:

$$K_{шя} = 75 \cdot 10^{-3} / I_{нш} = 7.5 \cdot 10^{-4};$$

$$R_T = \frac{K_{шя} K_{дя} R_{зт}}{K_T}; \quad R_T = 11.7 \text{ кОм.}$$

Об'єктом регулювання зовнішнього контуру швидкості є замкнутий контур струму і ланка, що описує механічний опір двигуна (рисунок 3.3).

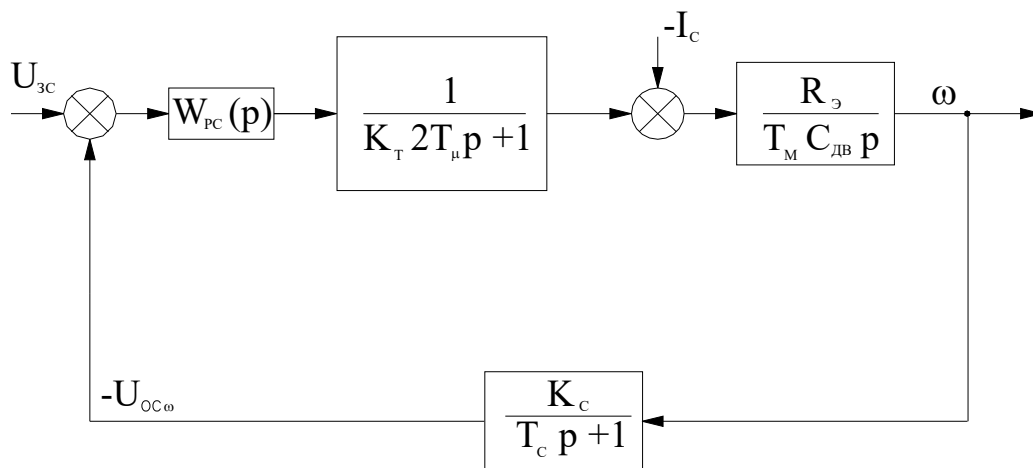


Рисунок 3.3 - Контур швидкості

Перехідна функція об'єкту регулювання контуру швидкості:

$$W_{обс}(p) = \frac{1/K_T}{2T_\mu p + 1} \cdot \frac{K_M}{T_M p}$$

де $K_M = \frac{R_\omega}{C_{дв}} = 2,23$.

Контур замикається інерційним зворотним зв'язком за швидкістю з передавальною функцією:

$$W_{oc}(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1};$$

$$K_c = \frac{U_{oc.w/max}}{\omega_{max}};$$

де $U_{oc \ max}$ – напруга негативного зворотного зв'язку за швидкістю

$$U_{oc.w.max} = U_{3c.max};$$

$U_{3c \ max}$ – напруга завдання максимальної швидкості.

$$U_{3c.max} = 10B;$$

ω_{max} – максимальна кутова швидкість двигуна.

$$\omega_{max} = \frac{n_{max} \cdot \pi}{30}; \quad \omega_{max} = 209,4 \text{ с}^{-1};$$

$$K_c = 0,048.$$

$$T_{\mu c} = 2 \cdot T_\mu + T_{дт} = 0,0144 \text{ з} - \text{еквівалентна постійна часу контуру швидкості.}$$

Об'єкт регулювання характеризується більшою постійною часу T_m , для компенсації якої можна застосувати П- або ПІ-регулятори швидкості. Системи підлеглого регулювання з П-регулятором швидкості є одноразово інтегруючими. Вони мають достатньо високу швидкодію і мале перерегулювання перехідних процесів, проте володіють значним статизмом. Такі системи електроприводу не здатні забезпечити великий діапазон регулювання швидкості.

Системи з ПІ-регулятором швидкості називають двократно інтегруючими. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання і практично нульову статичну помилку при обуренні по моменту опору. При настройці регулятора на симетричний оптимум характеризуються перерегулювання 43%. Зменшити перерегулювання можна шляхом включення на вхід СУ фільтру (аперіодична ланка).

Настройка ПІ – регулятора швидкості

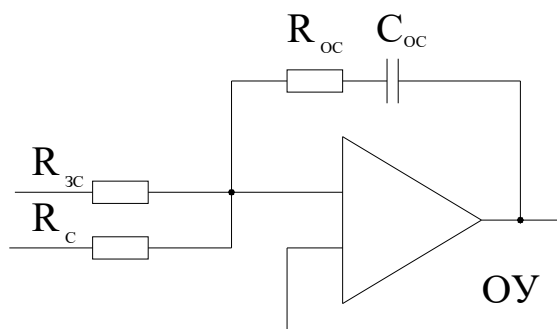


Рисунок 3.4 - ПІ – регулятор швидкості

Передавальна характеристика розімкненого контуру швидкості з ПІ-регулятором:

$$W_{PKC}(p) = k_{PIPC} \cdot \frac{1 + T_{PC}^x \cdot p}{T_{PC}^x \cdot p} \cdot \frac{1}{k_T} \cdot \frac{1}{T_{\mu C} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_C \cdot k_M}{T_M \cdot p};$$

При стандартній настройці на симетричний оптимум визначимо параметри ПІ-регулятора:

$$W_{PKC}(p) = k_{PIPC} \cdot \frac{1 + T_{PC}^x \cdot p}{T_{PC}^x \cdot p} = k_{PIPC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p};$$

$$k_{PIPC} = C_{ДВ} \cdot k_T \cdot T_M / (R_{\varepsilon} \cdot k_C \cdot 2 \cdot T_{\mu C}); \quad K_{PIPC} = 0,389;$$

$$T_{PC}^x = 4 \cdot T_{\mu C}; \quad T_{PC}^x = 0,056 \text{ с};$$

$$T_{PC} = T_{PC}^x / k_{PC}; \quad T_{PC} = 0.148 \text{ с};$$

Підставивши значення K_{PC} і T_{PC} , одержимо:

$$W_{PIKC}(p) = (1 + 4 \cdot T_{\mu C} \cdot p) / (8 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot p^2 \cdot (1 + T_{\mu C} \cdot p));$$

тобто регулятор компенсував велику постійну часу T_M і динамічні властивості контуру визначається тільки по малій постійній часу T_c .

Перехідна функція фільтру на вході СУ з ПІ-регулятор швидкості:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_{\mu C} \cdot p}.$$

Розрахунок параметрів регулятора швидкості

Для розрахунку параметрів ПІ-регулятор швидкості (рисунок 3.4), задавши величиною місткості $C_{OC} = 1.6 \text{ мкФ}$, визначимо R_{OC} із співвідношення :

$$T_{PC}^x = R_{OC} C_{OC}; \Rightarrow R_{OC} = \frac{T_{PC}^x}{C_{OC}} = 35.3 \text{ кОм}.$$

Решта параметрів елементів регулятора:

$$R_{3C} = T_{PC}^x / (k_{PC} C_{OC}) = T_{PC} / C_{OC}; \quad R_{3C} = 90.8 \text{ кОм}.$$

Визначимо коефіцієнт передачі тахогенератора:

$$k_{ТХГ} = U_{ТХГ} / \omega_{ТХГ}; \quad k_{ТХГ} = 100 / 3000 = 0,033$$

$$R_C = k_{ТХГ} R_{3C} / k_C; \quad R_C = 37.8 \text{ кОм}.$$

4.6 Побудова статичних характеристик

Визначимо U_{3C} відповідне $\omega_{\max}$, ω_H :

$$\omega_{\max} = n_{p.\max} \cdot \frac{\pi}{30} = 209.4 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_H = n_H \cdot \frac{\pi}{30} = 104.7 \text{ с}^{-1};$$

$$U_{3C} := \begin{pmatrix} \omega_{\max} K_c \\ \omega_H \cdot K_c \end{pmatrix} \quad U_{3C} = \begin{pmatrix} 10.053 \\ 5.027 \end{pmatrix}$$

