

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

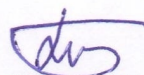
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

«16» 06 2025 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 подачі вертикально-свердлильного верстата»

Виконав: студент IV курсу, групи 4317ст3

Журжа Станіслав Денисович

(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, к.т.н., доц., Васильєв О.Г.

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

Рецензент доц. ка ф. 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 – 2025 року

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

Завідувач кафедри, к.т.н. доцент

І.С. Білюк

«7» 02 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Журжа Станіслав Денисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація електропривода подачі вертикально-свердлильного верстата»

керівник роботи Фоменко Андрій Миколайович, старший викладач, доцент НУК,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 23 » квітня 2025 року
№ 957уч.

2. Строк подання студентом роботи 15.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Двигун постійного струму типу ПБСТ з потужністю 1,5 кВт. Напруга живлення 380 В. Двоконтурна система підпорядкованого керування двигуна постійного струму. Час перехідного процесу не більш 0.2с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Опис свердлильного верстата 2 Опис комплектного електропривода КЕМІК 3 Вибір та обґрунтування елементів силових частини привода подачі верстата 4 Розрахунок та аналіз САК привода подачі вертикально свердлильного верстата 5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1 Кінематична схема свердлильного верстата 2Р135Ф2-1 2 Схема діючої системи керування верстатом 3 Функціональна схема електропривода КЕМЕК 4 Структурні схеми електроприводу для аналізу динаміки в середовищі MathLab 5 Статичні та динамічні характеристики приводу

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 01.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Опис свердлильного верстата.</i>	03.02.25	
2	<i>Опис комплектного електропривода КЕМІК.</i>		
3	<i>Вибір та огрунтування елементів силових частини привода подачі верстата.</i>	19.02.25	
4	<i>Розрахунок та аналіз САК привода подачі верти кально свердлильного верстата.</i>	18.03.25	
5	<i>Охорона праці.</i>	22.04.25	
6	<i>Графічна частина.</i>	27.05.25	

Студент


(підпис)

Журжа С.Д.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Фоменко А.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 70 с., 5 р., 35 рис., 1 табл., 13 джерел.

Ключові слова: електропривод постійного струму, привод подач, перехідна характеристика, свердлильний верстат, двоконтурна система керування.

Мета роботи – підвищення показників якості системи привода подач вертикально свердлильного верстата. Ціль роботи – розробка автоматичної системи керування приводом подач вертикально свердлильного верстата.

Розглянуто загальний вигляд та кінематику верстата. Приведений опис існуючої системи керування. Виявлено основні недоліки, а також запропоновані шляхи вдосконалення даного процесу.

Виконано огляд існуючих схем керування й сформульовані технічні вимоги до нової проекрованої системи. Розроблено схему математичної моделі системи керування.

Для забезпечення високих показників автоматизації керування була спроектована двоконтурна система підпорядкованого керування двигуна постійного струму, що дозволяє реалізувати закони керування.

У роботі також проведено моделювання проекрованої системи, результатом якого є показники стійкості та динамічні показники. Також отримані перехідні характеристики при різних типах роботи привода. Аналіз результатів моделювання показав, що така система повністю задовольняє вимогам технологічного процесу, підтримує постійну швидкість обертання і відробляє задачі виробництва.

На ряду з цим у роботі розглянуті питання охорони праці.

ЗМІСТ

Зміст

Вступ.....	6
1. Опис свердлильного верстата.....	7
2. Опис комплектного електропривода „КЕМЕК”	14
2.1 Технічні дані електропривода „КЕМЕК”	14
2.2 Математичний опис електропривода «КЕМЕК».....	18
3. Вибір елементів силової частини приводу подачі верстата.....	37
3.1 Постановка задачі підвищення показників та вхідні дані.....	37
3.2 Вибір двигуна.....	37
3.3 Вибір комплектного електроприводу.....	43
4. Розрахунок та аналіз САК приводом подач вертикально-свердлильного верстата.....	45
4.1 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача.....	45
4.2 Розрахунок індуктивності реакторів.....	46
4.3 Розрахунок параметрів об'єкта регулювання для аналізу динамічних властивостей системи.....	49
4.4 Розрахунок параметрів регуляторів і елементів контуру регулювання струму якоря у системі підпорядкованого регулювання.....	50
4.5 Розрахунок параметра регулятора в контурі швидкості.....	53
4.6 Побудова статичних характеристик.....	56
4.7 Дослідження динамічних характеристик	58
5. Охорона праці	64
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	64
5.2 Розрахунок освітлення.....	64
5.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки робіт.....	68
Висновки.....	69
Список літератури.....	70

ВСТУП

Для управління виконавчими пристроями верстатів з УЧПУ велике значення має використання регульованих електроприводів, як які застосовуються комплектні електроприводи постійного і змінного струму. Основним призначенням комплектного електроприводу є його використання у верстатах як привід головного руху або якості приводу подачі.

Розширення технологічних можливостей металорізучих верстатів забезпечило можливість проведення на одному верстаті різних технологічних операцій: фрезерування, свердлення і розточування; точіння, свердлення і розточування і ін. Це, у свою чергу, привело до ускладнення електроприводів подач унаслідок збільшення обертаючого моменту на валу двигуна, розширення діапазону робочих швидкостей і настановних переміщень, збільшення швидкодії приводу як при управляючій дії, так і при обуренні по навантаженню.

Останніми роками істотно змінилася конструкція верстатів унаслідок значного скорочення механічної частини приводів подач. Стала можливою установка високомоментних двигунів, що мають менші габаритні розміри в порівнянні із звичними двигунами постійного струму. До скорочення механічної частини приводу привело також і виключення коробки передач. У зв'язку з цим знизилася навантаження на двигун при холостих переміщеннях і зросла складова від різання в загальному навантаженні приводів подач. Значне збільшення швидкості швидких переміщень, зниження швидкості настановних переміщень привело до значного збільшення діапазону регулювання. Максимально робоча подача на сучасних багатоопераційних верстатах складає 10...30 % від швидкості швидких переміщень. Повний діапазон регулювання у верстатах фрезерної, розточувальної і токарної груп складає 100...10000.

У даній дипломній роботі розглядається питання пов'язані з підвищенням показників електропривода вертикальної подачі супорту вертикально-свердлильного верстата.

1 Опис свердлильного верстата

Свердлильний верстат 2P135Ф2–1 призначений для свердління, зенкування, розгортання, нарізування різьблення, легкого прямолінійного фрезування деталей зі сталі, чавуна кольорових металів в умовах дрібносерійного і серійного виробництва. Револьверна голівка з автоматичною зміною інструмента і хрестовий стіл із програмним керуванням дозволяють робити координатну обробку деталей типу кришок, фланців, панелей і т.д. без попередньої розмітки і застосування кондукторів. Клас точності верстата П.

Технічна характеристика верстата. Найбільший діаметр оброблюваної деталі 35 мм; найбільший діаметр різьблення М24; найбільша ширина фрезування 60 мм; число інструментів 6; число частот обертання шпинделя (усього/по програмі) 12/12; межі частот обертання шпинделя 35,5–1600 хв^{-1} ; число подач по осі Z 18; межі робочих подач по осі Z 10–500 мм/хв; швидкості швидкого переміщення столу і салазок 7000 мм/хв, а при фрезуванні 2200 мм/хв; швидкість швидкого переміщення супорта 4000 мм/хв; розмір робочої поверхні столу 400х600х710 мм; габаритні розміри верстата 1800х2400х2700 мм.

Пристрій ЧПК типу 2П32–3 призначено для керування процесом позиціонування і прямокутної обробки (рівнобіжної координатним осям). Програмоносії – восьмидоріжечна перфострічка, спосіб завдання переміщень в абсолютних значеннях координат. Мається цифрова індикація, передбачений уведення 15 корекцій на довжину інструмента. Система ЧПК замкнута, як датчики зворотного зв'язку використовують сельсин БС155А. Точність позиціонування столу і салазок 0,05 мм, дискретність завдання переміщень і цифрової індикації 0,01 мм. Число керованих координат усього/з них одночасно 3/2.

Основні механізми і рухи у верстаті. На підставі А (рисунок 1.1) установлена колона В, по вертикальних напрямних якої переміщається супорт Г з револьверною голівкою Д (подача по осі Z). На колоні закріплені коробки швидкостей, що передає головніше рух шпинделеві, і коробки подач супорта Г. Хресто-

вий стіл Б, що складається зі столу і салазок, робить два взаємно перпендикулярних рухи подачі по осях X' , Y' від редукторів Е.

Кінематика верстата. Очний рух шпиндель револьверної голівки одержує від асинхронного двошвидкісного електродвигуна М1 ($N = 4/4,5$ кВт, $n = 1000/1500$ хв⁻¹) через передачу $z = 29 - 41$, автоматичну коробку швидкостей, що забезпечує шість частот обертання за рахунок переключення електромагнітних муфт М1 – М5 і далі через передачі $z = 21 - 21$, $z = 37 - 37$, $z = 37 - 42$, $z = 31 - 49 - 47 - 35$ (колесо $z = 35$ установлене на кожному із шести шпинделів, але одержує обертання тільки те, що розташоване на працюючому шпинделі).

Змазування коробки швидкостей походить від насоса, що отримує обертання від електродвигуна М1 через клиноремінну передачу. Отвір у шпинделі для установки інструмента виконано під конус Морзе № 4.

Вірча подача супорта з револьверною голівкою здійснюється від електродвигуна постійного струму М2 ($N = 2,2$ кВт, $n = 3000$ хв⁻¹). Ходовий гвинт XXXIII із кроком $P = 8$ мм з'єднаний хрестовою муфтою з валом безконтактного сельсина – типу БС–155А, що є датчиком зворотного зв'язку по координаті Z.

Робочі подачі супорта відбуваються при включенні електромагнітної муфти М6 через передачі $z = 13 - 86$, $z = 37 - 37 - 37$, $z = 4 - 25$. Швидке переміщення супорта здійснюється при включенні муфти М7 через передачі $z = 37 - 37$, $z = 4 - 25$.

На валові XXXII встановлена електромагнітна муфта, що здійснює гальмування робочої подачі по координаті Z. На валові XXXIV розміщена крильчатка для розбризкування олії.

тому, обертаючи, переміщається вниз. Рухом униз через рейкову пару з рейковим колесом $z = 27$ обертається вал XX з ексцентриком Э1. Від Э1 через систему важелів револьверна голівка звільняється. Одночасно друге рейкове колесо $z = 27$ переміщає рейку на валові XVI, тим самим виводячи з зачеплення колесо $z = 47$ на валові X. Кінематичний ланцюг, що з'єднує привід обертання зі шпинделем, розмикається. Черв'як $z = 1$ доходить до твердого упора, і починається обертання револьверної голівки для зміни інструмента.

Одночасно з обертанням револьверної голівки через передачі $z = 16 - 58$, $z = 30 - 30$ працює позиційний командоапарат, що дає команди на вибір позиції револьверної голівки, зупинку прямого обертання і включення зворотного обертання (включається муфта М9, відключається М8). Револьверна голівка зворотним обертанням доходить до твердого упора супорта і зупиняється. При цьому черв'як $z = 1$, вивертаючись з черв'ячного колеса $z = 28$, рухається нагору; вал XX обертається в зворотному напрямку, зубчасте колесо $z = 47$ вводиться в зачеплення, з колесом $z = 35$. Голівка фіксується, і шпиндель одержує робоче обертання.

Випресовка інструмента зі шпинделя револьверної голівки здійснюється від електродвигуна М3 через колеса $z = 18 - 52$ при включеній муфті М10, черв'ячну передачу $z = 1 - 28$, зубцювату пару $z = 21 - 21$, і ексцентрик Э3, встановлений у пазу осі повороту револьверної голівки.

Змазування револьверного супорта здійснюється за допомогою електродвигуна М3 через колеса $z = 18 - 52 - 75$, вал XV, на якому встановлений ексцентрик Э2, що приводить у дію плунжерний насос.

Позиціонування здійснюється переміщенням столу і салазок. Редуктори подовжнього і поперечного переміщень однакові по конструкції і забезпечують швидке, середнє і повільне переміщення столу і салазок. Тут застосований електропривод зі східчастим регулюванням, підхід до заданої точки відбувається спочатку швидко, а потім повільно на «повзучій» швидкості. На середній швидкості виробляється фрезування. Розглянемо редуктор переміщення салазок. Швидке переміщення салазок відбувається при включенні муфти М11, тоді рух від електродвигуна М4 ($N = 1,1$ кВт, $n = 1500$ хв⁻¹) через зубцюваті пари $z = 40 -$

40, $z = 34 - 26 - 22 - 52 - 34$ передається на гвинт-гайку гойдання XXXIX із кроком $P = 5$ мм.

Повільне переміщення салазок відбувається при включенні муфти M12. Тоді рух від вала XXXIII передається ходовому гвинтові через передачі $z = 16 - 64$, $z = 25 - 55$, $z = 25 - 55$, $z = 16 - 64$, $z = 22 - 52 - 34$. Середнє переміщення столу здійснюється від електродвигуна M4 через зубчасті колеса $z = 16 - 64$, $z = 25 - 55$, $z = 25 - 55$, $z = 38 - 42$ (при включеній муфті M13), $z = 22 - 52 - 34$.

На ходовому гвинті XXXIX розташоване електромагнітне гальмо. Через кулачкову муфту M14 ходовий гвинт з'єднаний з датчиком зворотного зв'язку – сельсином.

Різьбонарізний патрон дозволяє нарізати різьблення від M6 до M24. При нарізуванні різьблення необхідно, щоб подача верстата на один оборот шпинделя була трохи менше кроку нарізає різьблення. Наприклад, при нарізуванні різьблення M12X1.75 у заготовлях з чавуна вибираємо швидкість різання $v = 4,7$ м/хв, тоді частота обертання шпинделя $n = 125$ хв⁻¹.

Передня опора шпинделя 6 (рисунок 1.2) виконана у виді дворядного роликопідшипника і завзятих підшипників. В міру зносу шийок зазор усувають шліфуванням торців компенсатора 1, а потім отримане положення фіксується гайкою 2. Осьовий натяг завзятих шарикопідшипників регулюють гайкою 3 з фіксацією положення упором 4 у зубчастому колесі 5.

Механізм закріплення револьверної голівки на супорті верстата (рисунок 1.3). Револьверна голівка зафіксована тягами 2 супорти, що знаходяться в пазу револьверної голівки 3. Ексцентрик 1, обертаючи, натискає на важіль 8, що стискає тарілчасті пружини 4 і тим самим звільняє револьверну голівку 3. Необхідну силу затиску регулюють гайками 5 і контргайками 6. Торці гвинтів 7 важеля 8 повинні бути встановлені щодо торців тяг 2 таким чином, щоб при натисканні ексцентрика 1 на важіль 8 утворився зазор між торцями голівок тяг 2 і Т – видним пазом револьверної голівки 3, рівний 0,3–0,5 мм, після чого гвинти 7 закріплюють гайками 9.

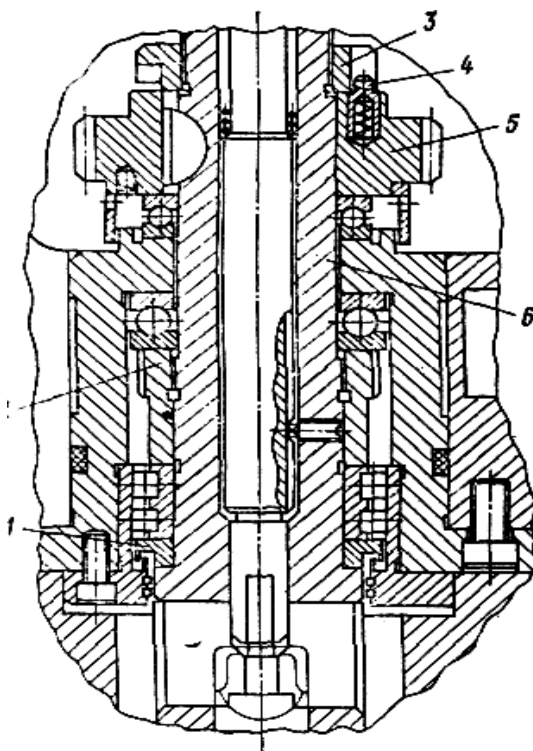


Рисунок 1.2 – Передня опора шпинделя верстата 2Р135Ф2–1

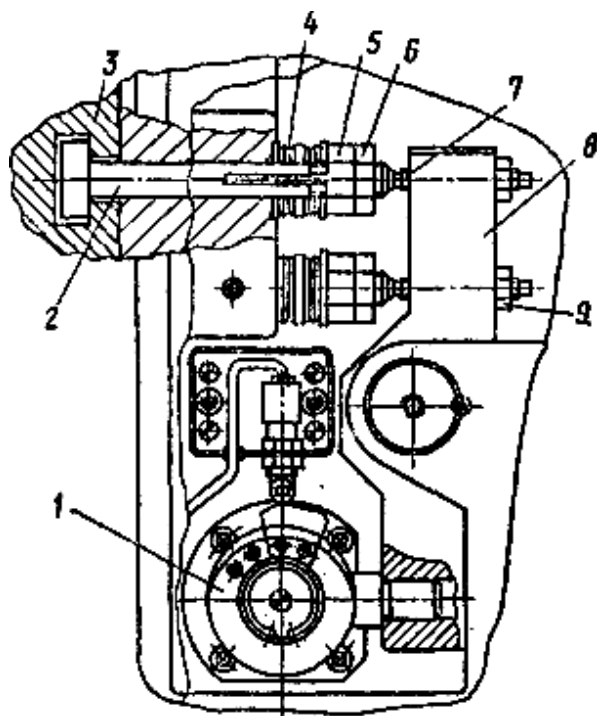


Рисунок 1.3 – Механізм закріплення револьверної голівки на супорті верстата 2Р135Ф2–1

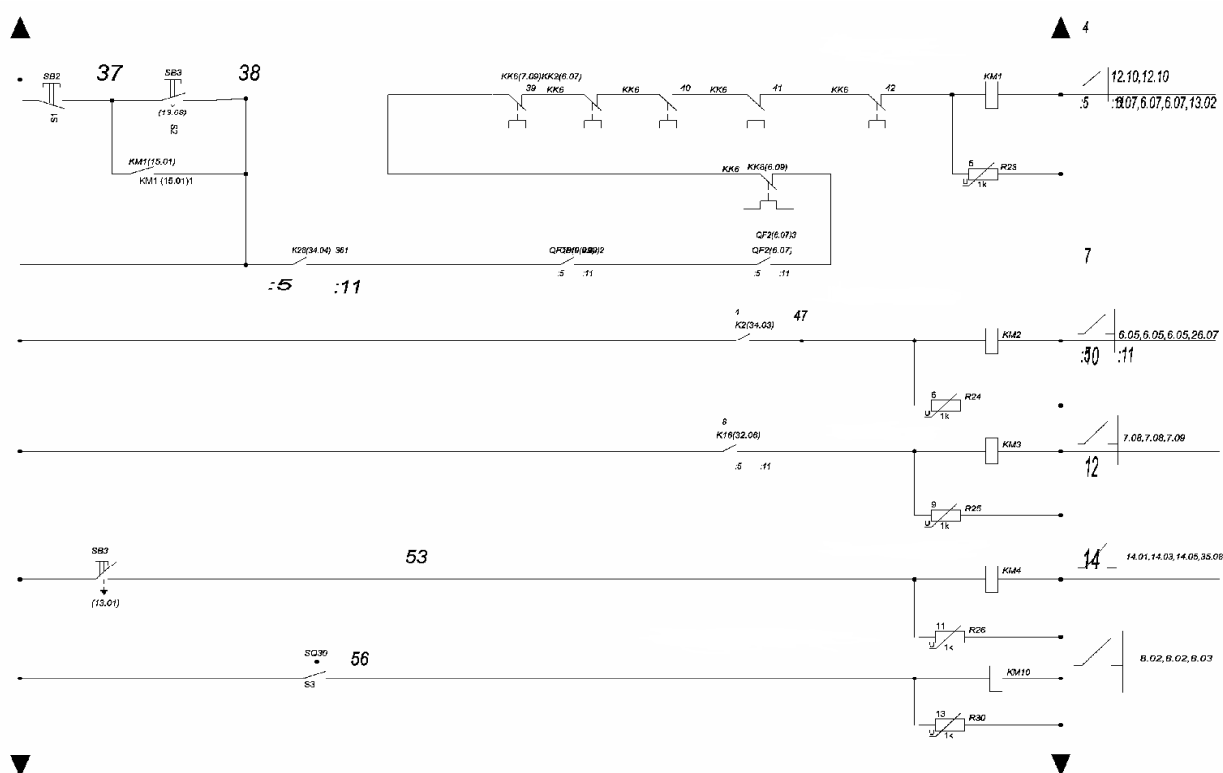


Рисунок 1.4 – Діюча принципова схема свердлильного
верстата 2P135Ф2-1

2 Опис комплектного електропривода „ КЕМЕК ”

Перетворювач типу « КЕМЕК » призначений для укомплектування приводів з роздільним керуванням. Його застосування дозволяє досягти підвищеної надійності, функціональності і зручності в експлуатації.

Умови експлуатації:

- температура навколишнього середовища - від 5 до 45⁰С;
- максимальна вологість повітря - 80% при 30⁰С;
- висота над рівнем моря - до 1000м (при більшій висоті використовуються з зменшеною потужністю);
- навколишнє середовище повинне бути: вибухобезпечним, без наявності струмопровідного пилу і агресивних газів, у концентрації, що руйнує метал і ізоляцію.

2.1 Технічні дані електропривода „ КЕМЕК ”

Електропривод перетворювача

- | | |
|--|-------------------------|
| - електродвигун постійного струму типу | 4-7МВО-2СР-М-8АЕВ16М; |
| - номінальний момент | 4,7/2,3 Нм; |
| - максимальна частота обертання | 2000 min ⁻¹ |
| - діапазон регулювання швидкості | >2000 min ⁻¹ |
| - номінальна напруга якоря | 60 V; |
| - номінальний режим роботи | тривалий |

Тиристорний перетворювач

- | | |
|---------------------------------------|---------|
| - тип використовуваного перетворювача | 2РЕВ16; |
| - номінальний струм | 20А; |
| - максимальний струм | 80А; |
| - максимальна керуюча напруга | ±10 V; |
| - вхідний імпеданс | >20k; |
| - маса без електропривода | 6,5кг. |

Силовий трансформатор:

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| - тип трансформатора | T1EB-Dzn, 380/105/32, 7кВа; |
| - виконання | трифазне; |

- номінальна первинна напруга	380 V;
- номінальна вторинна напруга	105 V;
- номінальний струм первинної обмотки	2,7A;
- номінальний струм вторинної обмотки	9,8A;
- маса	18 кг

Конструкція електропривода. Перетворювач має блокову конструкцію, (силовий блок і блок керування) і призначений для вертикального монтажу в металевій шафі. Забезпечено можливість циркуляції повітря через перетворювач. Блокова конструкція забезпечує оперативну заміну блоків і вільний доступ до контрольних точок.

Блок керування містить чотири плати "Живлення", "Фазове керування", "Логіка" і "Регулятори". Плата "Живлення" закріплена нерухомо над тиристорним блоком, а інші встановлені перед нею на пристрої, що забезпечує обертання кожної з них навколо нерухомої осі.

Тиристорний блок являє собою керований випрямляч, що має дві зустрічно зв'язані трифазні схеми.

