

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
бакалавр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**«Модернізація електропривода головного руху вальцетокарного
калібрувального верстата моделі 1К824»**

Виконав: студент 2 курсу, групи
201пМЕ2

спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гордієнко М. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

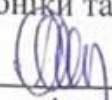
Рецензент Леві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій


О.В. Шефер
«01» квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Гордієнку Максиму Сергійовичу

1. Тема роботи «Модернізація електропривода головного руху вальцетокарного
калібрувального верстата моделі 1К824»

керівник роботи Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент

затверджена наказом вищого навчального закладу від 03. 03. 2025 року
№ 306/1-ф.а.

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Розробка високоточної системи стабілізації
потужності різання вальцетокарного каліброваного верстата моделі 1К824.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) Основні технічні характеристики верстата. Типи електроприводів для
металообробних верстатів. Точність регулювання швидкості. Зміна навантаження.
Вибір та перевірка електродвигуна. Розрахунок контуру потужності і процесу
різання. Аналіз роботи системи автоматичного регулювання з використанням
пакета MATLAB.

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

- 1) розрахунково-пояснювальна записка;
- 2) електричний привод вальцетокарного верстата;
- 3) схема функціональна;
- 4) математична модель системи автоматичного регулювання;
- 5) структурна схема;
- 6) схема для моделювання;
- 7) схема електрична принципова датчика;

- 8) графіки перехідних процесів в проєктуємії системі.
6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
1	Вступ. Технічні характеристики верстата Постановка задач на кваліфікаційну роботу	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Вибір двигуна та основного обладнання. Характеристика електропривода	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розрахунок та вибір обладнання	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Аналіз роботи системи автоматичного регулювання з використанням пакета MATLAB. Графічні роботи	30.05.25		80 %	Пл. 6
5	Розрахунок надійності системи. Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 7

Студент


(підпис)

Гордієнко М.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Галай В.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра "Модернізація електропривода головного руху вальцетокарного калібрувального верстата моделі 1К824"

Проект містить: 87 сторінок, 7 креслень, 15 використаних джерел, 17 ілюстрацій, 3 таблиці.

Ключові слова: електропривод постійного струму, система підлеглого регулювання, контур струму, контур швидкості, контур потужності, процес різання, оптимальне настроювання регуляторів

Об'єкт дослідження - головний привод вальцетокарного калібрувального верстата моделі 1К824.

Ціль роботи - розробка високоточної системи стабілізації потужності різання вальцетокарного каліброваного верстата моделі 1К824.

Методами теорії оптимального керування синтезована система стабілізації потужності різання, проведено дослідження синтезованої системи на математичній аналоговій моделі.

У результаті дослідження розроблена система стабілізації потужності різання, що забезпечує низьку чутливість до параметричних збурювань.

Основні конструктивні і техніко-експлуатаційні показники розробленої системи:

висока точність стабілізації потужності різання на заданому рівні;

досить велика швидкодія системи;

мала чутливість до зміни параметрів об'єкта керування.

Дійсна система керування може бути використана не тільки в даному вальцетокарному верстаті, але й у важких токарських і токарно-гвинторізних верстатах, де є необхідність обмежити потужність, виділювану з головного приводу верстата або потужність різання на практично будь-якому заданому рівні.

Ефективність розробленої системи керування визначається впровадженням оптимальних регуляторів, а також використанням сучасної елементної бази.

ABSTRACT

bachelor's Qualification Thesis: "Modernization of the Main Drive Electric Drive of a 1K824 Roll Turning Calibrating Machine"

The project includes: 86 pages, 7 drawings, 15 references, 17 illustrations, 3 tables.

Keywords: DC electric drive, subordinate control system, current loop, speed loop, power loop, cutting process, optimal tuning of controllers

The object of research is the main drive of the 1K824 roll-turning calibrating machine.

The goal of the work is to develop a high-precision cutting power stabilization system for the 1K824 roll-turning calibrating machine.

A cutting power stabilization system was synthesized using optimal control theory methods, and the synthesized system was investigated using a mathematical analog model.

As a result of the research, a cutting power stabilization system was developed that provides low sensitivity to parametric disturbances.

The main structural and technical-operational indicators of the developed system are:

High accuracy of cutting power stabilization at a given level.

Fairly high system response speed.

Low sensitivity to changes in control object parameters.

This control system can be used not only in this roll-turning machine but also in heavy-duty lathes and screw-cutting lathes where there is a need to limit the power delivered from the main drive of the machine or the cutting power at practically any given level.

The effectiveness of the developed control system is determined by the implementation of optimal controllers and the use of a modern component base.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Основні технічні характеристики верстата:.....	11
1.2 Технічні характеристики електропривода головного руху	12
1.3 Типи електроприводів для металообробних верстатів	14
1.4 Аналіз режимів функціонування приводних систем верстатів.....	15
1.5 Проблеми з недовантаженням електродвигунів	16
1.6 Вимоги до електроприводів на верстатах із ЧПК	16
1.7 Фактори, що впливають на стабільність електроприводів.....	17
Висновок до розділу	17
2 РОЗРАХУНКОВО - ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	18
2.1 Вибір та перевірка електродвигуна.....	18
2.2 Відомості про систему електроживлення верстата.....	25
2.3 Аналіз динамічних характеристик та вибір компонентної бази системи.	26
2.4 Синтез системи автоматичного регулювання. Підбір і розрахунок автоматизуючих пристроїв.....	31
2.5 Розрахунок контуру струму	32
2.6 Розрахунок контуру швидкості.....	35
2.7 Розрахунок контуру потужності і процесу різання.....	38
2.8 Розрахунок статичної характеристики системи	44
Висновок до розділу	45
3 РОЗДІЛ	47
ДАТЧИК ПОТУЖНОСТІ. СТРУКТУРА МОДЕЛІ MATLAB.....	47
3.1 Аналіз роботи системи автоматичного регулювання з використанням пакета MATLAB.....	49
Висновок до розділу	57
4 РОЗДІЛ. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ	58
4.1 Розрахункові дані.....	59
4.2 Основні технічні вимоги.....	60
4.3 Опис відмов у системі.....	61
4.4 Вибір вентиляційної групи	62

4.5 Трансформатор силовий погоджувачий.....	62
4.6 Автомат.....	63
4.7 Визначення часу до відмови трифазної нульової установки перетворення	63
4.8 Врахування умов роботи.....	63
4.9 Силовий трансформатор погоджувачий.....	64
4.10 Вентильна група.....	65
4.11 Автоматичний вимикач.....	68
4.12 Сумарні показники надійності.....	71
ВИСНОВОК	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ.....	76

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні та металообробці важливим завданням є підвищення ефективності роботи обладнання. Одним із ключових напрямів модернізації є вдосконалення приводних механізмів верстатів, що дозволяє підвищити продуктивність, точність обробки та енергоефективність. У цьому контексті актуальним є питання модернізації привода головного руху вальцетокарного калібрувального верстата моделі.

Верстат 1К824 широко використовується на підприємствах, що спеціалізуються на обробці валів, циліндричних та каліброваних деталей. Проте, з часом окремі вузли обладнання застарівають, що призводить до зниження його продуктивності та збільшення витрат на технічне обслуговування. Одним із таких вузлів є привод головного руху, який потребує модернізації для покращення експлуатаційних характеристик верстата.

Метою даної роботи бакалавра є аналіз існуючого привода головного руху верстата 1К824, виявлення його недоліків та розробка заходів щодо його модернізації. У ході роботи буде виконано технічний аналіз, проведено розрахунки та вибрано оптимальні технічні рішення для впровадження.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення продуктивності та надійності роботи металообробного обладнання, а також відповідності сучасним вимогам точності та енергоефективності.

Результати даної роботи можуть бути використані на підприємствах, що експлуатують верстати моделі 1К824, а також у процесі модернізації інших верстатів з аналогічними приводними системами.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основні технічні характеристики верстата:

Габарити оброблюваної заготовки:

- Максимальний діаметр заготовки, що встановлюється над супортом – **1000 мм**.
- Діапазон діаметрів оброблюваної зовнішньої поверхні – **600—1000 мм**.
- Максимальна довжина виробу – **5000 мм**.
- Найбільша маса заготовки, встановлюваної в центрах – **25000 кг**.

Робочі параметри:

- Максимальний перетин державки різців – **63 × 43 мм**.
- Кількість позицій інструмента – **1**.
- Найбільше поперечне переміщення супорта – **345 мм**.

Рухові характеристики:

- Діапазон частот обертання шпинделя – **0,46 — 25 об/хв**.
- Регулювання подач:
 - Подовжня подача супорта – **0,02 — 139,0 мм/об**.
 - Поперечна подача супорта – **0,01 — 55,0 мм/об**.
- Швидкі настановні переміщення супорта – **2,5 м/хв**.
- Кількість ступенів обертання шпинделя – **безступінчасте**.
- Кількість ступенів робочих подач – **безступінчасте**.

Силкові показники:

- Найбільше зусилля різання на один супорт – **100 кН**.
- Максимальний крутний момент на шпинделі – **90 кН·м**.

Якість обробки:

- Шорсткість зовнішньої поверхні – **1,65 мкм**.

Експлуатаційні характеристики:

- Продуктивність (у порівнянні з попередньою моделлю) – **1,6**.
- Питома маса металу на одиницю продуктивності – **0,76 кг**.
- Питома витрата електроенергії на одиницю продуктивності – **0,77 кВт·год**.

Надійність і безвідмовність:

- Мінімальний безвідмовний наробіток:
 - У добу – **16 год**.
 - У тиждень – **80 год**.
 - Загальний – **не менше 500 год**.

1.2 Технічні характеристики електропривода головного руху

Привод головного руху верстата 1К824 виконує функцію прецизійного керування частотою обертання шпинделя в діапазоні 0,46–25 об/хв, що необхідно для адаптації обладнання до різноманітних умов обробки. До ключових вимог, що висуваються до привода, належать підтримка розширеного спектра технологічних режимів, забезпечення максимальної ефективності на всіх стадіях виробничого процесу, а також досягнення високих показників точності та якості фінішної поверхні деталей.

Ключові параметри системи привода:

- **Тип двигуна:** Залежно від конкретної модифікації верстата, привод оснащується асинхронним або синхронним електродвигуном.
- **Система керування:** Для досягнення точного контролю швидкості застосовується система частотного регулювання.

- **Максимальний крутний момент:** Показник на шпинделі сягає 90 кН·м, що забезпечує можливість стабільної обробки великогабаритних заготовок.
- **Діапазони подач:** Супорт забезпечує подовжню подачу в межах 0,02—139,0 мм/об та поперечну — 0,01—55,0 мм/об.
- **Показники енергоефективності:** Питоме споживання електроенергії становить 0,77 кВт·год на одиницю продуктивності.
- **Швидкість допоміжних переміщень:** Швидкий хід супорта до 2,5 м/хв дозволяє мінімізувати непродуктивні витрати часу.

Отже, система електропривода головного руху надає гнучкість у налаштуванні швидкості обробки, стабільність роботи при коливаннях навантаження, високі показники продуктивності та енергоефективності. Завдяки прецизійному регулюванню забезпечується відмінна якість обробки, стабільність процесу та мінімізація відхилень у розмірах готових виробів. Привод дозволяє отримувати високий клас чистоти поверхні, що є однією з ключових вимог у точному машинобудуванні.

Існують три основні методи регулювання швидкості привода, вибір яких залежить від конструкції верстата та технологічних завдань:

Механічний метод: Здійснюється шляхом зміни передавального числа в механічній передачі між двигуном та шпинделем.

Електричний метод: Базується на керуванні частотою обертання вала двигуна за допомогою перетворювачів частоти.

Електромеханічний метод: Передбачає інтеграцію механічних та електричних способів для досягнення плавного та точного контролю швидкості.

Інтеграція сучасних підходів до керування приводом дозволяє оптимізувати продуктивність на всіх етапах обробки, розширити діапазон доступних технологічних режимів, а також підвищити точність виготовлення деталей та якість їхніх поверхонь.

1.3 Типи електроприводів для металообробних верстатів

У галузі металообробки вибір оптимального електропривода для верстатного обладнання визначається специфікою технологічних завдань та ключовими вимогами до точності, потужності й загальної ефективності. Залежно від цих факторів, застосовуються різні типи приводних систем.

Для верстатів зі стабільними режимами роботи, які не потребують частої зміни швидкості чи частих пусків, перевага надається трифазним асинхронним двигунам з короткозамкненим ротором. Їхня популярність зумовлена простотою конструкції, високою надійністю та відсутністю потреби у складних системах керування. Регулювання швидкості в таких системах зазвичай реалізується механічно, шляхом зміни передавального числа в коробці швидкостей.

Для обладнання, що вимагає гнучкого та широкого діапазону регулювання швидкості, як-от шліфувальні або високоточні токарні верстати, застосовуються електроприводи на базі двигунів постійного струму. Контроль кутової швидкості шляхом зміни напруги на обмотках дозволяє підтримувати стабільність обробки та досягати високої точності.

На великогабаритному обладнанні, такому як важкі токарні або карусельні верстати, поширена практика використання індивідуальних електроприводів для кожного механізму подачі. Такий підхід сприяє автоматизації допоміжних операцій, спрощенню кінематичної схеми верстата та забезпеченню високої точності переміщень.

У верстатах, де ключовою вимогою є плавність регулювання швидкості подачі або висока точність при обробці дрібних деталей, знаходять застосування двигуни постійного струму або асинхронні двигуни зі збільшеним пусковим моментом. Ці приводи забезпечують необхідну плавність керування та точність виконання операцій.

Таким чином, вибір конкретного типу електропривода є комплексним рішенням, що ґрунтується на аналізі умов експлуатації, а також техніко-економічних вимог до процесу обробки.

1.4 Аналіз режимів функціонування приводних систем верстатів

Специфіка технологічних процесів у металообробці зумовлює функціонування приводних систем верстатів у різноманітних режимах. Змінний характер навантаження, притаманний багатьом операціям, вимагає від електропривода здатності до швидкої адаптації без шкоди для точності та загальної ефективності.

Класифікація режимів роботи електричних приводів:

Режим тривалої роботи (S1): Цей режим означає, що привод функціонує безперервно при постійному навантаженні, що дозволяє досягти теплової рівноваги. Він є стандартом для потужних верстатів, таких як зубофрезерні, токарні та шліфувальні, що виконують довготривалі операції.

Режим частих реверсів та змінних навантажень (S7): Типовим прикладом є робота поздовжньо-стругальних верстатів, головний привод яких постійно змінює напрямок обертання та зазнає коливань навантаження. Підбір привода для цього режиму ґрунтується на аналізі діаграм навантажень, щоб оптимізувати динаміку реверсування.

Режими циклічної роботи з паузами (S3, S4): Обладнання, що працює в автоматичному циклі (наприклад, свердлильні верстати), функціонує в цих режимах. Вони характеризуються чергуванням коротких періодів роботи та пауз. Потужність привода розраховується з урахуванням усереднених теплових втрат за весь цикл.

Режим короткочасних включень (S2): Застосовується для допоміжних механізмів, які активуються на короткий проміжок часу, наприклад, для затискання деталі. Час роботи двигуна в такому режимі нетривалий (від 5 секунд до 1,5 хвилини, залежно від розміру верстата), що не дозволяє йому досягти значного нагрівання.

1.5 Проблеми з недовантаженням електродвигунів

Експлуатація електричних приводів при навантаженні, що є значно нижчим за номінальне, є поширеною проблемою, яка призводить до низки негативних наслідків. В першу чергу, це спричиняє падіння коефіцієнта корисної дії (ККД) та коефіцієнта потужності ($\cos\phi$). Як результат, зростає споживання реактивної енергії з мережі, що веде до невиправданих енергетичних втрат. Для нівелювання цього ефекту та оптимізації енергоспоживання в промисловості застосовують спеціалізовані компенсуючі пристрої.

1.6 Вимоги до електроприводів на верстатах із ЧПК

До приводних систем, що використовуються на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), висувається розширений перелік вимог порівняно зі стандартним обладнанням. Їхнє ключове завдання полягає не лише у підтримці стабільної частоти обертання, але й у забезпеченні високоточного позиціонування виконавчих органів верстата. Для реалізації цього функціоналу необхідний прецизійний контроль швидкості шпинделя та

здатність системи зберігати стабільність робочих параметрів при динамічних змінах навантаження.

1.7 Фактори, що впливають на стабільність електроприводів

Забезпечення стабільного функціонування приводних систем залежить від кількох критичних факторів, серед яких:

Точність підтримання швидкості: Для верстатів із ЧПК цей параметр є визначальним, оскільки навіть мінімальні флуктуації швидкості обертання безпосередньо впливають на якість фінішної обробки та точність геометрії деталі.

Стабільність напруги живлення: Коливання напруги в електромережі є фактором ризику, що може провокувати нештатну роботу приводної системи, збої в програмі та, як наслідок, погіршення точності позиціонування.

Реакція на динамічні навантаження: Здатність привода зберігати задані параметри при різкій зміні навантаження є критично важливою. Для обладнання з ЧПК похибка регулювання в таких умовах не повинна виходити за межі 2%.

Висновок до розділу

Таким чином, для забезпечення стабільної та ефективної роботи металообробних верстатів необхідно враховувати специфіку режимів роботи, а також розробляти системи управління електроприводами, що дозволяють оптимально працювати в умовах змінного навантаження.