Побудуємо статичні характеристики системи для ПІ-регулятор швидкості:

$$\omega 1(I) := \frac{U_{3c0}}{K_c} - \frac{I \cdot K_T}{K_c \cdot K_{\text{ПИрс}}} \quad \omega 2(I) := \frac{U_{3c1}}{K_c} - \frac{I \cdot K_T}{K_c \cdot K_{\text{ПИрс}}}$$

3.7 Розрахунок перехідних процесів

ПФ Ш-регулятор швидкості:

$$W_{\text{ПИрс}}(p) = k_{\text{ПИрс}} \cdot \frac{1 + T_{\text{РС}}^{\times} \cdot p}{T_{\text{РС}}^{\times} \cdot p}$$

ПФ Ш-регулятор струму:

$$W_{\text{РТ}}(p) = K_{\text{РТ}} + \frac{1}{T_{\text{РТ}} p}$$

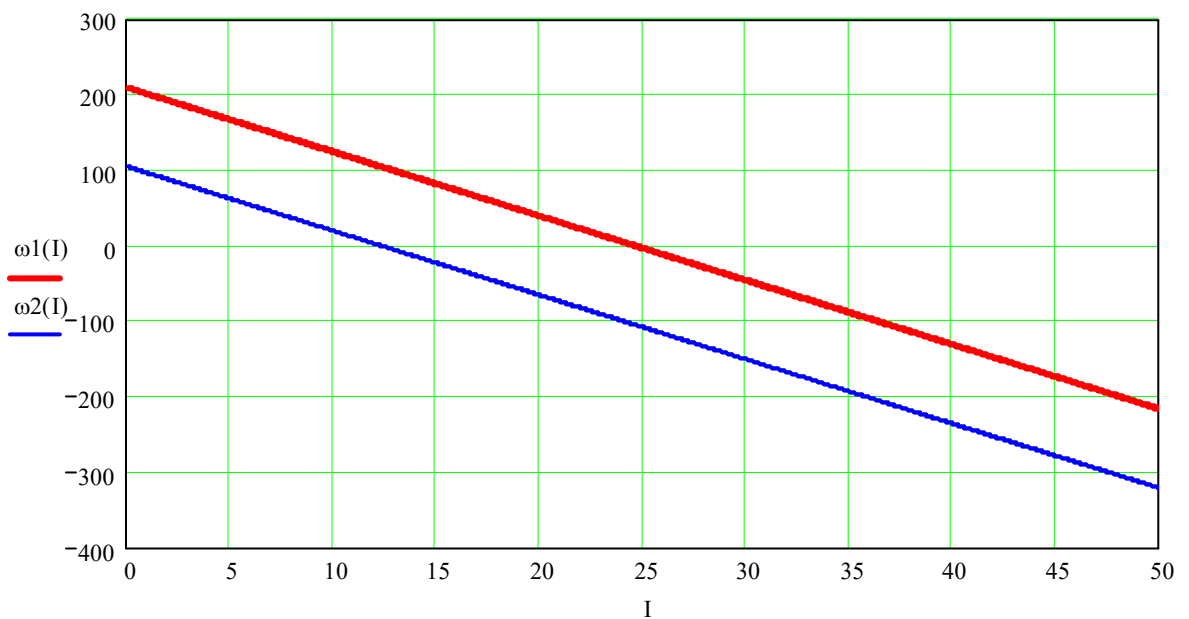


Рисунок 3.5 - Статичні характеристики системи

ПФ тиристорного перетворювача:

$$W_{\text{ТТ}}(p) = \frac{K_{\text{П}}}{T_{\text{П}} p + 1}$$

ПФ датчика струму:

$$W_{\text{ДТ}}(p) = \frac{K_{\text{Т}}}{T_{\text{Т}} p + 1}$$

ПФ датчика швидкості:

$$W_{dc}(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1}$$

ПФ фільтру:

$$W_\phi(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_{\mu c} \cdot p}$$

$$W_1(p) = \frac{1/R_\vartheta}{T_\vartheta p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{R_\vartheta}{C_{дв} \cdot T_M \cdot p};$$

$$\text{pulse}(x, w) := \Phi(x) - \Phi(x - w);$$

$$\text{bandpass}(x, w, f) := \text{pulse}(x - f, w);$$

Задаюча дія:

$$u_{zc}(t) := 7 \cdot \text{bandpass}(t, \infty, 0)$$

Збурююча дія:

$$i_c(t) := \frac{4.9}{C_{дв}} \cdot \text{bandpass}(t, \infty, 0.5)$$

В, А

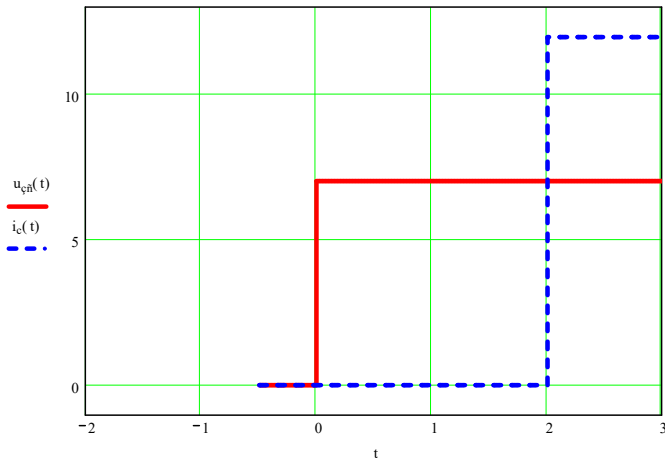


Рисунок 3.6 - Характеристика задаючої і збурюючої дій.

$$U_{zc}(s) := u_{zc}(t) \text{ laplace, } t \rightarrow \frac{7}{s} - 7 \cdot \frac{\exp(-\infty \cdot s)}{s};$$

$$I_c(s) := i_c(t) \text{ laplace, } t \rightarrow 11.93 \cdot \frac{\exp(-0.5 \cdot s)}{s} - 11.93 \cdot \frac{\exp((-0.5 - 1 \cdot \infty) \cdot s)}{s}$$

Передавальна функція при ПІ – регулятор швидкості:

$$\Omega_{\text{ПИ}}(p) := \frac{U_{\text{зс}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) \cdot W_{\text{ПИрс}}(p) - I_{\text{с}}(p) \cdot \left(W_{\text{дт}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right)}{C_{\text{дв}} + \frac{1}{W_2(p)} \cdot \left(W_{\text{дт}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right) + W_{\text{дс}}(p) \cdot W_{\text{ПИрс}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p)}$$

Передавальна функція при ПІ – регуляторі швидкості з фільтром на вході системи:

$$\Omega_{\Phi}(p) := \frac{U_{\text{зс}}(p) \cdot W_{\Phi}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) \cdot W_{\text{ПИрс}}(p) - I_{\text{с}}(p) \cdot \left(W_{\text{дт}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right)}{C_{\text{дв}} + \frac{1}{W_2(p)} \cdot \left(W_{\text{дт}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right) + W_{\text{дс}}(p) \cdot W_{\text{ПИрс}}(p) \cdot W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ТП}}(p)}$$