Функціональна схема

Функціональна схема тиристорного перетворювача представлена на рисунку 2.1. Електропривод являє собою систему автоматичного регулювання швидкості обертання високомоментного двигуна, що виконана за двоконтурною схемою з підлеглим регулюванням. На рисунку 2.1 позначені: 1 - задатчик керуючої напруги; 2 - регулятор швидкості; 3 - коригувальна ланка; 4 - блок адаптації; 5 - блок «Логіка»; 6 - статичне струмообмеження; 7 - динамічне струмообмеження; 8 - блок «Живлення»; 9 - регулятор струму; 10 - блок формування керуючих імпульсів, 11 - контроль напрямку фаз.

Блок "Логіка" здійснює комплекс захистів сигналізацій і індикацій: /CP/ - захист від обриву фази, неправильної фазировки; /OS/ - захист від перевищення максимальної швидкості обертання; /OC/ - захист від перевищення максимального струму електродвигуна; /TG/ - захист від обриву тахогенератора (ООС по швидкості); /OL/ - захист від динамічного перевантаження електродвигуна; /RD/

- наявність релейного виходу готовності приводу до роботи; RS – серієсний опір ланцюга якоря (датчик струму).

Регулятори швидкості і струму мають незалежне настроювання пропорційного і інтегрального коефіцієнта, а так само постійний час регулятора. Передбачено можливість плавної зміни параметрів регулятора з метою полегшення налагодження приводу.

Блок адаптації 4 призначений для залежної зміни коефіцієнта підсилення і постійної часу регулятора швидкості при низьких частотах обертання, при цьому, для цього використовується широтно-імпульсна модуляція. Зворотній зв'язок по швидкості здійснюється тахогенератором (TG). Призначення коригувальної ланки 3 - поліпшення динамічних параметрів приводу. Датчиком зворотного зв'язку по струму служить серієсний опір у ланцюзі якоря (RS), розміщений у середині перетворювача, силові кінці якого виведені на силовий блок. Статичне обмеження струму здійснюється на виході регулятора швидкості за принципом обмеження його напруги, що є функцією струму. Динамічне струмообмеження - функція частоти обертання, здійснюється функціональним перетворювачем відповідно до комутаційній кривій ел. двигуна.

Вихідний сигнал регулятора струму подається на вхід блоку "Фазове керування", що виконане по вертикальному принципі з джерелом опорної напруги і складається з трьох ідентичних каналів, що мають у своєму складі блок синхронізації 11 і блок формування керуючих імпульсів 10, одночасно служить і для їхнього розподілу.

Призначення блоку "Логіка" полягає в тому, щоб стежити за правильною роботою електропривода і запобігати можливості для аварії. Спрацьовування захистів і нормальний стан приводу реєструється світловою індикацією. Пуск елек-

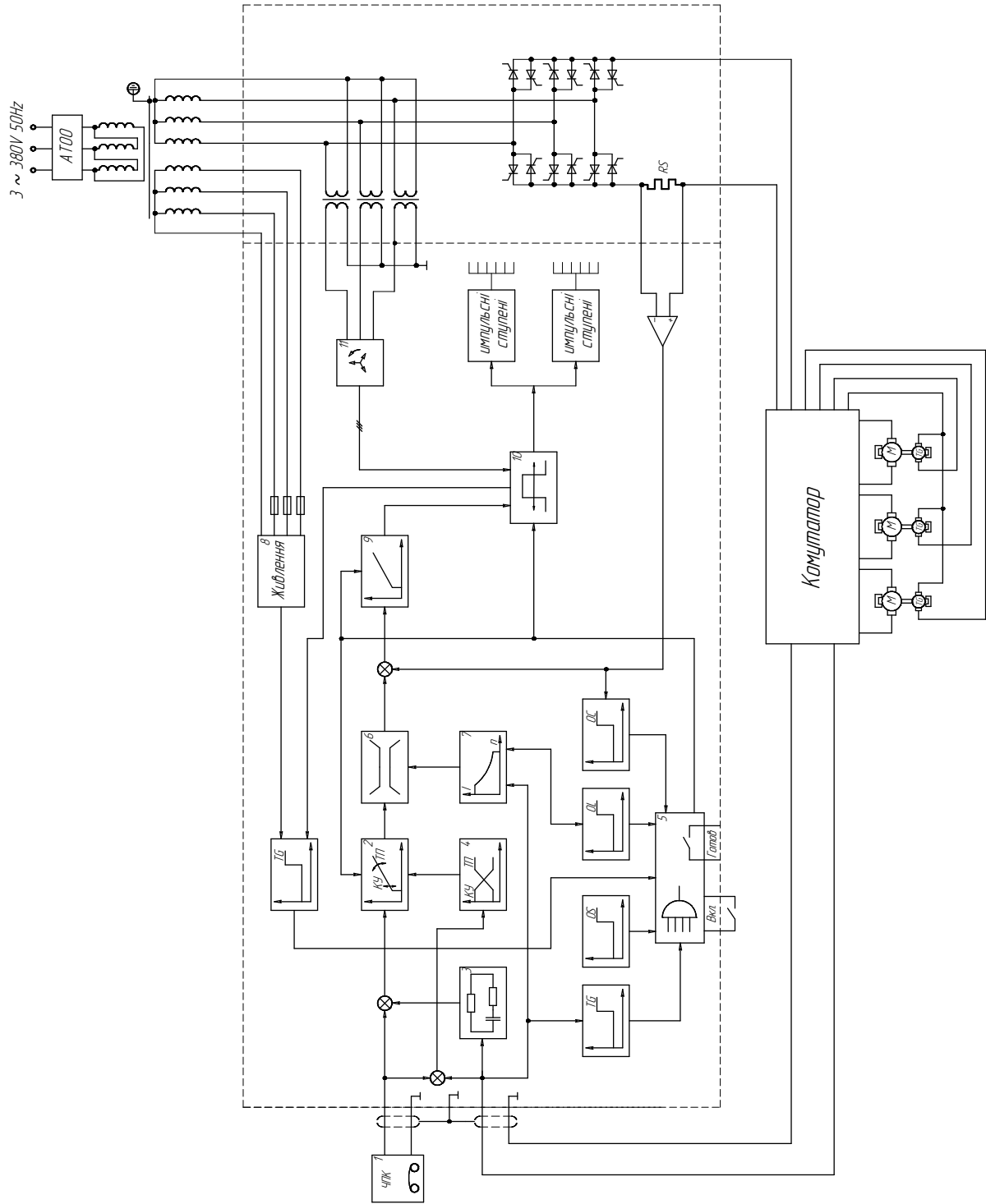


Рисунок 2.1 – Функціональна схема електропривода «КЕМЕК»

тропривода після спрацювання одного з захистів і відновлення нормального стану можливий тільки після повторної подачі сигналу, що допускає до роботи.

Живлення здійснюється з плати "Живлення", що забезпечує напругу ± 24 V, ± 15 V і -30 V. Для стабілізації напруги ± 15 V використовуються універсальні інтегральні стабілізатори типу МАА723.

Перетворювач захищений від перевантаження по струму і від короткого замикання за допомогою автоматичного вимикача А ТОО/16 А. Для синхронізації фаз використовуються синхронізуючі трансформатори, а для керування тиристорними - імпульсними трансформаторами.

2.2 Математичний опис електропривода « КЕМЕК »

Електропривод «КЕМЕК» складається з - ПІ-регулятора швидкості, вузла адаптації регулятора швидкості на малих частотах обертання, ПІ-регулятора струму, формувач сигналу зворотного зв'язку по швидкості, формувача сигналу зворотного зв'язку по струму і власне тиристорного перетворювача із СІФУ.

Математичний опис регулятора швидкості. Принципова схема регулятора швидкості складається з П - регулятора виконаного на мікросхемі D45, І - регулятора виконаного на мікросхемі D46 і диференціального підсилювача D47.

Схема пропорційної частини регулятора швидкості представлена на рисунку 2.2.

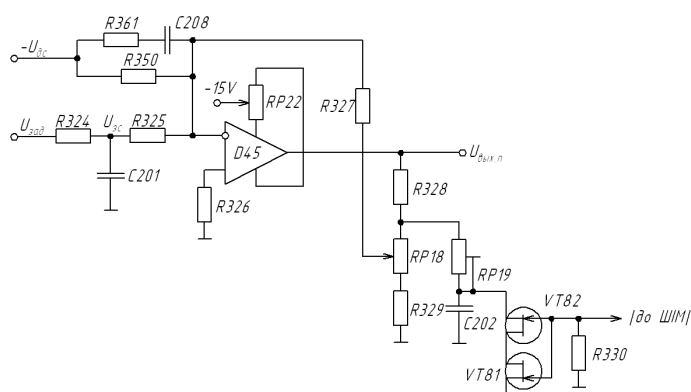


Рисунок 2.2 – Схема пропорційної частини регулятора швидкості

П - регулятор швидкості складається з вхідного RC-фільтра (R324, C201), корегуючої ланки по ланцюзі зворотного зв'язку (R350, R361, C208), дільника ланцюга зворотного зв'язку підсилювача (R328, R329, RP18) який разом з резисторами R327 і R325 задають коефіцієнт пропорційності регулятора. До дільника

зворотного зв'язку підключений ланцюжок адаптації (RP-19, VT81, VT82) призначений для зміни коефіцієнта пропорційності регулятора в зоні адаптації (зона знижених швидкостей).

Визначимо передатну функцію П - регулятора (рисунки 2.2.) по входах задання швидкості $U_{\text{зад}}$ і датчика швидкості $-U_{\text{дс}}$.

Позначимо рівнобіжне з'єднання опорів R329, RP18 і RP19, $R_{\text{кл.ср}}$ як максимально можливий адаптивний опір $R_{\text{ад.п}}^{\text{max}}$:

$$R_{\text{ад.п}}^{\text{max}} = (R_{329} + RP_{18}) \cdot R_{\text{кл.ср}} = \frac{(R_{329} + RP_{18}) \cdot R_{\text{кл.ср}}}{R_{329} + RP_{18} + R_{\text{кл.ср}}} \quad (2.1)$$

де $R_{\text{кл.ср}}$ - середнє значення активного опору ланцюга ключа за період керуючої напруги широтно - імпульсного модулятора (ШІМ).

Поточний опір адаптації розраховується в такий спосіб:

$$R_{\text{ад.п}} = R_{\text{ад.п}}^{\text{max}} \cdot \frac{R_{329} + RP_{18}^*}{R_{329} + RP_{18}} \quad (2.2)$$

Тут і далі RP^* - означає нижче за схемою опір резистора

Використовуючи відомі співвідношення для прямокутних імпульсів, та обставина, що напругу на ключі можна вважати постійною, завдяки дії конденсатора C202, запишемо вираз для МОП-ключей:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{с}} \quad (2.3)$$

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{max}} \cdot \frac{Q-1}{Q} \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{T}{t_{\text{и}}}$$

де $U_{\text{с}}$ - напруга на конденсаторі C202; $U_{\text{ср}}$ - середнє за період T напруга на ключі; $I_{\text{ср}}$ - середній за період струм через ключ; I_{max} - максимальне значення струму через ключ; Q - скважність керуючих імпульсів ШІМ; $t_{\text{и}}$ - тривалість позитивного імпульсу

Почленно розділивши (2.3) на (2.4) одержимо значення середнього опору гілки ключа за період (під гілкою ключа маємо на увазі ланцюг з RP19, VT81, VT82)

$$R_{KL.CP} = R_{MIN.П} \cdot \frac{Q-1}{Q} \quad (2.5)$$

де $R_{min} = RP_{19} + 2R_{нас}$ - мініально можливий опір галузі ключа;

$R_{нас}$ - опір насиченого каналу транзистора (порядку 100 Ом); RP_{19} - значення настроєного опору для настроювання значення $R_{тип}$. Тоді вираження (2.1) з врахуванням (2.5) буде мати такий вигляд

$$R_{AD.П}^{max} = \frac{(R_{329} + RP_{18}) \cdot (RP_{19} + 2 \cdot R_{НАС}) \cdot Q}{(R_{329} + RP_{18}) \cdot (Q-1) + (RP_{19} + 2 \cdot R_{НАС}) \cdot Q} \quad (2.6)$$

Таким чином, $R_{ад.п}^{max}$ є функцією Q ($R_{ад.п}^{max} = f(Q)$). Оскільки в зоні адаптації скважності імпульсів ШІМ зворотнє - пропорційна кутовій швидкості двигуна, то можна записати:

$$R_{AD.П} = f\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.7)$$

З врахуванням вищесказаного перетворимо схему приведену на рисунку 2.2. на розрахункову (рисунок. 2.3). Тут симетризуючий резистор R_{326} (не впливає на динаміку системи) не показаний.

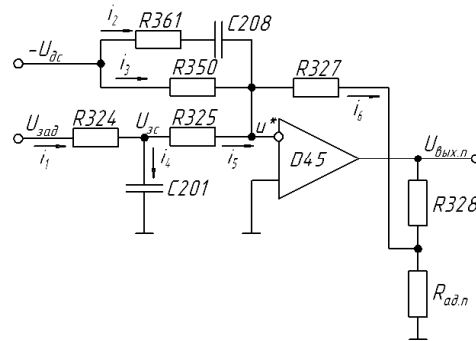


Рисунок – 2.3

Запишемо систему рівнянь, що зв'язує напругу завдання $U_{зад}$ з вихідною напругою мікросхеми D45 (при $U_{дс}=0$) $U_{вых.п.}$, вважаючи операційний підсилювач ідеальним $K_y = \infty$, $R_{вх} = \infty$, при цьому $i^* = 0$ ("мнима земля"). Тоді, відповідно до прийнятого на рисунку 2.3. позначення, запишемо

$$U_{эс} = U_{зад} - i_1 \cdot R_{324} = i_5 \cdot R_{325} = \frac{1}{C_{201}} \int i_4 dt \quad (2.8)$$

$$-i \cdot R_{327} = U_{вых.п.} \cdot \frac{R_{адn}}{R_{328} + R_{адn}^{max}} \quad (2.9)$$

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_4 + \dot{i}_5 \quad (2.10)$$

$$\dot{i}_5 = \dot{i}_6 \quad (2.11)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, знаходимо:

$$\frac{dU_{\text{эс}}}{dt} + \frac{U_{\text{эс}}}{C_{201} \cdot R_{324}} + \frac{U_{\text{эс}}}{C_{201} \cdot R_{325}} = \frac{U_{\text{зад}}}{C_{201} \cdot R_{324}} \quad (2.12)$$

$$U_{\text{вых.п}} = \frac{(R_{328} + R_{\text{ад.п}}^{\text{max}}) \cdot R_{327}}{R_{\text{ад.п}} \cdot R_{325}} \cdot U_{\text{эс}} \quad (2.13)$$

Перетворивши по Лапласу при нульових початкових умовах співвідношення (2.12) і (2.13), можна одержати передатну функцію П - регулятора задаючого впливу:

$$W_{\text{РС.П}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.П}}(p)}{U_{\text{ЗАД}}(p)} = - \frac{(R_{328} + R_{\text{АД.П}}^{\text{max}}) \cdot R_{327}}{R_{\text{АД.П}} \cdot R_{325}} \cdot \frac{\frac{R_{325}}{R_{324} + R_{325}}}{\frac{R_{324} \cdot R_{325}}{R_{324} + R_{325}} \cdot C_{201} \cdot p + 1} \quad (2.14)$$

Прийняв

$$T_{\Phi} = \frac{R_{324} \cdot R_{325}}{R_{324} + R_{325}} \cdot C_{201} \cdot k_{\Phi} = \frac{R_{325}}{R_{324} + R_{325}}; k_{\text{РС.П}} = \frac{(R_{328} + R_{\text{АД.П}}^{\text{max}}) \cdot R_{327}}{R_{\text{АД.П}} \cdot R_{325}}$$

отримаємо

$$W_{\text{РС.П}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.П}}(p)}{U_{\text{ЗАД}}(p)} = -k_{\text{РС.П}} \cdot \frac{k_{\Phi}}{T_{\Phi} \cdot p + 1} \quad (2.15)$$

Запишемо систему рівнянь, що зв'язує напругу зворотного зв'язку по швидкості $-U_{\text{дс}}$ із вихідною напругою D45 (при $U_{\text{зад}}=0$) $U_{\text{ВЫХ.П}}$, вважаючи операційний підсилювач ідеальним. Тоді, згідно з прийнятим на рисунку 2.3. позначенням, запишемо

$$\dot{i}_6 = \dot{i}_2 + \dot{i}_3 \quad (2.16)$$

$$-U_{\text{дс}} = \dot{i}_3 \cdot R_{360}$$

$$\dot{i}_3 \cdot R_{360} = \dot{i}_2 \cdot R_{361} + \frac{1}{C_{208}} \cdot \int i_2 dt \quad (2.17)$$

$$\dot{i}_3 \cdot R_{360} = \dot{i}_2 \cdot R_{361} + \frac{1}{C_{208}} \cdot \int i_2 dt \quad (2.18)$$

$$\dot{i}_6 \cdot R_{327} = U_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{R_{\text{АД.П}}}{R_{328} + R_{\text{АД.П}}^{\text{max}}} \quad (2.19)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, одержимо наступний вираз зв'язку напруги $U_{\text{ос}}$ по швидкості $-U_{\text{дс}}$ із вихідною напругою D45 $U_{\text{ВЫХ.П}}$

$$\begin{aligned} \frac{R_{ад.н} \cdot R_{361}}{(R_{328} + R_{ад.н}^{max}) \cdot R_{327}} \frac{dU_{вых.н}}{dt} + \frac{R_{ад.н} / R_{327}}{(R_{328} + R_{ад.н}^{max}) \cdot C_{208}} \cdot U_{вых.н} = \\ = \frac{R_{361} + R_{350}}{R_{350}} + \frac{dU_{дс}}{dt} + \frac{U_{дс}}{C_{208} \cdot R_{350}}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Перетворивши по Лапласу рівняння (2.19) можна одержати передатну функцію по ланцюзі від'ємного зворотного зв'язку:

$$W_{OC}(p) = \frac{U_{ВЫХ.П}(p)}{U_{ДС}(p)} = k_{OC} \cdot \frac{T_1 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p + 1} \quad (2.21)$$

$$T_1 = (R_{360} + R_{361}) \cdot C_{208} \quad (2.22)$$

$$T_2 = R_{361} \cdot C_{208} \quad (2.23)$$

$$k_{OC} = \frac{(R_{328} + R_{АД.П}^{max}) \cdot R_{327}}{R_{АД.П} \cdot R_{360}} \quad (2.24)$$

Структурна схема П- регулятора швидкості. Ділянка структурної схеми, що відповідає отриманим передатним функціям (2.15) і (2.21), представлена на рисунку 2.4.

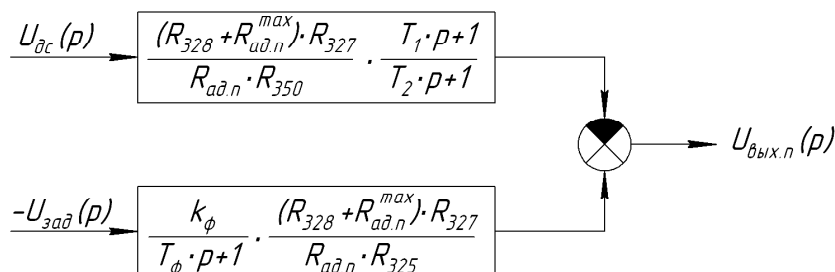


Рисунок – 2.4

Перетворимо схему показану на рисунку 2.4. внесенням коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку в основний ланцюг (рисунок 2.5)

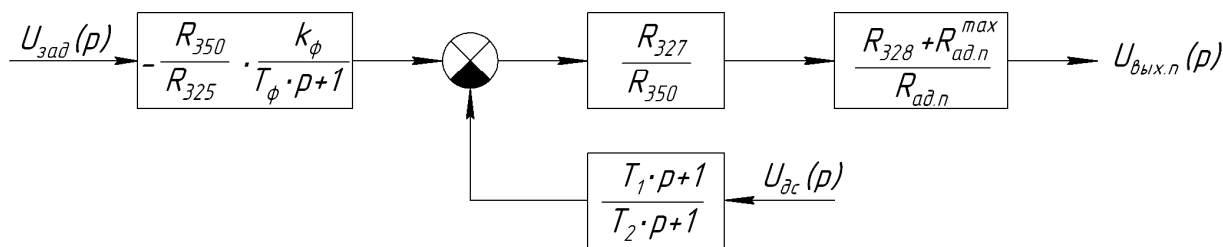


Рисунок – 2.4

Математичний опис І-регулятора швидкості. Принципова схема інтегральної частини регулятора швидкості представлена на рисунку 2.6.

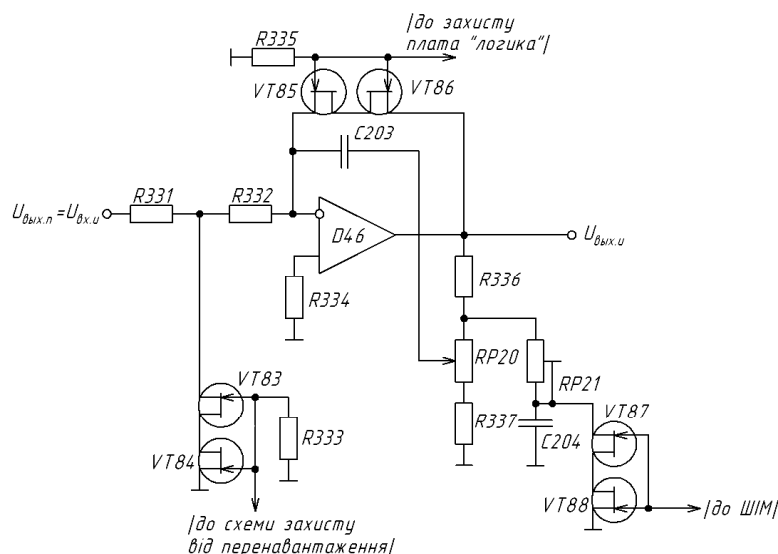


Рисунок – 2.6

І- регулятор швидкості складається з захисних МОП- ключів (VT83, VT84), ланцюга формування початкових (нульових) умов (VT85, VT86), ділянки ланцюга зворотного зв'язку підсилювача (R336, R337, RP20) який разом з резисторами R331, R332 і конденсатора C203 задає інтегральний коефіцієнт регулятора. До ділянки зворотного зв'язку підключений ланцюжок адаптації (RP21, VT87, VT88) призначений для зміни інтегрального коефіцієнта регулятора в зоні адаптації (зона знижених швидкостей).

Визначимо передатну функцію І - регулятора, що входить до складу регулятора швидкості зображеного на рисунку 2.6.

Позначимо паралельне з'єднання резисторів R337, RP20 і RP21, $R_{кл.ср.}$ як максимально можливий адаптивний опір $R_{ад.п}^{max}$

$$R_{ад.п}^{max} = (R_{337} \parallel RP_{20}) \parallel R_{кл.ср.} = \frac{(R_{337} + RP_{20}) \cdot R_{кл.ср.}}{R_{337} + RP_{20} + R_{кл.ср.}} \quad (2.26)$$

де $R_{кл.ср.}$ – середнє значення активного опору ланцюга ключа за період керуючої напруги ШІМ (широтно - імпульсного модулятора).

Мінімальний опір адаптації виходить у такий спосіб:

$$R_{ад.п}^{min} = R_{ад.п}^{max} \cdot \frac{R_{337} + RP_{20}^*}{R_{337} + RP_{20}} \quad (2.27)$$

Використовуючи ті ж міркування що і раніше, можна записати -

$$R_{АД.И}^{max} = \frac{(R_{337} + RP_{20}) \cdot R_{MIN.И} \cdot Q}{(R_{337} + RP_{20}) \cdot (Q - 1) + R_{MIN.И} \cdot Q} \quad (2.28)$$

де $R_{min} = RP_{21} + 2 R_{нас}$ - мінімально можливий опір галузі ключа, $R_{нас}$ - опір насиченого каналу транзистора (порядку 100 їм); RP_{21} - значення надбудовного опору для настроювання значення R_{min} .