2 РОЗРАХУНКОВО- ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір та перевірка електродвигуна

Ключовим етапом проектування головного привода для токарного верстата є обґрунтований вибір електродвигуна, що базується на прецизійному розрахунку необхідної потужності. Цей розрахунок дозволяє гарантувати продуктивне функціонування обладнання в різноманітних технологічних умовах. Методика визначення потужності ґрунтується на аналізі ключових фізичних параметрів процесу, зокрема швидкості різання та силових навантажень на інструмент, оскільки ці показники безпосередньо залежать від властивостей оброблюваного матеріалу.

Розглянемо методику розрахунку на прикладі конкретного технологічного завдання: чорнова обробка вала діаметром 1000 мм, виготовленого з конструкційної сталі марки 60ХН, з використанням різця зі швидкорізальної сталі Т14Д08. Для цього необхідно визначити два основні параметри.

Швидкість різання (V)

Цей параметр визначає швидкість відносного руху різальної кромки інструмента по поверхні заготовки. Величина швидкості різання є критично важливою для оптимізації продуктивності та контролю зносу інструмента. Її оптимальне значення є функцією від фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки та характеристик самого різального інструмента. Правильний вибір цього параметра безпосередньо впливає на точність обробки.

Тангенціальна складова сили різання (F_z)

Цей компонент є силовим фактором, що формує основне навантаження на привод під час зняття стружки. Величина F_z є результатом складної взаємодії інструмента з матеріалом і залежить від численних чинників, серед яких – властивості оброблюваного матеріалу, геометрія різальної частини інструмента та задані режими різання (глибина, подача).

Отже, для коректного визначення потужності двигуна головного привода необхідний комплексний підхід. Він має інтегрувати аналіз усіх перерахованих факторів у поєднанні з характеристиками робочих режимів верстата. Такий підхід забезпечує вибір оптимального двигуна, здатного підтримувати стабільну та ефективну роботу обладнання на всіх етапах технологічного процесу.

$$V = \frac{C_v}{T^m x^y} K_v \quad (2.1)$$

$S = 34$ мм — подовжня подача, що визначає переміщення інструмента відносно заготовки за один оборот.

$C_v = 340$ — емпіричний коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості матеріалу та інструменту.

$m = 0.2$; $x = 0.15$; $y = 0.45$ — емпіричні коефіцієнти, які використовуються для коригування розрахункових значень в залежності від характеристик матеріалу та умов роботи.

$t = 12$ мм — товщина шару матеріалу, що знімається під час кожного проходу ріжучого інструмента.

$T = 60$ хв — тривалість ефективного використання, що визначає час роботи приводу під час одного технологічного циклу.

K_v — поправочний коефіцієнт, що враховує фактичні умови різання, наприклад, зміну швидкості, тип матеріалу та інші параметри.

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}, \quad (2.2)$$

K_{mv} — визначає вплив фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу.

$K_{iv} = 0.8$ — коригувальний коефіцієнт, що відображає характеристики застосованого ріжучого інструменту.

$K_{pv} = 1$ — враховує наявність окалини на поверхні заготовки (у даному випадку обробка виконується по чистій поверхні).

$$K_{MV} = K_{\sigma} \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_B} = \left(\frac{750}{1100} \right)^{1.75} = 0.52 \quad (2.3)$$

У розрахунках для визначення потужності електродвигуна використовуються кілька коригувальних коефіцієнтів:

- $K_{\Gamma} = 1$ — коефіцієнт міцності, що вважається рівним одиниці для даного типу обробки.
- $\sigma_B = 1100$ МПа — межа міцності матеріалу, з яким проводиться обробка.
- $n_B = 1.78$ — коефіцієнт, що залежить від характеристик оброблюваного матеріалу та матеріалу ріжучого інструмента.

З урахуванням цих значень, для обчислення поправочного коефіцієнта K_v , підставляємо:

$$K_v = 0.52 \cdot 1 \cdot 0.8 = 0.41 \quad (2.4)$$

Отже, з урахуванням усіх коефіцієнтів і поправок, отримуємо остаточне значення для K_v , що складає 0.41.

$$V = \frac{340}{60^{0.2} \cdot 12^{0.15} \cdot 34^{0.45}} \cdot 0.41 = 8.66 \quad (2.5)$$

Таким чином, знаючи швидкість різання V , можна розрахувати тангенціальну складову сили різання F_z , яка є важливим параметром для визначення навантаження на оброблювану деталь під час процесу різання:

$$F_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (2.6)$$

$C_p = 200$ — емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив фізико-механічних властивостей матеріалу.

$x = 1$; $y = 0.75$; $n = 0$ — емпіричні коефіцієнти, які коригують результати розрахунку залежно від умов обробки.

K_p — коефіцієнт коригування, що враховує реальні умови процесу різання, зокрема тип оброблюваного матеріалу та інструмента.

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\alpha p} \cdot K_{\beta p} \cdot K_{rp} \cdot K_{\gamma p}; \quad (2.7)$$

$K_{\alpha p} = 1.15$ — коефіцієнт, що враховує передній кут інструмента, який у плані складає $\alpha = 12-15^\circ$;

$K_{\beta p} = 1$ — коефіцієнт, що відображає кут нахилу основного леза інструмента, який дорівнює $\gamma = 15^\circ$;

$K_{rp} = 0.93$ — коефіцієнт, що враховує радіус на кінцевій точці інструмента $r = 1$ мм;

$K_{\gamma p} = 1$ — коефіцієнт, що визначає основний кут у горизонтальній площині, рівний $\gamma = 45^\circ$.

Також важливим є коефіцієнт K_{mp} , який враховує вплив якості оброблюваного матеріалу на сили, що виникають під час процесу різання.

$$K_{MP} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right)^n = \left(\frac{1100}{750}\right)^{0.75} = 1.33 \quad (2.8)$$

$\sigma_B = 1100$ МПа — межа міцності оброблюваного матеріалу;

$n = 0.75$ — коефіцієнт ступеня, який враховує вплив якості матеріалу на силові характеристики під час обробки.

Тепер, підставивши рівняння (2.8) в рівняння (2.7), отримаємо:

$$K_p = 1.33 \cdot 1.15 \cdot 1 \cdot 0.93 \cdot 1 = 1.425 \quad (2.9)$$

Підставивши рівняння (2.1) — (2.5) та (2.7) — (2.9) у рівняння (2.6), отримаємо:

$$F_z = 10 \cdot 200 \cdot 12^1 \cdot 34^{0.75} \cdot 8.66^0 \cdot 1.425 = 481670 \text{ кН} \quad (2.10)$$

Знаючи швидкість різання V та тангенціальну складову сили різання F_z , можемо визначити необхідну потужність різання, враховуючи коефіцієнт корисної дії системи, який дорівнює 0.9:

$$P = \frac{F_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{481670 \cdot 8.66}{1020 \cdot 60} = 68.157 \text{ кВт.} \quad (2.11)$$

Обираємо електродвигун серії 4ПН 400 - 22 МУЗ з такими характеристиками:

- Номінальна потужність двигуна: $P_n = 70 \text{ кВт}$;
- Номінальний струм двигуна: $I_n = 350 \text{ А}$;
- Номінальна напруга живлення: $U_n = 220 \text{ В}$;
- Момент інерції двигуна: $J_{дв} = 8.25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- Мінімальна швидкість обертання: $n_{\min} = 250 \text{ об/хв}$;
- Номінальна швидкість обертання: $n_n = 750 \text{ об/хв}$;
- Максимальна швидкість обертання: $n_{\max} = 1500 \text{ об/хв}$;
- Пускова перевантажувальна здатність: $\sigma_p = 2$;
- Номінальний коефіцієнт корисної дії: $\eta_n = 93\%$.

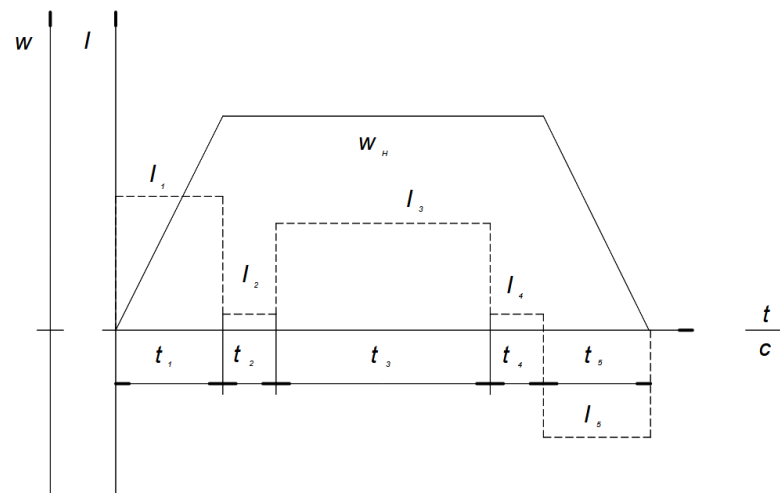


Рисунок. 2.1 – Навантажувальна діаграма і тахограма руху ЕП

Для перевірки вибраного двигуна на нагрівання проводимо аналіз за тахограмою та навантажувальною діаграмою, наведено на Рис. 2.1

У цьому аналізі:

- $t_1 = 1 \text{ с}$ — час розвантаження електродвигуна;
- $t_2 = t_4 = 2 \text{ с}$ — час роботи електродвигуна на холостому ході;
- $t_3 = 3000 \text{ с}$ — час роботи двигуна з номінальним навантаженням;
- $t_5 = 1 \text{ с}$ — час гальмування двигуна;
- $I_1 = 2I_n = 700 \text{ А}$ — пусковий струм двигуна;
- $I_2 = 0.1I_n = 35 \text{ А}$ — струм холостого ходу двигуна;
- $I_3 = 0.95I_n = 332 \text{ А}$ — номінальний робочий струм двигуна;
- $I_4 = 0.1I_n = 35 \text{ А}$ — струм холостого ходу двигуна;
- $I_5 = 1.9I_n = 665 \text{ А}$ — гальмовий струм електродвигуна.

Отже:

$$\begin{aligned}
 I_3 &= \sqrt{\frac{t_1(2I_H)^2 + (t_2 + t_4)(0.1I_H)^2 + t_3(0.95I_H)^2 + t_5(1.9I_H)^2}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} = \\
 &= \sqrt{\frac{1 \cdot 700^2 + (2 + 2) \cdot 35^2 + 3000 \cdot 333^2 + 1 \cdot 665^2}{1 + 2 + 3000 + 2 + 1}} = 333 \text{ А}
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Оскільки розрахований еквівалентний струм є меншим за номінальний струм обраного двигуна, це свідчить про те, що двигун підібрано правильно і він відповідає вимогам по нагріванню.

Для живлення двигуна обираємо тиристорний перетворювач серії ЕПУ1-2-4347 ДУХЛ4, який має наступні характеристики:

- Номінальна потужність: $P_H = 92 \text{ кВт}$;
- Номінальна вихідна напруга: $U_H = 230 \text{ В}$;
- Номінальний вихідний струм: $I_H = 400 \text{ А}$.

Для забезпечення живлення тиристорного перетворювача використовуємо трансформатор ТСЗП - 160 / 0.743 з такими технічними параметрами:

- Номінальна споживана потужність: $P_H = 143 \text{ кВА}$;
- Напруга первинної обмотки: $U_1 = 380 \text{ В}$;
- Напруга вторинної обмотки: $U_{2\phi} = 230 \text{ В}$;
- Струм вторинної обмотки: $I_{2\phi} = 500 \text{ А}$;
- Втрати холостого ходу: $P_{хх} = 795 \text{ Вт}$;
- Втрати при короткому замиканні: $P_{кз} = 2400 \text{ Вт}$;
- Напруга короткого замикання: $U_{кз} = 4.5\%$;
- Струм холостого ходу: $I_{хх} = 5.2\%$.

Для зменшення пульсацій випрямленої напруги обрано реактор ФРОС - 125 / 0.5 УЗ, який має такі параметри:

- Номінальний струм: $I_n = 500 \text{ A}$;
- Номінальна індуктивність: $L_n = 0.75 \text{ мГн}$;
- Номінальний опір: $R_n = 3 \text{ МОм}$.

Цей вибір трансформатора і реактора забезпечує надійне і ефективне живлення системи, стабілізуючи роботу електричних приводів

2.2 Відомості про систему електроживлення верстата

Характеристика системи електроживлення верстата вальцетокарного каліброваного моделі 1К824.

Система електроживлення верстата є комплексною та багаторівневою, забезпечуючи різні вузли та ланцюги необхідними параметрами струму та напруги.

Основне живлення всього електроустаткування здійснюється від промислової трифазної мережі з напругою **380В** та частотою **50Гц**.

Живлення ланцюгів керування (ЦУ) реалізовано через низку понижувальних трансформаторів та випрямних мостів для отримання постійного та змінного струму різних номіналів:

Для станції НКУ 2090:

Постійна напруга **110В** формується трансформатором Т10 з випрямлячем V20-V25.

Окрема лінія стабілізованої постійної напруги **110В** забезпечується стабілізатором G2 та трансформатором Т7 з випрямлячем V8-V11.

Постійна напруга **24В** подається від двох паралельних джерел: трансформатора Т8 (з випрямлячем V12-V17) та трансформатора Т11 (з випрямлячем V26-V31).

Змінна напруга **110В (50Гц)** для ланцюгів керування подається від трансформатора Т6.

Для станції НКУ 3090:

Живлення постійним струмом **110В** та **24В** забезпечується відповідно трансформаторами Т20 (з випрямлячем V89) та Т23 (з випрямлячем V90).

Живлення допоміжних систем та пристроїв:

Комплектний цифровий індикатор (КЦІ) живиться напругою **220В, 50Гц** від трансформатора Т22.

Двигуни вентиляторів у комплектних пристроях НКУ працюють від напруги **220В, 50Гц**, що подається трансформатором Т12.

Система загального освітлення верстата живиться безпечною напругою **24В** від трансформатора Т4.

Для місцевого освітлення станції НКУ 2090 використовується напруга **24В, 50Гц** від трансформатора Т6.

2.3 Аналіз динамічних характеристик та вибір компонентної бази системи.

На Рис. 2.2. система схеми тиристорний перетворювач — двигун. Система, що розробляється, описується на Рис. 2.3.

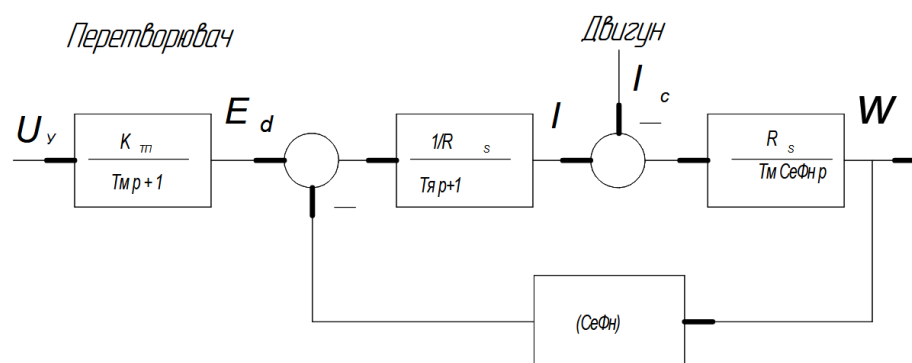


Рисунок. 2.2 – Структурна схема системи ТП-Д

Для коректного налаштування системи обчислимо коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача, що визначається як співвідношення між середньою випрямленою напругою (U_{d0}) та максимальною напругою керування ($U_{ум}$), яка, у зв'язку із застосуванням стандартної блокової системи регуляторів, не перевищує 8 В.:

$$K_{ТП} = \frac{U_{d0}}{U_{ум}} = \frac{537.4}{8} = 67.17 \quad (2.17)$$

$$U_{d0} = \frac{U_{2\phi}}{K_u} = \frac{230}{0.428} = 537.4 \quad (2.18)$$

де $K_u = 0.428$ — коефіцієнт схеми випрямлення.

Постійну часу тиристорного перетворювача приймаємо рівною 0.007 с, час, достатній з метою повернення блокуючої здатності тиристорів по завершенні переходу напівперіоду напруги через нульове значення

Визначимо активний опір фази трансформатора:

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_2^2}{I_{нтр}^2} = \frac{2400 \cdot 398.4^2}{143\,000^2} = 18.6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (2.19)$$

де:

$$U_{2н} = U_{2гм} \cdot \sqrt{3} = 230 \cdot \sqrt{3} = 398.4 \text{ В} \quad (2.20)$$

Тоді повний опір фази трансформатора складе:

$$Z_{тр} = \frac{U_{к\%} \cdot U_{2гм}}{100 \cdot I_2} = \frac{4.5 \cdot 230}{100 \cdot 500} = 20.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad (2.21)$$

а індуктивний опір фази трансформатора складе:

$$x_{тр} = \sqrt{Z_{тр}^2 - r_{тр}^2} = \sqrt{(20.7 \cdot 10^{-3})^2 - (18.6 \cdot 10^{-3})^2} = 9.1 \cdot 10^{-3} \quad (2.22)$$

Тоді індуктивність фази трансформатора складе:

$$L_{тр} = \frac{x_{тр}}{\omega_m} = \frac{x_{тр}}{2\pi \cdot f_{мережі}} = \frac{9.1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 28.92 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (2.23)$$

Визначимо індуктивність якоря двигуна по емпіричній формулі:

$$L_{\text{яд}} = K \frac{30 \cdot U_{\text{н}}}{\pi n_{\text{н}} p I_{\text{н}}} = 0.5 \cdot \frac{30 \cdot 220}{\pi \cdot 750 \cdot 2 \cdot 350} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.24)$$

де $p = 2$ — число пар полюсів двигуна.