Перехідний процес при ПІ - регулятор швидкості:

$$\omega_{\text{ПИ}}(t) := \Omega_{\text{ПИ}}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

Перехідний процес при П - регуляторі швидкості:

$$\omega_{\text{П}}(t) := \Omega_{\text{П}}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

Перехідний процес при ПІ - регуляторі швидкості з фільтром на вході системи:

$$\omega_{\Phi}(t) := \Omega_{\Phi}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

$$t := 0, 0.001.. 0.4 \quad \omega_{\text{уст}} := 26.33$$

$\text{с}^{-1} \quad \omega$

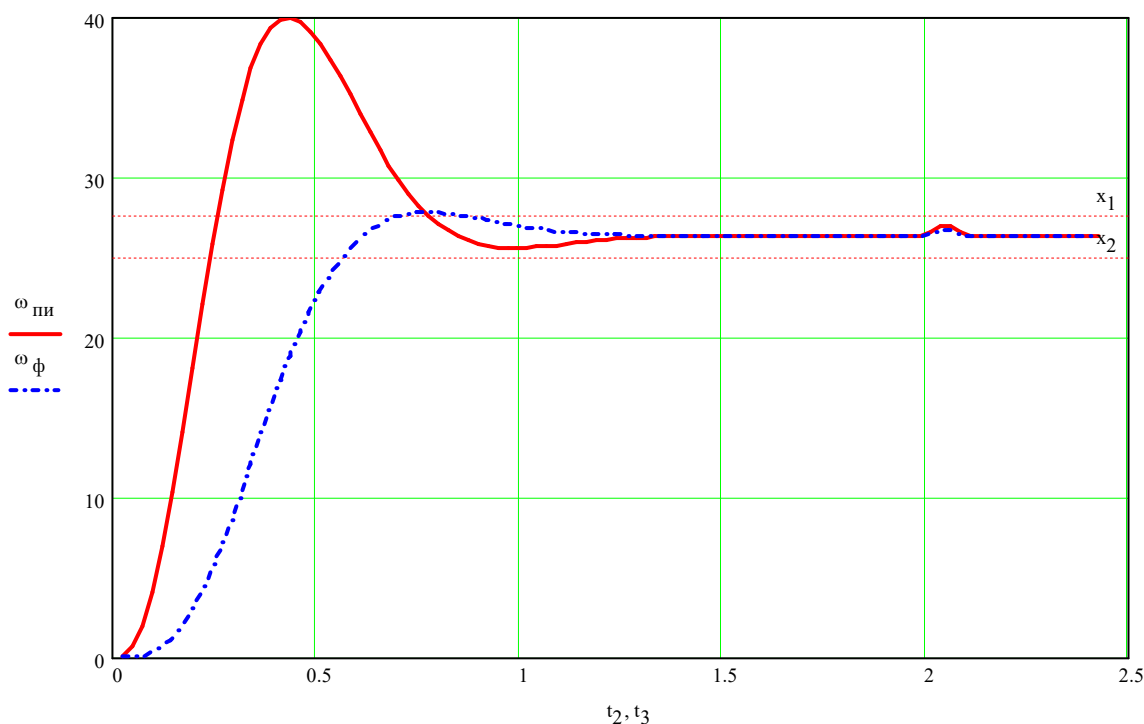


Рисунок 3.7 - Перехідні процеси кутової швидкості

$$\omega_{уст} := 26.33 \quad \omega_{п.мах} := 28.028 \quad \omega_{пи.мах} := 39.671 \quad \omega_{ф.мах} := 27.785$$

Перерегулювання:

$$\sigma_{п} := \frac{\omega_{п.мах} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100 \quad \sigma_{п} = 6.449$$

$$\sigma_{пи} := \frac{\omega_{пи.мах} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100 \quad \sigma_{пи} = 35.477$$

$$\sigma_{ф} := \frac{\omega_{ф.мах} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100 \quad \sigma_{ф} = 5.526$$

Передавальна функція ЕДС тиристорного перетворювача при ПІ - регуляторі швидкості:

$$E_{пПИ}(p) := \frac{U_{зс}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + I_c(p) \cdot \left[\frac{1}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) - W_{дт}(p) \right]}{\frac{W_1(p)}{\left(W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)} \right)} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) + \frac{1}{W_{РТ}(p) \cdot W_{тп}(p)}}$$

Передавальна функція ЕДС тиристорного перетворювача при ПІ - регуляторі швидкості з фільтром:

$$E_{пФ}(p) := \frac{U_{зс}(p) \cdot W_{ф}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + I_c(p) \cdot \left[\frac{1}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) - W_{дт}(p) \right]}{\frac{W_1(p)}{\left(W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)} \right)} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПИрс}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) + \frac{1}{W_{РТ}(p) \cdot W_{тп}(p)}}$$

Перехідний процес ЕДС тиристорного перетворювача при ПІ - регулятор швидкості:

$$e_{пПИ}(t) := E_{пПИ}(s) \text{ invlaplace } , s \rightarrow$$

Перехідний процес ЕДС тиристорного перетворювача при ПІ - регуляторі швидкості з фільтром на вході системи:

$$e_{пФ}(t) := E_{пФ}(s) \text{ invlaplace } , s \rightarrow \quad e_{уст} = 54 \text{ В}; \quad \text{В, } e_{п}$$

Передавальна функція струму якоря при ПІ - регулятор швидкості:

$$I_{яПН}(p) := \frac{U_{зс}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + W_2(p) \cdot I_c(p) \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + \frac{C_{дв}}{W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} \right)}{W_2(p) \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + \frac{C_{дв}}{W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} \right) + \frac{1}{W_1(p) \cdot W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} + W_{дт}(p)}$$

$$I_{яФ}(p) := \frac{U_{зс}(p) \cdot W_{ф}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + W_2(p) \cdot I_c(p) \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + \frac{C_{дв}}{W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} \right)}{W_2(p) \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{ПНрс}(p) + \frac{C_{дв}}{W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} \right) + \frac{1}{W_1(p) \cdot W_{РТ}(p) \cdot W_{ТН}(p)} + W_{дт}(p)}$$

Передавальна функція струму якоря при П - регуляторі швидкості з фільт-

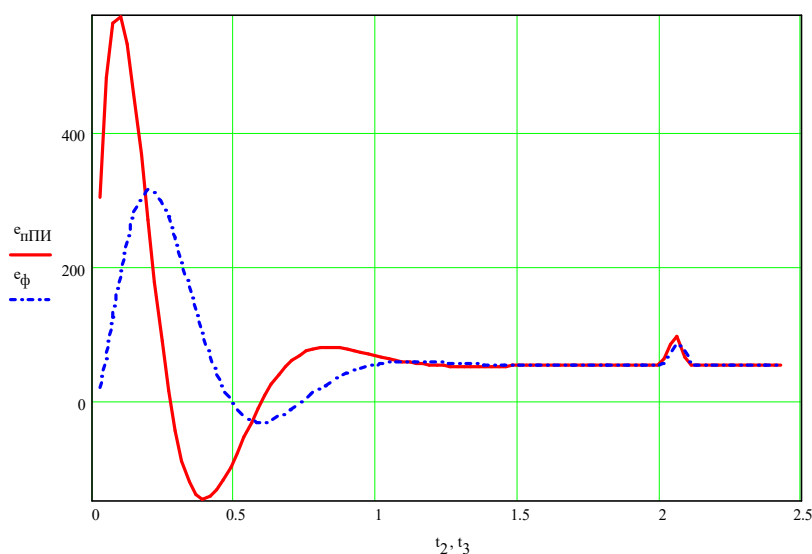


Рисунок 3.8 - Перехідні процеси ЕРС тиристорного перетворювача
ром на вході системи:

Перехідний процес струму якоря при ПН - регулятор швидкості:

$$i_{яПН}(t) := I_{яПН}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

Перехідний процес струму якоря при П - регуляторі швидкості:

$$i_{яП}(t) := I_{яП}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow$$

Перехідний процес струму якоря при ПН - регуляторі швидкості з фільтром
на вході системи:

$$i_{яФ}(t) := I_{яФ}(s) \text{ invlaplace, } s \rightarrow i_{уст} = 11,925 \text{ A;}$$

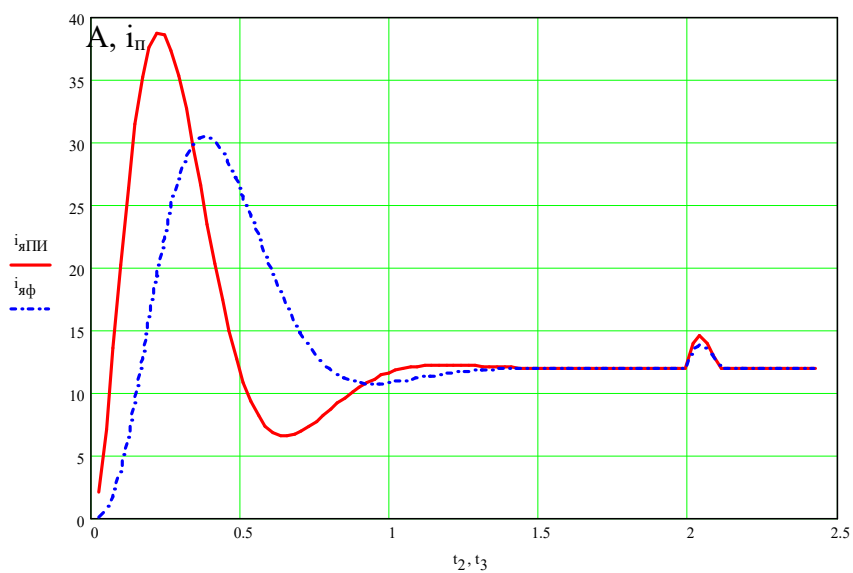


Рисунок 3.9 - Перехідні процеси струму якоря

4 Охорона праці

Охорона праці - система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Повністю безпечних і нешкідливих виробництв не існує. Задачі охорони праці - звести до мінімуму вірогідність ураження або захворювання працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Охорона праці включає:

- виробничу санітарію — систему організаційних заходів і технічних засобів, що запобігають або зменшують дію на працюючих шкідливих виробничих чинників;
- техніку безпеки - система організаційних заходів і технічних засобів, запобігаючи або зменшуючи дію на працюючих небезпечних виробничих чинників;
- пожежо - і вибухобезпечність - система організаційних заходів і технічних засобів, направлених на профілактику і ліквідацію пожеж і вибухів, обмеження їх наслідків;
- законодавство по охороні праці.
-

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників для установки з приводом постійного струму

Реальні виробничі умови характеризуються, як правило, наявністю певних небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Небезпечним виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах призводить до травми або до іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

Шкідливим виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах призводить до захворювання або зниження працездатності.

Між небезпечним і шкідливим чинником часто не можна провести чіткої межі. Один і той же чинник може привести до нещасного випадку.

До небезпечних і шкідливих виробничих чинників, характерних для установки асинхронного приводу, відносяться:

- небезпека ураження електричним струмом;
- небезпека виникнення пожежі;
- дія шуму на організм людини.

До основних причин ураження електричним струмом відносяться такі, як випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою; поява напруги на конструктивних металевих частинах устаткування (корпусі, кожусі) в результаті пошкодження ізоляції і інших причин; поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, в результаті помилкового включення установки; виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання дроту на землю.

Небезпека ураження, оцінюється величиною струму, що проходить через тіло людини, або ж напругою дотику, залежить від ряду чинників: схеми включення людини в ланцюг, напруга мережі, схеми самого ланцюга, режиму її нейтралі, ступені ізоляції струмоведучих частин від землі, також від величини місткості струмоведучих частин і т.д.

Проходячи через організм електричний струм проводить термічну, електролітичну і біологічну дію.

Термічна дія виражається в опіках окремих ділянок тіла нагріві кровоносних судин і т.п.

Електролітична дія виражається в розкладанні крові і інших органічних рідин, що викликає значні порушення їх фізико-хімічних складів.

Біологічна дія є особливим специфічним процесом, властивим лише живій тканині. Воно виражається в подразненні і збудженні живих тканин організму, що супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів, у тому числі м'язів серця і легенів. В результаті можуть виникнути різні порушення в організмі, у тому числі порушення і навіть повне припинення діяльності органів дихання

і кровообігу. Подразнююча дія струму на тканини організму може бути прямою, коли струм проходить безпосередньо по цих тканинах і рефлекторним, тобто через центральну нервову систему, коли шлях струму лежить зовні цих тканин.

Результат дії електричного струму залежить від ряду чинників, у тому числі від електричного опору тіла людини, величини і тривалості протікання через нього струму, роду і частоти струму і індивідуальних властивостей людини.

Величина струму, що протікає через тіло людини, є головним чинником, від якого залежить результат ураження: чим більше струм, тим небезпечніша його дія. Людина починає відчувати протікаючий через нього струм промислової частоти (50 Гц) щодо малого значення: 0,6 — 1,5 мА. Цей струм називається пороговим відчутним струмом.

Тривалість протікання струму через тіло людини впливає на результат ураження унаслідок того, що з часом різко зростає струм за рахунок зменшення опору тіла і нагромаджуються негативні наслідки дії струму на організм.

Основними заходами захисту від ураження струмом для установки з асинхронним приводом є забезпечення недоступності струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, для випадкового дотику; захисне розділення мережі; усунення небезпеки ураження при появі напруги на корпусі, кожусі і інших частинах установки, що досягається застосуванням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням і др.; вживання захисних засобів; організація безпечної експлуатації установки. В процесі експлуатації установки з асинхронним приводом нерідко виникають умови, при яких навіть найдосконаліше їх виконання не забезпечує безпеки працюючого і потрібне застосування спеціальних захисних засобів - переносних приладів і пристосувань.

До захисних засобів відносяться:

- ізолюючі захисні засоби: діелектричні гумові рукавички, інструмент з ізольованими рукоятками, струмошукачі, діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки;

- огорожуючи захисні засоби: щити, калоші, килимки, ізолюючі накладки, тимчасові захисні заземлення;
- оберігаючи захисні засоби: захисні окуляри спеціальні рукавиці.

Пожежі на промислових підприємствах представляють велику небезпеку для працюючих і можуть заподіяти величезний матеріальний збиток. Пожежа від установки з асинхронним приводом може відбутися в результаті прояву теплової і іскрової дії електричного струму в умовах, сприятливих для запалювання горючих матеріалів електроустановки, до яких відносяться тверді і рідкі ізоляційні матеріали. Основними причинами пожеж в електроустановках є перевантаження дротів, коротке замикання, великі перехідні опори в електричних мережах, електрична дуга або іскріння. До заходів попередження виникнення пожеж відносяться вживання плавких запобіжників, автоматичних вимикачів, що здійснюють захисне відключення, а також правильний монтаж мереж, машин і апаратів відповідно до вимог правил пристрою електроустановок.