З урахуванням вищесказаного перетворимо схему приведену на рисунку 2.2 до розрахункового варіанта (рисунок 2.6). Тут симетрируючий резистор R_{334} (не впливає на динаміку системи), а так само ланцюга захисту і формування початкових умов не показані.

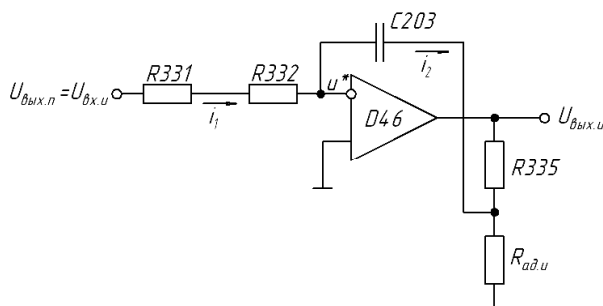


Рисунок – 2.6

Запишемо систему рівнянь, що зв'язує напругу пропорційної складової регулятора $U_{ВЫХ}$ з вихідною напругою підсилювача D46 $U_{ВЫХ}$, вважаючи, як і колись, операційний підсилювач ідеальним: $K_y = \infty$ И, $R_{вх} = \infty$, при цьому $i^* = 0$ ("мніма земля"). Тоді, згідно прийнятим на рисунку 2.6 позначенням, можна записати:

$$i_1 = i_2 \quad (2.29)$$

$$i_1 \cdot (R_{331} + R_{332}) = U_{ВХ.И} \quad (2.30)$$

$$i_2 = C_{203} \cdot \frac{dU_C}{dt} \quad (2.31)$$

$$U_C = -\frac{R_{АД.И}}{R_{336} + R_{АД.И}^{max}} \cdot U_{ВЫХ.И} \quad (2.32)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, одержимо наступний вираз зв'язку вхідної напруги інтегратора $U_{ВХ.і}$ з його вихідною напругою $U_{ВЫХ.і}$

$$\frac{U_{ВЫХ.И}}{R_{331} + R_{332}} = -\frac{R_{АД.И} \cdot C_{203}}{(R_{336} + R_{АД.И}^{max})} \cdot \frac{dU_{ВЫХ.И}}{dt} \quad (2.33)$$

Перетворивши по Лапласу рівняння (2.32), можна одержати передатну функцію, що зв'язує вхідну напругу І - регулятора $U_{\text{ВЫХ.И}}$ (вона ж і вихідна напруга П- регулятора $U_{\text{ВЫХ.И}}$) з його вихідною напругою $U_{\text{ВЫХ.И}}$:

$$W_{\text{РС.И}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.И}}(p)}{U_{\text{ВХ.И}}(p)} = - \frac{R_{336} + R_{\text{АД.И}}^{\text{max}}}{R_{\text{АД.И}} \cdot C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332})} \cdot \frac{1}{p} \quad (2.34)$$

Як що прийняти

$$k_{\text{РС.И}} = \frac{R_{336} + R_{\text{АД.И}}^{\text{max}}}{R_{\text{АД.И}}}, T_{\text{РС.И}} = C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332})$$

то можна отримати

$$W_{\text{РС.И}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.И}}(p)}{U_{\text{ВХ.И}}(p)} = -k_{\text{РС.И}} \cdot \frac{1}{T_{\text{РС.И}} \cdot p} \quad (2.35)$$

Математичний опис суматора П- і І- складових. Для формування ПІ- регулятора з П- і І- регуляторів застосовується диференціальний підсилювач на операційному підсилювачі D47 (див. рисунок 2.7).

Запишемо передатну функцію диференціального підсилювача, реалізованого на мікросхемі D47 по його входам (прямому й інверсному). Коефіцієнт передачі по інверсному вході

$$k^- = \frac{R_{341}}{R_{338}} \quad (2.36)$$

Коефіцієнт передачі по прямому вході:

$$k^+ = \frac{R_{341}}{R_{339}} \cdot \frac{G_3^-}{G_3^+} \quad (2.37)$$

де G_3^+ - еквівалентна сумарна провідність ланцюгів інверсного входу; G_3^- - еквівалентна сумарна провідність ланцюгів прямого входу.

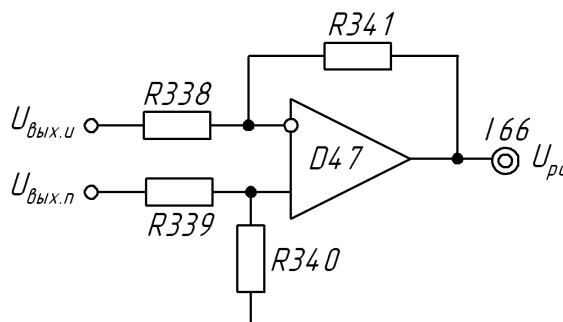


Рисунок – 2.7

Оскільки вихідний опір операційних підсилювачів D45 і D46 малий і їм, з достатньою для розрахунку точності, можна зневажити, те маємо:

$$G_{\mathcal{G}}^{-} = \frac{1}{R_{341}} + \frac{1}{R_{338}} \quad (2.38)$$

$$G_{\mathcal{G}}^{+} = \frac{1}{R_{340}} + \frac{1}{R_{339}} \quad (2.39)$$

При Виконанні умови $G_3^{-} = G_3^{+}$ маємо наступне:

$$\frac{1}{R_{341}} + \frac{1}{R_{338}} = \frac{1}{R_{340}} + \frac{1}{R_{339}} \quad (2.40)$$

Таким чином, коефіцієнт передачі по прямому входу запишеться як:

$$k^{+} = \frac{R_{341}}{R_{339}} \quad (2.41)$$

У цьому випадку передатні функції по прямому й інверсному входах пишуться в такий спосіб:

$$W^{-}(p) = \frac{U_{PC}(p)}{U_{BX.II}(p)} = -\frac{R_{341}}{R_{338}} = -k^{-} \quad (2.42)$$

$$W^{+}(p) = \frac{U_{PC}(p)}{U_{BX.PI}(p)} = \frac{R_{341}}{R_{339}} = k^{+} \quad (2.43)$$

Структурна схема ПІ-регулятора швидкості. Зобразимо ділянку структурної схеми, що відповідає пропорційно-інтегральному регулятору швидкості (РШ), внесе передатну функцію $W^{+}(p)$ в головний ланцюг схеми (рисунок 2.8).

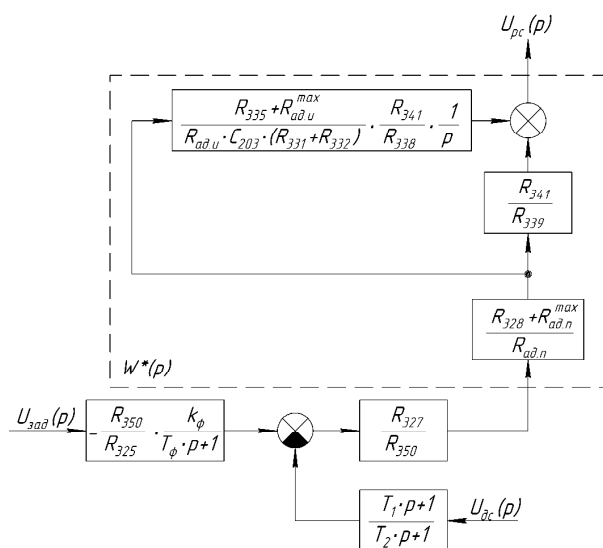


Рисунок – 2.8

Визначимо передатну функцію $W^{*}(p)$, що відповідає виділеній пунктиром частини структурної схеми (рисунок 2.8)

$$W^*(p) = \left[\frac{R_{328} + R_{AD.II}^{max}}{R_{AD.II}} \right] \cdot \left[\frac{R_{341}}{R_{339}} + \frac{R_{336} \cdot R_{341} + R_{AD.II}^{max} \cdot R_{341}}{R_{AD.II} \cdot C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332}) \cdot R_{338}} \cdot \frac{1}{p} \right] \quad (2.44)$$

$$W^*(p) = \left[\frac{R_{329} + RP_{18}}{R_{329} + RP_{18}^*} \right] \cdot \left[\frac{R_{328}}{R_{AD.II}^{max}} + 1 \right] \cdot \left[\frac{R_{341}}{R_{339}} + \frac{R_{337} + RP_{20}}{R_{337} + RP_{20}^*} \cdot \frac{\left(\frac{R_{336} \cdot R_{341}}{R_{AD.II}^{max}} \right) + R_{341}}{C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332}) \cdot R_{338}} \cdot \frac{1}{p} \right] \quad (2.45)$$

З формул (2.6) і (2.27) випливає, що:

$$\frac{1}{R_{ad.n}^{max}} = \frac{(R_{329} + RP_{18}) \cdot (Q-1) + (RP_{19} + 2 \cdot R_{nac}) \cdot Q}{(R_{329} + RP_{18}) \cdot (RP_{19} + 2 \cdot R_{nac}) \cdot Q} = \frac{1}{R_{329} + RP_{18}} + \frac{Q-1}{R_{min.n} \cdot Q}, \quad (2.46)$$

$$\frac{1}{R_{ad.u}^{max}} = \frac{(R_{337} + RP_{20}) \cdot (Q-1) + (RP_{21} + 2 \cdot R_{nac}) \cdot Q}{(R_{337} + RP_{20}) \cdot (RP_{21} + 2 \cdot R_{nac}) \cdot Q} = \frac{1}{R_{337} + RP_{20}} + \frac{Q-1}{R_{min.u} \cdot Q}. \quad (2.47)$$

З обліком (2.46) і (2.47) передатну функцію $W^*(p)$ представимо у виді:

$$W^*(p) = \left[\frac{Q-1}{Q} \cdot k_1 + k_2 \right] \cdot \left[1 + \frac{Q-1}{Q} \cdot \frac{1}{\tau_1 \cdot p} + \frac{1}{\tau_2 \cdot p} \right] \quad (2.48)$$

$$k_1 = \frac{(R_{329} + RP_{18}) \cdot R_{341} \cdot R_{328}}{(R_{329} + RP_{18}^*) \cdot R_{339} \cdot R_{MIN.II}} \quad (2.49)$$

$$k_2 = \frac{R_{329} + RP_{18} + R_{328}}{R_{329} + RP_{18}^*} \cdot \frac{R_{341}}{R_{339}} \quad (2.50)$$

$$\tau_1 = \frac{(R_{337} + RP_{20}^*) \cdot C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332}) \cdot R_{338} \cdot R_{MIN.II}}{(R_{337} + RP_{20}) \cdot R_{336} \cdot R_{339}} \quad (2.51)$$

$$\tau_2 = \frac{(R_{337} + RP_{20}^*) \cdot C_{203} \cdot (R_{331} + R_{332}) \cdot R_{338}}{(R_{337} + RP_{20} + R_{336}) \cdot R_{339}} \quad (2.52)$$

Передатну функцію (2.48) можна привести до канонічної форми запису передатної функції ПІ-регулятора

$$W^*(p) = k_{AD} \cdot \frac{\tau_{AD} \cdot p + 1}{\tau_{AD} \cdot p} \quad (2.53)$$

$$k_{AD} = \frac{k_1 \cdot (Q-1) + k_2 \cdot Q}{Q} \quad (2.54)$$

$$\tau_{AD} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot Q}{\tau_1 \cdot Q + \tau_2 \cdot (Q-1)} \quad (2.55)$$

З урахуванням пророблених перетворень, що відповідає $W^*(p)$ ділянка структурної схеми (рисунок 2.8), перетвориться до виду, показаному на рисунку 2.9.

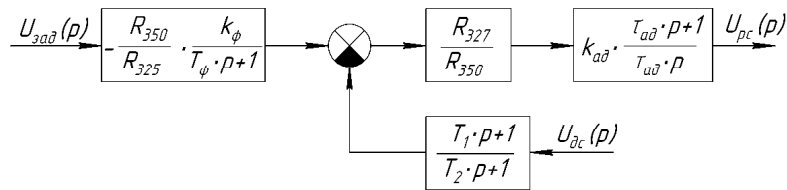


Рисунок – 2.9

Визначимо коефіцієнт пропорційності кутовою швидкістю двигуна і скважність імпульсів і ШІМ вузла адаптації.

Нехай система працює в установленому ($w=w_0$) режимі. При цьому, на прямий вхід операційного підсилювача D56 блоку адаптації подається напруга з датчика швидкості

$$-U_{ДС} = -k_{ТГ} \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_{359}}{R_{359} + R_{358}} \quad (2.56)$$

На вхід, що інвертує, D56 подається напруга завдання швидкості:

$$U_{3C} = U_{3C}^{max} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_{MAX}} \quad (2.57)$$

тут $k_{ТГ}$ - крутість характеристики тахогенератора;

U_{3C}^{max} - максимальне значення напруги, що задається, на вході регулятора швидкості, що відповідає кутовій швидкості ω_{MAX} .

Вихідна напруга підсилювача D56 прямо пропорційно значенню кутової швидкості (якій встановлюється):

$$U_{D56} = \omega_0 \cdot k^* \quad (2.58)$$

$$k^* = k_{ТГ} \cdot \frac{R_{359}}{R_{358} + R_{359}} \cdot \frac{(R_{394} + R_{395} + R_{399}) \cdot R_{398}}{(R_{396} + R_{397} + R_{398}) \cdot (R_{394} + R_{395})} + \frac{U_{3C}^{max}}{\omega_{MAX}} \cdot \frac{R_{399}}{R_{394} + R_{395}} \quad (2.59)$$

На операційному підсилювачі D57 зібраний випрямувач з одиничним коефіцієнтом передачі:

$$U_{D57} = |U_{D56}| = \omega_0 \cdot k^* \quad (2.59)$$

Ключі на МОП- транзисторах VT81, VT82 і VT87, VT88 цілком закриваються при надходженні на затвори від'ємної напруги. Визначимо скважність позитивних імпульсів Q^+ ШІМ.

Скважність визначається формулою:

$$Q^+ = \frac{T}{t^+} \quad (2.60)$$

де t^+ - тривалість позитивного імпульсу; T - період проходження імпульсів.

Вихідна напруга операційного підсилювача D57 міняється в межах від $U_{\max}$ до нуля, при цьому скважність змінюється від ∞ до 1 відповідно. Тоді залежність між напругою U_{D57} і скважністю $Q=Q^+$ визначимо як:

$$Q^+ = \frac{U_{MAX}}{U_{D57}} \quad (2.61)$$

де $U_{\max}$ - амплітуда пилоподібної напруги на виході D59 (див. рисунок 2.10).

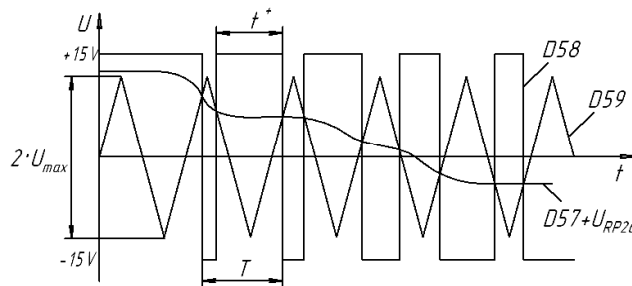


Рисунок – 2.10

Величиною зворотної скважності є коефіцієнт заповнення імпульсів:

$$\frac{1}{Q^+} = \frac{U_{D57}}{U_{MAX}} \quad (2.62)$$

Підставляючи в дане вираження формулу (4.60), одержимо:

$$\frac{1}{Q^+} = \frac{\omega_0 \cdot k^*}{U_{MAX}} \quad (2.63)$$

Прийнявши $k_d = k^*/U_{\max}$, отримаємо

$$\frac{1}{Q^+} = k_d \cdot \omega_0 \quad (2.64)$$

Дана формула визначає зв'язок між скважністю імпульсів керування ШІН і кутовою швидкістю. Вона справедлива у випадку $k^* \omega_0 < U_{\max}$ (зона адаптації). В інших випадках необхідно приймати $Q^+ = 1$. Підставивши формулу (2.65) у вираження (2.54) і (2.55), одержимо залежність зміни коефіцієнта підсилення і постійної часу регулятора, у зона адаптації:

$$k_{AD} = k_2 + k_1 - k_1 \cdot k_d \cdot \omega_0 \quad (2.65)$$

$$\tau_{AD} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2 - \tau_2 \cdot k_D \cdot \omega_0} \quad (2.66)$$

З (2.65) і (2.66) видно, що коефіцієнт підсилення адаптивного регулятора $k_{ад}$ зменшується зі збільшенням кутової швидкості, а постійна часу $t_{ад}$ збільшується, дані формули показують вплив настроювання регулятора при малих швидкостях (змінюючи коефіцієнт k_9 можна легко впливати на динаміку регулятора швидкості в зоні адаптації).

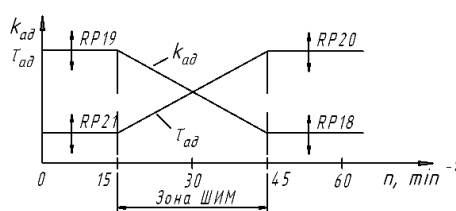


Рисунок – 2.11

Розглянемо пропорційно-інтегральний регулятор струму виконаний на операційному підсилювачі D48 рисунок 2.12

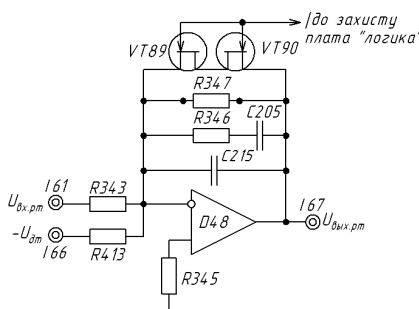


Рисунок – 2.12

Регулятор струму виконаний за класичною схемою ПІ-регулятора з формуючими елементами R346, R343, R413 і C205. Конденсатор C215 у формуванні керування не приймає участь, і призначений для фільтрації високочастотних перешкод (частота перешкод набагато вище робочої частоти). Підключення резистора R347 перетворює регулятор у пропорційний (через малість його опору). Транзистори VT89, VT90 призначені для формування нульових початкових умов інтегрування, резистор R345 зменшує зміщення нуля операційного підсилювача D48 через нерівномірність вхідних струмів

Відповідно до вищевикладеного розрахункова схема ПІ-регулятора струму перетвориться до виду, представленому на рисунку 2.13.

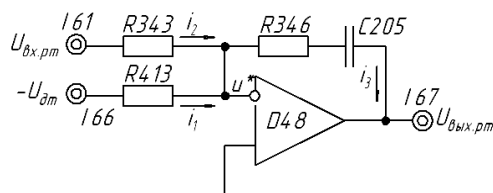


Рисунок – 2.13

Визначимо передатну функцію Пі-регулятора струму по вхідному впливу $U_{\text{вх.пт.}}$.

Запишемо систему рівнянь, що зв'язує вхідна напруга регулятора струму $U_{\text{вх.пт.}}$ з вихідною напругою підсилювача D48 (при $U_{\text{дт}}=0$) $U_{\text{вх.пт.}}$, вважаючи операційний підсилювач ідеальним: $K_y=I$, $R_{\text{вх}}=U$, при цьому $i^*=0$ ("мнима земля"). Тоді, згідно з прийнятим на рисунку 2.13 позначенням, запишемо:

$$i_3 = i_2 \quad (2.68)$$

$$-U_{\text{ВЫХ.ПТ}} = i_3 \cdot R_{346} + \frac{1}{C_{205}} \cdot \int i_3 dt \quad (2.69)$$

$$U_{\text{ВХ.ПТ}} = i_2 \cdot R_{343} \quad (2.70)$$

Вирішуючи дану систему рівнянні, знаходимо

$$-\frac{dU_{\text{ВЫХ.ПТ}}}{dt} = \frac{R_{346}}{R_{343}} \cdot \frac{dU_{\text{ВХ.ПТ}}}{dt} + \frac{U_{\text{ВХ.ПТ}}}{C_{205} \cdot R_{343}} \quad (2.71)$$

Перетворивши по Лапласу, при нульових початкових умовах, рівняння (2.71) можна одержати передатну функцію Пі-регулятора струму по вхідному впливу.

$$W_{\text{ВХ.ПТ}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.ПТ}}(p)}{U_{\text{ВХ.ПТ}}(p)} = -\frac{R_{346}}{R_{343}} \cdot \frac{R_{346} \cdot C_{205} \cdot p + 1}{R_{346} \cdot C_{205} \cdot p} \quad (2.72)$$

Прийнявши

$$T_{\text{РТ}} = R_{346} \cdot C_{205} \quad \text{і} \quad k_{\text{ВХ.ПТ}} = \frac{R_{346}}{R_{343}}$$

вираз (2.72) перепишеться у вигляді

$$W_{\text{ВХ.ПТ}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ.ПТ}}(p)}{U_{\text{ВХ.ПТ}}(p)} = -k_{\text{ВХ.ПТ}} \cdot \frac{T_{\text{РТ}} \cdot p + 1}{T_{\text{РТ}} \cdot p} \quad (2.73)$$

Визначимо передатну функцію регулятора струму по ланцюзі зворотного зв'язку $-U_{\text{дт.}}$.

Запишемо систему рівнянь, що зв'язує подібну напругу датчика струму $U_{\text{дт}}$ з вихідною напругою D48 (при $U_{\text{вх.пт.}}=0$) $U_{\text{вых.пт.}}$, вважаючи операційний підсилю-

вач ідеальним: $K_y = \infty$, $R_{вх} = \infty$ при цьому $i^* = 0$ ("мнима земля"). Тоді, згідно прийнятим на рисунку 2.13 позначенням запишемо

$$i_3 = i_1 \quad (2.74)$$

$$-U_{ВЫХ.РТ} = i_3 \cdot R_{346} + \frac{1}{C_{205}} \cdot \int i_3 dt \quad (2.75)$$

$$-U_{\partial m} = i_1 \cdot R_{413}. \quad (2.76)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, знаходимо

$$-\frac{dU_{ВЫХ.РТ}}{dt} = -\frac{R_{346}}{R_{413}} \cdot \frac{dU_{ДТ}}{dt} - \frac{U_{ДТ}}{C_{205} \cdot R_{413}} \quad (2.77)$$

Перетворивши по Лапласу, при нульових початкових умовах вираз (2.77), можна одержати передатну функцію ПІ-регулятора струму по ланцюзі зворотного зв'язку:

$$W_{OC.РТ}(p) = \frac{U_{ВЫХ.РТ}(p)}{U_{ДТ}(p)} = \frac{R_{346}}{R_{413}} \cdot \frac{R_{346} \cdot C_{205} \cdot p + 1}{R_{346} \cdot C_{205} \cdot p} \quad (2.78)$$

Прийнявши $T_{PT} = R_{346} \cdot C_{205}$; $k_{PTOC} = \frac{R_{346}}{R_{413}}$, запишемо передатну функцію у виді:

$$W_{OC.РТ}(p) = \frac{U_{ВЫХ.РТ}(p)}{U_{ДТ}(p)} = k_{OC.РТ} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} \quad (2.79)$$

Ділянка структурної схеми, що відповідає отриманим передатним функціям (2.73) і (2.79) представлена на рисунку 2.14.