Визначимо сумарну індуктивність якірного ланцюга двигуна:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{ср}} + 2L_{\text{тр}} + L_{\text{яд}} = 0.75 + 2 \cdot 0.02892 + 2 = 2.808 \text{ мГн} \quad (2.25)$$

Визначимо сумарний активний опір якірного ланцюга двигуна:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{яд}} + r_{\text{ср}} + a \cdot r_{\text{д}} + b \cdot r_{\text{тр}} + c \cdot r_{\text{ур}} + r_{\text{к}} \quad (2.26)$$

де:

$r_{\text{ср}}$ — активний опір реактора, що згладжує;

$r_{\text{д}}$ — динамічний опір тиристорів;

$r_{\text{ур}}$ — активний опір зрівняльного реактора;

$r_{\text{к}}$ — комутаційний опір;

$a = 2, b = 2, c = 1$ — коефіцієнти, що залежать від схеми випрямлення

напруги.

$$r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{тр}}}{m_{\text{тр}}} \approx r_{\text{ур}} = \frac{0.186 \cdot 10^{-3}}{3} = 0.062 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (2.27)$$

$$r_{\text{к}} = \frac{m \cdot x_{\text{тр}}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 9.1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 8.68 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (2.28)$$

$r_{\text{д}} = 0.45 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ — по паспортним даним.

Підставивши (2.15) — (2.17) у (2.14), одержимо:

$$R_{\Sigma} = (21.5 + 0.062 + 2 \cdot 0.45 + 2 \cdot 0.186 + 1 \cdot 0.62 + 8.68) \cdot 10^{-3} = 31.576 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (2.30)$$

Визначимо граничний кут відмикання тиристорів:

$$\alpha_{\text{max}} = \arccos \left(\frac{C_e' \cdot n_{\text{min}} + I_{\text{н}} \cdot R_{\text{яд}}}{U_{\text{d0}}} \right) \quad (2.31)$$

де C_e' — коефіцієнт пропорційності між швидкістю і ЕРС двигуна.

$$C_e' = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}}}{n_{\text{н}}} = \frac{220 - 350 \cdot 0.0215}{750} = 0.283 \frac{\text{В} \cdot \text{об}}{\text{хв}} \quad (2.32)$$

Тоді, підставивши (2.32) у (2.31), одержимо граничний кут відмикання тиристорів:

$$\alpha_{\max} = \arccos\left(\frac{0.283 \cdot 250 + 350 \cdot 0.0215}{537.4}\right) = \arccos(0.1457) = 81.62^\circ = 81^\circ 37' \quad (2.33)$$

Визначимо постійні часу отриманої системи.

Електромагнітна постійна якірного ланцюга двигуна:

$$T_e = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{2.808 \cdot 10^{-3}}{31.576 \cdot 10^{-3}} = 0.0889 \text{ с} \quad (2.34)$$

Електромагнітна постійна якоря двигуна:

$$T_j = \frac{L_{\text{яд}}}{R_{\text{яд}}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{21.5 \cdot 10^{-3}} = 0.093 \text{ с} \quad (2.35)$$

Електромеханічна постійна системи:

$$T_m = \frac{J_\Sigma \cdot R_\Sigma}{(C\Phi_n)^2} = \frac{20.625 \cdot 21.5 \cdot 10^{-3}}{(2.705)^2} = 0.0606 \text{ с} \quad (2.36)$$

де: $J_\Sigma = K_j \cdot J_{\text{дв}} = 2.5 \cdot 8.25 = 20.625 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.37)$

K_j — коефіцієнт динамічності системи електропривода, що показує в скільки разів система електропривода має більшу інерційність, чим двигун.

Результати обчислень зведемо в таблицю.

Таблиця 2.1 Динамічні параметри системи

Найменування	Позначення	Величина
Електромагнітна постійна часу системи	T_e	0.0899 с
Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна	T_j	0.093 с
Електромеханічна постійна часу системи	T_m	0.0606 с

Постійна часу тиристорного перетворювача	$T_{\text{тп}}$	0.007 с
Сумарний опір якірного ланцюга електродвигуна	R_{Σ}	0.031576 Ом
Сумарний момент інерції системи електропривода	J_{Σ}	20.625 кг·м ²
Коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача	$K_{\text{тп}}$	67.17
Максимальний кут відмикання тиристорів	α_{max}	81° 37'

2.4 Синтез системи автоматичного регулювання. Підбір і розрахунок автоматизуючих пристроїв.

Щоб система відповідала необхідним статичним та динамічним вимогам, її структура має забезпечувати ефективне керування потужністю різання. Оскільки стабілізація потужності є головною метою, система будується навколо відповідного контуру регулювання. Для досягнення позитивної динаміки роботи до структури також вводяться контури для контролю струму та швидкості.

Вибір регуляторів для кожного контуру здійснювався наступним чином. Для контуру швидкості, де не ставляться жорсткі вимоги до статичної помилки, достатньо застосувати пропорційний (П) регулятор. У той же час, контур струму обов'язково потребує пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора для забезпечення стабільності.

Для контуру потужності, де головна вимога — це стабілізація на заданому рівні з точністю до 5%, використовується пропорційно-інтегрально-

диференціальний (ПД) регулятор. У цьому випадку інтегральна та диференціальна складові є критично важливими для ефективної стабілізації параметра.

Отже, синтез системи приводить до створення трьохконтурної структури, де внутрішні контури (струм, швидкість) підпорядковані зовнішньому контуру (потужність різання).

2.5 Розрахунок контуру струму

Регулятор струму, як зображено на рис. 2.4, функціонує за пропорційно-інтегральним (ПІ) принципом. Його основне призначення для досягнення необхідної динаміки — це компенсація електромагнітної постійної часу системи (T_e), а також впливу малої постійної часу, властивої самому контуру струму (T_μ).

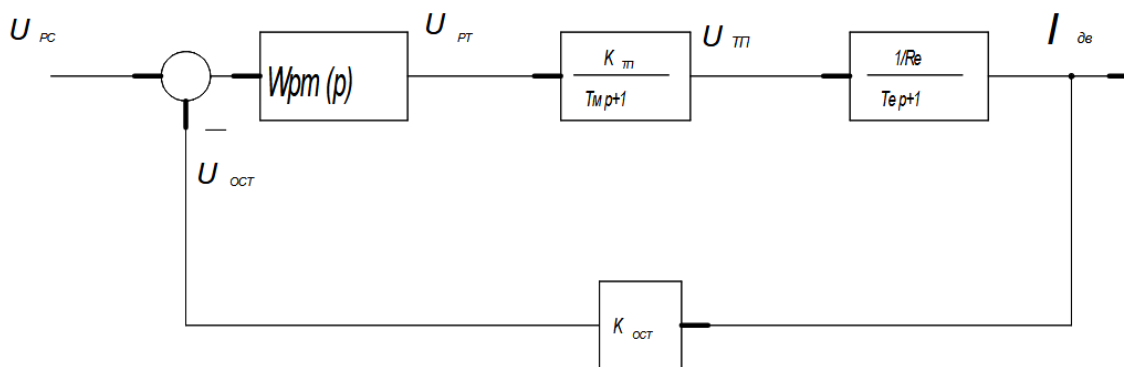


Рисунок. 2.4 – Структурна схема контуру струму

З урахуванням зазначених вимог, передаточна функція регулятора струму має вигляд:

$$W_{PT}^{MO}(p) = K_{PT} \frac{\tau_{PT} \cdot p + 1}{\tau_{PT} \cdot p} \quad (2.38)$$

де τ_{PT} — постійна часу токового контуру;

$$\tau_{PT} = \frac{K_{PT}}{T_\omega} \quad (2.39)$$

K_{PT} — пропорційна частина регулятора струму, визначається по формулі:

$$K_{PT} = \frac{T_e \cdot R_\Sigma}{K_{TP} \cdot K_{OT} \cdot T_{OT}} \quad (2.40)$$

де:

T_{OT} — мала постійна часу контуру струму;

$$T_{OT} = 2 \cdot T_e = 2 \cdot 0.007 = 0.01c \quad (2.41)$$

K_{OT} — коефіцієнт зворотного зв'язку по струму, визначається по формулі:

$$K_{OT} = K_{dT} \cdot K_{ш} = 60.95 \cdot 1.875 \cdot 10^{-4} = 1.143 \cdot 10^{-2} \quad (2.42)$$

де:

K_{dT} — коефіцієнт підсилення датчика струму;

$$K_{dT} = \frac{U_{\max}}{K_{UI} \cdot I_{\max}} = \frac{8}{1.5 \cdot 10^{-4} \cdot 2.5 \cdot 350} = 60.95 \quad (2.43)$$

$K_{ш}$ — коефіцієнт підсилення вимірювального шунта;

$$K_{ш} = \frac{U_{шц}}{I_{шц}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{400} = 1.1875 \cdot 10^{-4}$$

Підставивши (2.40) — (2.43) у (2.39), одержимо:

$$K_{PT} = \frac{T_e \cdot R_\Sigma}{K_{TP} \cdot K_{OT} \cdot T_{OT}} = \frac{0.0889 \cdot 0.031567}{67.17 \cdot 1.143 \cdot 10^{-2} \cdot 0.014} = 0.2612 \quad (2.44)$$

Підставивши (2.44) у (2.39), одержимо:

$$\tau_{PT} = \frac{K_{PT}}{T_E} = \frac{0.2612}{0.0889} = 2.9382 \quad (2.45)$$

На Рис.2.5. приведено схему реалізації регулятора струму. Рис. 2.6. відображає структурну схему регулятора струму. Згідно Рис. 2.5 і Рис. 2.6

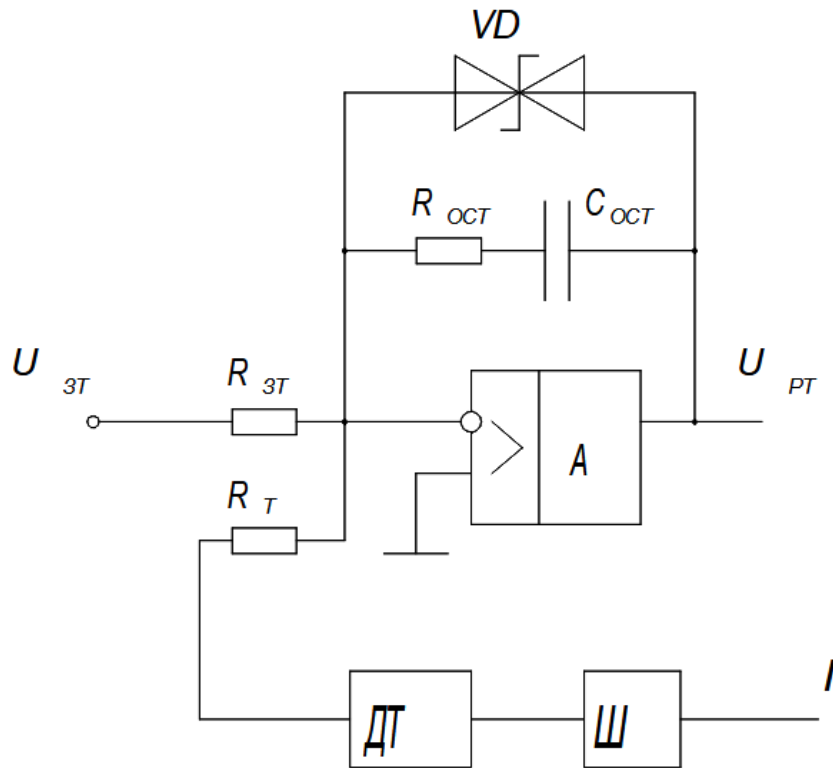


Рисунок. 2.5 – Схема реалізації струму

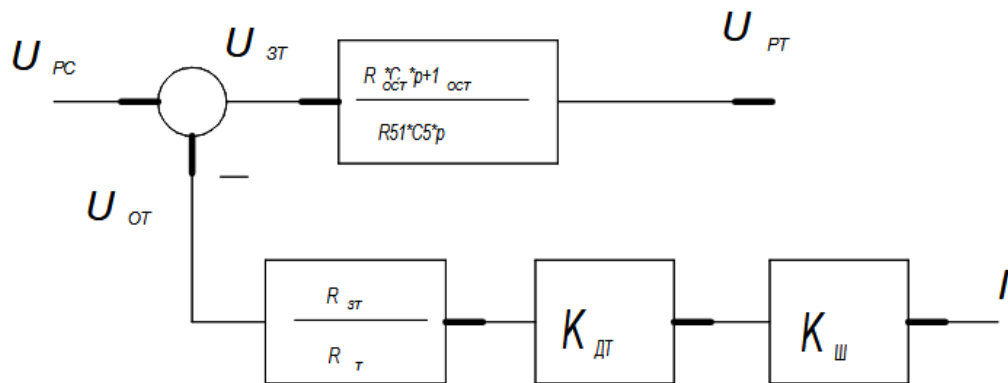


Рисунок. 2.6 – Структурна схема регулятора струму

Запишемо рівняння відповідності динамічних параметрів системи і фізичних параметрів схеми реалізації:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{от} = \frac{R_{зт}}{R_{т}} \cdot K_{дт} \cdot K_{ш} \\ T_e = R_{ост} \cdot C_{ост} \\ \frac{T_{э}}{K_{рт}} = R_{зт} \cdot C_{ост} \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Задамося ємністю конденсатора $C_{ост} = 1$ мкф. Тоді, згідно рівняння 2 системи, опір $R_{ост}$ складе:

$$R_{ост} = \frac{T_e}{C_{ост}} = \frac{0.0889}{1 \cdot 10^{-6}} = 88.9 \text{ кОм} \quad (2.47)$$

Підставивши значення $C_{ост} = 1$ мкф у рівняння 3 системи, знайдемо, що опір $R_{зт}$ складе:

$$R_{зт} = \frac{T_{э}}{K_{рт} \cdot C_{ост}} = \frac{0.0889}{0.2612 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 340 \text{ кОм} \quad (2.48)$$

Підставивши (2.47) у 1 рівняння системи, одержимо, що опір $R_{т}$ складе:

$$R_{т} = \frac{R_{зт} \cdot K_{дт} \cdot K_{ш}}{K_{от}} = \frac{340 \cdot 60.95 \cdot 1.875 \cdot 10^{-4}}{1.143 \cdot 10^{-2}} \approx 340 \text{ кОм} \quad (2.49)$$

2.6 Розрахунок контуру швидкості

Система керування швидкістю, зображена на рис. 2.7, побудована на базі пропорційного (П) регулятора, який налаштовується на модульний оптимум. Для того, щоб забезпечити необхідну якість перехідних процесів, параметри регулятора обираються таким чином, аби компенсувати вплив електромеханічної постійної часу системи T_m , так і малу постійну часу самого контуру швидкості $T_{ос}$.