Шум надає на людину шкідливу фізіологічну дію, яка полягає не тільки в пошкодженні слухового апарату, але і в негативному впливі на нервову систему, викликаючи уповільнення психологічних реакцій. Під впливом виробничого шуму виникають різні професійні захворювання: порушується ритм серцевої діяльності, змінюється кров'яний тиск, погіршується діяльність органів дихання. Спостерігається також ослаблення пам'яті, уваги, гостроти зору. Таким чином, шум може бути причиною травматизму.

Під впливом шуму значно знижується продуктивність праці, причому знижується тим більше, чим складніше трудовий процес і чим більше в ньому елементів розумової праці.

Для зниження шуму в установці з асинхронним приводом можуть бути застосовані наступні методи:

- зменшення шуму в джерелі шляхом вдосконалення технологічних процесів і устаткування;
- зміна спрямованості випромінювання;
- раціональне планування цеху;

- акустична обробка приміщення при вживанні звукопоглинальних матеріалів;
- зменшення шуму на шляху його розповсюдження, використовуючи звукоізоляційні матеріали.

-

4.2 Розрахунок захисного заземлення установки з приводом постійного струму

Захисним заземленням називається навмисне з'єднання нетоковедущих частин, які можуть опинитися під напругою, із заземляючим пристроєм.

Корпуси електричних машин, джерел живлення, електричні апарати і інші частини, виконані з струмопровідних матеріалів, можуть опинитися під напругою при замиканні їх струмоведучих частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту із землею, дотик до нього так само небезпечне, як і дотик до фази. Якщо ж корпус заземлений, він опиниться під напругою

$$U_3 = I_3 R_3$$

де I_3 - струм замикання на землю;

R_3 - опір що заземляє пристрої.

Людина, що стосується цього корпусу, потрапляє під напругу зіткнення:

$$U_{\text{пр}} = U_3 \alpha_1 \alpha_2$$

де α_1 - коефіцієнт напруги зіткнення;

α_2 - коефіцієнт, що враховує падіння напруги в додатковому опорі ланцюга людини.

Струм через людину рівний

$$I = I_3 \cdot \frac{R_3}{R} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$$

звідки видно, що чим менше R_3 і α_1 , тим менше струм проходить через людину, що стоїть на землі і стосується корпусу устаткування, яке знаходиться під напругою.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначити основні параметри заземлення: число, розміри і розміщення одиночних заземлителів і що заземляють провідників, при яких напруга дотику і кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень. При цьому розрахунок проводиться звично для випадків розміщення заземлителя в однорідній землі (спосіб коефіцієнтів використання).

Найбільший допустимий опір що заземляє пристрої для електричних установок напругою до 1000 В у будь-який час року не повинно перевищувати 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту з урахуванням кліматичного коефіцієнта:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{уд}} \cdot \varphi = 601,4 = 84 \text{ Ом},$$

де $\rho_{\text{уд}}$ - питомий опір для ґрунту (для глини $\rho_{\text{уд}}=60 \text{ Ом}$);

φ - кліматичний коефіцієнт ($\varphi = 1,4$).

Опір одиночного вертикального трубчастого заземлення визначається по формулі:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \left[\text{Ln} \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \frac{4H + L}{4H - L} \right],$$

де H, L, D - розміри заземлителя.

Як вертикальні електроди використовуємо сталеві труби з розмірами (рисунок 4.1): $d = 0,03 \text{ м}$; $L = 3,5 \text{ м}$; $H_0 = 0,8 \text{ м}$; $H = 2,3 \text{ м}$.

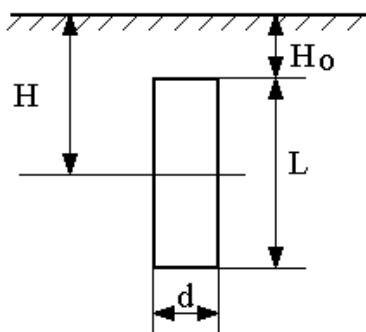


Рисунок 4.1. – Трубчатий заземлювач в ґрунті.

Опір розтікання струму одиночного стрижня:

$$R = \frac{84}{2\pi \cdot 2,5} \cdot \left[\text{Ln} \frac{2 \cdot 2,5}{0,03} + \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \frac{4 \cdot 2,3 + 2,5}{4 \cdot 2,3 - 2,5} \right] = 28,7 \text{ Ом}.$$

Попередня кількість вертикальних заземлителів:

$$n' = R_{\text{ст.од.}} / R_{\text{доп}} = 28.7 / 4 \approx 8 \text{ стрижнів.}$$

Вибираємо відстань між вертикальними заземлювачами: $a = 2,5 \text{ м.}$

По таблиці [11] приймаємо коефіцієнт використання вертикальних стрижнів $\eta_{\text{ст}} = 0,6$. З урахуванням цього уточнене число вертикальних заземлителів:

$$n = n' / \eta_{\text{ст}} = 8 / 0,6 \approx 14 \text{ стрижнів.}$$

Визначаємо довжину смуги, що сполучає вертикальні заземлювачі:

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 2,5 \cdot 14 = 36,8 \text{ м.}$$

Опір розтікання струму смуги магістралі (рисунок 4.2):

$$R_n = 0,159 \cdot \frac{\rho}{L} \cdot \ln \frac{2L^2}{b \cdot h},$$

де b - ширина смуги ($b = 0,03 \text{ м}$);

h - глибина смуги заземлення ($h = 0,85 \text{ м}$);

L - довга смуги;

ρ - питомий опір.

$$R_n = 0,159 \cdot \frac{84}{36,8} \cdot \ln \frac{2 \cdot 36,8^2}{0,03 \cdot 0,85} = 4,2 \text{ Ом.}$$

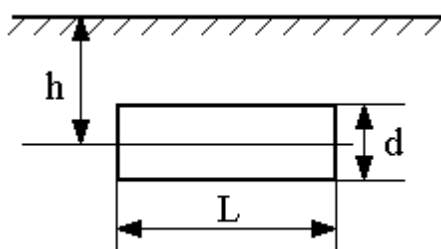


Рисунок 4.2. – Сму́га в гра́нті

Опір розтікання струму всього пристрою:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{\eta_2}{R_n} + \frac{n \cdot \eta_1}{R_{\text{ст.од}}}} = \frac{1}{\frac{0,48}{4,2} + 14 \cdot \frac{0,6}{28,7}} = 2,45 \text{ Ом}$$

де η_1 - коефіцієнт використання заземлителя ($\eta_1 = 0,6$);

η_2 - коефіцієнт використання сполучної смуги [11] ($\eta_2 = 0,48$).

Оскільки одержаний опір $R_3 = 2,45$ Ом менше допустимого $R_{\text{доп}} = 4$ Ом, то заземлювач забезпечує якісне заземлення корпусу електродвигуна.

4.4 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроустановки з приводом постійного струму

Досвід показує, що для забезпечення безпечної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно разом з досконалим виконанням їх і оснащенням захисними засобами так організувати їх експлуатацію, щоб виключити всяку можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Основою організації безпечної експлуатації електроустановок є висока технічна письменність і свідомо дисципліна обслуговуючого персоналу, який зобов'язаний строго дотримувати організаційні і технічні заходи, а також прийоми і черговість виконання експлуатаційних операцій відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів і Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів.

Особи, обслуговуючі електроустановки, не повинні мати каліцтв і хвороб, що заважають виробничій роботі. Для персоналу бере безпосередню участь в оперативних перемиканнях і ремонтних роботах в електроустановках, стан здоров'я встановлюється медичним оглядом при прийнятті на роботу, а потім періодично один раз в два роки.