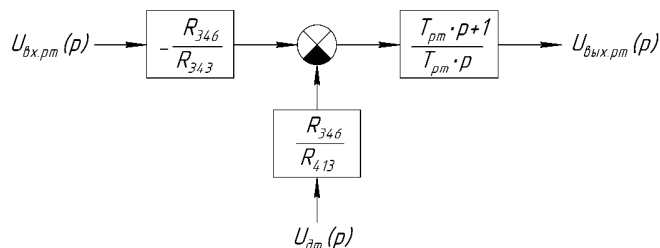


Рисунок – 2.14

Перетворимо схему на рисунку 2.14, вводячи коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку в основний ланцюг, рисунок 2.15.

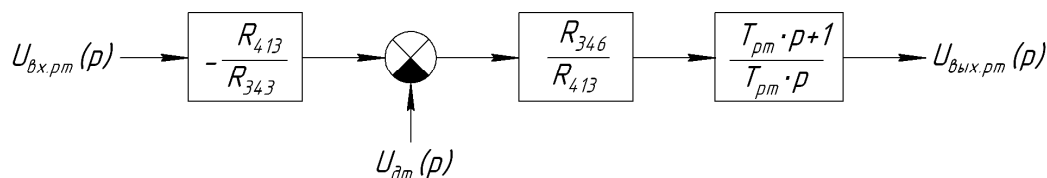


Рисунок – 2.15

Формування сигналу зворотного зв'язку по швидкості. Розглянемо використовуваний даний перетворювач при формуванні сигналу зворотного зв'язку по швидкості рисунок 2.16.

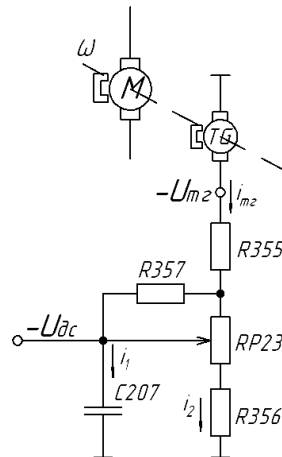


Рисунок – 2.16

Вона здійснюється за допомогою датчика швидкості, у якості якого застосований тахогенератор ТГ, навантажений ділянкою напруги R355, R356, R357 і RP23. Конденсатор C207 призначений для згладжування пульсацій вихідної напруги тахогенератора.

Запишемо перетворені по Лапласу рівняння динаміки для даної схеми

$$-U_{m2}(p) = k_{m2} \cdot \omega_0(p) = k_{m2} \cdot p \cdot \alpha_0(p); \quad (2.80)$$

$$i_1(p) + i_2(p) = i_{m2}(p); \quad (2.81)$$

$$-U_{dc}(p) = i_1(p) \cdot (R_{356} + RP_{23}^*) = \frac{1}{C_{207} \cdot p} i_2(p); \quad (2.82)$$

$$U_{dc}(p) - U_{m2}(p) = i_{m2}(p) \cdot (R_{355} + R_{\text{эКВ}}), \quad (2.83)$$

де k_{TG} - крутизна тахогенератора; $\omega_d(p)$ - відповідно кутова швидкість і кут повороту вала двигуна в перетвореному по Лапласу виді;

Вирішуючи дану систему рівнянь, одержуємо:

$$U_{dc}(p) - U_{TG}(p) = -(R_{355} + R_{\text{эКВ}}) \cdot \left[\frac{U_{dc}(p)}{R_{356} + RP_{23}^*} + U_{dc}(p) \cdot C_{207} \cdot p \right] \quad (2.84)$$

згрупувавши вираження (2.84) відносно $U_{dc}(p)$ і $U_{TG}(p)$, одержимо -

$$U_{TG}(p) = U_{dc}(p) \cdot \left[\frac{R_{355} + R_{\text{эКВ}}}{R_{356} + RP_{23}^*} + 1 + (R_{355} + R_{\text{эКВ}}) \cdot C_{207} \cdot p \right] \quad (2.85)$$

Виражаючи $U_{TG}(p)$ через $\omega_d(p)$, визначимо передатну функцію ділянки стосовно кутової частоти обертання вала двигуна:

$$W_{дс}(p) = \frac{U_{дс}(p)}{\omega_{дс}(p)} = -k_{дс} \cdot \frac{1}{T_{дс} \cdot p + 1} \quad (2.86)$$

$$k_{дс} = k_{ТГ} \cdot \frac{R_{356} + RP_{23}^*}{R_{355} + R_{ЭКВ} + R_{356} + RP_{23}^*} \quad (2.87)$$

$$T_{дс} = \frac{(R_{355} + R_{ЭКВ}) \cdot C_{207}}{\frac{R_{355} + R_{ЭКВ}}{R_{356} + RP_{23}^*} + 1} \quad (2.88)$$

$$R_{ЭКВ} = \frac{R_{357} \cdot (RP_{23} - RP_{23}^*)}{R_{357} + RP_{23} - RP_{23}^*} \quad (2.89)$$

Як видно з формул (2.87) і (2.88), коефіцієнт передачі дільника $k_{дс}$ і постійна часу фільтра $T_{дс}$ залежать від положення потенціометра RP_{23} , у зв'язку з чим їм можна регулювати (у малих межах) швидкість обертання двигуна.

Формування сигналу зворотного зв'язку по струму Розглянемо використовуваний у схемі спосіб формування зворотного зв'язку по струму рисунок. 2.18

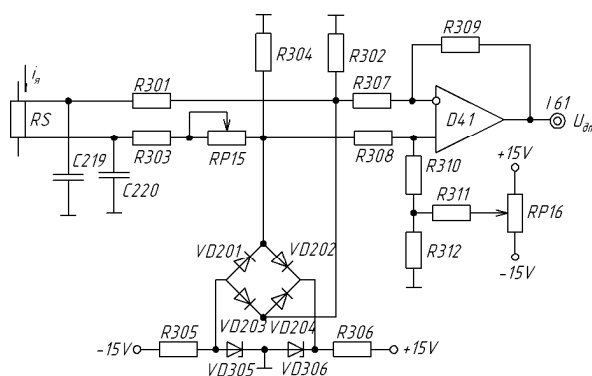


Рисунок – 2.18

На операційному підсилювачі D41 зібраний підсилювач синфазного сигналу, що знімається з датчика струму (серієсного опору в ланцюзі якоря) і поданого на входи підсилювача через дільники R_{301} , R_{302} і R_{303} , RP_{15} , R_{304} . Перемінним резистором RP_{16} здійснюється настроювання нуля операційного підсилювача D41. На діодному мосту VD0201 - VD204 і стабілітронах VD305, VD306 - обмежник синфазної напруги, призначений для захисту входів D41 при перевищенні струму вище встановленої норми. Резистором RP_{15} можна в невеликих межах регулювати коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

Визначимо передатну функцію схеми формування зворотного зв'язку по струму, виходячи з відомих для операційних підсилювачів співвідношень:

$$W_{дт}(p) = \frac{U_{дт}(p)}{i_{я}(p)} = -\frac{RS}{R_{301} + R_{303} + RP_{15}} \cdot \left[\frac{(R_{307} + R_{309})(R_{310} + R_{312})}{R_{308} + R_{310} + R_{312}} \cdot \frac{R_{304}}{R_{308}} + \frac{R_{309} \cdot R_{302}}{R_{307}} \right] \quad (2.90)$$

Ввівши відповідні позначення, можна записати:

$$W_{дт}(p) = \frac{U_{дт}(p)}{i_{я}(p)} = -k_{дт} \quad (2.91)$$

Таким чином, пульсуючий струм якоря двигуна перетворюється схемою формування від'ємного зворотного зв'язку по струму в сигнал постійної напруги. Цей сигнал інвертується і передається з коефіцієнтом $k_{дт}$ в ПІ- регулятор струму для формування ВЗЗ по струму.

Силовa частина електропривода „ КЕМЕК ” складається з двигуна постійного струму (ДПТ) і тиристорного перетворювача (ТП)

Математичне представлення ДПТ Динаміка руху двигуна постійного струму (ДПТ) описується двома рівняннями:

$$\frac{d\omega_{д}}{dt} = \frac{k_M}{J} \cdot i_{я} - \frac{1}{J} \cdot M_c \quad (2.92)$$

$$U_{я} = i_{я} \cdot R_{яц} + L_{яц} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + k_{\omega} \cdot \omega_{д} \quad (2.93)$$

де $\omega_{д}$ - кутова швидкість вала двигуна; $i_{я}$ - струм якоря двигуна; M_c - статичний момент навантаження; $U_{я}$ - напруга на якорі двигуна; $R_{яц}$, $L_{яц}$ - відповідно опір і індуктивність якоря, k_{ω} - коефіцієнт проти- ЕРС двигуна, k_M - коефіцієнт моменту двигуна, J - сумарний момент інерції, приведений до вала двигуна.

Перетворивши по Лапласу рівняння (2.92) і (2.93), перепишемо їх щодо кутовий швидкості $W_{д}$ і струму якоря $i_{я}$

$$\omega(p) = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (k_M \cdot i_{я}(p) - M_c(p)) \quad (2.94)$$

$$i_{я}(p) = \frac{1/R_{яц}}{T_{эм} \cdot p + 1} \cdot (U_{я}(p) - k_{\omega} \cdot \omega_{д}(p)) \quad (2.95)$$

де $T_{эм} = L_{яц}/R_{яц}$ - електромеханічна постійна часу якорного ланцюга.

Коефіцієнт противо- ЕРС k_{ω} і коефіцієнт моменту двигуна визначаються по формулах

$$k_{\omega} = \frac{U_{ян} - I_{ян} \cdot R_{яц}}{\omega_{дн}} \quad (2.96)$$

$$k_M = \frac{M_H}{I_{ян}} \quad (2.97)$$

де $U_{ян}$, $I_{ян}$, $\omega_{дн}$ - відповідно напруга, струм якоря і кутова частота обертання двигуна, узяті для номінального режиму роботи.

Математичне представлення ТП. Тиристорний перетворювач (ТП) представлений аперіодичним законом з передатною функцією виду:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП} \cdot p + 1} \quad (2.98)$$

де $k_{ТП}$ - коефіцієнт підсилення ТП (разом із СІФУ), $T_{ТП}$ - постійна часу ТП.

Оскільки на вході СІФУ відсутній фільтр, постійну часу ТП визначимо відповідно до формули:

$$T_{ТП} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f} \quad (2.99)$$

а коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача по формулі:

$$k_{ТП} = \frac{U_{яц}^{max}}{U_{р.т}^{max}} \quad (2.100)$$

де $f = \omega / (2\pi)$ - частота напруги живлення; $1 / (2mf)$ - середньостатичне запізнювання ТП; $m=6$ число пульсації за період живильної напруги, $U_{я.ц}^{max}$ - максимально спрямована напруга перетворювача; $U_{р.т}^{max}$ - максимальна напруга, що надходить до СІФУ від регулятора струму.

Структурна схема системи ТП-ДПТ По рівняннях (2.90), (2.91) і (2.92) одержимо структурну схему системи ТП-ДПТ (рисунок 2.18).

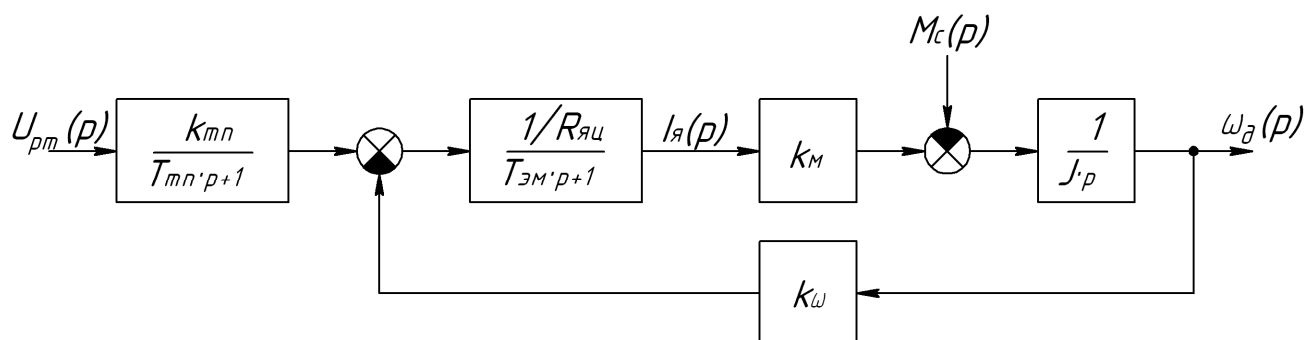


Рисунок – 2.18

3 Вибір елементів силової частини приводу подачі верстата

3.1 Постановка задачі підвищення ефективності та вхідні дані

В електроприводах подач двигун здійснює переміщення інструмента або заготовки для забезпечення процесу різання. Подача на верстатах здійснюється різноманітними засобами, але найбільше поширення одержав привід із високомоментним двигуном постійного струму зі збудженням від постійних магнітів. Такий двигун ставиться безпосередньо на ходовий гвинт, що істотно скорочує механічну частину приводу, зменшує його момент інерції і підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД). У зв'язку з цим знижується навантаження на двигун при холостих переміщеннях і зростає складова від сил різання в загальному навантаженні приводів подач.

Ціллю даної роботи є підвищення показників електропривода вертикальної подачі супорту в ертикально-свердлильного верстата 2Р135Ф2-1.

Вхідні дані:

Координатна вісь	Z
$i_p = 1$	передаточне відношення коробки передач.
$M_3 = 8.8$ (Нм)	еквівалентний момент на валу двигуна, визначений за навантажувальною діаграмою.
$V_{БП} = 4.8$ (м/хв)	швидкість швидкого переміщення робочого органу механізму подачі.
$V_{раб.мин} = 4.8$ (мм/хв)	мінімальна швидкість робочої подачі.
$F_z = 7000$ (Н)	складаюча сили різання по вісі координат.
$\eta_2 = 1$	ККД коробки передач.
$\eta_1 = 0.9$	ККД гвинтової пари.
$t_B = 2.4$ (мм/об)	шаг ходового гвинта.
$M_{y3} = 35$ (кг)	маса вузлу, який лінійно пересувається
$D = 20$ (мм)	середній діаметр ходового гвинта
$L = 1.2$ (м)	довжина ходового гвинта.

$T_T, T_C = 0.34$ (мс)	постійні часу фільтрів датчиків струму та швидкості
$f_c = 50$ (Гц)	частота мережі живлення
$\tau_{\text{пп}} = 0.2$ (с)	час перехідного процесу
ПВ=80%	тривалість включення

3.2 Вибір двигуна

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

Виключення силового редуктора зумовило зниження загального моменту інерції механізму і збільшення допустимого для приводу за умов механічної міцності прискорення. Це забезпечило скорочення часу перехідних процесів, збільшення продуктивності верстатів, поліпшення якості обробки внаслідок підвищення швидкодії всієї електромеханічної системи приводу подачі, як по управляючій дії, так і по навантаженню.

Початковими даними для вибору двигуна приводу подачі служать: сила тертя в опорах, направляючих і передачі; передавальні відносини механічних ланок приводу (коробки подач, гвинтової пари, передачі рейка-шестерня і т.д.); маса переміщуваного органу приводу разом з деталлю або інструментальним магазином; моменти інерції механічних ланок; ККД механічних передач; швидкості швидкого ходу і настановних переміщень і діапазон робочих подач; допустимі для механізмів прискорення і необхідний час перехідних процесів, циклограма навантаження двигуна при роботі механізму і т.д. Крім того, для правильного вибору двигуна необхідно знати закони його регулювання і управління в перехідних режимах. Як правило, в механізмах подач регулювання швидкості двигуна здійснюється при постійному моменті зміною напруги на якорі. Закон управління при розгоні і гальмуванні реалізується системою управління верстатом, в окремому випадку ЧПУ. Найпоширенішими законами управління є стрибкоподібний і лінійно змінюваний, проте можливі і інші форми задаючих сигналів.

Визначення швидкостей двигуна. Швидкість двигуна визначається швидкістю переміщення робочих органів верстата і передавальним відношенням механічної передачі:

Для передачі гвинт-гайка швидкість обертання двигуна визначається по формулі:

$$n_{\text{дв}} = V \cdot \left(\frac{i_p}{t_B} \right) \text{ об/хв};$$

Тоді, максимальна робоча частота обертання:

$$n_{\text{макс}} := V_{\text{бп}} \cdot \frac{i_p}{h}, \quad n_{\text{макс}} = 2000 \text{ об/хв};$$

Максимальна частота обертання при робочій подачі:

$$n_{\text{раб.макс}} := \frac{V_{\text{рабмакс}} \cdot i_p}{h} \quad n_{\text{раб.макс}} = 200 \text{ об/хв};$$

Мінімальна частота обертання при робочій подачі:

$$n_{\text{раб.мін}} := \frac{V_{\text{рабмін}} \cdot i_p}{h} \quad n_{\text{раб.мін}} = 2 \text{ об/хв}.$$

Визначення моментів інерції. Момент інерції вузла, що поступально переміщається, приведений до валу двигуна,

$$J := (m_{\text{уз}} + m_{\text{д}}) \cdot \left(\frac{h \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_p^2},$$

$$J = 1.459 \times 10^{-5} \text{ Нм}$$

Приведений момент інерції ходового гвинта:

$$J_B := 7.7 \cdot 10^2 \cdot D^4 \cdot L \cdot i_p$$

одержуємо

$$J_B = 1.4703 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2.$$

Визначаємо приведений момент інерції коробки подач

$$J'_\Pi = \frac{J_1 + J_2}{i_p^2},$$

одержуємо: $J_{\Pi'} = 0 \text{ кгм}^2$.

Приведений сумарний момент інерції механічної схеми приводу:

$$J'_{\Sigma} = J'_{MEX} + J'_B + J'_{\Pi},$$

$$J'_{\Sigma} = 1.6162 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2.$$

Визначення моментів двигуна. Загальний обертаючий момент двигуна складається із статичного і динамічного моментів:

$$M_{ДВ} = M_{СТ} + M_{ДИН}.$$

Статичний момент визначається зусиллям, передаваним у напрямі подачі при сталих русі робочого органу верстата. Зусилля подачі по вертикальній координаті Z :

$$F_{ПОД} = kFz + f_{тр} N\Sigma + FH;$$

де Fz – складаюча від зусилля різання уздовж осі Z , Н; k -коефіцієнт запасу, $k=1.5$; $f_{тр}$ - коефіцієнт тертя; $N\Sigma$ - сума нормальних сил, діючих на направляючі, Н; FH - зусилля від попереднього натягу, не враховане в $N\Sigma$, Н. Для даного варіанту $FH = 0$, тоді формула приймає вигляд:

$$F_{ПОД} = kFz + f_{тр} N\Sigma.$$

Коефіцієнт тертя залежить від матеріалу поверхонь, що труться, і їх мас-тила для направляючих ковзання, від конструкції направляючих і їх попередньо-го натягу для направляючих качення і комбінованих. У нашому випадку $f_{тр} = 0.1$.

Сила тертя $F_{ТР}$ визначається масами вузла, що переміщається, і встановленої на ньому деталі і коефіцієнтом тертя $f_{ТР}$. Для вузлів, що переміщаються в горизонтальній площині, сила тертя

$$F_{ТР} = f_{ТР} N\Sigma = f_{ТР} (m_{УЗ,СТ} + m_{ДЕТ})g;$$

де $g = 9,81 \text{ (м/с}^2\text{)}$ - прискорення вільного падіння. Тоді

$$N\Sigma = (m_{УЗ,СТ} + m_{ДЕТ})g.$$

Момент від сили різання:

$$M_{РЕЗ} = \frac{F_z t_B}{2\pi i_p \eta_1 \eta_2},$$

$$M_{РЕЗ} = 2.9709 \text{ Нм}$$

Момент від сили тертя в направляючих:

$$M_{TP} = \frac{m_{yз.см} \cdot g \cdot f_{TP} \cdot t_B}{2\pi i_p \eta_1 \eta_2},$$

$$M_{TP} = 0.0416 \text{ Нм}$$

Статичний момент при обробці:

$$M_{CT} = M_{PEЗ} + M_{TP},$$

$$M_{CT} = 4.498 \text{ Нм.}$$

Статичний момент з урахуванням ПВ:

$$M_{CT} = \frac{M_{CT} \cdot ПВ}{100\%},$$

$$M_{CT} = 3.5984 \text{ Нм.}$$

По розрахованій максимальній швидкості обертання валу двигуна і статичному моменту на валу, вибираємо високомоментний двигун постійного струму серії ПБВ – 100L.

Технічні дані двигуна ПБВ – 100L.

Номінальний момент	$M_H = 10.5 \text{ Нм}$
Номінальна частота обертання	$n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/хв.}$
Номінальна напруга	$U_{\text{ном}} = 56 \text{ В}$
Номінальний струм	$I_{\text{ном}} = 24 \text{ А}$
Тривалий момент у загальмованому стані	$M_{3AG} = 12 \text{ Нм}$
Максимальний момент при пуску	$M_{\text{мах.пуск}} = 100 \text{ Нм}$
Момент при максимальній частоті обертання	$M_{\text{мах.об.}} = 8.6 \text{ Нм}$
Максимальний момент при максимальній частоті обертання	$M_{\text{махпри макс об}} = 21 \text{ Нм}$
Максимальна частота обертання в тривалому режимі	$M_{\text{мах. трив.реж}} = 2000 \text{ об/хв.}$
Момент інерції якоря	$M_{\text{я}} = 0.013 \text{ кгм}^2$
Опір обмотки якоря при 15°C	$M_{\text{я}^{\circ}\text{C}} = 0.222 \text{ Ом}$
Індуктивність обмотки якоря	$L_{\text{я}} = 0.8 \text{ мГн}$

Електромеханічна постійна часу	$\tau_{\text{ЕЛ-МЕХ}} = 7.6 \text{ мс}$
Електромагнітна постійна часу	$\tau_{\text{ЕЛ-МАГН}} = 6.74 \text{ мс}$
Постійна ЕРС	$\tau_{\text{ЕРС}} = 0.044 \text{ В/(об/хв)}$
Теплова постійна часу	$\tau_{\text{ТЕПЛ}} = 70 \text{ хв}$
Маса двигуна з тахогенератором	$M_{\text{ДВИГ}} = 33 \text{ кг}$

До комплекту двигуна входить тахогенератор типу ТС – 1М.

Основні дані тахогенератора.

Крутизна вихідної характеристики, В/(об/хв)	0,2
Опір навантаження, кОм не менше	4
Амплітуда пульсації вихідної напруги, %	2
Нелінійність вихідної характеристики, %	2
Несиметрія вихідних характеристик при різних напрямках обертання, %	1
Зміна вихідної напруги при нагрівання, %.....	2
Опір обмотка якоря при 1500 С, Ом.....	138
Індуктивність обмотки якоря, Гн.....	0,6

Перевірка динамічних властивостей приводу:

Динамічний момент $M_{\text{дин}}$ на двигуні визначається сумарним моментом інерції механізму J_{Σ}' , приведений до валу двигуна, і власним моментом інерції двигуна $J_{\text{де}}$ з урахуванням моментів інерції датчиків швидкості і кута повороту, якщо вони є, і прискоренням ε , яке повинен розвивати двигун:

$$M_{\text{дин}} = (J_{\Sigma}' + J_{\text{де}}) \frac{d\omega}{dt} = (J_{\Sigma}' + J_{\text{де}}) \varepsilon,$$

де J_{Σ}' складається з моментів інерції всіх рухомих вузлів приводу, включаючи ті, що обертаються і поступально рухомі.