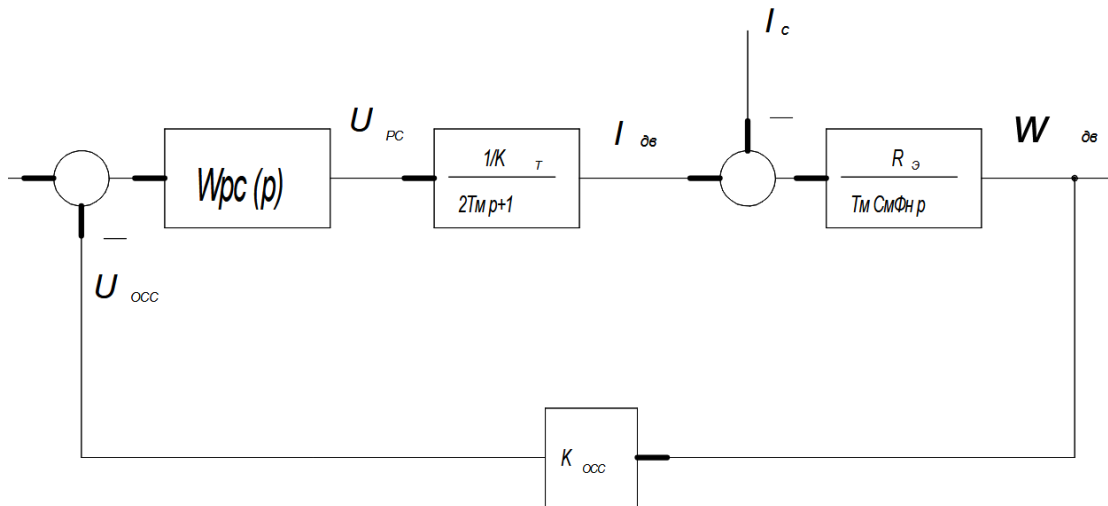


Рисунок. 2.7 – Структурна схема контура швидкості

Таким чином, передатна функція системи керування швидкістю матиме вигляд:

$$W_{PC}^{MO}(p) = K_{PC} = \frac{K_{от} \cdot T_M \cdot C_{Фн}}{R_{\Sigma} \cdot K_{ос} \cdot T_{ос}} \quad (2.50)$$

де $T_{ос}$ — мала постійна часу токового контуру;

$$T_{от} = 2 \cdot T_{от} = 4 \cdot T_e = 4 \cdot 0.007 = 0.028 \text{ с} \quad (2.51)$$

$K_{ос}$ — коефіцієнт зворотного впливу по швидкості, який визначається за формулою:

$$K_{ос} = \frac{U_{зсmax}}{\omega_{max}} = \frac{8}{78.54} = 0.10186 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (2.52)$$

Підставивши динамічні параметри систем, одержимо:

$$K_{PC} = \frac{K_{от} \cdot T_M \cdot C_{Фн}}{R_{\Sigma} \cdot K_{ос} \cdot T_{ос}} = \frac{1.143 \cdot 10^{-2} \cdot 0.0606 \cdot 2.705}{0.031567 \cdot 0.10186 \cdot 0.028} = 20.8 \quad (2.53)$$

На Рис.2.8. приведено схему реалізації регулятора швидкості. Рис. 2.9. відображає структурну схему регулятора швидкості. Згідно Рис. 2.8 і Рис. 2.9

де $K_{дс}$ - коефіцієнт датчика швидкості, обумовлений відношенням:

$$K_{дс} = \frac{U_{уmax}}{\omega_n} = \frac{8}{78.54} = 0.10186 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (2.55)$$

Задамося опором $R_{осс} = 100 \text{ Ом}$. Тоді, згідно рівняння 2 системи, опір $R_{зс}$ складе:

$$R_{зс} = \frac{R_{осс}}{K_{рс}} = \frac{100}{20.8} = 4.8 \text{ кОм}$$

Підставивши значення $R_{зс} = 4.8 \text{ кОм}$ в рівняння 1 системи, знайдемо, що опір R_c складе:

$$R_c = \frac{R_{зс} \cdot K_{дс}}{K_{ос}} = \frac{4.8 \cdot 0.10186}{0.10186} = 4.8 \text{ кОм} \quad (2.56)$$

2.7 Розрахунок контуру потужності і процесу різання

Вибір діапазону регулювання для контуру потужності (рис. 2.10) є обґрунтованим, оскільки початковий розрахунок потужності приводного двигуна базувався на теоретично найважчому режимі роботи. Цей режим передбачав обробку важкооброблюваного, але поширеного матеріалу, з використанням різців зі швидкорізальної сталі при максимальних значеннях діаметра заготовки та подачі.

Зважаючи на це, проектування контуру здійснюється з метою стабілізації потужності різання на рівні, що відповідає $90 \pm 5\%$ від номінальної потужності двигуна. Цей показник є еквівалентним $93 \pm 4\%$ від розрахункової потужності різання, що забезпечує роботу в оптимальній та безпечній зоні.

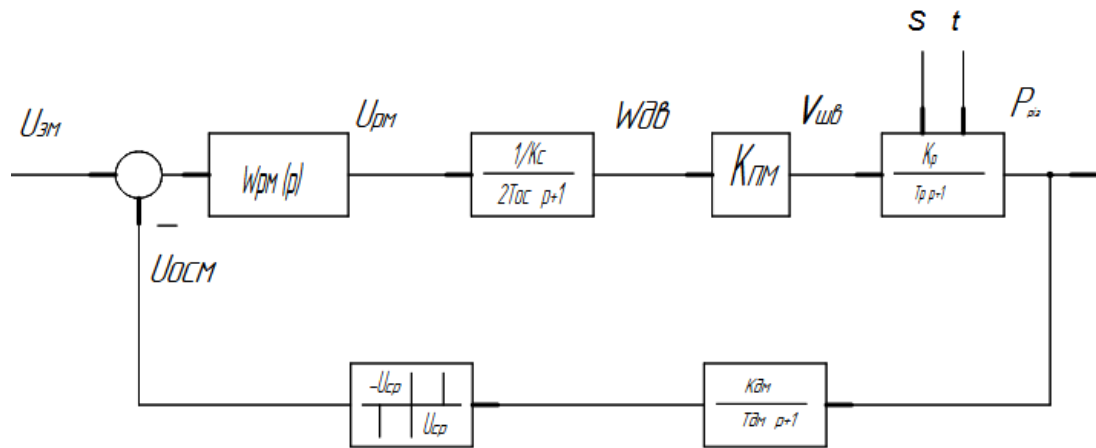


Рисунок. 2.10 – Структурна схема контура потужності

У даному конкретному випадку потужність різання визначається наступним виразом:

$$P_{\text{різ}} = 7870.66975 \cdot V \text{ кВт} \quad (2.57)$$

де: V — швидкість різання.

Необхідна в даному випадку швидкість різання складає 8.66 м/хв. Розрахуємо коефіцієнт передачі передавального механізму (коробки швидкостей):

$$K_{\text{ПМ}} = \frac{V}{\omega_n} = \frac{8.66}{78.54} = 0.11026 \text{ м} \cdot \text{с} / \text{хв} \quad (2.58)$$

Постійна процесу різання визначається в такий спосіб:

$$T_p = \frac{60}{n_{\text{ш}}} \quad (2.59)$$

де:

$n_{\text{ш}}$ — швидкість обертання шпинделя, що визначається по формулі:

$$n_{\text{ш}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{дет}}} = \frac{1000 \cdot 8.66}{\pi \cdot 1000} = 2.757 \text{ об} / \text{хв} \quad (2.60)$$

де:

$D_{\text{дет}}$ — діаметр встановлюваної в центрах заготівлі.

Підставивши (2.53) у (2.52), одержимо:

$$T_p = \frac{60}{2.757} = 21.766 \text{ с} \quad (2.61)$$

Для одночасного досягнення стабільності потужності та уникнення затягування перехідних процесів, зворотний зв'язок у контурі потужності повинен спрацьовувати лише при перевищенні заданого максимального рівня. Реалізація цього принципу досягається за допомогою зони нечутливості.

Оскільки для уніфікованої блокової системи регуляторів (УБСР) максимальна робоча напруга становить 8 В, то і сигнал уставки, що обмежує потужність, буде дорівнювати цій величині ($U_{cp} = 8 \text{ В}$).

Це дозволяє розрахувати коефіцієнт датчика потужності, виходячи з наступного міркування: напруга на виході датчика потужності повинна дорівнювати напрузі порівняння саме тоді, коли потужність досягає межі стабілізації.

$$K_{dm} = \frac{U_{cp}}{P_{ст}} = \frac{8}{60000} = 1.333 \cdot 10^{-4} \text{ В / Вт} \quad (2.62)$$

де: $P_{ст}$ — рівень стабілізації потужності.

Проектування регулятора потужності вимагає визначення максимального значення сигналу уставки, який подається на його вхід для підтримання заданого рівня стабілізації. Розрахунок цього сигналу базується на умові, згідно з якою сигнал уставки досягає свого максимуму, коли потужність дорівнює цільовому рівню стабілізації, і спадає до нуля, коли потужність сягає свого граничного (максимального) значення.

На основі цього, необхідне значення напруги завдання обчислюється за формулою:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{зм}} &= (P_{\text{max}} + P_{\text{ст}}) \cdot K_{\text{дм}} = (68160 - 60000) \cdot 1.33 \cdot 10^{-4} = \\
 &= 1.088 \text{ В}
 \end{aligned}
 \tag{2.63}$$

Налаштування контуру потужності виконується за критерієм симетричного оптимуму. Варто враховувати, що датчик потужності, як комбінований пристрій, що використовує сигнали з датчиків струму та швидкості, не є безінерційним. Для типових реалізацій його постійна часу зазвичай становить від 0.003 до 0.006 секунди. Однак у нашому випадку для реалізації датчика потужності застосовано мікросхемну елементну базу, що забезпечує значно вищу швидкодію $T_{\text{дм}} = 0.004$ с.

Тоді, згідно Рис.2.10. для компенсації всіх постійних необхідна наступна передатна функція регулятора потужності:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{рм}}^{\text{со}}(p) &= \frac{(T_p p + 1) \cdot (T_{\text{дм}} p + 1) \cdot K_{\text{ос}}}{K_p \cdot K_{\text{дм}} \cdot K_{\text{пм}} \cdot 2 \cdot T_{\text{ор}}} = \frac{T_p \cdot T_{\text{дм}} \cdot K_{\text{ос}}}{K_p \cdot K_{\text{дм}} \cdot K_{\text{пм}} \cdot 2 \cdot T_{\text{ор}}} p + \\
 &+ \frac{(T_p + T_{\text{дм}}) \cdot K_{\text{ос}}}{K_p \cdot K_{\text{дм}} \cdot K_{\text{пм}} \cdot 2 \cdot T_{\text{ор}}} + \frac{K_{\text{ос}}}{K_p \cdot K_{\text{дм}} \cdot K_{\text{пм}} \cdot 2 \cdot T_{\text{ор}}} \cdot p
 \end{aligned}
 \tag{2.64}$$

Підставивши значення постійних часу і коефіцієнтів передачі, одержимо:

- пропорційна частина регулятора потужності $K_{\text{рм}}^{\text{п}} = 7.3529$;
- інтегральна частина регулятора потужності $K_{\text{рм}}^{\text{и}} = 0.0338$;
- диференціальна частина регулятора потужності $K_{\text{рм}}^{\text{д}} = 0.0029$.

Для забезпечення необхідної якості регулювання потужності в статичних та динамічних режимах, доцільно спростити структуру регулятора до пропорційно-інтегрального (ПІ) типу. Таке рішення обґрунтоване тим, що, як показали розрахунки, пропорційна складова має домінуючий вплив, тоді як внесок інтегральної та диференціальної частин є незначним і ним можна знехтувати

На Рис.2.11 приведено схему реалізації регулятора потужності. Рис. 2.12 відображає структурну схему регулятора потужності. Згідно Рис. 2.11 і Рис. 2.12.

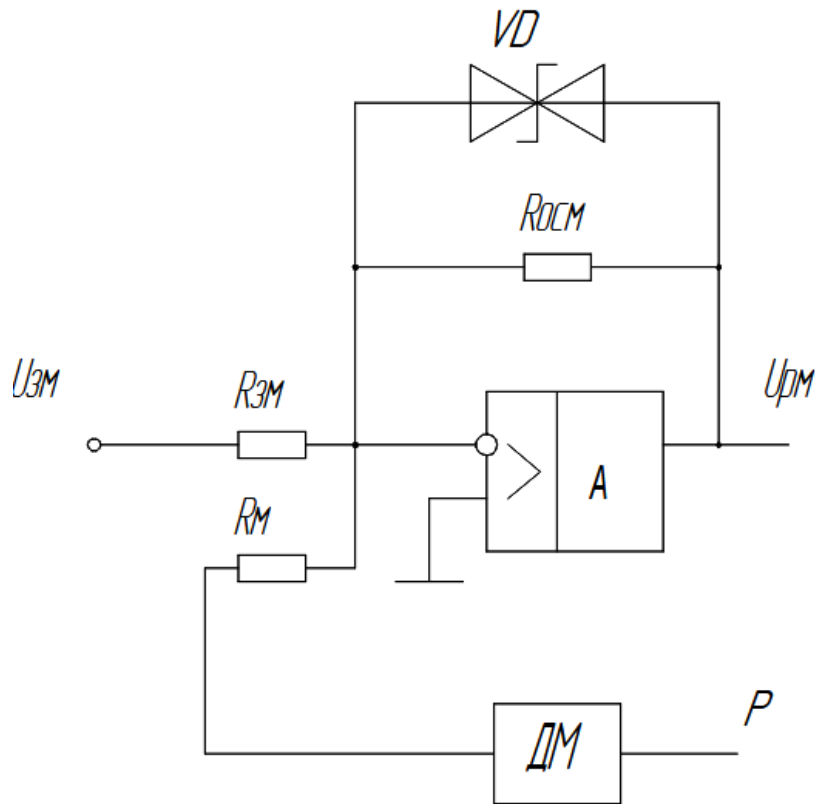


Рисунок. 2.11 – Схема реалізації регулятора потужності

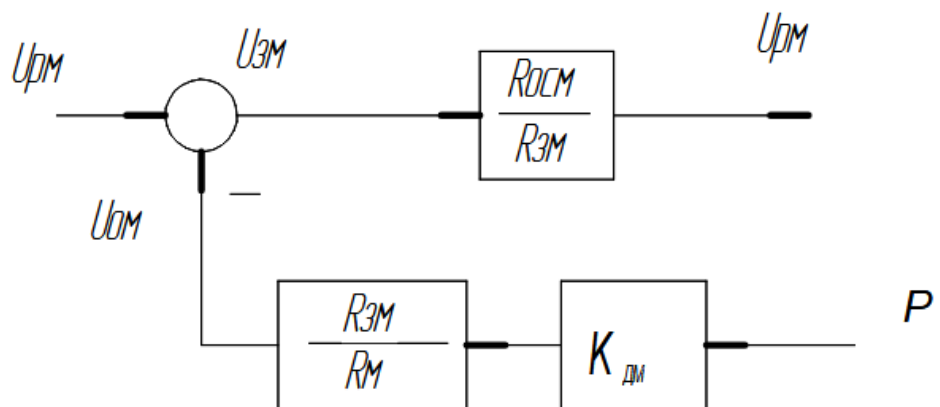


Рисунок. 2.12 – Структурна схема регулятора потужності

Запишемо рівняння відповідності динамічних параметрів системи і фізичних параметрів схеми реалізації:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{ом}} = \frac{R_{\text{зм}}}{R_{\text{м}}} \cdot K_{\text{дм}} \\ K_{\text{рм}} = \frac{R_{\text{осм}}}{R_{\text{зм}}} \end{array} \right. \quad (2.65)$$

де $K_{\text{дм}}$ — коефіцієнт датчика швидкості.

Задамося опором $R_{\text{осм}} = 100$ кОм. Тоді, згідно рівняння 2 системи (2.65), опір $R_{\text{зм}}$ складе:

$$R_{\text{зм}} = \frac{R_{\text{осм}}}{K_{\text{рм}}} = \frac{100}{7.35924} = 13.6 \text{ кОм} \quad (2.66)$$

де:

$K_{\text{рм}}$ — пропорційна частина регулятора потужності.

Підставивши значення $R_{\text{зм}} = 4.8$ кОм в рівняння 1 системи (2.65), знайдемо, що опір $R_{\text{м}}$ складе:

$$R_{\text{м}} = \frac{R_{\text{зм}} \cdot K_{\text{дм}}}{K_{\text{ом}}} = \frac{13.6 \cdot 1.33 \cdot 10^{-4}}{1.596 \cdot 10^{-5}} = 113.6 \text{ кОм} \quad (2.67)$$

де:

$K_{\text{ом}}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку по потужності, що розраховується з умови відповідності максимального завдання на потужність максимальної потужності, тобто:

$$K_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{зм max}}}{P_{\text{max}}} = \frac{1.088}{68160} = 1.596 \cdot 10^{-5} \quad (2.68)$$

2.8 Розрахунок статичної характеристики системи

Структурна схема проектованої системи електропривода в статистиці для розрахунку статичної характеристики приведена на Рис. 2.13.

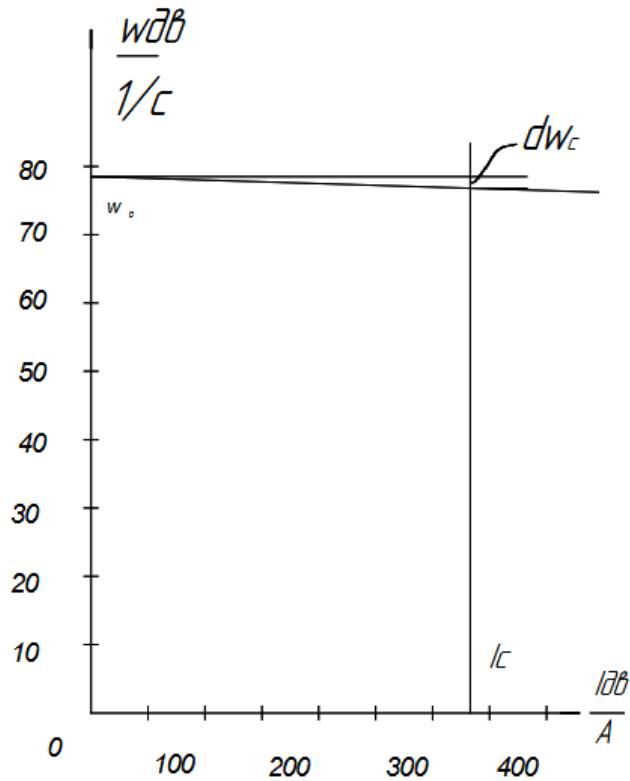


Рисунок. 2.13 – Статична характеристика системи

Запишемо рівняння швидкості руху електропривода в статистиці:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{K_{PC} \cdot \frac{1}{K_{Om}} \cdot \infty}{1 + \frac{K_{PC} \cdot K_{Oc} \cdot \infty}{K_{Om}}} \cdot U_{zc} - \frac{\infty}{1 + \frac{K_{PC} \cdot K_{Oc} \cdot \infty}{K_{Om}}} \cdot I_c = \\ &= \frac{1}{K_{Oc}} \cdot U_{zc} - \frac{K_{Om}}{K_{PC} \cdot K_{Oc}} \cdot I_c = \omega_0 - \Delta\omega_c \end{aligned} \quad (2.69)$$

де:

ω — швидкість обертання двигуна;

ω_0 — швидкість холостого ходу двигуна:

$$\omega_0 = \frac{U_{zc}}{K_{Oc}} = \frac{8}{0.10186} = 78.54 \text{ 1/c} \quad (2.70)$$

де:

K_{oc} — статичне падіння швидкості при статичному струмі:

$$\Delta\omega_c = \frac{K_{от} \cdot I_c}{K_{pc} \cdot K_{oc}} = \frac{1.143 \cdot 10^{-2} \cdot 333}{20.8 \cdot 0.10186} = 1.7 \text{ 1/c} \quad (2.80)$$

Вираз (2.69) розкрито за допомогою правила Лапіталя для знаходження невизначеностей типу $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$.