Кожний працівник до призначення його на самостійну роботу по обслуговуванню електроустановок або при переведенні на іншу ділянку роботи зобов'язаний пройти навчання безпечним методам роботи на робочому місці і перевірку знань. Одночасно він зобов'язаний вивчити правила техніки безпеки, правила надання першої допомоги. Кожний працівник до призначення його на самостійну роботу по обслуговуванню електроустановок або при переведенні на іншу ділянку роботи зобов'язаний пройти навчання безпечним методам роботи на робочому місці і перевірку і т.п. в об'ємі, відповідному вимогам його робочого місця. Перевір-

ка знань Правил техніки безпеки проводиться кваліфікованою комісією після навчання на робочому місці.

Всі роботи по експлуатації діючої установки проводяться при обов'язковому дотриманні наступних умов:

- на роботу повинен бути видано дозвіл уповноваженою на це особою;
- робота повинна проводитися, як правило, не менше ніж двома особами;
- повинні бути виконані організаційні і технологічні заходи, що забезпечують безпеку персоналу.

ВИСНОВОК

Основне завдання кваліфікаційної роботи – розробка системи автоматичного керування електроприводом головної засувки станції водопостачання.

У відповідності до мети дипломної роботи була проведена наступна робота.

Проведений опис системи головної засувки та розглянута робота основних її пристроїв.

На підставі проведеного аналізу розроблена та наведена автоматизована система керування засувками всього об'єкту в цілому.

Проведений аналіз використаного комплектного електропривода «Кемток», проведений аналіз його статичних і динамічних.

Проведений розрахунок і аналіз автоматичної системи управління приводу головної засувки, включаючи вибір комплектного електродвигуна, розрахунок параметрів регуляторів, аналіз статичних та динамічних характеристик приводу.

Використання такої системи автоматичного керування дозволяє виконати вимоги охорони праці та захисту навколишнього середовища.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод : навч. посібник : у 2 ч. – Рівне : НУВГП, 2010.
2. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. – К. : Ліра-К, 2009. – 504 с. – ISBN 978-966-96938-8-4.
3. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. – Харків : Панов А. М., 2017. – 452 с.
4. Бєлікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів. – О. : Наука і техніка, 2012. – 480 с. – ISBN 978-966-1552-11-0.
5. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В. та ін. Основи охорони праці : підручник / за ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – 2-ге вид., доп. та перероб. – К. : Основа, 2006. – 448 с.
6. Ткачук К. Н., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В., Полукаров О. І. та ін. Основи охорони праці : підручник [Електронне видання] / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – К. : Основа, 2015. – 548 с.
7. Rashid M. H. Power Electronics: Circuits, Devices & Applications 4th ed., Pearson, 2013, 1024 с., ISBN 978-0-13-312590-0.
8. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2012. – 704 p. – ISBN 978-0-07-352954-7.
9. Smith O. J. M. Feedback Control Systems. – New York : McGraw-Hill, 1958. – 694 p. – ISBN 978-0-07-058470-9.
10. Hughes Ph., Ferrett E. Introduction to Health and Safety at Work : for the NEBOSH National General Certificate in Occupational Health and Safety. – 6th ed. – London : Routledge, 2016. – ISBN 978-0-415-72308-4.
11. Umans S. D. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery. – 7th ed. – New York : McGraw-Hill, 2014. – 704 p. – ISBN 978-0-07-338046-9.
12. Tietze U., Schenk Ch., Gamm E. Electronic Circuits: Handbook for Design and Application. – 2nd ed. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. – 1543 p. – ISBN 978-3-540-00429-5.
13. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. – 3rd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2002. – 802 p. – ISBN 978-0-471-22693-2.

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Автоматизована система керування засувками об'єкту

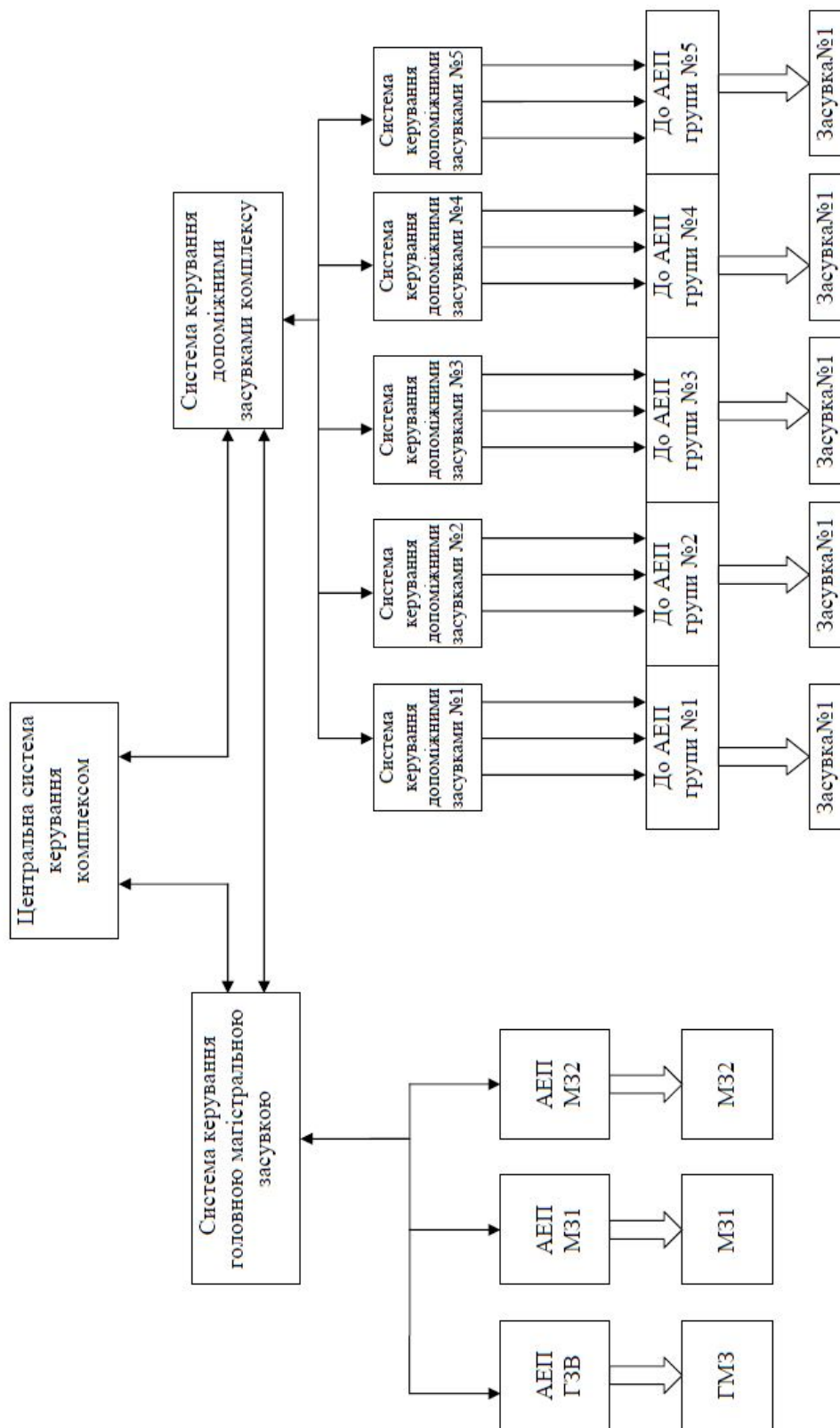


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Загальний вигляд головної засувки