Прискорення двигуна визначається за часом перехідного процесу, заданому закону і зміні швидкості. При стрибкоподібній зміні сигналу управління швидкість зміниться на $\Delta\omega$ за час перехідного процесу $t_{\text{п.п}}$, при розгоні двигуна по експоненціальному закону з прискоренням ε

$$\varepsilon = 0,63 \Delta\omega / T$$

де ε - кутове прискорення, рад/с²; $T = t_{п.п}/3$ – постійна часу експоненціальної ба-
жаної кривої зміни швидкості, с; $\Delta\omega$ - приріст швидкості двигуна, рад/с,

$$\Delta\omega = 2\pi \Delta v / (60 \cdot h);$$

Δv – зміна швидкості рухомих органів верстата за час $t_{п.п}$, мм /хв.

Сумарний момент інерції приводу:

$$J_{пп} = J_{\Sigma} + J_{дв} \quad J_{пп} = 0.0132 \text{ кгм}^2$$

Динамічний момент двигуна при розгоні до $n_{б.х.} = 1000$ об/хв:

$$M_{дин} = M_{мах.пуск} = 70 \text{ Нм}$$

Прискорення, що розвивається приводом при розгоні до $n_{б.х.}$:

$$\varepsilon = \frac{M_{дин}}{J_{пп}}, \quad \varepsilon = 7597.85 \text{ с}^{-2}.$$

Час розгону до $V_{б.х.}$:

$$t'_{пп} = \frac{0,2 V_{б.х.} i_p}{(t_b \varepsilon)}, \quad t'_{пп} = 8.78 \times 10^{-4} \text{ с}.$$

Шлях розгону (гальмування):

$$l_{паз} = \frac{V_{б.х.} t_{пп}}{2}, \quad l_{паз} = 0.0351 \text{ мм}$$

За розрахованими даними можна зробити висновок, що вибраний двигун задовольняє даної роботи, так як його параметри задовольняють пред'явленим вимогам:

$$M_{дв} = 10.5 \text{ Нм}, \quad M_{ст} = 4.498 \text{ Нм}, \quad M_{дв} > M_{ст}$$

$$t'_{пп} = 0.878 \text{ мс}, \quad t_{пп} = 0.2 \text{ с}, \quad t_{пп} > t'_{пп}$$

3.3 Вибір комплектного електроприводу

Вибір комплектного електропривода для приводу подач верстата відбува-
ється по:

1. номінальній потужності використовуваного двигуна;
2. $U_{пп}$ – номінальній напрузі електропривода

$$U_{н.п.} > U_{мах/эд}$$

де $U_{\max \text{ эд}}$ – максимальна напруга на двигуні, необхідна для забезпечення $n_{\max}$ при швидкому переміщенні робочого органа. Для двигунів із збудженням від постійних магнітів $U_{\max}$ визначається із співвідношення:

$$\frac{U_{\max}}{n_{\max}} = \frac{U_H}{n_H}.$$

$$\text{Тому: } U_{\max \text{ эд}} = \frac{n_{\max}}{n_H} \cdot U_H; \quad U_{\max \text{ эд}} = 112 \text{ В}$$

Вибираємо значення напруги $U_{\text{нп}} = 112 \text{ В}$.

Номінальна потужність електроприводу обирається по номінальній потужності двигуна з врахуванням перевантаження:

$$P_{\text{нп}} \geq 2 P_{\text{эд}}$$

$$P_{\text{эд}} = M_H \cdot \frac{n_H \cdot \pi}{30};$$

$$P_{\text{эд}} = 672 \text{ Вт};$$

$$\text{Одержуємо } P_{\text{нп}} = 1350 \text{ Вт}$$

Обираємо комплектний електропривод « КЕМЕК » з наступними параметрами:

Тип електродвигуна	ПБ
Потужність, кВт	0,75...5,5
Напруга, В	52...117
Частота обертання, об/хв	1000
Потужність трансформатора, кВА	6, 11, 14, 19

4 Розрахунок та аналіз САК приводом подач вертикально - свердлильного верстата

4.1 Розрахунок параметрів тиристорного перетворювача

До розрахункових параметрів тиристорного перетворювача відносять: $R_{\text{эп}}$ – еквівалентні внутрішні опори ТП; $L_{\text{эп}}$ – еквівалентна індуктивність ТП;

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

Приймаємо $E_{1\phi} = 220$ В, тому $E_{2\phi}$ знаходимо по $E_{\text{оп}} = 1,1 U_{\text{нп}} = 126,5$ В.

Для комплектного електроприводу « КЕМЕК » приймається трифазна нульова схема, для якої:

$$E_{2\phi} = \frac{E_{\text{оп}}}{1.17}; \quad E_{2\phi} = 108,2 \text{ В};$$

Визначимо коефіцієнт трансформації за формулою:

$$q = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}}; \quad q = 0,4915;$$

Потужність трансформатора для даної схеми приймемо : $S_T = 11$ кВт.

Визначимо номінальні струми первинної та вторинної обмотки:

$$I_{1H} = \frac{S_T}{3E_{1\phi}}; \quad I_{1H} = 9,09 \text{ А};$$

$$I_{2H} = \frac{S_T}{3E_{2\phi}}; \quad I_{2H} = 18,498 \text{ А}.$$

Так як відсутні параметри $U_{\text{кз}}$ и $P_{\text{кз}}$ для даного трансформатора, , то отримаємо їх шляхом лінійної інтерполяції аналогічних параметрів інших трансформаторів.

$$P_{\text{кз}} = 320 \text{ Вт}; \quad U_{\text{кз}} = 4.7 \text{ \%}.$$

$$R = \frac{P_{\text{кз}}}{3 \cdot I_{2H}^2}; \quad R = 0.3117 \text{ Ом}.$$

Визначимо активний опір фаз трансформатора:

$$R_{\phi} = \frac{R}{2 \cdot q^2}; \quad R_{\phi} = 0,64 \text{ Ом}.$$

$$\text{Визначимо } U = \frac{U_{\text{кз}}(\%) \cdot E_{1\phi}}{100}, \quad U = 10,34 \text{ В}$$

Тому, $Z = U / I_{\text{IH}} = 1,137 \text{ Ом};$

Звідси $X = \sqrt{Z^2 - R^2} = 1.0938 \text{ Ом}.$

Визначимо індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_{\text{АФ}} = \frac{X}{2 \cdot q^2}; \quad X_{\text{АФ}} = 2.2645 \text{ Ом}.$$

Знайдемо індуктивний опір ВП мережі живлення, котрий для трифазної нульової схеми дорівнює $X_{\text{А}} = X_{\text{АФ}} = 2.2645 \text{ Ом}.$

Тепер можна визначити еквівалентний внутрішній опір тиристорного перетворювача: $R_{\text{ЭП}} = \left[\frac{m}{2\pi} \right] X_{\text{А}} + R_{\text{Ф}}; \quad R_{\text{ЭП}} = 1.7265 \text{ Ом}.$

Визначимо номінальний струм тиристорного перетворювача в відповідності з даною схемою: $I_{\text{HП}} = \frac{I_{2\text{H}}}{0.58}; \quad I_{\text{HП}} = I_{\text{HП}} = 31.8931 \text{ А}.$

Приймаємо падіння напруги на тиристорах рівним $U_{\text{В}} = 0,5 \text{ В}.$

Тепер уточнюємо: $E_{\text{ОП}} = U_{\text{HП}} + U_{\text{В}} + R_{\text{ЭП}} I_{\text{HП}}; \quad E_{\text{оп}} = 170.0644 \text{ В}.$

$$E_{2\text{Ф}} = \frac{E_{\text{оп}}}{1.17}, \quad E_{2\text{Ф}} = 145.3542 \text{ В}.$$

Еквівалентна індуктивність тиристорного перетворювача :

$$L_{\text{ЭП}} = \frac{X_{\text{А}}}{2\pi f_{\text{с}}}; \quad L_{\text{ЭП}} = 0,007208 \text{ Гн};$$

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

4.2 Розрахунок індуктивності реакторів

У вентильному електроприводі реактори виконують наступні основні функції: зменшують зону переривистих струмів, згладжують пульсації випрямного струму, обмежують струм через вентилі в перший півперіод напруги, що живить, при короткому замиканні на стороні випрямного струму. У реверсивному вентильному ЕП на реактори покладаються додаткові задачі: обмеження зрівняльних струмів при спільному керуванні вентильними групами, обмеження швидкості наростання аварійного струму при перекиданні інвертора. Індуктивність реактора залежить від його призначення, силової схеми перетворювача і розташування реактора в схемі.

Обмеження зрівняльних струмів

Зрівняльні реактори застосовуються для обмеження зрівняльних струмів при спільному керуванні вентильними групами. При узгодженому спільному керуванні індуктивність струмообмежуючих реакторів, визначається по формулі:

$$L_{yp} = K_d \cdot \frac{E_{\phi M}}{\omega_c \cdot I_{yp}} - L_{\varepsilon П},$$

де $\omega_c = 2\pi f_c = 314 \text{ с}^{-1}$; $E_{\phi M} = \sqrt{2}E_{2\phi}$ амплітуда фазної ЕРС; $E_{\phi M} = 205.5619 \text{ В}$;

Діюче значення зрівняльного струму: $I_{yp} = 0,2 I_n = 6.3786 \text{ А}$.

Величину L_{yp} визначимо для максимального значення K_d при відомому діапазоні зміни α . Зважаючи на те, що розраховуємий перетворювач використовується для широко регульованого ЕП, зі зміною α від 0° до 90° . для трифазної зустрічно-рівнобіжної схеми найбільше значення $K_d = 0,62$ при $\alpha = 60^\circ$.

Для трифазної нульової схеми $K_d = 0,2$ при $\alpha = 60^\circ$.

Одержимо $L_{yp} = 13.3082 \text{ мГн}$.

Обмеження струму при однофазному перекиданні інвертора

З довідника вибираємо низько частотні тиристори по граничних значеннях параметрів режиму:

- по максимальному значенню середнього струму у відкритому стані I_{oc} (А);

$$I_b = 0,33 I_{нп} = 10.5247 \text{ А};$$

I_{oc} повинен бути не менше I_b , т. е. $I_{oc} \geq 19,3 \text{ А}$.

- по повторюваній імпульсній напрузі в закритому стані $U_{зпс}$;

$$U_{обр.мах} = 2,09 E_{оп} = 355.4347 \text{ В}.$$

$$U_{зпс} \geq U_{обр.мах}; U_{зпс} \geq 356 \text{ В}.$$

За даними умовами обираємо низькочастотний тиристор Т2-12-4.

- Для обраного тиристора знаходимо струм, що ударно не повторюється у відкритому стані $I_{oc.удр}$; $I_{oc.удр} = 250 \text{ А}$. $C_{дв} = \frac{U_H - I_H R_{я} \beta_T}{\omega_H}$; $C_{дв} = 0,495 \text{ В/с}$.

Обмеження струму через тиристори при короткому замиканні на стороні постійного струму

При короткому замиканні на стороні постійного струму реактор, що токо-
обмежує, повинен обмежити швидкість наростання аварійного струму, щоб він
не перевищив небезпечного для тиристорів значення в плинні власного часу
спрацьовування захисних пристроїв. Обмеження струму через вентилі може бу-
ти отримане за рахунок індуктивності розсіювання обмоток трансформатора й
індуктивності в ланцюзі постійного струму.

Необхідна величина спільної індуктивності для нульової схеми:

$$L_{\Sigma}^{K3} \approx \frac{2.1U_{2\phi}}{\omega_c(I_{\text{доп}} - I_{\text{нач}})};$$

де $I_{\text{нач}}$ – початковий струм у момент короткого замикання $I_{\text{нач}} = I_B$ при мак-
симальному навантаженні ЕП;

$I_{\text{доп}}$ – максимально допустимий у спливанні півперіоду струм вентиля;

$I_{\text{доп}} = I_{\text{ос.удр.}}$ $I_{\text{нач}} = 10.5247 \text{ А}$; $I_{\text{доп}} = 250 \text{ А}$; $U_{2\phi} = E_{2\phi} = 145.3542 \text{ В}$; Оде-
ржимо $L_{\Sigma}^{K3} = 4.0573 \text{ мГн}$.

Індуктивність додаткового реактора: $L_{\text{др}} = L_{\Sigma}^{K3} - (L_{\text{ур}} + L_{\text{эл}}) = -16.4588 \text{ мГн}$.

Ми одержали від’ємну індуктивність додаткового реактора. Це означає,
що індуктивності зрівняльного реактору та індуктивності ЕП достатньо для об-
меження швидкості наростання аварійного струму. Тому не потрібно встанов-
лювати додатковий реактор.

Згладжування пульсацій випрямленого струму

Пульсації спрямованої напруги призводять до пульсацій спрямованого
струму, що погіршують комутацію двигуна і збільшують його нагрів. У симет-
ричних мостових і в нульових схемах найбільшу амплітуду мають основні гар-
моніки ($k=1$).

Амплітуди гармонік більш високої 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 гар-
монійних складових випрямленої напруги E_{nm} при $\alpha=80^\circ$.

$k = 1$ – основна гармоніка. $p = 3$ - число пульсацій за період.

$$E_{nm} = E_{оп} \cdot \frac{2 \cdot \cos \alpha}{k^2 \cdot p^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot p^2 \cdot \tan^2 \alpha}; \quad E_{nm} = 125.8274 \text{ В.}$$

При відомій амплітуді основної гармоніки E_{NM} і припустимому діючому значенню основної гармоніки струму $P_{(1)}\%$ необхідна величина індуктивності кола випрямленого струму може бути визначена за формою:

$$L_{\Sigma}^{\Pi} = \frac{E_{nm} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot k \cdot p \cdot \omega_c \cdot P_{(1)} \cdot I_H}; \quad L_{\Sigma}^{\Pi} = 39.3349 \text{ мГн.}$$

Індуктивність додаткового реактора: $L_{др} = L_{\Sigma}^{\Pi} - (L_{я} + L_{ур} + L_{эп}); \quad L_{др} = 18.0187 \text{ мГн.}$

Тоді еквівалентна індуктивність якірного кола двигуна: $L_{\mathcal{O}} = L_{др} + L_{я} + L_{ур} + L_{эп}, \quad L_{\mathcal{O}} = 39.3349 \text{ мГн;}$

4.3 Розрахунок параметрів об'єкта регулювання для аналізу динамічних властивостей системи

Еквівалентний опір якірного кола двигуна: $R_{\mathcal{O}} = R_{эп} + \beta_T (R_{я} + R_{дп})1,5;$
 $R_{\mathcal{O}} = 1.9851 \text{ Ом,}$

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

Електромагнітна постійна часу якірного кола двигуна: $T_{\mathcal{O}} = \frac{L_{\mathcal{O}}}{R_{\mathcal{O}}}; \quad T_{\mathcal{O}} = 0.0198 \text{ с.}$

Електромеханічна постійна часу якірного кола двигуна: $T_M = \frac{J_{пр} \cdot R_{\mathcal{O}}}{C_{дв}^2}; \quad T_M = 0.1066 \text{ с.}$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача.

Вибираємо СІФУ з арккосінусоїдною характеристикою $\alpha = \arccos(U_y)$.

Статична характеристика такого ТП лінійна, $K_{\Pi} = \frac{E_{оп}}{U_{y_{\max}}}, \quad K_{\Pi} = 17.0064.$

де $U_{y_{\max}} = 10\text{В}$ – напруга керування на вході ТП, що відповідає максимальній ЕРС на $E_{оп}$.

Для практичних розрахунків передатну функцію ТП можна уявити у вигляді інерційної ланки: $W_{\text{MN}}(p) = \frac{K_{\text{П}}}{T_{\text{П}}p + 1}$,

де $T_{\text{П}}$ – постійна часу ТП, $T_{\text{П}} = \frac{1}{pf_c} = 0.0067$ с.

Одержимо:
$$W_{\text{TP}}(p) = \frac{17.0064}{0.0067 \cdot p + 1}.$$

4.4 Розрахунок параметрів регуляторів і елементів контуру регулювання струму якоря у системі підпорядкованого регулювання

Система підпорядкованого регулювання являє собою багатоконтурну систему з каскадним включенням регуляторів. При цьому число регуляторів і контурів регулювання дорівнює числу регульованих параметрів. У двоконтурній схемі (рисунок 4.1) вихідний сигнал регулятора швидкості, включений у зовнішній контур, є заданим для регулятора струму, включеного у внутрішній контур. Налаштування регуляторів відбувається незалежно і послідовно від внутрішнього контуру до зовнішнього. Контур струму складається з об'єкта регулювання – кола якоря двигуна, силового перетворювача і регулятора струму. Контур замикається зворотним зв'язком за величиною напруги, що знімається з датчика

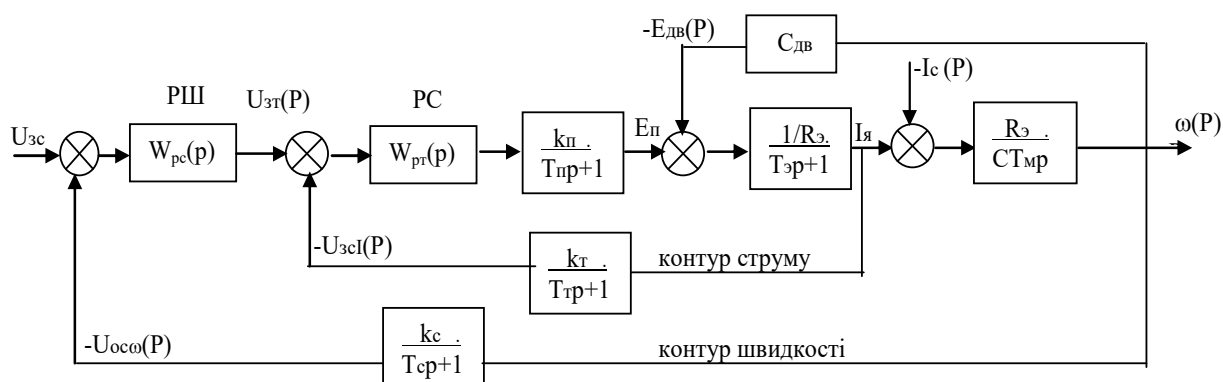


Рисунок 4.1 – Двоконтурна система підпорядкованого регулювання струму в колі якоря.

Передатний коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$K_{\text{П}} = \frac{E_{\text{оп}}}{U_{y_{\text{MAX}}}},$$

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

$I_{\text{дв max}}$ – максимально припустимий струм двигуна в перехідних процесах.

Для високомоментного двигуна $I_{\text{дв max}} = 2 I_{\text{н}} = 48 \text{ А}$.

Одержуємо $K_{\text{T}} = 0.2083$.

Налагодження регулятора струму

Тому що об'єкт регулювання в контурі струму поданий аперіодичними ланками, застосовується ПІ-регулятор струму, що настроюється по модульному (технічному) оптимуму. При стандартному налагодженні контуру струму звичайно зневажають внутрішнім зворотним зв'язком по ЕРС, що справедливо, якщо електромагнітна ($T_{\text{э}} = 0.0198 \text{ с}$) і електромеханічна ($T_{\text{м}} = 0.1066 \text{ с}$) постійні двигуна значно перевершують постійну часу ВП ($T_{\text{п}} = 0.0067 \text{ с}$), та $T_{\text{м}} \gg T_{\text{э}}$.

Передатна функція об'єкта регулювання контуру струму, приведеного до контуру з одиничним зворотним зв'язком:

$$W_{\text{обт}}(p) = \frac{K_{\text{п}} K_{\text{T}}}{T_{\mu} p + 1} \cdot \frac{1/R_{\text{э}}}{T_{\text{э}} p + 1}.$$

Об'єкт містить велику постійну часу $T_{\text{э}}$ і малу T_{μ} , що називають некомпенсованою малою постійною часу.

$$T_{\mu} = T_{\text{п}} + T_{\text{T}} = 0.007 \text{ с}.$$

$$W_{\text{обт}}(p) := \frac{1}{0.007p + 1} \cdot \frac{1.7877}{0.0198p + 1}$$

Передатна функція оптимізованого контуру при налагодженні на модульний (технічний) оптимум:

$$W_{\text{опт}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}; \quad W_{\text{опт}}(p) = \frac{71.3606}{p} \cdot \frac{1}{0.007 \cdot p + 1}$$

Для одержання перехідного процесу в контурі струму, що відповідає налагодженню на МО, визначимо передатну функцію регулятора струму з рівності:

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

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

Тобто для відповідності перехідного процесу в контурі регулювання струму перехідному процесу в контурі оптимальній структурі, необхідний ПІ-регулятор струму з коефіцієнтом передачі K_{PT} і постійної часу T_{PT} :

$$K_{PT} = \frac{R_{\Sigma} T_{\Sigma}}{2T_{\mu} K_T K_{\Pi}}; \quad K_{PT} = 0.7923 \quad T_{PT} = T_{\Sigma} / K_{PT} = 0.025 \text{ с.}$$

Передатна функція розімкнутого ланцюга контуру струму:

$$W_{PT}(p) = K_{PT} + \frac{1}{T_{PT} \cdot p}; \quad W_{PT}(p) = 0.7923 + \frac{1}{0.025 p}$$

$$W_{PKT}(p) = W_{PT}(p) \cdot W_{OBT}(p) = W_{PT}(p) \frac{K_T K_{\Pi} / R_{\Sigma}}{(T_{\Sigma} p + 1)(T_{\mu} p + 1)},$$

Налаштування на технічний оптимум характеризуються невеликим перегулюванням 4.3%. Тривалість перехідного процесу визначається тільки малою некомпенсованою постійною часу і складає $4.7T_{\mu} = 0.0329 \text{ с.}$

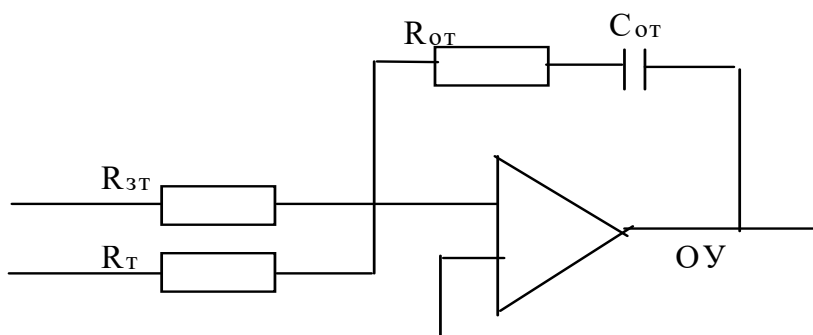


Рисунок 4.2 – ПІ-регулятор струму

Розрахунок параметрів регулятора струму

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунок 4.2) можна задатися величиною ємності C_{OC} (наприклад $1 \mu\text{Ф} = 10^{-6} \text{ Ф.}$).