Висновок до розділу

У даному розділі було проведено синтез системи автоматичного регулювання потужності різання. На основі поставлених вимог до статичних та динамічних характеристик системи було обґрунтовано вибір триконтурної структури.

Система складається із зовнішнього контуру стабілізації потужності та підпорядкованих йому внутрішніх контурів регулювання струму і швидкості двигуна. Для вирішення поставлених завдань було здійснено підбір та обґрунтування типів регуляторів для кожного контуру:

Для контуру потужності, з метою забезпечення стабілізації на заданому рівні з точністю до 5%, обрано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор.

Для контуру струму, відповідно до стандартних вимог, застосовано пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор.

Для контуру швидкості, враховуючи відсутність високих вимог до статичної точності, було обрано пропорційний (П) регулятор.

Таким чином, у розділі розроблено та обґрунтовано повну структуру системи автоматичного регулювання, що забезпечує ефективну стабілізацію

потужності різання та є основою для подальшого моделювання та аналізу її динамічних характеристик.

3 РОЗДІЛ

ДАТЧИК ПОТУЖНОСТІ. СТРУКТУРА МОДЕЛІ МАТЛАВ

Ключовим завданням при розробці цієї системи електропривода є отримання сигналу, що адекватно відображає потужність різання. Враховуючи, що прямий замір цього параметра в реальних умовах є технічно складним і непрактичним, для його визначення вдаються до опосередкованих методів.

Найбільш поширеним підходом є аналіз електричних показників двигуна, таких як струм, швидкість обертання чи ЕРС, які мають пропорційну залежність від потужності.

У рамках даного проекту було обрано метод, що базується на використанні сигналів, пропорційних **струму та швидкості приводного двигуна**. Кінцевий сигнал, пропорційний потужності різання, формується шляхом перемноження цих двох величин.

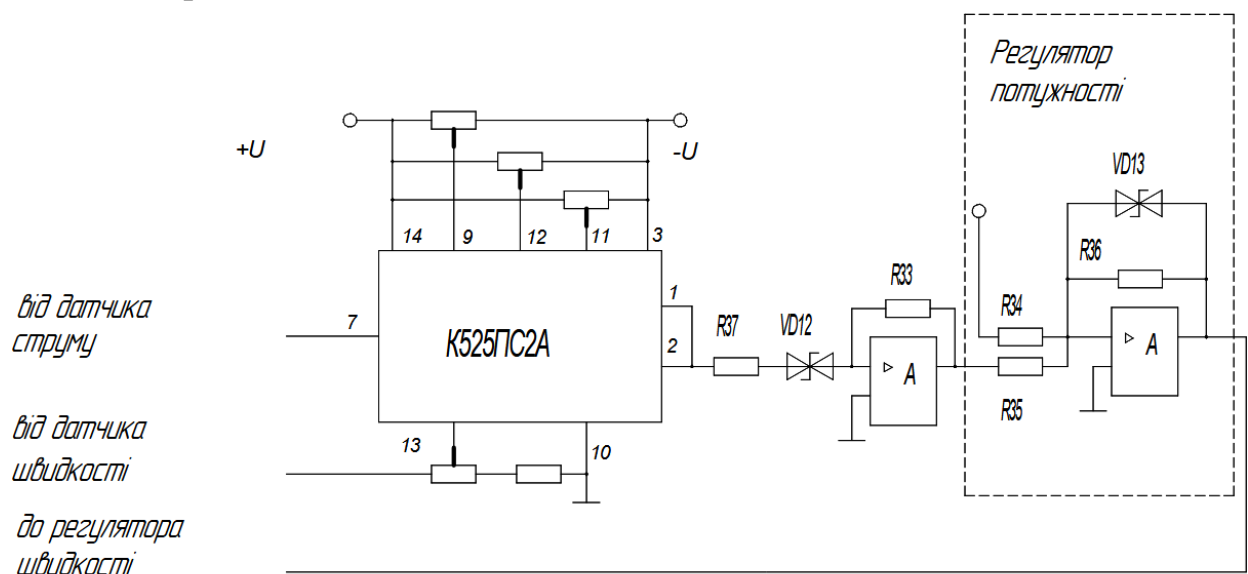


Рисунок. 3.1 – Функціональна схема датчика потужності

Функціональна схема спроектованого датчика потужності наведена на Рис. 3.1.

Датчик потужності включає в себе інтегральну мікросхему (ІМС) К525ПС2А, яка є чотирьополюсним аналоговим перемножувачем сигналів. Її технічні характеристики включають:

Споживаний струм — не більше 6 мА.

Погрішність перемножування — не більше $\pm 1\%$.

Нелінійність перемножування:

За входом Х — не більше $\pm 0.8\%$.

За входом Y — не більше $\pm 0.5\%$.

Залишкова напруга:

За входом Х — не більше 80 мВ.

За входом Y — не більше 60 мВ.

Вхідний струм:

За входом Х — не більше 4 мкА.

За входом Y — не більше 6 мкА.

Смуга перетворення по входах — не менше 0.7 МГц.

Вихідна напруга — не більше 10.5 В.

Розрахунок параметрів стабілітрона, який встановлюється на вході операційного підсилювача, ґрунтується на ключовій умові: його напруга стабілізації має бути еквівалентною тому рівню потужності різання, який є цільовим для системи. Цьому рівню будуть відповідати такі параметри: статичний струм двигуна $I_c = 333$ А та швидкість обертання двигуна $\omega_n = 78.54$ 1/с

Оскільки датчик струму розрахований на пусковий струм, в номінальному режимі його вихідна напруга складе:

$$U_{\text{дт}} = K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ш}} \cdot I_c = 60.95 \cdot 1.875 \cdot 10^{-4} \cdot 333 = 3.8\text{В} \quad (3.1)$$

Сигнал з тахогенератора складе:

$$U_{\text{дс}} = K_{\text{дс}} \cdot \omega_H = 0.10186 \cdot 78.54 = 8\text{ В} \quad (3.2)$$

Тоді сигнал на виході ІМС складе:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{дт}} \cdot U_{\text{дс}}}{10} = \frac{3.8 \cdot 8}{10} = 3.04 \approx 3\text{ В} \quad (3.3)$$

Таким чином, напруга стабілізації вхідного стабілітрона повинна складати 3 В, що забезпечить правильну роботу зворотного зв'язку по потужності.

Зворотний зв'язок включається через 1.5 с після включення двигуна, що забезпечують контакти реле часу. Це необхідно для того, щоб при пуску зворотний зв'язок по потужності не спрацьовував.

3.1 Аналіз роботи системи автоматичного регулювання з використанням пакета MATLAB

За структурною схемою системи, приведеної на Рис. 3.2., складемо математичну модель проектованої системи для подальшого моделювання, що приведена на Рис. 3.3.

Структурна схема системи автоматичного регулювання потужності різання головного привода вальцетокарного калібрувального станка моделі 1К824 для набору в Matlab

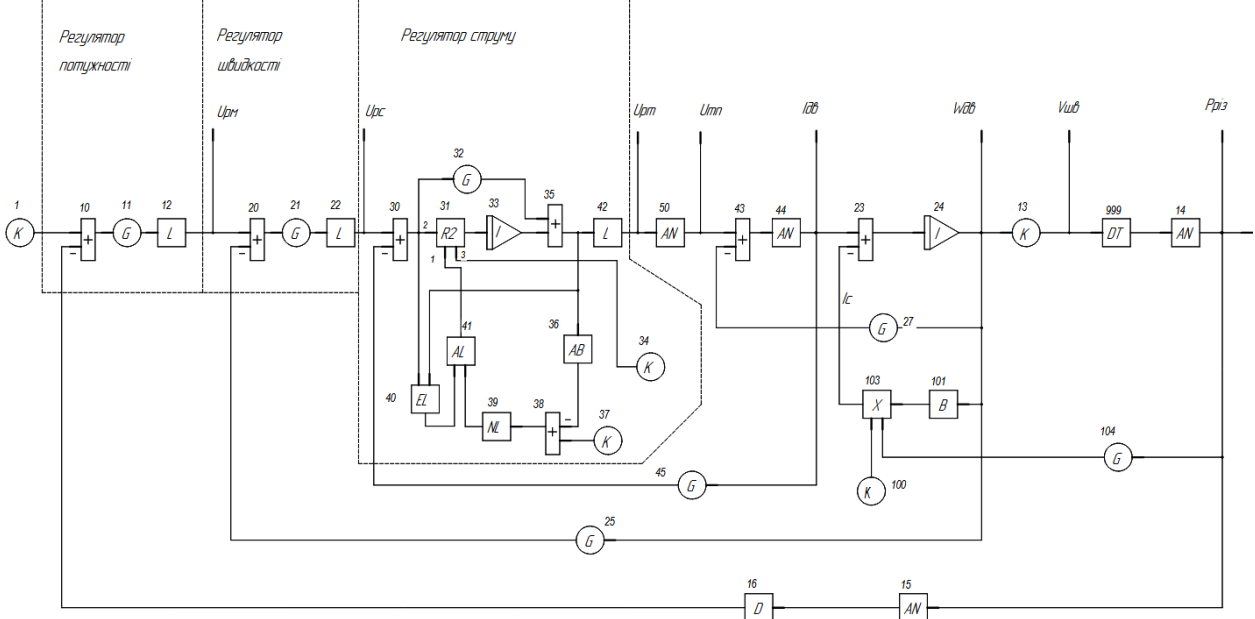


Рисунок. 3.2– Схема набору ЕП для моделювання в MATLAB

Математична модель системи автоматичного регулювання потужності головного привода вальцетокарного калібрувального станка моделі 1К824

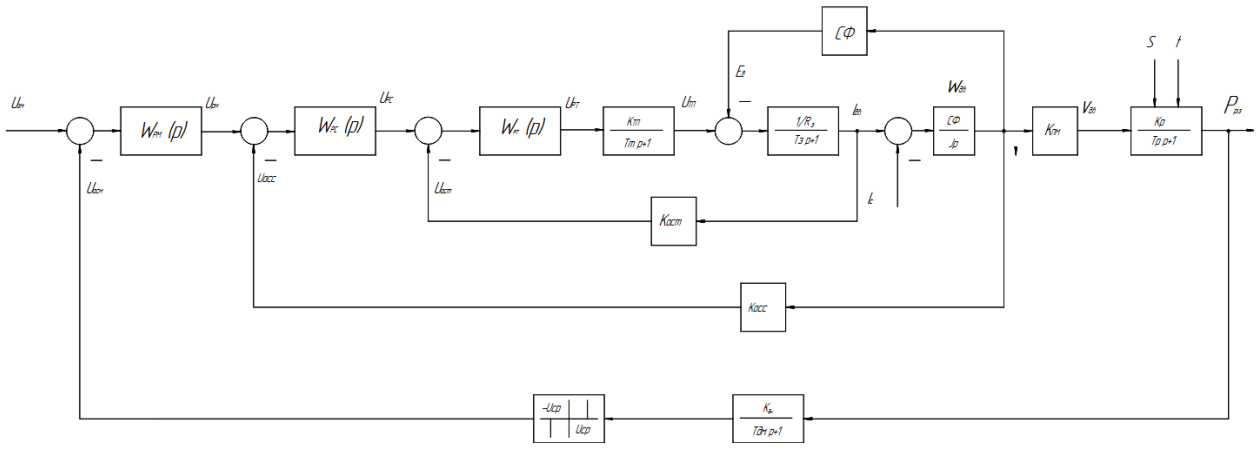


Рисунок. 3.3 – Математична модель системи автоматичного регулювання

Згідно Рис. 3.2. Таблиця 3.1 Моделювання процесів на MATLAB.

1	K				1.0879E+00	
10	+	1	-16		0	
11	G	10	0	0	7.3529E+00	
12	L	11			8.0000E+00	-8.0000E+00
13	G	24	0	0	1.1026E-01	
15	AN	14			1.3333E-04	3.9999E-03
16	D	15			8.0000E+00	-8.0000E+00
20	+	12	-25		0	
21	G	20	0	0	2.0799E+01	
22	L	21			8.0000E+00	-8.0000E+00
23	+	44	-			
			103	0		
24	I	0	23	0	0.0000E+00	
					1.9263E-01	
					0.0000E+00	
25	G	24	0	0	1.0185E-01	
27	G	24	0	0	2.7050E+00	
30	+	22	-45		0	
31	R2	41	30	34		
32	G	30	0	0	2.6119E-01	
33	I	0	31	0	0.0000E+00	2.9382E+000.0000E+00
34	K				0.0000E+00	
35	+	32	33		0	
36	AB	35				
37	K				8.0000E+00	
38	+	37	-36		0	
39	NL	38				

40	EL	30	33			
41	AL	39	40			
42	L	35			8.0000E+00	-8.0000E+00
43	+	50	-27		0	
44	AN	43			3.1669E+01	8.8899E-02
45	G	44	0	0	1.1430E-02	
50	AN	42			6.7170E+01	6.9999E-03
100	K					1.0000E+00
101	B	24				
103	X	100	101	104		
104	G	14	0	0	5.1152E-03	
999	DT	13			1.5000E+00	
14	AN	999			7.8700E+03	2.1766E+01

Структура моделі:

- регулятор струму - блоки 30 - 42;
- зворотний зв'язок по струму - блок 45;
- навантаження (статичний струм) - блоки 100 - 104;
- регулятор швидкості - блоки 20 - 22;
- зворотний зв'язок по швидкості - блок 25;
- регулятор потужності - блоки 10 - 12;
- зворотний зв'язок по потужності - блоки 15 - 16;
- тиристорний перетворювач - блок 50;
- двигун:
 - струмова частина - блоки 43 - 44;
 - швидкісна частина - блоки 23 - 24;
 - внутрішній зворотний зв'язок двигуна (СФ) - блок 27;
 - передавальний механізм - блок 13;
 - процес різання - блоки 999,14.

Виходи блоків:

- швидкість обертання двигуна - вихід блоку 24;
- струм двигуна - вихід блоку 44;
- потужність різання - вихід блоку 14.

У результаті моделювання були отримані результати, приведені на Рис. 3.4. - Рис. 3.10., що приведені нижче.