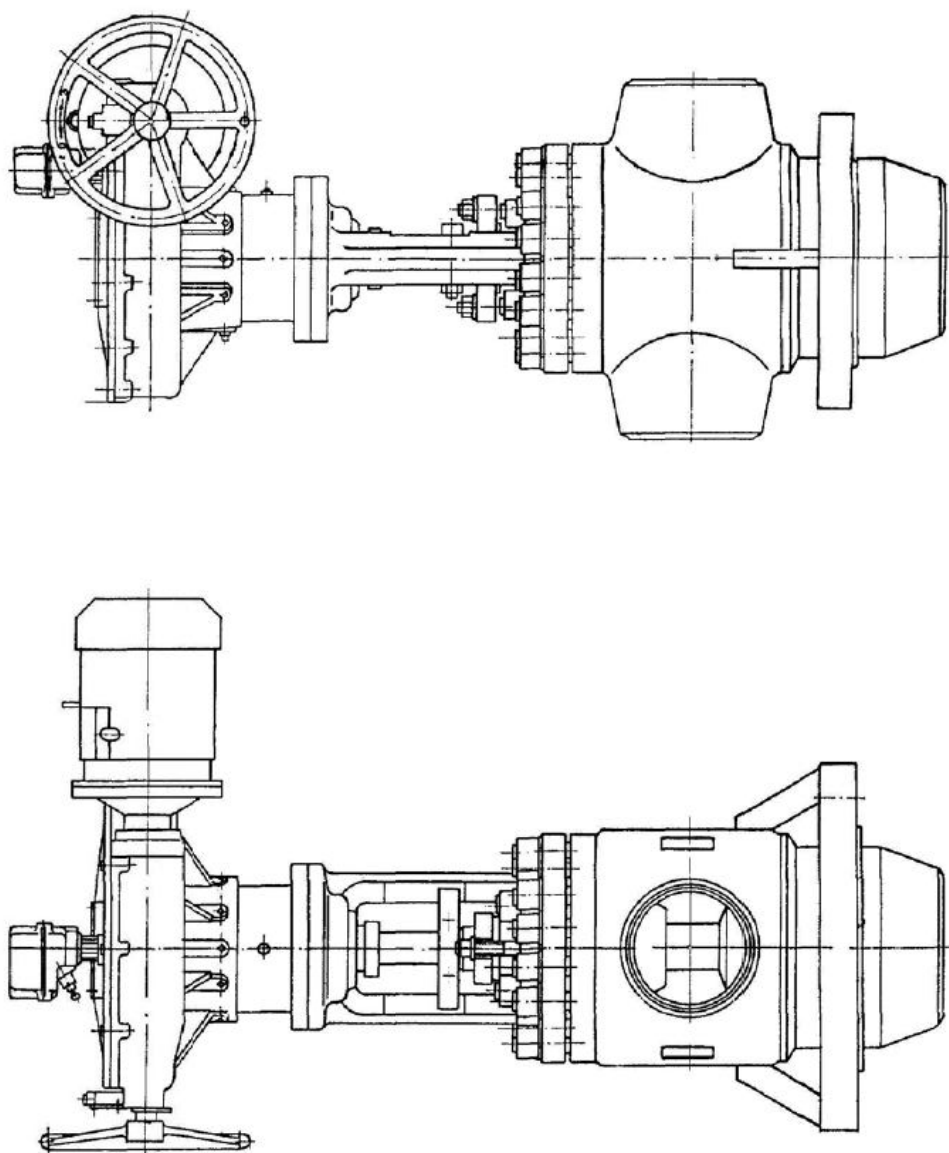


Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Діюча схема системи керування засувкою

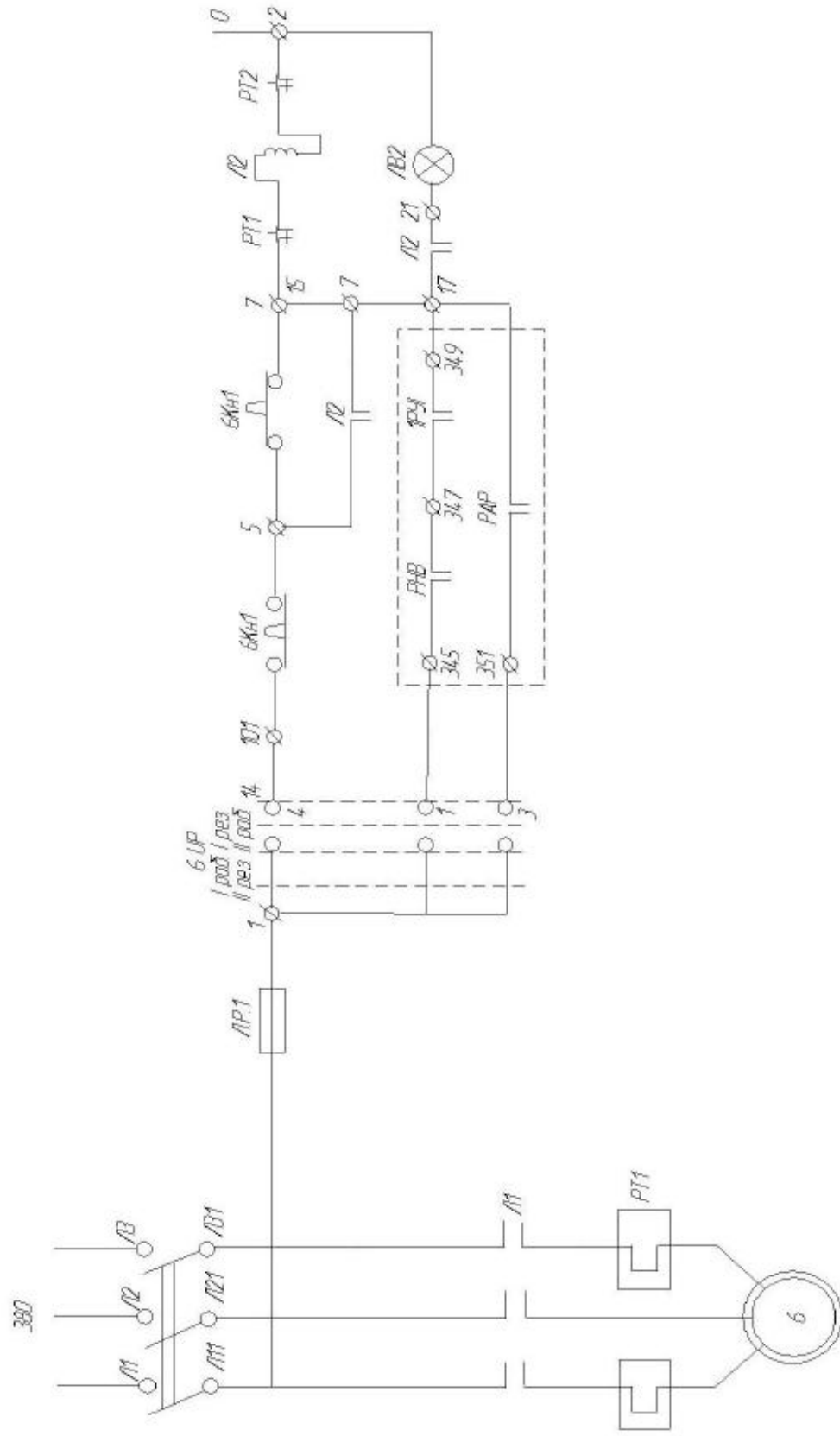


Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Структурна схема електроприводу «КЕМТОК» для аналізу динаміки