Постійна часу зворотного зв'язку регулятора:

$$T_{PT}^{\times} = T_{\Sigma} = R_{OC} C_{OC};$$

звідки визначимо: $R_{OC} = \frac{T_{PT}^{\times}}{C_{OC}} = 19.8154 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$

Інші параметри: $R_{3T} = T_{PT}^{\times} / (K_{PT} C_{OC}) = T_{PT} / C_{OC}; \quad R_{3T} = 25.0114 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$

Виберемо номінальний струм шунта з умови: $I_{нш} \geq I_{нп} \quad I_{нш} = 35 \text{ А.}$

Коефіцієнт передачі датчика струму якоря: $K_{ДЯ} = (10 / 75 \cdot 10^{-3}) = 133.333$;

Коефіцієнт передачі шунта: $K_{ШЯ} = 2.1 \cdot 10^{-3}$;

$$R_T = \frac{K_{ШЯ} K_{ДЯ} R_{ЗТ}}{K_T}; \quad R_T = 34.3014 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

4.5 Розрахунок параметра регулятора в контурі швидкості

Об'єктом регулювання зовнішнього контуру швидкості є замкнутий контур струму і ланка, що описує механічний опір двигуна (рисунок 4.3)

Перехідна функція об'єкта регулювання контуру швидкості:

$$W_{обс}(p) = \frac{1 / K_T}{2T_\mu p + 1} \cdot \frac{K_M}{T_M p}, \quad \text{де } K_M = \frac{R_\Omega}{C_{ДВ}} = 4.0102. \quad W_{обс}(p) = \frac{19.252}{0.014 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{p}.$$

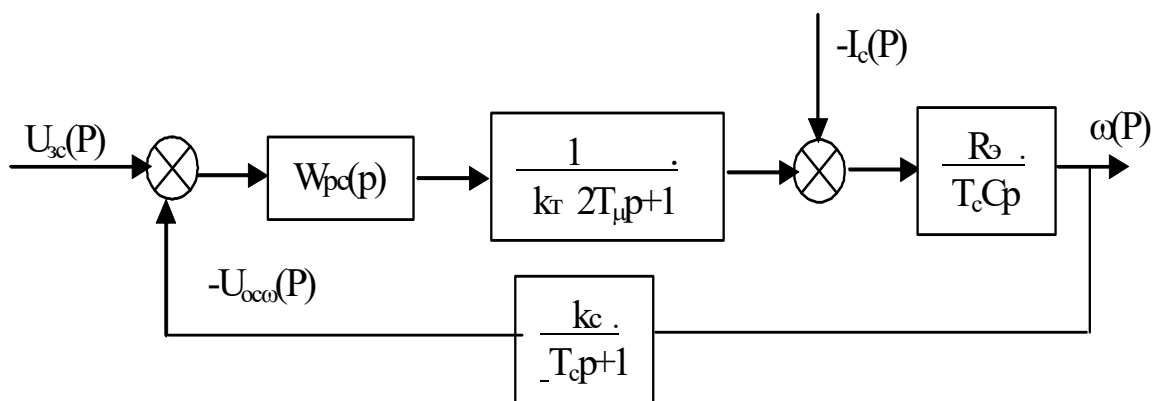


Рисунок 4.3 – Контур швидкості

Контур замикається інерційно зворотним зв'язком по швидкості з передатною функцією:

$$W_{oc}(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1}; \quad K_c = \frac{U_{oc.w / MAX}}{\omega_{MAX}},$$

де $U_{ocw \text{ max}}$ – напруга негативного зворотного зв'язку по швидкості,
 $U_{oc.w.MAX} = U_{zc.MAX}$;

$U_{zc \text{ max}}$ – напруга завдання максимальної швидкості. $U_{zc.MAX} = 10 \text{ В}$.

ω_{max} – максимальна кутова швидкість двигуна.

$$\omega_{MAX} = \frac{n_{MAX} \cdot \pi}{30}; \quad \omega_{max} = 209,44 \text{ с}^{-1}. \quad K_c = 0,0477 \text{ В/с}^{-1}. \quad W_{oc}(p) = \frac{0.0477}{0.34 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}$$

$T_{\mu C} = 2 \cdot T_\mu + T_T = 0.0144 \text{ с}$ – 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 підпорядкованого регулювання з П-регулятором швидкості є інтегрованими однократно. Вони мають достатньо високу швидкодію і мале перерегулювання перехідних процесів, проте мають значний статизм. Такі системи електропривода не спроможні забезпечити великий діапазон регулювання швидкості.

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

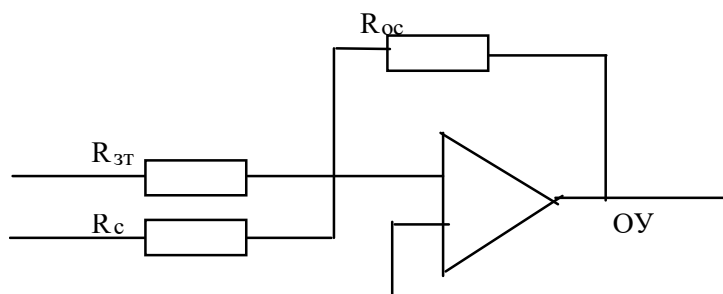


Рисунок 4.4 – ПІ-регулятор швидкості

Налагодження ПІ-регулятора швидкості.

Передатна функція контуру швидкості з ПІ-регулятором:

$$W_{\text{PKC}}(p) = k_{\text{IPI}} \frac{1/k_T}{T_{\mu C} p + 1} \cdot \frac{k_C k_M}{T_M p} = k_{\text{IPI}} \frac{1/k_T}{T_{\mu C} p + 1} \frac{C_{\text{ДВ}} k_C}{J_{\text{ПР}} p};$$

Корекція контуру здійснюється за рахунок зміни коефіцієнта підсилення регулятора: $k_{\text{IPI}} = k_T T_M / (k_M k_C 2T_{\mu C}) = \frac{k_T \cdot J_{\text{ПР}}}{2T_{\mu C} k_C C_{\text{ДВ}}}$; $K_{\text{ПРс}} = 4.0415$.

$$W_{\text{PKC}}(p) = k_{\text{IPI}} \cdot \frac{1/k_T}{T_{\mu C} \cdot p + 1} \cdot \frac{C_{\text{ДВ}} \cdot k_C}{J_{\text{ПР}} \cdot p}; \quad W_{\text{ПРс}}(p) = \frac{19.402}{0.0144 p + 1} \cdot \frac{1.794}{p}.$$

Визначення коефіцієнта $K_{\text{Рс}}$ по формулі характеризують налагодження контуру по модульному (технічному) оптимуму з коефіцієнтом демпфування перехідного процесу $\xi = \sqrt{2} / 2$.

Перехідна функція оптимізованого контуру швидкості:

$$W_{PKC}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu C} \cdot p \cdot (T_{\mu C} \cdot p + 1)},$$

тобто перехідний процес визначає тільки мала постійна часу $T_{\mu C}$.

$$W_{Ipc}(p) = \frac{1}{0,0287 p \cdot (0,0144 p + 1)}$$

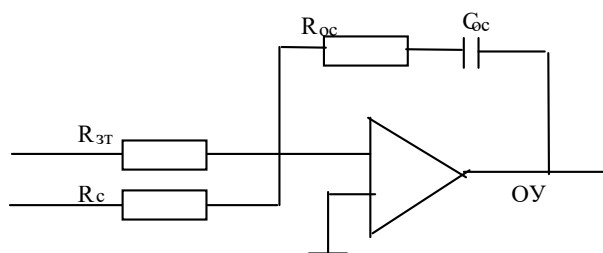


Рисунок 4.5 – ПІ-регулятор швидкості

Налагодження ПІ-регулятора швидкості.

Передатна характеристика розімкнутого контуру швидкості з ПІ-регулятором: $W_{PKC}(p) = k_{ПИPC} \cdot \frac{1 + T_{PC}^{\times} \cdot p}{T_{PC}^{\times} \cdot p} \cdot \frac{1}{k_T} \cdot \frac{1}{T_{\mu C} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_C \cdot k_M}{T_M \cdot p}$;

При стандартному налагодженні на симетричний оптимум визначимо параметри ПІ-регулятора:

$$W_{PKC}(p) = k_{ПИPC} \cdot \frac{1 + T_{PC}^{\times} \cdot p}{T_{PC}^{\times} \cdot p} = k_{ПИPC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p}; \quad k_{ПИPC} = C_{ДВ} \cdot k_T \cdot T_M / (R_{Э} \cdot k_C \cdot 2 \cdot T_{\mu C}); \quad K_{ПИPC} = 4.04.$$

$$T_{PC}^{\times} = 4 \cdot T_{\mu C}; \quad T_{PC}^{\times} = 0.0574 c; \quad T_{PC} = T_{PC}^{\times} / k_{PC}; \quad T_{PC} = 0.0142 c; \quad c;$$

Підставимо значення K_{PC} і $T_{PC}^{\times}$, та одержимо:

$$W_{PKC}(p) = (1 + 4 \cdot T_{\mu C} \cdot p) / (8 \cdot T_{\mu C}^2 \cdot p^2 \cdot (1 + T_{\mu C} \cdot p)); \quad W_{ПИPC}(p) = \frac{1 + 0.0574 p}{(0.0016 p^2) \cdot (1 + 0.0144 p)},$$

тобто регулятор компенсував постійну часу, що є більшою – T_M і динамічні властивості контуру визначаються тільки за малої постійної часу $T_{\mu C}$.

Перехідна функція фільтра на вході СУ з ПІ-регулятором швидкості:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_{\mu C} \cdot p}; \quad W_{\Phi}(p) = \frac{1}{0.0574 p + 1}.$$

Розрахунок параметрів регулятора швидкості.

Для розрахунку параметрів ПІ-регулятора швидкості (рисунок 4.5), задавши розміром ємності C_{OC} (наприклад $1\text{мкФ}=10^{-6}\text{Ф}$), визначимо R_{OC} із відношення:

$$T_{PC}^* = R_{OC} C_{OC}; \quad R_{OC} = \frac{T_{PC}^*}{C_{OC}} = 57.4133 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Інші параметри елементів регулятора (рисунок 4.4):

$$R_{3C} = T_{PC}^* / (k_{PC} C_{OC}) = T_{PC} / C_{OC}; \quad R_{3C} = 14.2061 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

Визначимо коефіцієнт передачі тахогенератору:

$$k_{T\Gamma} = U_{T\Gamma} / \omega_{T\Gamma}; \quad k_{T\Gamma} = 2. \quad R_C = k_{T\Gamma} R_{3C} / k_C; \quad R_C = 595.0627 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Для визначення параметрів ПІ-регулятора зададимось значенням $R_{3C} = 3.3 \text{ кОм}$ і для відомого K_{PC} визначимо:

$$R_{OC} = k_{IPC} R_{3C}; \quad R_{OC} = 13.3368 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

$$R_C = R_{3C} k_{T\Gamma} / k_C; \quad R_C = 138.2301 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

4.6 Побудова статичних характеристик

Для замкнутої системи

$$\text{Відповідно до рівняння: } \omega = \frac{U_{3C}}{k_C} - \frac{Ik_T}{k_C k_{PC}} = \omega_0 - \Delta\omega_3,$$

Визначимо три характеристики для U_{3C} , відповідного до $\omega_{\max}$, ω_H , $\omega_{\min}$, відповідні швидкості переміщення, що задають РО.

$$\omega_{MAX} = n_{P.MAX} \cdot \frac{\pi}{30} = 209,4395 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_H = n_H \cdot \frac{\pi}{30} = 104,7198 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{MIN} = n_{P.MIN} \cdot \frac{\pi}{30} = 0,2094 \text{ с}^{-1}.$$

$$U_{\zeta\tilde{n}} := \begin{pmatrix} \omega_{\min} \cdot K_c \\ \omega_i \cdot K_c \\ \omega_{\max} \cdot K_c \end{pmatrix} \quad U_{\zeta\tilde{n}} = \begin{pmatrix} 0.01 \\ 5 \\ 10 \end{pmatrix} \text{ В}$$

Побудуємо статичні характеристики для замкнутої системи:

$$\omega_1(I) := \frac{U_{3C0}}{K_c} - \frac{I \cdot K_T}{K_c \cdot K_{Прс}} \quad \omega_2(I) := \frac{U_{3C1}}{K_c} - \frac{I \cdot K_T}{K_c \cdot K_{Прс}} \quad \omega_3(I) := \frac{U_{3C2}}{K_c} - \frac{I \cdot K_T}{K_c \cdot K_{Прс}}$$

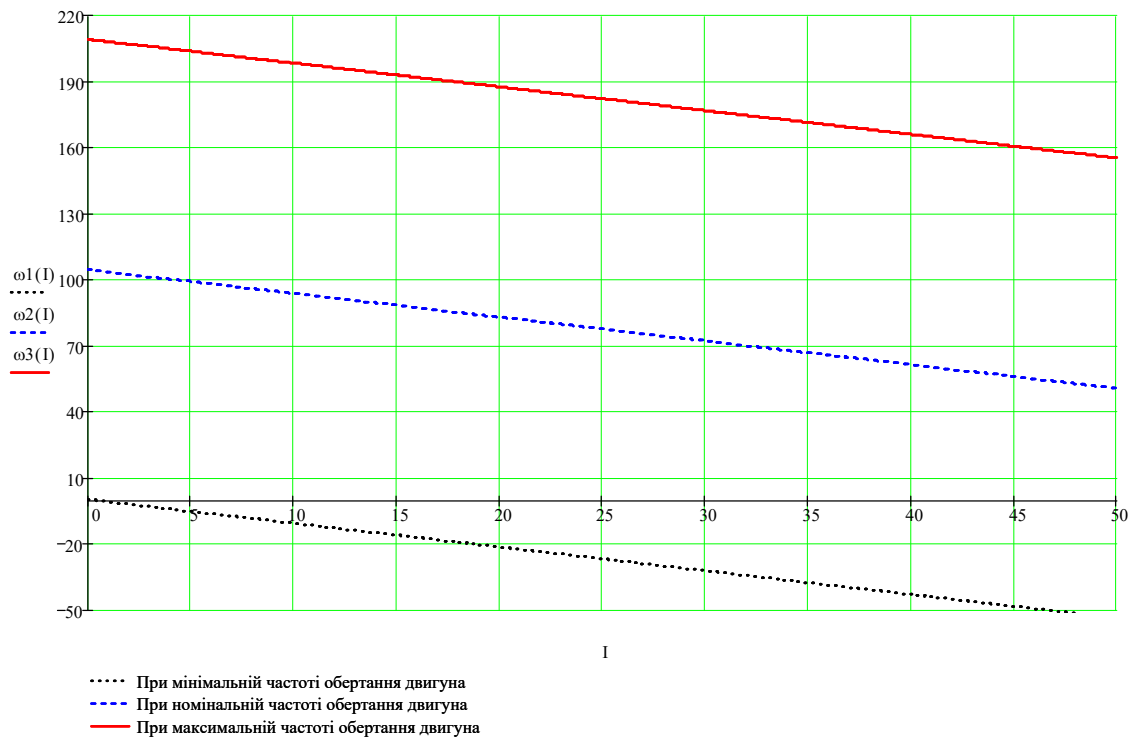


Рисунок 4.6 – Статична характеристика замкнутої системи

Для розімкнутої системи

Для побудови статичних характеристик розімкнутої системи знаходимо величини напруг U_y так, щоб відбувалась відповідність з характеристиками замкнутої системи.

$$U_y := \frac{U_{3c} \cdot C_d}{K_c \cdot K_{\text{ПИ}}}$$

Визначимо:

$$U_y = \begin{pmatrix} 0.0061 \\ 3.048 \\ 6.0961 \end{pmatrix} \text{ V}$$

одержуємо:

Побудуємо статичні характеристики для розімкненої системи:

$$\omega_1(I) := \frac{U_{y_0} \cdot K_{\text{ПИpc}} - I \cdot R_3}{C_{\text{дв}}} \quad \omega_2(I) := \frac{U_{y_1} \cdot K_{\text{ПИpc}} - I \cdot R_3}{C_{\text{дв}}} \quad \omega_3(I) := \frac{U_{y_2} \cdot K_{\text{ПИpc}} - I \cdot R_3}{C_{\text{дв}}}$$

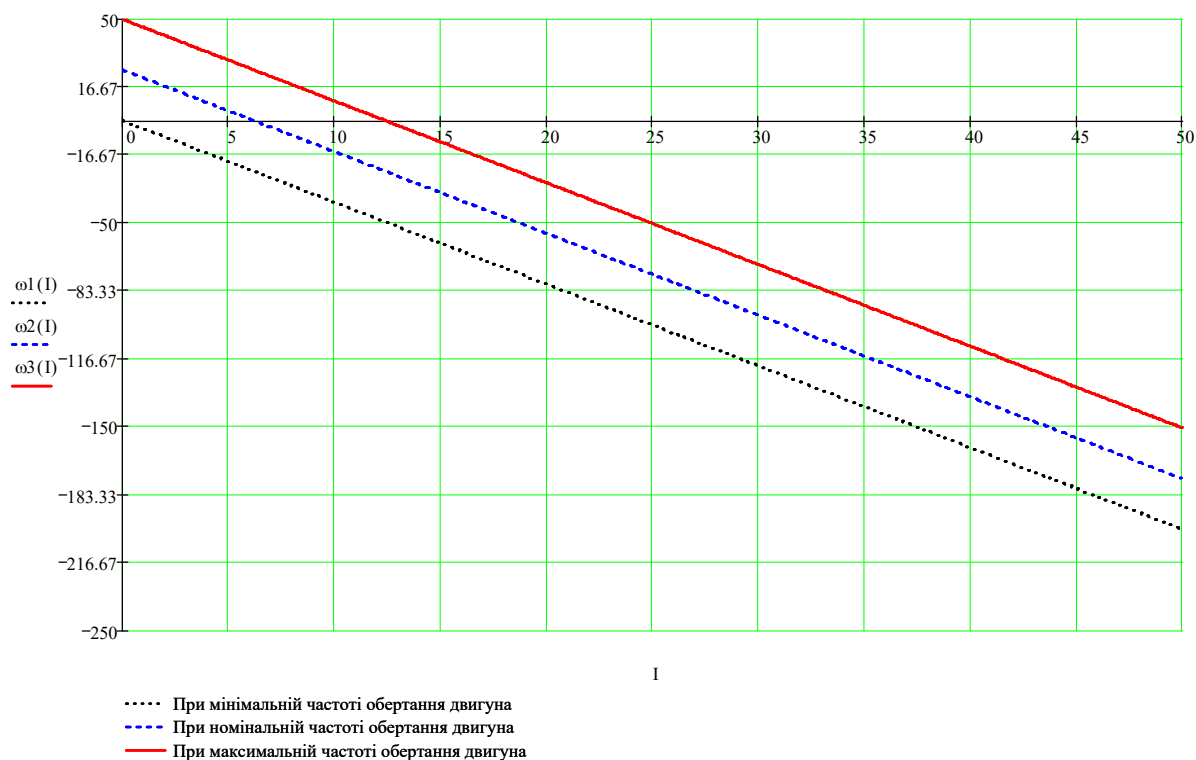


Рисунок 4.7 – Статична характеристика розімкнутої системи

4.7 Дослідження динамічних характеристик

Вхідні дані для розрахунку перехідних процесів

Постійна ЕРС двигуна	$C_{ДВ} = 0.495 \text{ В/с}$
Еквівалентний опір якорного ланцюга двигуна	$R_{\Sigma} = 1.9851 \text{ Ом}$
Електромеханічна постійна часу якорного ланцюга	$T_M = 0.1066 \text{ с}$
Електромагнітна постійна часу якорного ланцюга	$T_{\Sigma} = 0.0198 \text{ с}$
Постійна часу тиристорного перетворювача	$T_{П} = 0.0067 \text{ с}$
Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача	$K_{П} = 17.0064$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості	$K_{ПРс} = 4.0415$
Коефіцієнт підсилення П-регулятора швидкості	$K_{Прс} = 4.0415$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму	$K_{РТ} = 0.7923$
Передатний коефіцієнт ЗЗ по струму	$K_T = 0.2083$
Передатний коефіцієнт ЗЗ по швидкості	$K_C = 0.0477$
Постійна часу датчика швидкості	$T_C = 0.00034 \text{ с}$
Постійна часу датчика струму	$T_T = 0.00034 \text{ с}$
Постійна часу ПІ-регулятора швидкості	$T_{РС} = 0.0142 \text{ с}$
Постійна часу ПІ-регулятора струму	$T_{РТ} = 0.025$

Еквівалентна часу контуру швидкості

$$T_{\mu c} = 0.0144$$

ПФ ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{\Pi\text{Ipc}}(p) = k_{\Pi\text{Ipc}} \cdot \frac{1 + T_{\text{PC}}^{\times} \cdot p}{T_{\text{PC}}^{\times} \cdot p}$$

ПФ П- регулятора швидкості:

$$W_{\text{Ipc}}(p) = K_{\text{Ipc}}$$

ПФ ПІ-регулятора струму:

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

ПФ тиристорного перетворювача:

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

ПФ датчика струму:

$$W_{\text{dT}}(p) = \frac{K_T}{T_T p + 1}$$

ПФ датчика швидкості:

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

ПФ фільтра:

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

$$W_1(p) = \frac{1/R_{\text{э}}}{T_{\text{э}} \cdot p + 1}$$

$$W_2(p) = \frac{R_{\text{э}}}{C_{\text{дв}} \cdot T_M \cdot p}$$

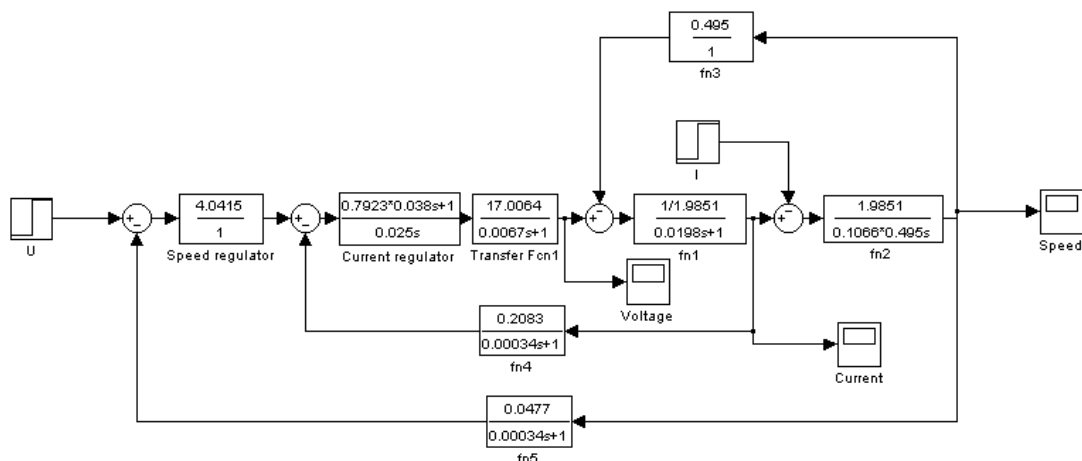


Рисунок 4.8 – Схема моделі з П - регулятором швидкості

Передатна функція при ПІ-регуляторі швидкості:

$$\Omega_{\text{III}}(p) = \frac{U_{\text{зс}}(p) \cdot W_{\text{PT}}(p) \cdot W_{\text{TI}}(p) \cdot W_{\text{IIpc}}(p) - I_c(p) \cdot \left(W_{\text{dT}}(p) \cdot W_{\text{PT}}(p) \cdot W_{\text{TI}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right)}{C_{\text{дв}} + \frac{1}{W_2(p)} \cdot \left(W_{\text{dT}}(p) \cdot W_{\text{PT}}(p) \cdot W_{\text{TI}}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right) + W_{\text{дс}}(p) \cdot W_{\text{IIpc}}(p) \cdot W_{\text{PT}}(p) \cdot W_{\text{TI}}(p)}$$