На малюнках приведено:

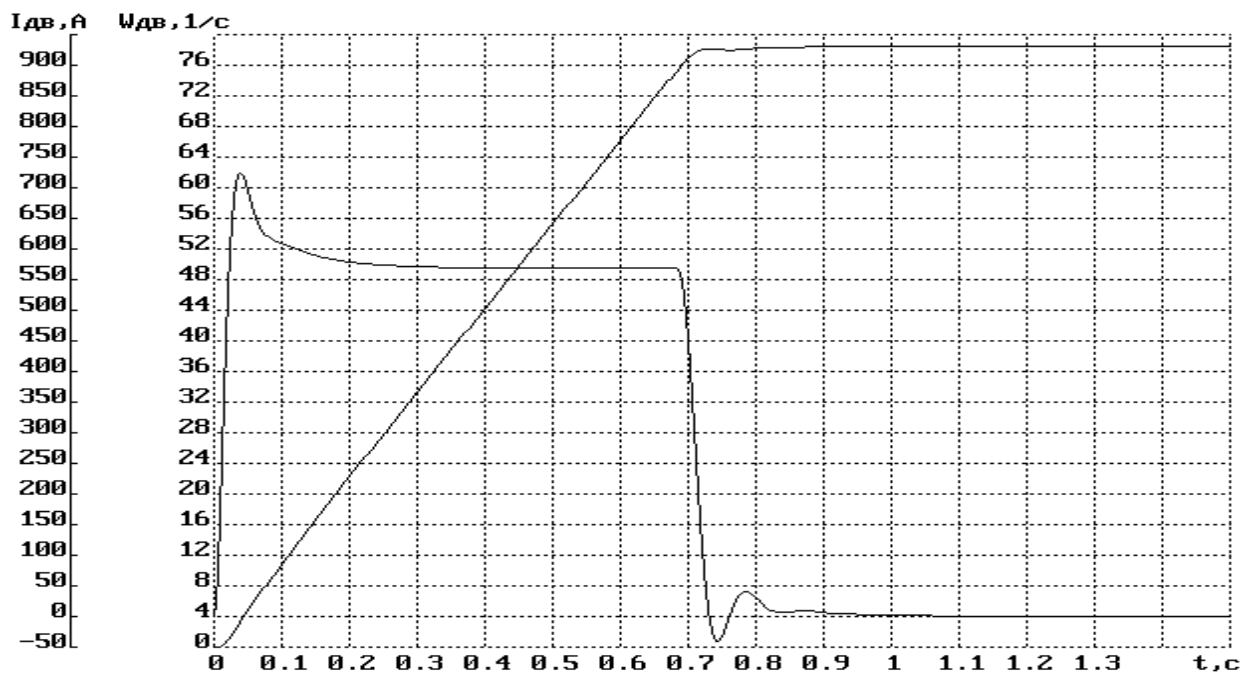


Рисунок. 3.4. - Пуск двигуна

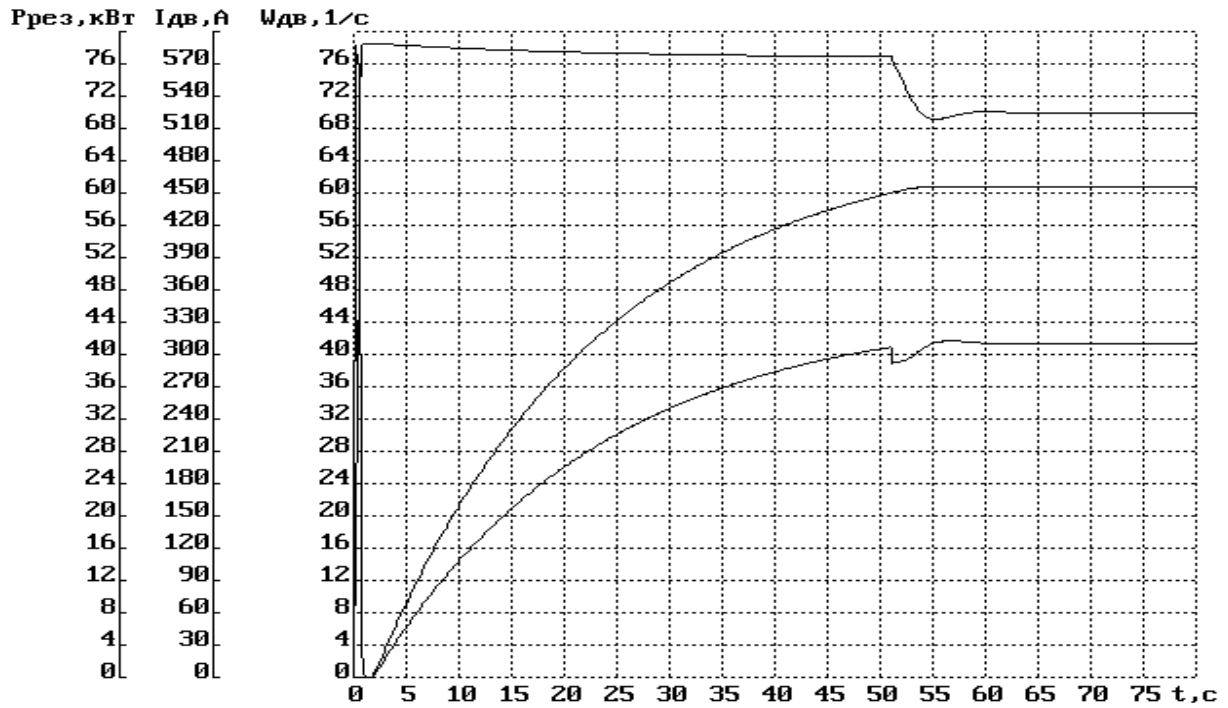


Рисунок. 3.5. - Стабілізація розрахункового варіанта потужності

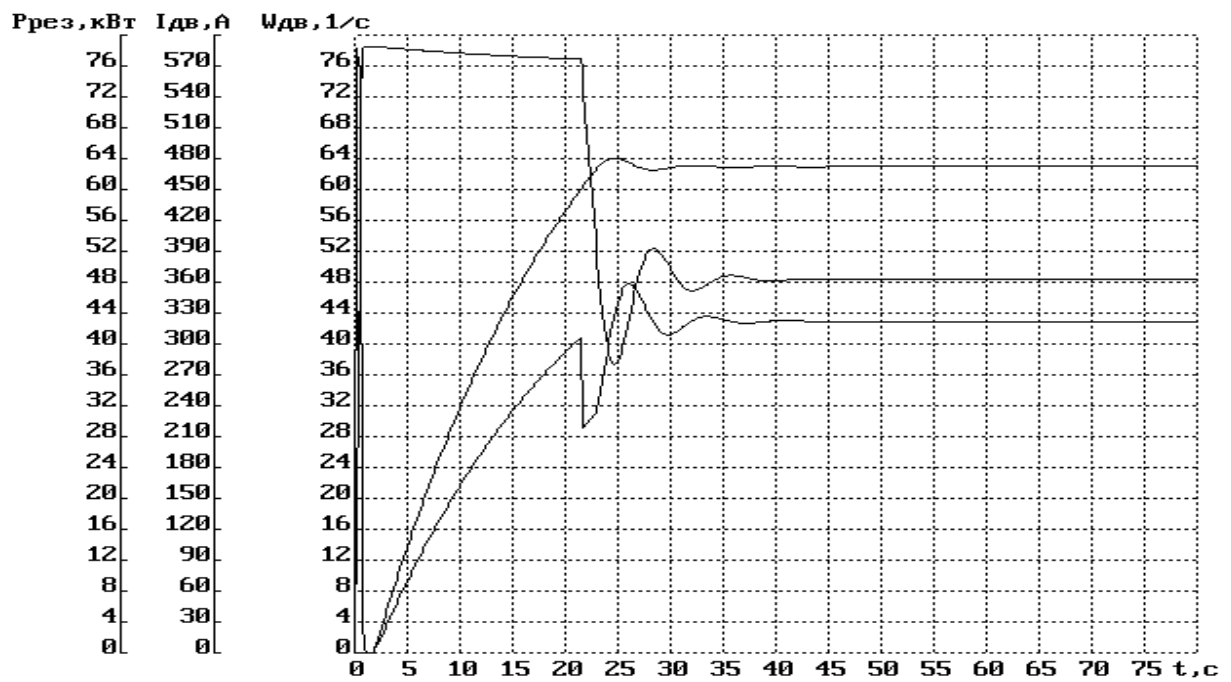


Рисунок. 3.6. - Робота системи при збільшенні коефіцієнта різання на 50%

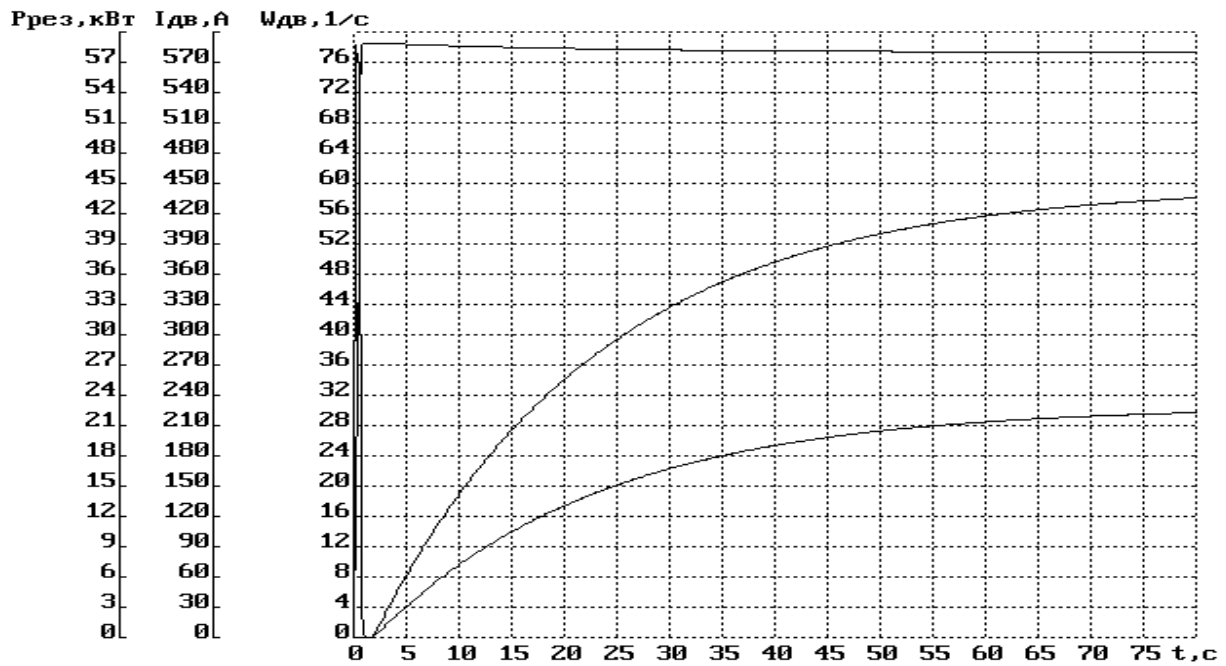


Рисунок. 3.7. - Робота системи при зменшенні коефіцієнта різання на 50%

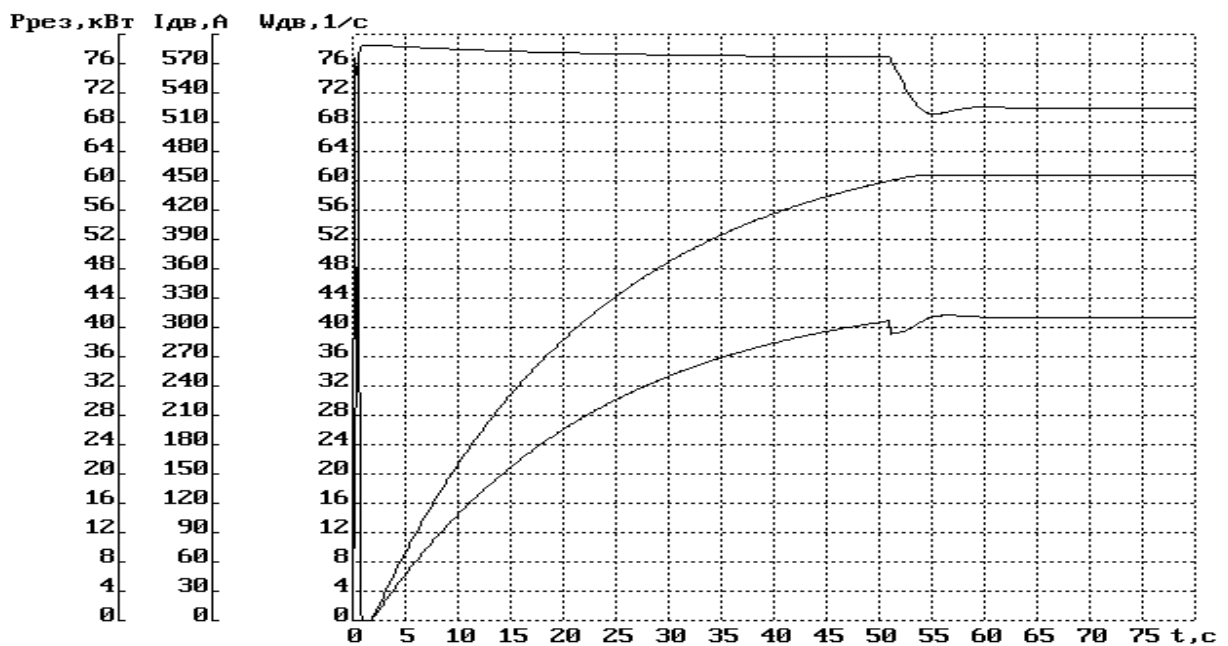


Рисунок. 3.8. - Робота системи при зменшенні механічної постійної часу на 10%

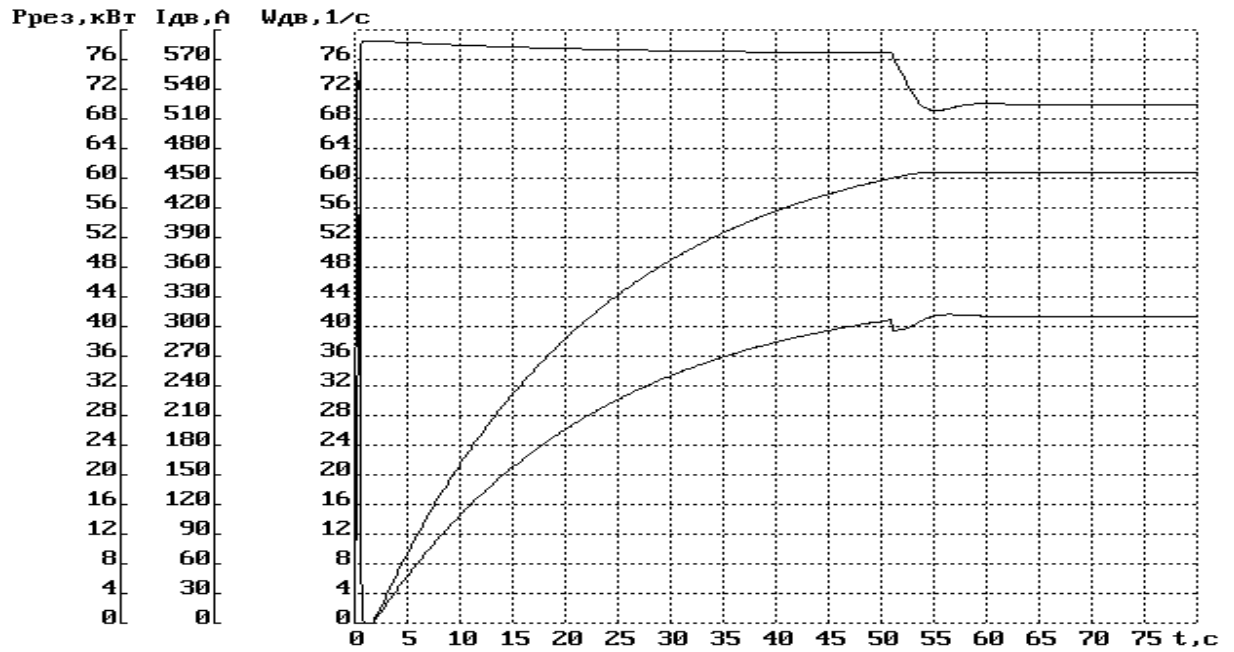


Рисунок. 3.9. - Робота системи при зменшенні механічної постійної часу на 20%

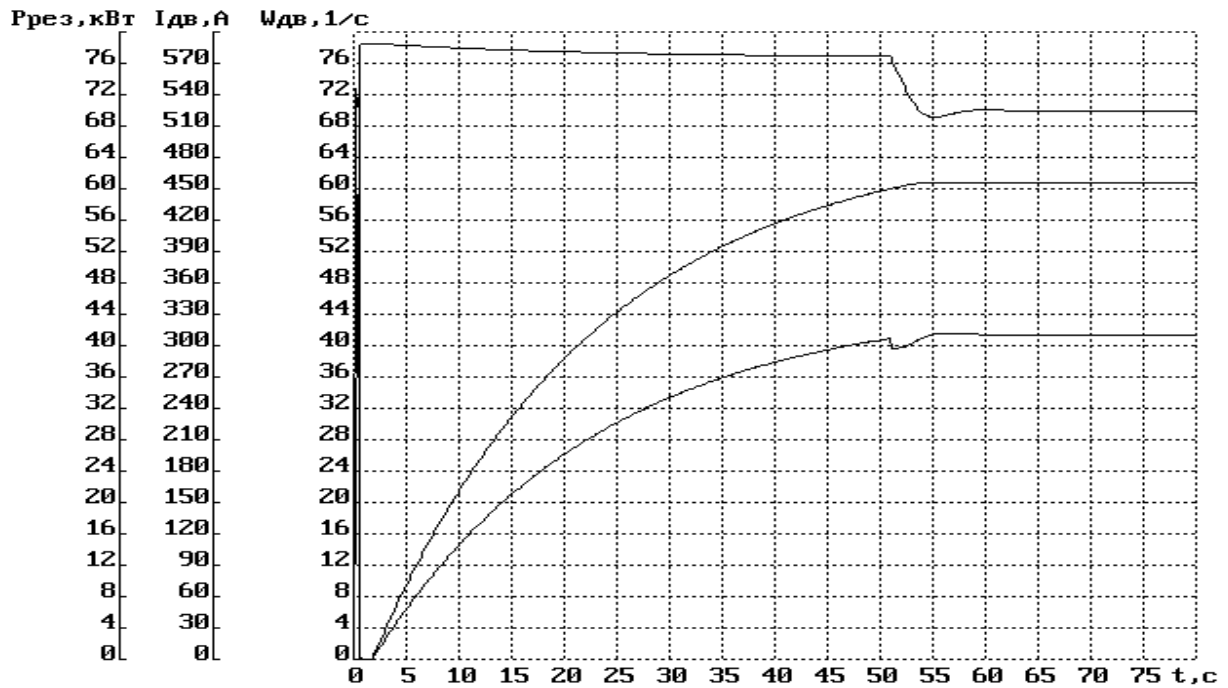


Рисунок. 3.10. - Робота системи при зменшенні механічної постійної часу на 30%.

Висновок до розділу

Таким чином, із приведених графіків перехідних процесів можна зробити висновок, що зміна механічної постійної часу, що може трапитися в результаті зменшення маси оброблюваної деталі і її геометричних розмірів, не робить істотного впливу на стабілізацію потужності, у той час, як зміна механічних властивостей оброблюваної деталі або інструмента, що ріже, зміна чистоти поверхні деталі і так далі істотно впливають на потужність різання. При цьому змінюється характер перехідного процесу наростання потужності різання. З аперіодичного (рис.3.5) він перетворюється в коливальний (рис. 3.6)

4 РОЗДІЛ. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ

Розрахунки надійності автоматизованих систем керування є одними з найскладніших етапів проектування. Вони передбачають виконання кількох підготовчих кроків:

Аналіз принципу роботи та фізичних процесів елементної бази, що застосовується в автоматичних системах керування. Цей етап охоплює дослідження фізичних явищ, які відбуваються в елементах, використовуваних у системах. Вивчення цих аспектів є частиною курсів промислової електроніки, електричних машин та елементів систем автоматичного керування.