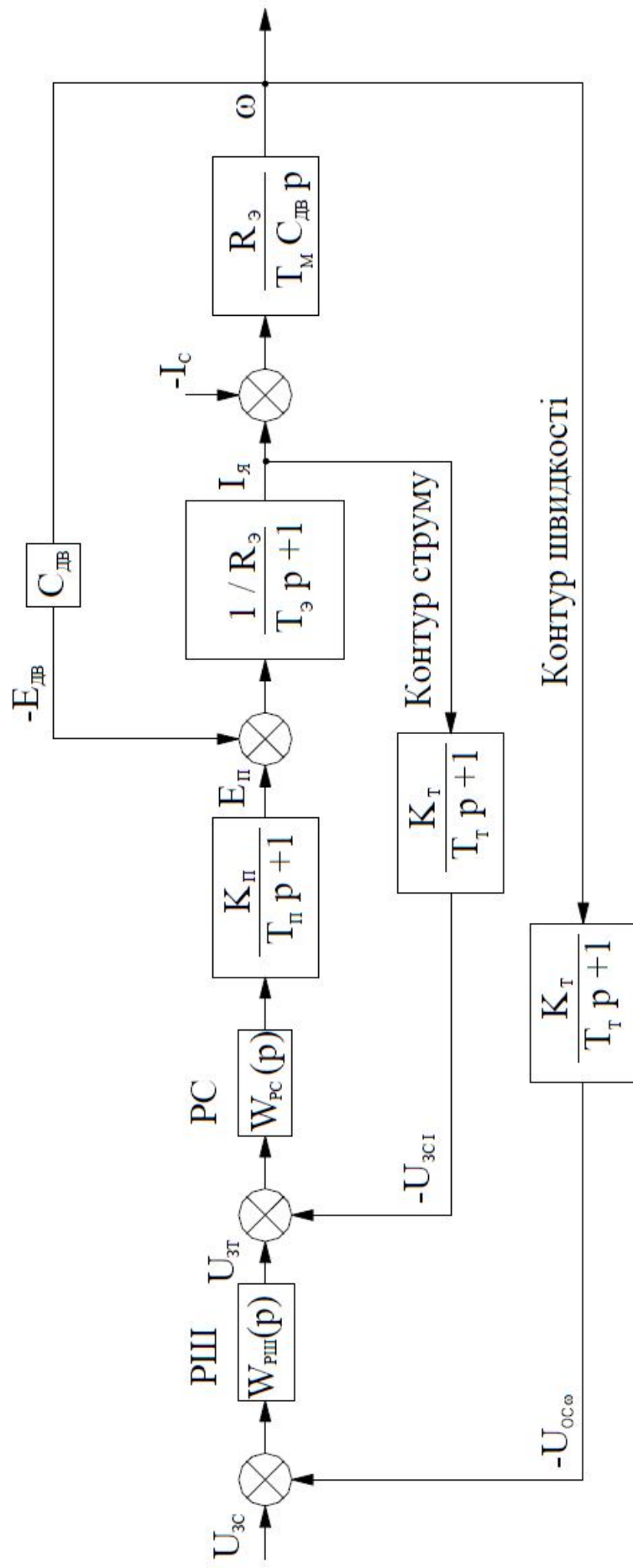
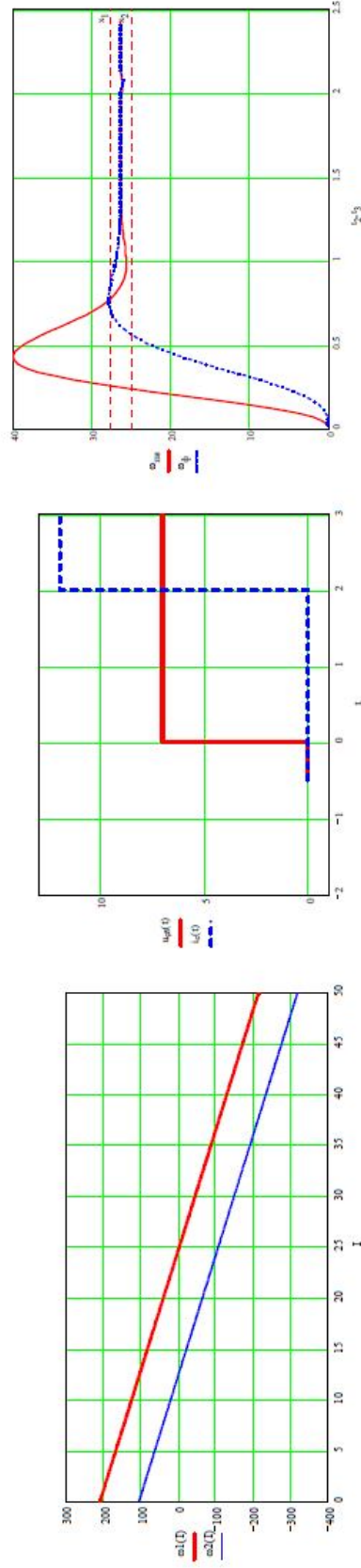


Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації

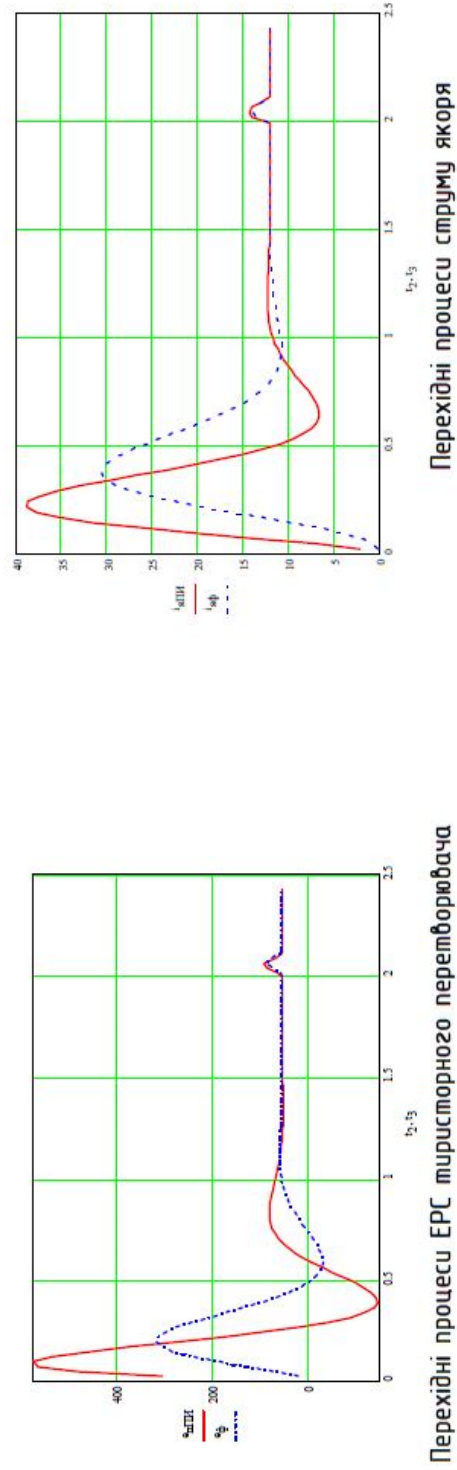
Графіки статичних і динамічних характеристик приводу



Статичні характеристики системи

Характеристика задаючої і збурюючої дії

Перехідні процеси кутової швидкості



Перехідні процеси ЕРС тиристорного перетворювача

Перехідні процеси струму якоря