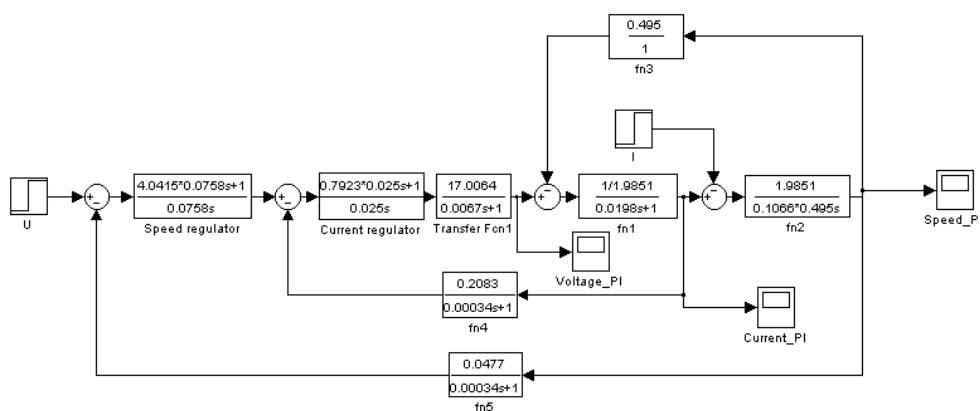
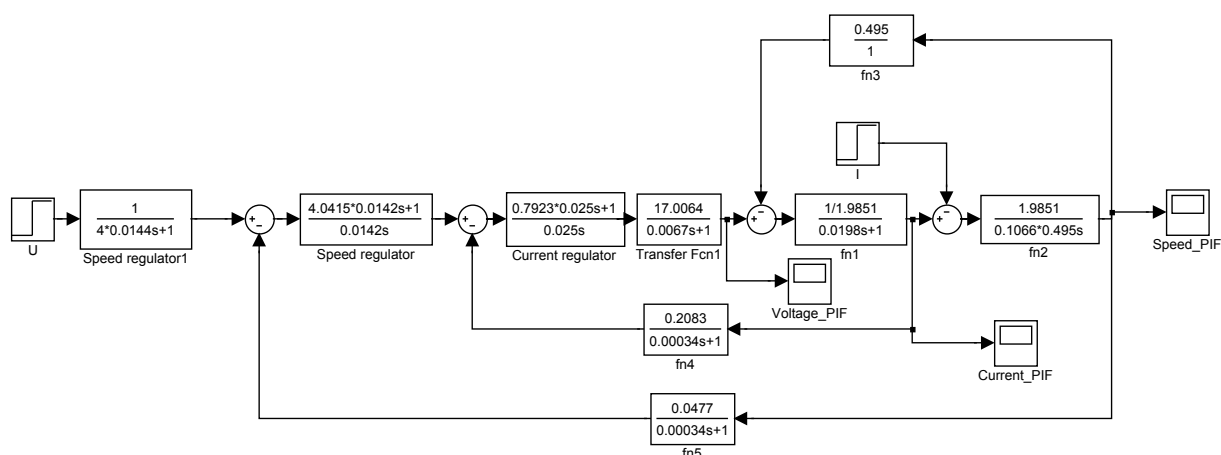


Рисунок 4.9 – Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості



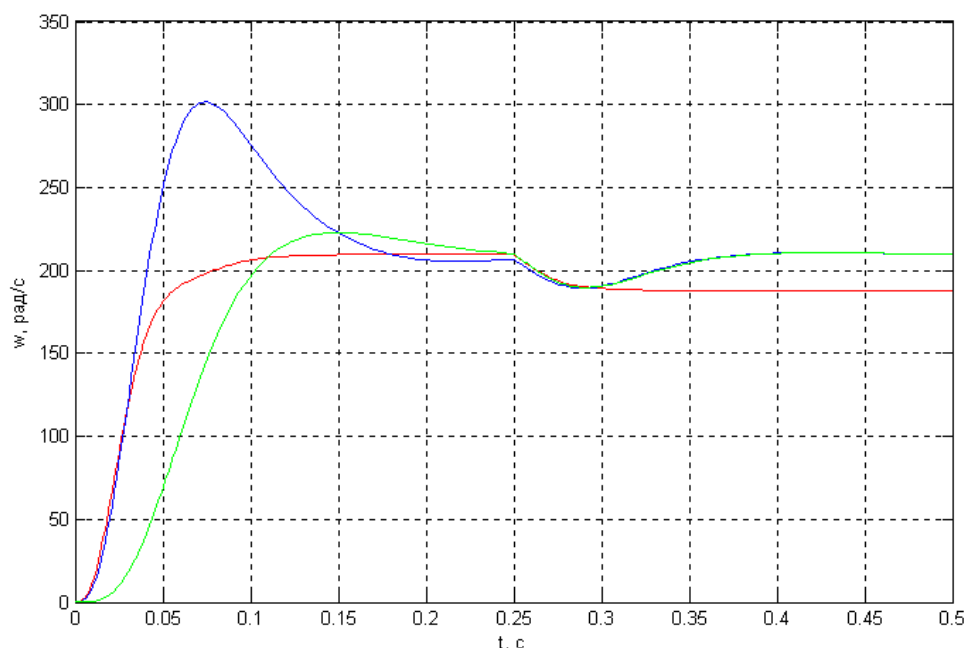
Передатна функція при П-регуляторі швидкості:

$$\Omega_{\Pi}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) \cdot W_{Прс}(p) - I_C(p) \cdot \left(W_{ДТ}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right)}{C_{ДВ} + \frac{1}{W_2(p)} \cdot \left(W_{ДТ}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right) + W_{ДС}(p) \cdot W_{Прс}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)}$$

Передатна функція при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром на вході системи:

$$\Omega_{\Phi}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{\Phi} \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) \cdot W_{Прс}(p) - I_C(p) \cdot \left(W_{ДТ}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right)}{C_{ДВ} + \frac{1}{W_2(p)} \cdot \left(W_{ДТ}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p) + \frac{1}{W_1(p)} \right) + W_{ДС}(p) \cdot W_{Прс}(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)}$$

Задаюча напруга $U_{3C} = 10$ В; Збурюючий струм $I_{ЗБ} = 20$ А.



- кутова швидкість при П-регуляторі швидкості;
— кутова швидкість при ПІ-регуляторі швидкості;
— кутова швидкість при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром.

Рисунок 4.11 – Перехідні процеси кутової швидкості.

$$\omega_{уст} = 210 \text{ рад/с}, \quad \omega_{\max P} = 305 \text{ рад/с}, \quad \omega_{\max PI} = 225 \text{ рад/с}, \quad \omega_{\max PIF} = 210 \text{ рад/с}.$$

Перерегулювання складатиме:

$$G_P = \frac{\omega_{\max P} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}}, \quad G_P = 0\%, \quad G_{PI} = \frac{\omega_{\max PI} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}}, \quad G_{PI} = 45.23\%.$$

$$G_{PIF} = \frac{\omega_{\max PIF} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}}, \quad G_{PIF} = 7.14\%.$$

Передатна функція ЕРС тиристорного перетворювача при ПІ-регуляторі швидкості

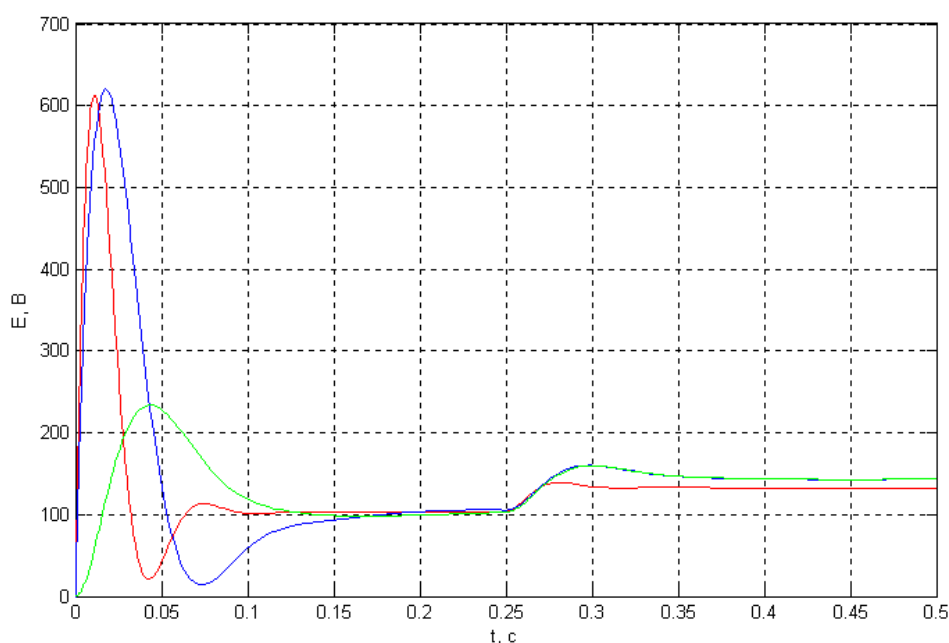
$$E_{nPI}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{ПРС}(p) + I_C(p) \cdot \left(\frac{1}{W_1(p) \cdot C_{ДВ} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{ДС}(p) \cdot W_{ПРС}(p) + \frac{W_{ДТ}(p)}{W_2(p)} \right) \right) - W_{ДТ}(p)}{\left(\frac{W_1(p)}{W_1(p) \cdot C_{ДВ} + \frac{1}{W_2(p)}} \right) \cdot \left(W_{ДС}(p) \cdot W_{ПРС}(p) + \frac{W_{ДТ}(p)}{W_2(p)} \right) + \frac{1}{W_{РТ}(p) \cdot W_{ТП}(p)}}$$

Передатна функція ЕРС тиристорного перетворювача при П-регуляторі швидкості:

$$E_{n\Pi}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{\Pi pc}(p) + I_C(p) \cdot \left(\frac{1}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{\Pi pc}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) \right) - W_{дт}(p)}{\left(\frac{W_1(p)}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{\Pi pc}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) + \frac{1}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right)}$$

Передатна функція ЕРС тиристорного перетворювача при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром :

$$E_{n\Phi}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{\Phi} \cdot W_{\Pi pc}(p) + I_C(p) \cdot \left(\frac{1}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{\Pi pc}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) \right) - W_{дт}(p)}{\left(\frac{W_1(p)}{W_1(p) \cdot C_{дв} + \frac{1}{W_2(p)}} \cdot \left(W_{дс}(p) \cdot W_{\Pi pc}(p) + \frac{W_{дт}(p)}{W_2(p)} \right) + \frac{1}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right)}$$



- ЕРС ТП при П-регуляторі швидкості;
- ЕРС ТП при ПІ-регуляторі швидкості;
- ЕРС ТП при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром.

Рисунок 4.12 – Перехідні процеси ЕРС тиристорного перетворювача

$$E_{уст} = 145В.$$

Передатна функція струму якоря при ПІ-регуляторі швидкості:

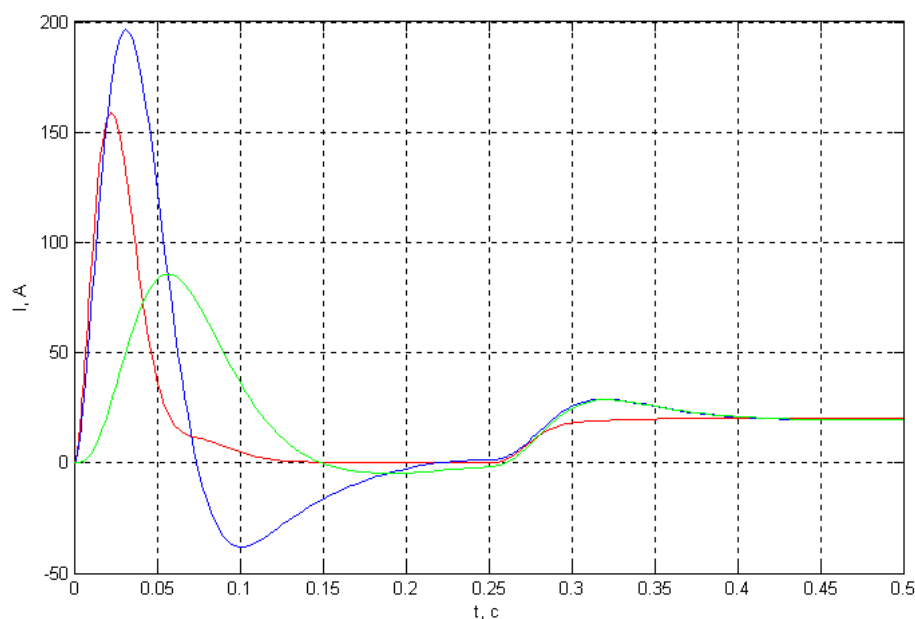
$$I_{яIII}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + W_2(p) \cdot I_C(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right)}{W_2(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right) + \frac{1}{W_1(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} + W_{дГ}(p)}$$

Передатна функція струму якоря при П-регуляторі швидкості:

$$I_{яII}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + W_2(p) \cdot I_C(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right)}{W_2(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right) + \frac{1}{W_1(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} + W_{дГ}(p)}$$

Передатна функція струму якоря при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром:

$$I_{яФ}(p) = \frac{U_{3C}(p) \cdot W_{\Phi} \cdot W_{IIpc}(p) + W_2(p) \cdot I_C(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right)}{W_2(p) \cdot \left(W_{дC}(p) \cdot W_{IIpc}(p) + \frac{C_{дВ}}{W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} \right) + \frac{1}{W_1(p) \cdot W_{PT}(p) \cdot W_{ТП}(p)} + W_{дГ}(p)}$$



- струм якорю двигуна при П-регуляторі швидкості;
- струм якорю двигуна при ПІ-регуляторі швидкості;
- струм якорю двигуна при ПІ-регуляторі швидкості з фільтром.

Рисунок 4.13 – Перехідні процеси струму якоря

$$I_{яуст} = 22 \text{ A.}$$

Як видно з графіків система має задовольняючий час перехідних процесів, тобто максимальний час регулювання менше 0,2с. ($t_{п.п.} < 0,2\text{с.}$)

5 Охорона праці

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Умови праці - це комплекс факторів зовнішнього середовища і виробничої обстановки (техніки, технології й організації), що впливають на продуктивність праці, безпеки і здоров'я робітників. У цеху наступні умови праці; небезпека виникнення пожежі, підвищена вібрація і шуми, висока небезпека поразки електричним струмом.

Щоб продуктивно працювати в таких умовах - потрібно забезпечити: електробезпеку; мінімальний рівень шуму; мінімальні рівні вібрації; системи піна - і пожежегасіння і т.д.

Зупинимося більш докладно на деяких з цих проблем.

При роботі на свердлильних верстатах із ЧПК виникає ряд небезпечних і шкідливих факторів, що можуть привести до виробничого травматизму.

До них відносяться:

1) фізичні - частини верстата, що рухаються, обертова заготівля, небезпечний рівень напруги в електричній частині, коротке замикання, що може відбутися через тіло людини;

2) психофізичні - нервово-психічні перевантаження (монотонність праці в операторів і наладчиків).

Передбачаються умови, що усувають наявність важкої, монотонної, некваліфікованої праці. Це досягається за рахунок застосування наступних засобів механізації: автоматичних пристроїв для зміни інструментів, пристроїв автоматичного змащення. Для виконання робіт у положенні "сидячи" на всіх робочих місцях передбачається підйомно-поворотний стілець.

5.2 Розрахунок освітлення

Відповідно до "Будівельних норм і правил" («СНІП 23-05-95») освітлення повинне забезпечити: санітарні норми освітленості на робочих місцях, рівномірну яскравість в полі зору, відсутність різких тіней і блискости, постійність освітленості за часом і правильність напрямку світлового потоку. Освітленість на робочих

місцях і у виробничих приміщеннях повинна контролюватися не рідше за один раз на рік. Для вимірювання освітленості використовується об'єктивний люксметр (Ю-16, Ю-116, Ю-117).

Виробниче освітлення буває:

- природним: обумовлено прямими сонячними променями і розсіяним світлом небозводу. Міняється залежно від географічної широти, часу доби, ступеня хмарності, прозорості атмосфери. По пристрою розрізняють: бічне, верхнє, комбіноване;

- штучним: створюється штучними джерелами світла (лампа розжарювання і т. д.). Застосовується за відсутності або недоліку природного. За призначенням буває: робочим, аварійним, евакуаційним, охоронним, черговим. По пристрою буває: місцевим, загальним, комбінованим. Влаштувати одне місцеве освітлення не можна.

При недостатності природного освітлення використовується *суміщене (комбіноване)* освітлення. Останнє є освітленням, при якому в світлий час доби використовується одночасно природне і штучне світло.

Природне і штучне освітлення нормується «СНИП II 4-79» залежно від характеристики зорової роботи, найменшого розміру об'єкту розрізнення, фону контрасту об'єкту з фоном.

Нормовані значення освітленості в люксах і КПО в % у виробничих приміщеннях представлені таблиці 6.1.

Основи розрахунку освітлення. Основним завданням є: визначення необхідної площі світлових отворів - при природному освітленні. Визначення потужності освітлювальних установок - для штучного. Для розрахунку штучного існує 2 методики: метод коефіцієнтів використання світлового потоку; точковий метод (розраховує освітлення певної крапки; місцеве освітлення).

Штучне освітлення. Норми освітленості робочих місць регламентуються СНИП 23-05-95.

При встановленні норми освітленості необхідно враховувати: розмір об'єкту розрізнення (встановлено вісім розрядів від 1 до VII), контраст об'єкту з фоном і

характер фону. На підставі цих даних по таблицям СНІП 23-05-95 визначається норма освітленості.

При виборі джерел штучного освітлення повинні враховуватися їх електричні, світлотехнічні, конструктивні, експлуатаційні і економічні показники. На практиці використовуються два види джерел освітлення: лампи накаливання і газорозрядні.

Таблиця 5.1 – Норми штучного і природного освітлення виробничих приміщень (визначення з СНІП II-4-79)

Характеристика зрительної роботи	Найменший розмір об'єкту відмінності, мм	Розряд зорової роботи	Штучне освітлення		Природне освітлення		Суміщене освітлення	
			Освітленість, лк		КПО %			
			при комбінованому освітленні	при загальному освітленні	при верхньому або комбінованому освітленні	при бічному освітленні	при верхньому або комбінованому освітленні	при бічному освітленні
Високої точності	0,3—0,5	III	2000—400	500—200	5	2	3	1,2
Середньої точності	0,5—0,1	IV	750—300	300—150	4	15	24	0,9
Малій точності	1—5	V	300—200**	200—100	3	1	1,8	0,6
Загальне спостереження за ходом виробничого процесу	—	VIII	—	75*—30	1*	0,3*	0,7*	0,2*

* При постійному спостереженні за процесом.

** Норматив стосується роботи при середньому контрасті об'єкту з фоном і темним фоном.

У методі коефіцієнта використання розрахунок світлового потоку джерела проводиться по формулі:
$$F = \frac{E_n SZK}{Nn\eta}, \quad (5.1)$$

де E_n - нормативна освітленість, лк; S - освітлювана площа, м²;

Z - коефіцієнт мінімальної освітленості $Z = \frac{E_{cp}}{N\eta} \approx 1.1 \div 1.5$;

K - коефіцієнт запасу, що враховує погіршення характеристик джерел при експлуатації;

N - число світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η - коефіцієнт використання світлового потоку.

Коефіцієнт використання визначається по індексу приміщення I_n і коефіцієнтам віддзеркалення потоку, стін і підлоги по спеціальній таблиці.

$$\text{Індекс приміщення розраховується за формулою: } i_n = \frac{ab}{h(a+b)}, \quad (5.2)$$

де a і b довжина і ширина приміщення; h - висота підвісу світильників.

$$\text{За формулою (5.1) знаходимо кількість світильників: } N = \frac{E_n SZK}{Fn\eta} \quad (5.3)$$

Розрахунок освітлення. Для розрахунку освітлення задамо параметри цеху:

- довжина: $a=50$ м.
- ширина: $b=20$ м.
- висота розташування світильників: $h=2,8$ м.

За формулою (5.2) визначимо показник приміщення:

$$i_n = \frac{ab}{h(a+b)} = \frac{50 \cdot 20}{2,8 \cdot (50 + 20)} \approx 5.$$

Для освітлення виберемо світильники серії ЛСП01.

Прийнявши коефіцієнт віддзеркалення стелі рівним 50%, по довіднику визначимо коефіцієнт використання світильника: $\eta = 58\%$.

Визначимо коефіцієнти формули (5.3):

$E_n = 500$ лк (по таблиці 5.1 для середньої точності робіт при комбінованому освітленні);

$$S = a \cdot b = 50 \cdot 20 = 1000 \text{ м}^2;$$

$Z = 1,1$ – коефіцієнт мінімальної освітленості для люмінесцентних ламп;

$K = 1,25$ – коефіцієнт запасу для газонаповнених ламп;

$n = 2$ – кількість ламп у світильнику ЛСП01;

$F = 5400$ лм – світловий потік лампи ЛБ80 (по довіднику);

За формулою (6.3) знаходимо:

$$N = \frac{E_n SZK}{Fn\eta} = \frac{500 \cdot 1000 \cdot 1,1 \cdot 1,25}{5400 \cdot 2 \cdot 0,58} \approx 109 \text{ світильників.}$$

5.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки робіт

Для забезпечення нормальної експлуатації свердлильного верстата з ЧПК необхідно виконати наступні міри безпеки:

Поразка людини електричним струмом - результат замикання електричного ланцюга через тіло людини. У зв'язку з великою насиченістю цеху електроустаткуванням, електробезпечність повинна бути забезпечена в першу чергу.

Це досягається наступними заходами: напруга на імпульсному генераторі до 2 кВт; напруга в мережі обрано 380 В;

- електроустаткування проектується таким чином, щоб цілком виключити можливість зіткнення людини зі струмоведучими частинами;

- все електроустаткування і металеві обгортки кабелів ретельно заземлюються, що забезпечує захист від поразки електричним струмом при порушенні ізоляції, а також є захистом від статичних розрядів;

- для живлення приладу обрана напруга 5В и 12В;

- наявність ізолюючих гумових рукавиць і ручного ізольованого інструмента в обслуговуючого персоналу,

Надійна ізоляція струмоведучих частин - основний технічний фактор у захисті людини від поразки електричним струмом. Опір ізоляції для силової мережі повинний бути не менш 1 МОм, мережі висвітлення 0.5 МОм, мережі слабого струму 0.2 МОм.

Мінімальні рівні шуму регламентуються ДСТ. Рівень шуму згідно ДСТ 12.1.003 - 83 повинний бути не більш 80дб. З метою зниження шуму в цехах застосовують звукоізоляційні матеріали і звуковбирні покриття.

Рівні вібрації регламентуються ДСТ 12.1. 012 - 78. Вони нормують параметри вібрації, що діють на організм людини. Боротьба з вібрацією невіддільна від боротьби із шумом і є аналогічною їй.

У цеху застосовуються світильники денного висвітлення. При штучному світлі застосовується система комбінованого висвітлення, при якій загальне висвітлення при необхідності доповнюється місцевим.

Висновок

В даній дипломній роботі розглянуті питання здійснення підвищення показників вертикально-свердлильного верстата з оперативною системою керування. В ході виконання даної роботи була змінена кінематика верстата – усунений редуктор, шестерні, зубчаті колеса та з'єднаний високомоментний двигун напряму з валом гвинта.

Дана модернізація не погіршала показників якості верстата, але спростила його конструкцію. Статичні та динамічні характеристики, розраховані та змодельовані в даній роботі задовольняють вимогам та нормам.

З одержаних графіків перехідних процесів можна побачити, що П- регулятор має меншу величину перерегулювання, на відміну від ПІ-регулятора, але не відпрацьовує збурюючий вплив. ПІ-регулятор – покращує точність системи, але має більшу величину перерегулювання. Найкращим варіантом є використання ПІ-регулятора з включеним на вході фільтром, тоді величина перерегулювання найменша з розглянутих регуляторів

Таким чином можна зробити висновок, що дана модернізація спростила кінематичну схему верстата та покращила статистичні та динамічні характеристики.