Розрахунок і вибір основного обладнання для системи, а також оптимізація складу систем автоматичного керування. На цьому етапі здійснюється вибір компонентів, що відповідають вимогам надійності і функціональності. Ці питання вивчаються в курсах автоматизованого електропривода та систем автоматичного керування.

Визначення параметрів і характеристик елементів системи керування, а також аналіз меж можливих змін цих параметрів і їхнього впливу на ефективність роботи всієї системи. Це досліджується в рамках курсів автоматизованого електропривода, систем автоматичного керування та спеціальних дисциплін, що займаються теоретичними основами підготовки фахівців з автоматизації.

Лише після того, як буде повністю зрозуміли фізичні процеси, властивості елементної бази та їх вплив на систему автоматичного керування, можна приступати до **розрахунку надійності**. Цей розрахунок завершує етап проектування і визначає, як ефективно система буде працювати в умовах реальних навантажень та змін зовнішніх умов.

4.1 Розрахункові дані

Необхідно визначити час на відмову трифазної нульової схеми випрямляча, що живить обмотку збудження двигуна постійного струму. Напруга змінного струму мережі $380/220$ В, постійна напруга мережі $U_{дН} = 24$ В, а також номінальний струм обмотки збудження $I_{дН} = 400$ А. Умови експлуатації — для внутрішньоцехового використання; вважається, що відмови відбуваються за найпростішою схемою.

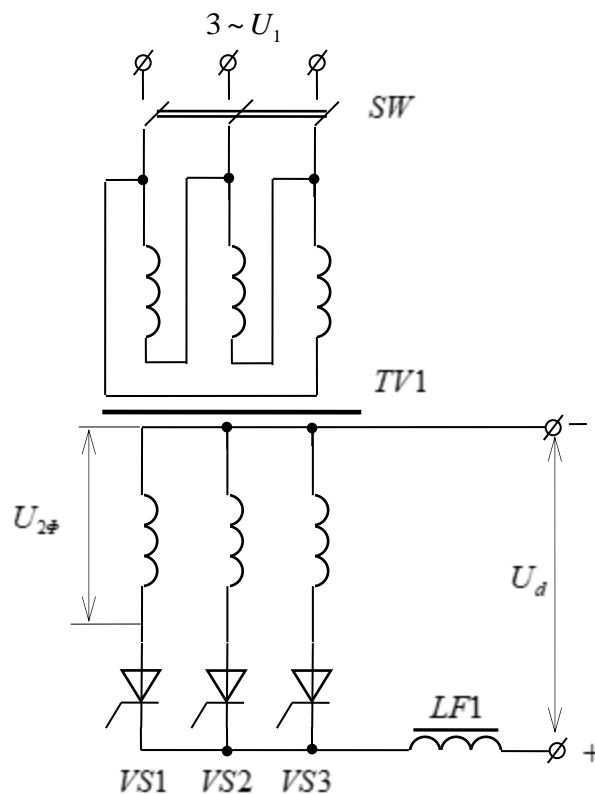


Рис. 4.1. Схема тиристорного випрямляча.

4.2 Основні технічні вимоги

ТП призначений для регулювання напруги на якорі двигуна

Умови експлуатації виробу - внутрішньоцехові. Рамки коливання температури навколишнього оточення. $10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{окр}} \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Режим роботи виробу в технологічній установці - безперервний, однозмінний, із тривалістю робочої зміни 8 годин. Виконання профілактичних і регламентних робіт здійснюється поза робочою зміною.

Гамма-процентний термін служби виробу $T_{\gamma\text{cp}} = 50 \cdot 10^3 \text{ год}$ (час календарний з обліком робочих і неробочих змін) при імовірності відмовлення $\gamma_{\text{cp}} = 0,1$.

Думаємо, що конструктивне виконання ТП є блоковим згодом заміни блоку, що вийшов з ладу, на резервний блок не більш 0,5 години. Виключення складає заміна силових трансформаторів, що відмовили. Для їхньої заміни у випадку відмовлення передбачені наступні норми.

Таблиця. 4.1

Типова потужність трансформатора, кВА	Час заміни, год
10 ÷ 50	0,5
60 ÷ 100	1,0
160 ÷ 250	1,5
320 ÷ 800	2,0
1000 ÷ 3200	4,0
4000 ÷ 1000	8,0

Двигун серії 4ПН 400 - 22 МУЗ з наступними параметрами:

- номінальна потужність двигуна $P_{\text{н}} = 70 \text{ кВт};$
- номінальний струм двигуна $I_{\text{н}} = 350 \text{ А};$
- номінальна напруга живлення $U_{\text{н}} = 220 \text{ В};$
- момент інерції двигуна $J_{\text{дв}} = 8.25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
- мінімальна швидкість обертання $n_{\text{мін}} = 250 \text{ об/хв};$
- номінальна швидкість обертання $n_{\text{н}} = 750 \text{ об/хв};$

- максимальна швидкість обертання $n_{\max} = 1500$ об/хв;
- пускова перевантажувальна здатність $\sigma_{\text{п}} = 2$;
- номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{н}} = 93\%$.

Комплектний тиристорний перетворювач серії ЕПУ1-2-4347 ДУХЛ4 з наступними параметрами:

- $P_{\text{н}} = 92$ кВт — номінальне значення енергоефективності інвертора;
- $U_{\text{н}} = 230$ В — номінальна вихідна напруга ТП;
- $I_{\text{н}} = 400$ А — номінальний вихідний струм перетворювача.

Трансформатор ТСЗП-160/0.743 з наступними параметрами:

- $P_{\text{н}} = 143$ кВа — номінальна споживана потужність трансформатора;
- $U_1 = 380$ В — напруга первинної обмотки трансформатора;
- $U_{2\phi} = 230$ В — напруга вторинної обмотки трансформатора;
- $I_{2\phi} = 500$ А — струм вторинної обмотки трансформатора;
- $P_{\text{xx}} = 795$ Вт — енергетичні втрати під час роботи трансформатора без навантаження;
- $P_{\text{кз}} = 2400$ Вт — втрати при короткому замиканні в трансформаторі;
- $U_{\text{кз}} = 4.5\%$ — напруга короткого замикання трансформатора;
- $I_{\text{xx}} = 5.2\%$ — струм, що протікає через трансформатор у режимі холостого ходу.
-

4.3 Опис відмов у системі

В рамках проектування джерела живлення під відмовою мається на увазі будь-яке порушення нормального режиму роботи, яке призводить до зниження напруги на навантаженні більше ніж на 20%. До причин коливань вихідної напруги слід віднести лише відмову окремих компонентів системи. Падіння напруги, викликані надмірними коливаннями вхідної напруги мережі, не вважаються відмовою.

Це визначається як відмова всієї системи в цілому. При цьому припускаємо, що коливання в мережі можуть досягати певних величин, але вони не розглядаються як відмова.

4.4 Вибір вентиляційної групи

Середнє значення струму через вентилялі: $I_{VCP} = I_d/3 = 858/3 = 286A$.

Для точності розрахунків потрібно врахувати коефіцієнт коригування через нестандартну форму струму: $K_3 = 1,1$.

Умови для підбору вентилів за струмом: $I_{occp} \geq K_3 \cdot I_{VCP} \Rightarrow I_{occp} \geq 346A$.

Згідно з довідником, найближчим відповідним тиристором є модель - ЕПУ1-2-4347 ДУХЛ4: $I_{occp} = 400A$

Максимально допустиме робоче значення напруги для цього тиристора

$$U_{vm} = U_{2лн} = 1,057U_{d0} = 1,057 \cdot 154 = 162,8 \text{ В}$$

Також необхідно врахувати можливе підвищення напруги в мережі на 10% та додатково закласти 20% запас для перенапруги. Це важливо для забезпечення надійної роботи системи. $K_{31} = 1,1$; $K_{32} = 1,2$. Умова для підбору тиристорів за напругою: $U_{III} \geq K_{31} \cdot K_{32} \cdot U_{vm} = 1,1 \cdot 1,2 \cdot 162,8 = 214,9B$.

4.5 Трансформатор силовий погоджуючий

$$U_{2\phi} = U_{d0}/1,34 = 154/1.34 = 114,9B;$$

$$K_T = U_{1\phi}/U_{2\phi} = 220/114,9 = 1,9;$$

$$S_T = \frac{1,057(U_{дн} \cdot I_{дн})}{(\eta_{TP} \cdot \eta_{преобр})} = \frac{1,057 \cdot 154 \cdot 858}{0,95 \cdot 0,99} = 5200\text{kVA}$$

По каталозі вибираємо силовий погоджуючий трансформатор ТСЗП - 160 / 0.743

4.6 Автомат

Для забезпечення захисту електричної мережі від перевантажень та короткозамкнених ситуацій можна використовувати автоматичний вимикач типу АК-50-6,3, розрахований на номінальний струм. За допомогою табличних даних розрахуємо показник частоти відмов для даного автоматичного пристрою захисту $\lambda_{AO} \approx 12 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

4.7 Визначення часу до відмови трифазної нульової установки перетворення

Час до відмови перетворювальної установки обчислюється шляхом підсумовування ймовірностей відмов окремих компонентів системи

$$T_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{3 \cdot \lambda_{VO} + \lambda_{TPO} + \lambda_{AO}} = (3 \cdot \lambda_{VO} + \lambda_{TPO} + \lambda_{AO})^{-1} \quad (4.1)$$

де:

λ_{VO} - інтенсивність відмовлень вентилів;

λ_{TPO} - інтенсивність відмовлень трансформатора;

λ_{AO} - інтенсивність відмовлень автоматичного вимикача;

Тоді:

$$T_1 = (3 \cdot \lambda_{VO} + \lambda_{TPO} + \lambda_{AO})^{-1} = 5,8 \cdot 10^6 c$$

Необхідно зазначити, що отримані дані є приблизними і мають оціночний характер. У цьому розрахунку не враховуються реальні характеристики розподілу та конкретні умови експлуатації.

4.8 Врахування умов роботи

При врахуванні умов експлуатації важливо чітко визначити поняття відмови для окремих компонентів системи, а також встановити фізичні параметри і ознаки відмов для груп однотипних елементів. Для цього здійснюється розрахунок або вибір коефіцієнтів навантаження на основі таблиць або графічних залежностей.

4.9 Силовий трансформатор погоджуючий

Аналіз впливу різних електричних, теплових і механічних факторів на роботу елементів та систем проводиться за допомогою множення коефіцієнта навантаження та вагового коефіцієнта, що відображає значущість впливу конкретних аспектів. Аналіз багаторічної експлуатації показує, що переважна більшість (більше 98%) відмов трансформаторного обладнання середньої та малої потужності виникає через пробій ізоляції обмоток, спровокований електричними факторами. Решта 2% відмов обумовлені механічними пошкодженнями, зокрема, втратою контактів на клеммах. У трансформаторах високої потужності виникають додаткові типи відмов, основною причиною яких є теплові фактори.

Незалежно від типу несправності, вона має тотальний характер та спричиняє вихід з ладу джерела електропостачання. Величину навантаження трансформатора за потужністю обчислюють так:

$$K_{HP} = \frac{S_P}{S_H} = \frac{U_d \cdot I_d \cdot K_{CX}}{\eta \cdot S_H} = \frac{5200}{6000} = 0,865 \quad (4.2)$$

Коефіцієнт значущості електричного навантаження $h_E = 1,5$ (обирається згідно з табличними даними).

$$\text{Отже } \text{ch } h_E \cdot K_{HE} = \frac{\exp(h_E \cdot K_{HE}) + \exp(-h_E \cdot K_{HE})}{2} = \frac{e^{1,331} + e^{-1,331}}{2} = 2,018.$$

Можна констатувати, що врахування фактичних умов експлуатації спричиняє подвоєння інтенсивності виникнення відмов.

Величину теплового завантаження розраховують за допомогою формули:

$$K_{H\Theta} = \frac{\theta_p - \theta_{\text{окр ср}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{срmax}}} \quad (4.3)$$

в якому:

θ_p і $\theta_{\text{доп}}$ - характеризує робочу, а також гранично допустиму температуру.

Допускається їхня рівність ;

$\theta_{\text{окр ср}}$ - усереднена температура зовнішнього середовища, яка дорівнює;

$\theta_{\text{ср max}}$ - найбільше значення температури оточуючого середовища, що приймається як;

Внаслідок цього:

$$K_{\text{H}\Theta} = \frac{\theta_p - \theta_{\text{окр ср}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{срmax}}} = \frac{135 - 20}{135 - 40} = 1,21$$

Оскільки всі температурні показники залишаються в межах допустимих робочих діапазонів, теплове навантаження не матиме суттєвого впливу на параметри надійності. Внаслідок цього, ваговий коефіцієнт приймається рівним одиниці.

Таким чином:

$$\text{ch } h_{\Theta} \cdot K_{\text{HE}} = \frac{\exp(h_{\Theta} \cdot K_{\text{HE}}) + \exp(-h_{\Theta} \cdot K_{\text{HE}})}{2} = \frac{e^{1,21} + e^{-1,21}}{2} = 1,97 \quad (4.4)$$

Також приймаємо, що вібраційний вплив на трансформатор за заданих умов експлуатації є нехтовно малим (або відсутній). Внаслідок цього, частота відмов трансформатора при фактичних умовах функціонування визначається як:

$$\lambda_{\text{ТР}} = \lambda_{\text{ТРО}} \prod_{i=1}^2 \text{ch } h_i \cdot K_{\text{Hi}} = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,97 \cdot 2,018 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год} \quad (4.5)$$

4.10 Вентильна група

Несправності тиристорів проявляються у двох основних формах:

- Пробій - коротке замикання структури (КЗ);
- Обрив - утрата провідності структури (ОБР);

Інтенсивність відмовлень: $\lambda_{V O} = \lambda_{V \text{ КЗ } O} + \lambda_{V \text{ ОБР } O}$,

де:

$\lambda_{V O}$ - сумарна складової інтенсивності відмовлень;

$\lambda_{V \text{ КЗ } O}$ - компонент, зумовлений коротким замиканням;

$\lambda_{V \text{ ОБР } O}$ - частина, пов'язана з порушенням цілісності структури (обривом);

Зазвичай, виходячи з даних експлуатації, встановлюється $\lambda_{V \text{ КЗ } O} = 90\%$
 $\lambda_{V \text{ ОБР } O} = 10\%$, отже, відношення між компонентами приймають як 9 до 1.

Здійснимо розрахунок частоти відмов з урахуванням відповідних коефіцієнтів навантаження. При цьому зосередимося на двох причинах, що ведуть до збільшення інтенсивності відмов – електричній та тепловій. Електричну причину характеризують дві величини: струм і напруга.

Показник навантаження вентиля за струмом:

$$K_{H1} = \frac{I_{\text{вср}}}{I_H} = \frac{281,52}{500} = 0,56 \quad (4.6)$$

Маємо: $h_{E1} = 1,1$.

Показник завантаження по зворотній напрузі для вентиля:

$$K_{H2} = \frac{U_1}{U_{\text{зсп}}} = \frac{380}{400} = 0,95 \quad (4.7)$$

Маємо: $h_{E1} = 1,1$.

Показник температурного завантаження $K_{H\Theta}$:

$$K_{H\Theta} = \frac{\theta_p - \theta_{\text{окр ср}}}{\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{срмах}}} = \frac{135 - 20}{135 - 40} = 1,21 \quad (4.8)$$

Маємо: $h_{E1} = 1,2$.

Відповідно:

$$\text{ch}h_{E1} \cdot K_{H1} = \text{ch}1,1 \cdot 0,56 = 1,433$$

$$\text{ch}h_{E2} \cdot K_{H2} = \text{ch}1,1 \cdot 0,95 = 1,598$$

$$\text{ch}h_{E3} \cdot K_{H\Theta} = \text{ch}1,2 \cdot 1,21 = 2,253$$

З вираження $\lambda_{V0} = \lambda_{\text{КЗ}O} + \lambda_{\text{ВКЗ}}/9 = 1,1\lambda_{\text{КЗ}}$, маємо:

$$\lambda_{\text{КЗ}} = \left(\frac{\lambda_{V0}}{1,1} \right) = \left(\frac{6,2 \cdot 10^{-6}}{1,1} \right) = 5,636 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год} \quad (4.9)$$

Відмовлення типу КЗ кожного з трьох тиристорів у складі вентиляльної групи спричиняє коротке замикання у вторинній обмотці трансформатора. За таких обставин автоматичний захист має знеструмити схему, що означає повний вихід з ладу. З точки зору несправностей, всі тиристири формують структуру з послідовним з'єднанням. Частота відмов випрямного пристрою, спричинена коротким замиканням, розраховується шляхом простого додавання або потрійного множення (відповідно до кількості тиристорів) значення $\lambda_{кз}$.

$$\begin{aligned}\lambda_{кз} &= \lambda_{кзо} \prod_{i=1}^3 ch h_i \cdot K_{Hi} = 5,636 \cdot 1,433 \cdot 1,598 \cdot 2,253 \cdot 10^{-6} = \\ &= 29 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}\end{aligned}\tag{4.10}$$

Облік відмовлень типу ОБР структури. При відмовленні одного з трьох вентилів трифазної нульової випрямної схеми, напруга падає на третину, отже, досягає значення $U_d = \frac{2}{3} U_{дн} = 0,67 U_{дн}$ (падіння напруги становить 33%).