Використання такої системи автоматичного керування дозволяє:

1. безступінчате регулювання швидкістю подачі стола верстата;
2. спрощення механічної частини верстата шляхом вилучення коробки передач приводу подачі;
3. підвищення точності обробки деталей;
4. підвищення продуктивності верстата.

Список літератури

1. Автоматизированный электропривод. Под ред. Н.Ф.Ильинского, Н.Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами : Учебное пособие для ВУЗов. – Л. : Энергоиздат, 1982.
3. Брускин Д. Э. и др. Электрические машины: в 2-х ч.Ч. 1: Учебник для электротехнических специализированных ВУЗов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович В.С. Хвостов. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
4. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М. : Энергоатомиздат, 1984.
5. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М. : Энергия, 1977.
6. Каммерер Ю.Ю., Харкевич А.Е. Аварийные работы в очагах поражения. Учебное пособие. – К. : Высшая школа, 1987.
7. Казьмерковский М., Вуйцак А. Схемы управления и измерения в промышленной электронике. – К. : Наукова думка, 1986.
8. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для ВУЗов. – М. : Энергия, 1980.
9. Отто Дж. М. Смит. Автоматическое регулирование. – М. : Государственное издательство физико - математической литературы, 1962.
10. Охрана труда в машиностроении. Под ред. Е.Я. Юдина. : Учебник для ВУЗов. – М. : Машиностроение, 1976.
11. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей редакцией И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
12. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : Справочное руководство. Пер. с нем. – М. : 1982.
13. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода : Учебник для ВУЗов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М. : Энергоиздат, 1981.

Кінематична схема свердлильного верстата 2Р135Ф2-1

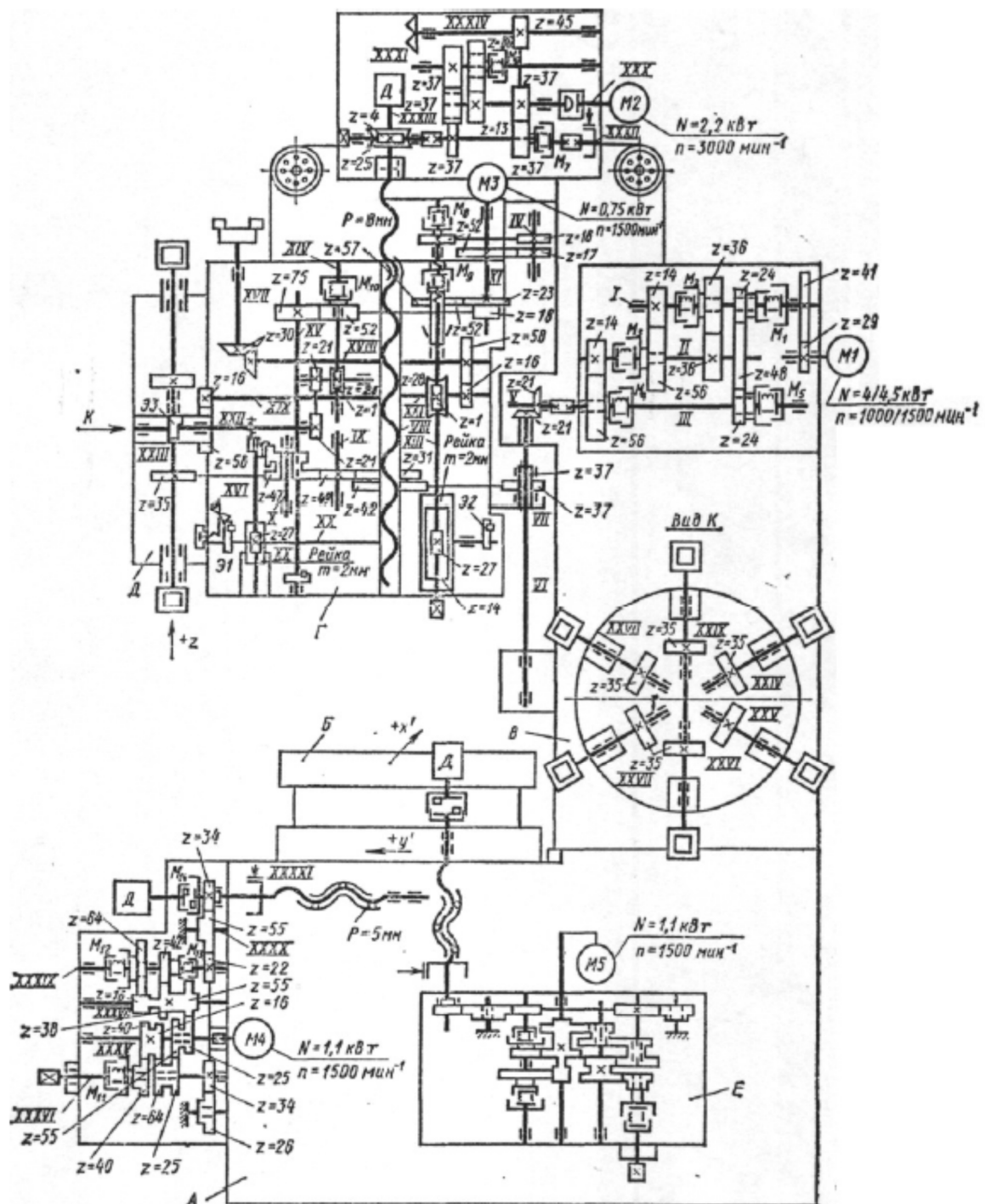


Схема діючої системи керування верстатом

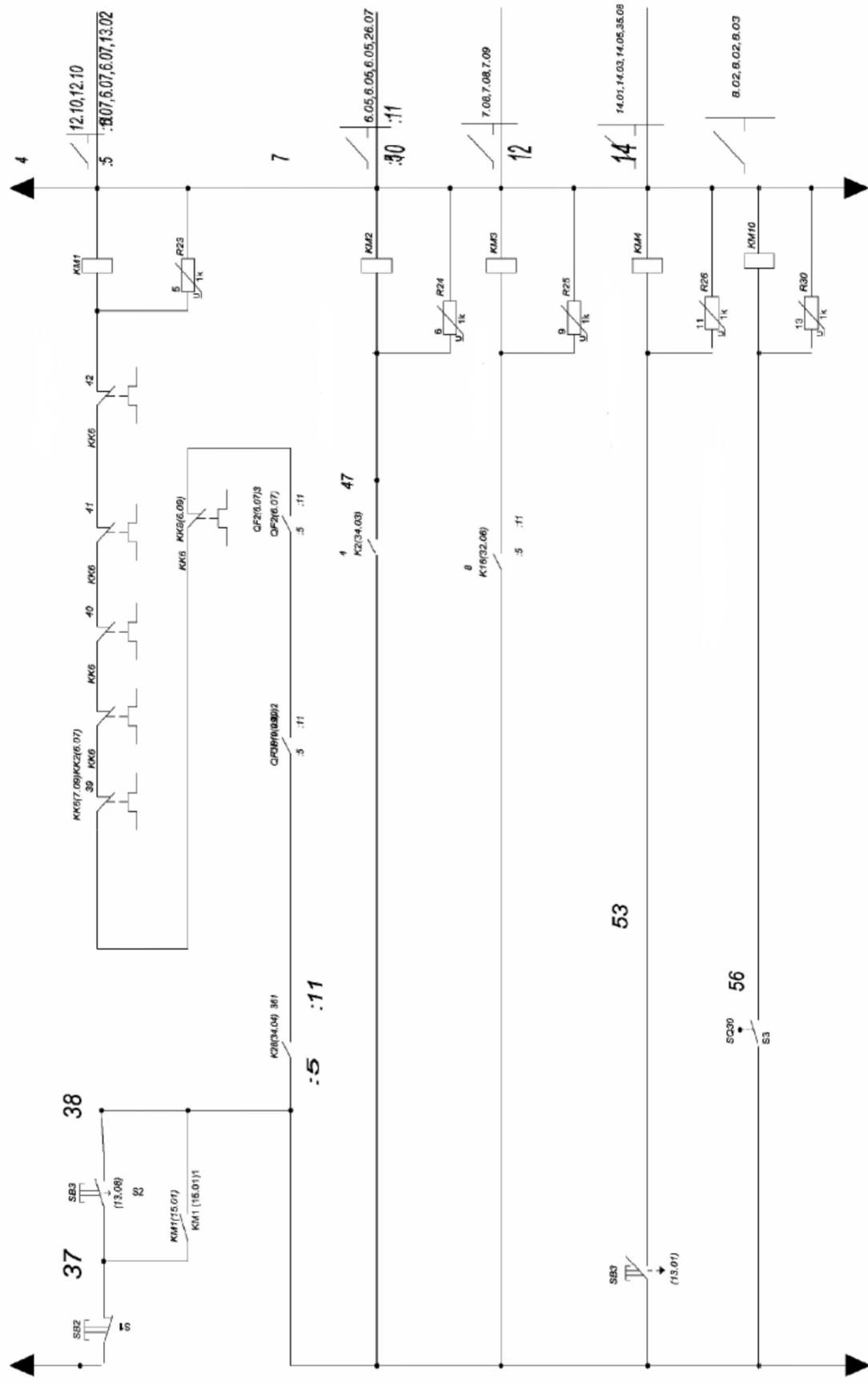


Рисунок 2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Функціональна схема електропривода «КЕМЕК»

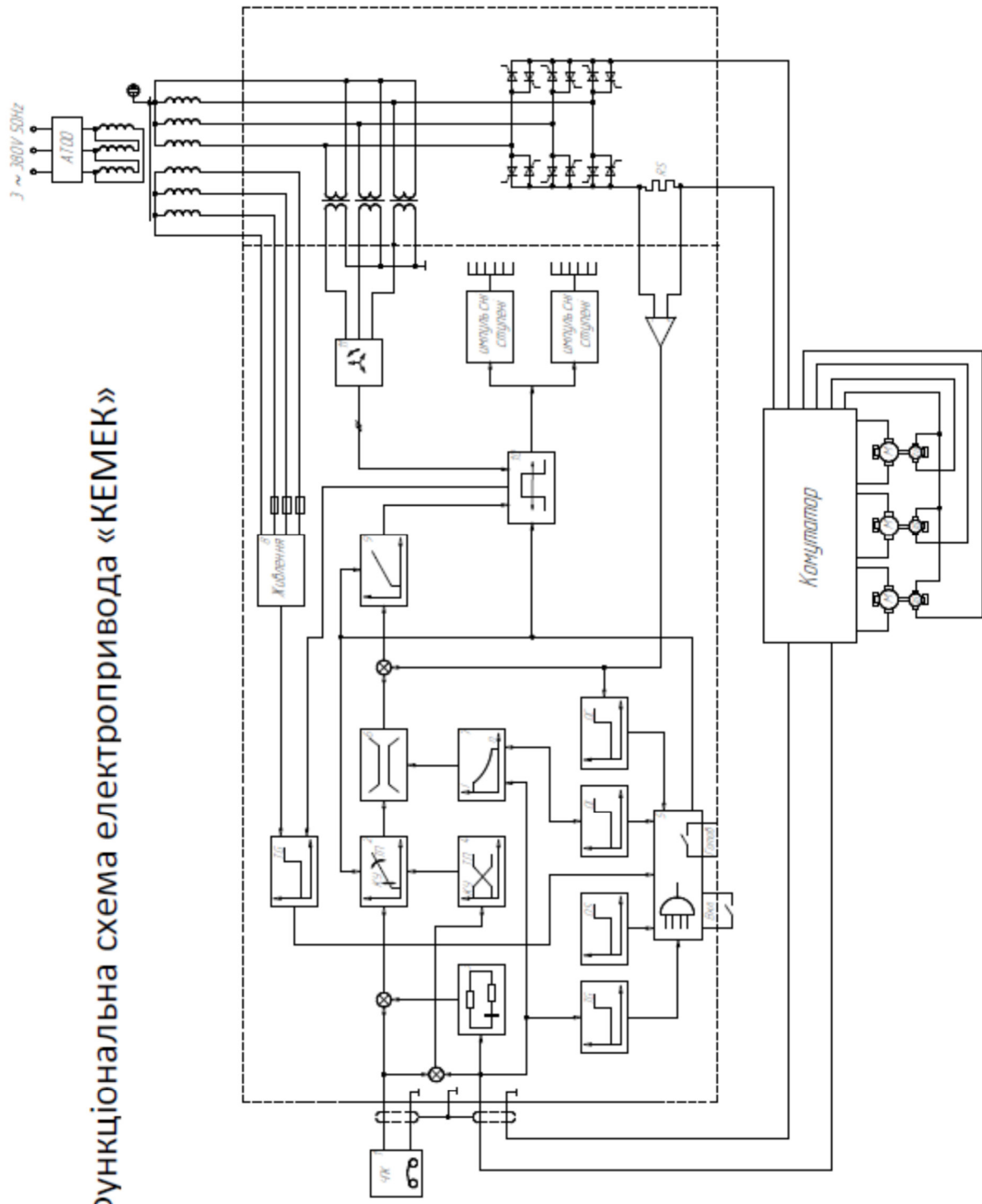


Рисунок 3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Структурні схеми електроприводу для аналізу динаміки в середовищі MathLab

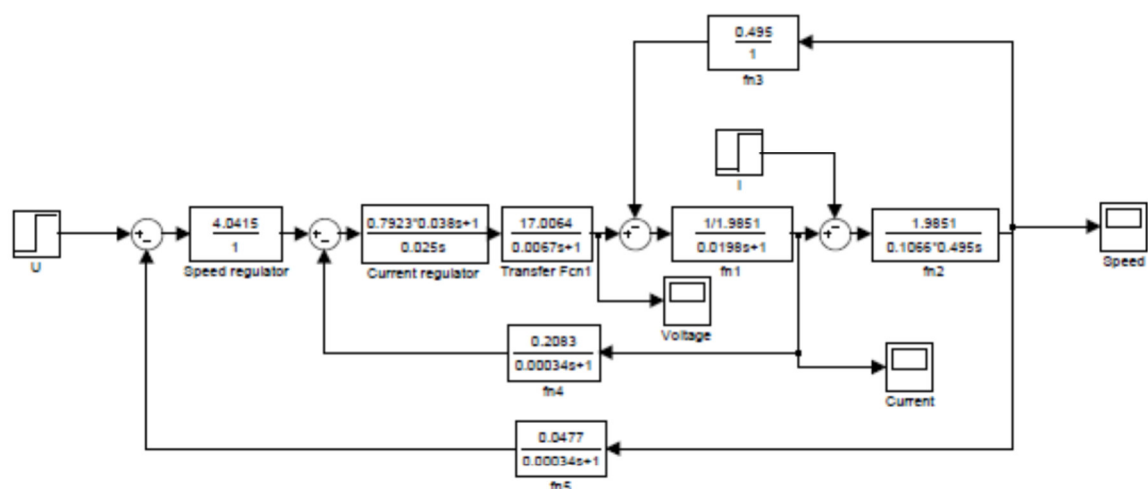


Схема моделі з П- регулятором швидкості

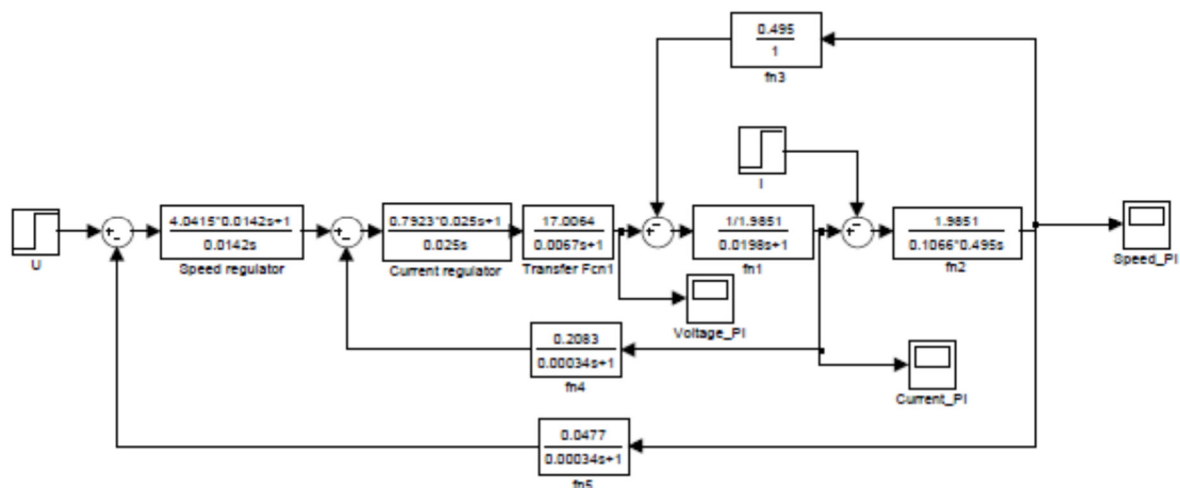


Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості

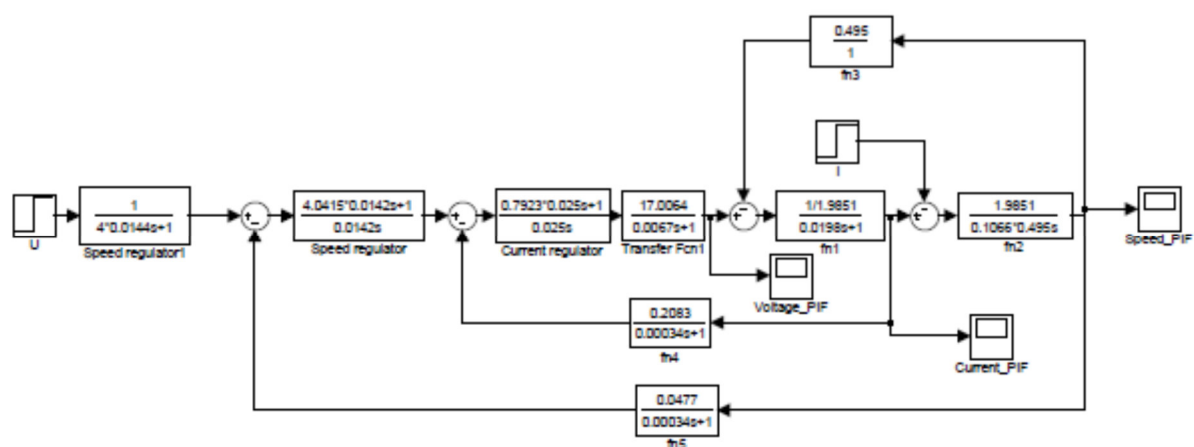
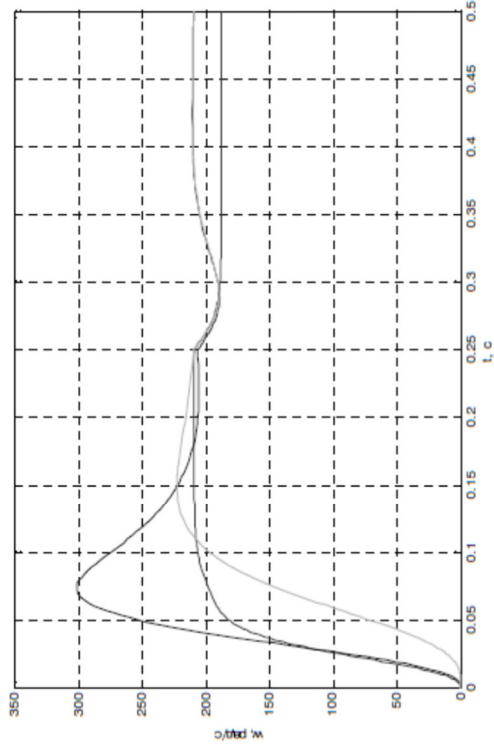
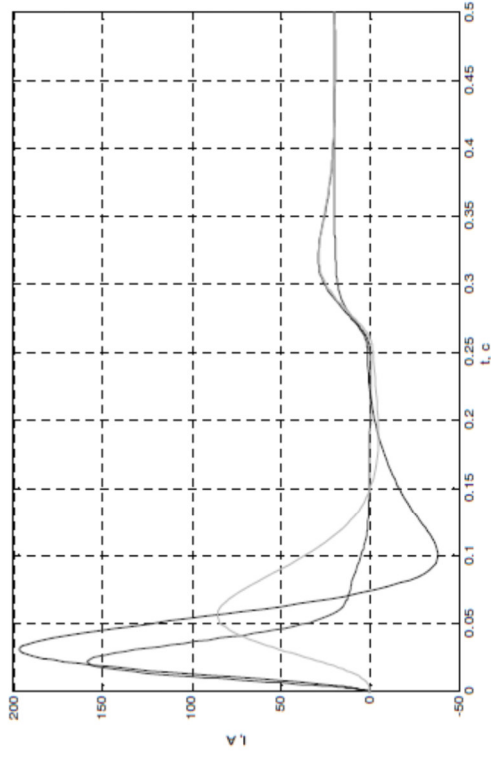


Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості з фільтром

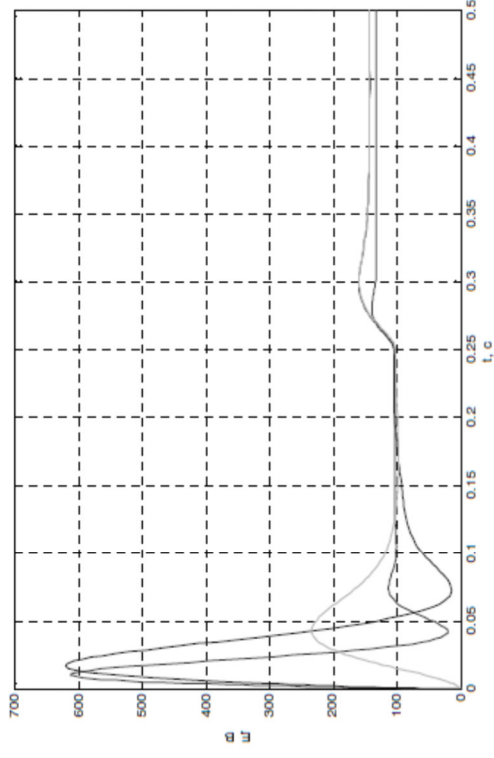
Статичні та динамічні характеристики приводу



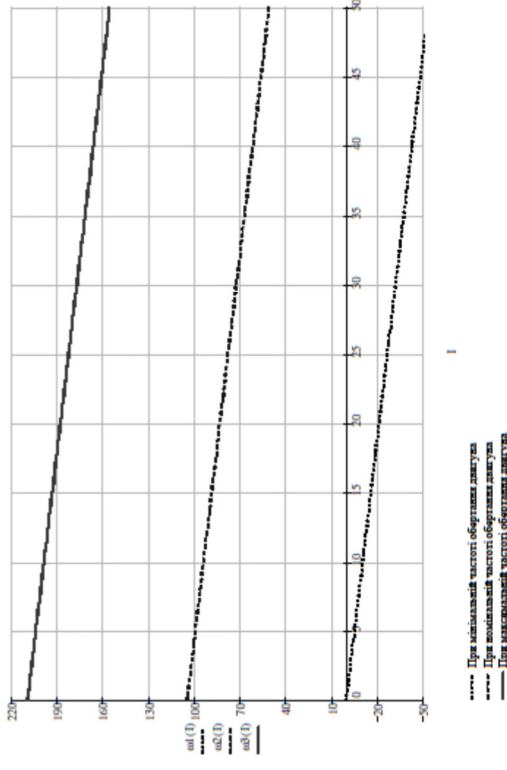
Перехідні процеси кутової швидкості



Перехідні процеси струму якоря



Перехідні процеси ЕРС



Статичні характеристики