Згідно з визначенням відмови, падіння напруги на 20% або більше свідчить про вихід з ладу всього джерела живлення. Таким чином, розрив у структурі одного з тиристорів вентиляльної групи розглядається як несправність випрямляча. Несправність виникає, коли в одному з вентилів трапляється відмова, пов'язана з обривом його структури.

Період безвідмовної роботи T_1 визначається єдиним проміжком часу: від початку використання до моменту, коли один із трьох вентилів вийде з ладу

$$t_1 = \frac{1}{\lambda_3 \lambda_{ОБР}}$$

З таблиці виберемо $\lambda_{v0} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$.

Маємо: $\lambda_{vсх} = \lambda_{v0} \prod_{i=1}^3 ch h_i \cdot K_{Hi} = 1,2 \cdot \prod_{i=1}^3 ch K_{Hi} \cdot h_i = 1,68$.

Однак, відмови, що проявляються як обрив, становлять 10% від загальної кількості, таким чином:

$$\lambda_{\text{VOBR}} = 0,1\lambda_{\text{VCH}} = 0,1 \cdot 1,68 \cdot 10^{-6} \approx 0,17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

$$(4.11)$$

Звідси:

$$t_1 = \frac{1}{3\lambda_{\text{VOBR}}} = \frac{10^6}{3 \cdot 1,7} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ год}$$

$$T_{1\text{OBR}} = t_1 = 1,96 \cdot 10^5 \text{ год}$$

Стосовно вентиляльної групи загалом:

$$\lambda_{\text{VOBR}} = \frac{1}{T_{1\text{OBR}}} = \frac{1}{1,96 \cdot 10^5} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

$$(4.12)$$

Повна інтенсивність відмовлень випрямляча λ_V складається з λ_{VOBR} і λ_{VKZ} .

4.11 Автоматичний вимикач

Ключова функція автоматичного вимикача полягає в оперативному приєднанні навантаження до електромережі та його екстремому від'єднанні у разі теплових чи миттєвих перевантажень (реалізація теплового та максимального струмового захисту). Несправності спричинені переважно обгоранням основних контактів та поломками в механізмі автоматичних вимикачів.

Відмінною особливістю елементів САУ, схожих на автоматичні вимикачі, є функціонування в трьох різних режимах.

1. Сталий режим - режим включеного стану; за час цього режиму допускається визначене число оперативних включень і вимикань;

2. Режим екстремого відключення при перевантаженнях. Число допустимих аварійних перевантажень зазвичай регламентується. Проте, періодичність виникнення аварійних перевантажень для розробника залишається невизначеною.

3. Режим відключеного стану - режим збереження;

Для кожного режиму властива певна інтенсивність виникнення відмов. Під час зберігання беруться до уваги умови, в яких воно відбувається. Частота відмов під час зберігання варіюється у визначеному діапазоні $\lambda_{\text{ХР}} (0,01 \div 0,1)\lambda_p$. При цьому, для складського зберігання нижній поріг становить $0,01$, а для зберігання в цехових умовах – верхній поріг $0,1$.

У технічній документації на автоматичні вимикачі серій АК, АП, АТ, АЗ700 відсутні відомості щодо надійності, проте зазначається кількість допустимих оперативних спрацювань. Якщо пристрій працює в одну зміну, кількість оперативних спрацювань протягом зміни не має бути більшою за десять. Це дає можливість приблизно оцінити експлуатаційний ресурс виробу за умов роботи в одну зміну.

$$T_{\gamma} = \frac{N \cdot t}{n} \quad (4.13)$$

де:

N - гарантоване число вмикань за одну зміну, що допускається (стосовно автоматичних вимикачів);

n - кількість оперативних спрацювань за зміну ($n \leq 10$);

t - кількість годин протягом доби;

$$T_{\gamma} = \frac{N \cdot t}{n} = \frac{2700 \cdot 24}{10} = 6480 \text{ год}$$

Ресурс виробу, що гарантується $\gamma = 0,1$. Таким чином $P(T_{\gamma}) = 1 - \gamma$. для розрахунку інтенсивності відмов використовуються такі вирази: $P(t) = \exp(-\lambda_{\text{ср}} t)$; $P(T_{\gamma}) = e(-\lambda_{\text{ср}} T_{\gamma}) = 1 - \gamma$.

Звідси:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\gamma}\right)}{T_{\gamma}} = \frac{0,1054}{6480} = 16,27 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год} \quad (4.14)$$

Частота відмов, що припадає на один цикл спрацювань

$$\lambda_{\gamma} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{N} = \frac{16,27 \cdot 10^{-6}}{2700} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ 1/год} \quad (4.15)$$

Ймовірність надійної експлуатації пристрою, враховуючи три режими його функціонування:

$$P(t) = \exp[-(\lambda_p t_p + \lambda_{xp} t_{xp} + \lambda_{cp} T_{ц} h)] \quad (4.16)$$

де:

$T_{ц}$ - середня тривалість циклу роботи;

h - кількість циклів роботи;

λ_{cp} - показник інтенсивності відмов під час екстреного спрацювання.

Показник інтенсивності відмов для автоматичного спрацювання на вимкнення під час безперервної експлуатації приймається в межах $\lambda_{po} = (2 \div 5) \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$.

Якщо прийняти $\lambda_{po} = 3 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$ і $\lambda_{xp} = 0,05 \lambda_{po}$, то маємо: $\lambda_{xp} = 0,05 \lambda_{po} = 0,05 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-7} 1/\text{год}$.

Отже, інтенсивність відмовлень автоматичного вимикача:

$$\lambda_{ABO} = \frac{\lambda_{po} t_p + \lambda_{xp} t_{xp} + \lambda_{cp} T_{ц} h}{t} \quad (4.17)$$

де:

$t = t_p + t_{xp}$ - середній час експлуатації (часом переключення зневажаємо);

При роботі в одну зміну $\frac{t_p}{t} = \frac{1}{3}$; $\frac{t_{xp}}{t} = \frac{2}{3}$.

Отже:

$$\lambda_{AB} = \frac{1}{3} \lambda_p + \frac{2}{3} \lambda_{xp} + \lambda_{cp} \quad (4.18)$$

чи

$$\lambda_{AB} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{3} + \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}}{3} + 16,27 \cdot 10^{-6} = 17,37 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$$

4.12 Сумарні показники надійності

Тепер можна розрахувати сумарні показники надійності виробу в цілому.

$$\lambda_{\text{уст}} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i = \lambda_{\text{тр}} + \lambda_{\text{вп}} + \lambda_{\text{ав}} = (20 + 34,1 + 17,37) \cdot 10^{-6} = 71,47 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.} \quad (4.19)$$

$$T_{\text{уст}} = \frac{1}{\lambda_{\text{уст}}} = \frac{1}{71,47 \cdot 10^{-6}} = 13991,89 \text{ год.} \quad (4.20)$$

При ослабленні величин λ можна визначити оптимальний запас ЗИПА, а також найбільш уразливу частину виробу.

ВИСНОВОК

У рамках виконаної роботи було проведено розрахунок граничного значення потужності різання для вальцетокарного верстата моделі 1К824 та обґрунтовано цільовий рівень для її стабілізації. На основі цих даних було підібрано приводний двигун серії 4ПН, що відрізняється високими динамічними характеристиками, та виконано його перевірку на теплове навантаження з урахуванням режимів пуску-гальмування.

Центральним завданням проекту стало проектування системи стабілізації потужності, яка пройшла комплексне дослідження в середовищі імітаційного моделювання Matlab.

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити такі висновки:

Статична точність системи є високою: показник статизму швидкості при номінальному навантаженні (з неактивним контуром потужності) становить 1.7 1/с, що еквівалентно 2.16% від швидкості холостого ходу. Такий результат забезпечується як ефективністю контурів керування, так і відмінними властивостями самого двигуна.

Якість стабілізації потужності підтверджується низькою похибкою: навіть за найскладніших умов роботи (коли навантаження на 15% перевищує рівень стабілізації) відхилення складає всього 1178 Вт (1,96%), що є абсолютно задовільним показником.

Динаміка системи значно покращилася: завдяки ПІ-регулятору струму тривалість пускового процесу вдалося скоротити на 55% (з 2.0 с до 0.9 с), що створює передумови для скорочення загального часу обробки.

Показники перерегулювання ключових параметрів (струму, швидкості, потужності) за найважчих режимів не перевищують 5.1%, що свідчить про високу стійкість системи.

Підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати, що розроблена трьохконтурна система автоматичного регулювання повністю відповідає поставленим вимогам. Досягнуті показники якості свідчать про успішність синтезованих регуляторів. Впровадження даного технічного рішення в реальних умовах експлуатації верстата 1К824 дозволить суттєво підвищити його продуктивність та покращити якість обробки деталей завдяки стабілізації процесу різання. Таким чином, мета проекту щодо модернізації електропривода головного руху є повністю досягнутою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація виробничих процесів: підручник/ І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. – Вид. 2-ге, виправлене. – К.: Видавництво Ліра-К, 2015.
2. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.
3. Методичні вказівки до виконання практичних робіт із дисципліни “Електропривод і автоматизація верстатів автоматів” для студентів спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” денної та заочної форм навчання. – Полтава: ПолтНТУ, Укладач: М.В. Пугач, к.т.н., доцент 2013. – 52 с.
4. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 410 с.
5. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
6. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора: навч. посібник [для студ. електротехн. спеціальностей] / В. І. Мілих. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 99 с.
7. Шапарев Н.К. Розрахунок автоматизованих електроприводів систем керування металообробкою: Навч. посібник. – 2 е вид., перер. і доп. - К.: Либідь, 1992р. - 272с., іл.
8. Посібник з експлуатації. Верстат вальцетокарний калібрувальний спеціальний. Модель 1К824 - Краматорськ, 2002р.
9. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: Навчальний посібник/ В.Г. Трегуб. – К.: Видавництво Ліра-К, 2014.

10. Галай М.В. “Системи автоматичного керування” Посібник для вищих навчальних – Полтава: ПолтДТУ 2000р
11. Шефер О.В. Вимірювальнно-діагностична систем для оцінки енергоефективності роботи та технічного стану електромеханічних перетворювачів / О.В. Шефер, М.В. Капустянський // Збірник наукових праць за матеріалами VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія інновації, практика». (Полтава, 6 листопада 2020 р.) – Полтава: НУПП, 2020. – С. 146-150.
12. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.
13. Розроблення сучасної системи автоматичного керування електроприводом бетонороздавача / Н.В. Єрмілова, С.Г. Кислиця, Я.Р. Буркун, А.Г. Гончаров // Системи управління, навігації та зв’язку. – 2020. – Вип. 1 (59). – С. 21-26.
14. Захарченко Р.В. Дослідження перехідних процесів у системі «інвертор – асинхронний двигун» електроприводу насосної установки / Р.В. Захарченко, В.Ю. Курбала // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика : зб. наук. пр. за матеріалами IX Всеукр. наук.-практ. конф., 10 листоп. 2023 р. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – С. 27–28.
15. Єрмілова Н.В. Методи підвищення енергоефективності та надійності обладнання бурових установок для електробуріння / Н.В. Єрмілова, Ю.С. Ярошенко // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика : зб. наук. пр. за матеріалами IX Всеукр. наук.-практ. конф., 10 листоп. 2023 р. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – С. 124–126.

ДОДАТКИ

1. TECHNOLOGICAL PART

1.1 Main technical specifications of the machine tool:

Workpiece dimensions:

- Maximum diameter of the workpiece installed over the support – 1000 mm.
- Range of diameters of the machined external surface – 600—1000 mm.
- Maximum length of the workpiece – 5000 mm.
- Maximum weight of the workpiece installed in centers – 25000 kg.

Operating parameters:

- Maximum cross-section of the tool holder – 63×43 mm.
- Number of tool positions – 1.
- Maximum transverse travel of the support – 345 mm.

Motion characteristics:

- Spindle speed range – 0.46 — 25 rpm.
- Feed adjustment:
 - Longitudinal feed of the support – 0.02 — 139.0 mm/rev.
 - Transverse feed of the support – 0.01 — 55.0 mm/rev.
- Rapid traverse of the support – 2.5 m/min.
- Number of spindle speed steps – stepless.
- Number of working feed steps – stepless.

Force characteristics:

- Maximum cutting force per support – 100 kN.
- Maximum torque on the spindle – 90 kN·m.

Machining quality:

- Roughness of the external surface – 1.65 μm .

Operational characteristics:

- Productivity (compared to the previous model) – 1.6.
- Specific metal mass per unit of productivity – 0.76 kg.
- Specific electricity consumption per unit of productivity – 0.77 kWh.

Reliability and dependability:

- Minimum failure-free operating time:
 - Per day – 16 h.
 - Per week – 80 h.
 - Total – not less than 500 h.

1.2 Parameters of the main motion electric drive

The main motion electric drive of the 1K824 roll-turning calibration lathe ensures stable regulation of the spindle speed within the range of 0.46—25 rpm, which allows the machine tool to be adapted to various technological processes. It must provide a wide range of technological modes, maximum productivity at all stages of machining, high accuracy, and a high-quality surface finish of the final parts.

Main parameters of the drive:

- **Motor type** – asynchronous or synchronous motor, depending on the modification.

- **Control system** – variable frequency drive for precise speed regulation.
- **Maximum torque on the spindle** – 90 kN·m, which guarantees stable machining of massive workpieces.
- **Support feed range** – longitudinal 0.02—139.0 mm/rev, transverse 0.01—55.0 mm/rev.
- **Energy efficiency** – specific electricity consumption of 0.77 kWh per unit of productivity.
- **Rapid traverse of the support** – 2.5 m/min, which reduces auxiliary time.

The main motion electric drive provides flexibility in speed adjustment for various machining modes, resistance to variable loads, energy efficiency, and high productivity. Thanks to the precision of regulation, high machining quality, operational stability, and minimal deviations in part dimensions are achieved. The drive allows for obtaining a high-quality finish on machined surfaces, which is critically important in precision engineering.

Depending on the design features and requirements of the machining process, the speed of the electric drive can be regulated by three main methods:

- **Mechanical** – changing the gear ratio between the motor and the working element of the machine tool.
- **Electrical** – regulating the motor's rotation frequency using frequency converters.
- **Electromechanical** – combined use of mechanical and electrical methods to ensure smooth speed adjustment.

The combination of modern drive control methods allows for achieving maximum productivity at all stages of machining, providing a wide range of

technological modes, increasing the accuracy of part manufacturing, and improving the quality of machined surfaces.

1.3 Types of electric drives for metalworking machine tools

In the metalworking industry, the choice of an electric drive for machine tools depends on the specifics of the technological process and the requirements for accuracy, power, and operational efficiency of the equipment. Depending on the type of machining and the characteristics of the machine tool, various types of electric drives are used.

For machine tools that do not require frequent starting and wide-range speed changes, three-phase asynchronous motors with a squirrel-cage rotor are typically used. These motors have a simple design, are reliable in operation, and do not require complex regulation. They operate effectively under constant loads, and speed changes are accomplished by shifting gears in the gearbox.

For machine tools that require significant speed regulation, such as grinding or turning lathes with high accuracy requirements, electric drives are used that allow for changing the angular velocity by regulating the voltage on the windings of DC motors. This makes it possible to maintain stable operation at different speeds and increases machining accuracy.

Furthermore, for large machine tools that work with large parts, such as vertical turning lathes or heavy-duty lathes, separate electric drives are used for the feed mechanisms. Such a system allows for the automation of many operations, simplifies the kinematics, and ensures the precision of movements during machining.

For machine tools where it is necessary to smoothly change the feed speed or achieve high accuracy when working with small workpieces, asynchronous motors with increased starting torque or DC motors are used. They provide the necessary

smoothness of speed regulation and ensure the required accuracy when machining highly detailed parts.

The choice of an electric drive for each specific machine tool depends on the operating conditions, and the requirements for speed, accuracy, and economic efficiency of the machining process.

1.4 Operating modes of electric drives on machine tools

Electric drives on metalworking machine tools operate in different modes depending on the machining conditions and the required performance characteristics. Since the machining of parts on machine tools may involve load changes during different stages of the technological process, it is important that the drive systems can adapt to changing conditions without loss of efficiency and accuracy.

The main operating modes of electric drives are:

Continuous duty (S1) This mode is used for machine tools that operate continuously under a constant load. Examples include large turning, grinding, and gear-hobbing machines. In this case, the drive maintains constant power and rotation speed for a long time, which ensures stable operation of the machine tool.

Intermittent load mode with frequent reversals (S7) This is used in the main drives for planing machines. Here, the drive power changes depending on the load, and frequent changes in the direction of rotation are normal. The selection of an electric drive for such a mode requires consideration of load diagrams and ensuring an optimal transient process during reversals.

Intermittent periodic duty modes (S3, S4) These modes are typical for machine tools that operate in automatic cycles or perform operations requiring short-term activation, such as drilling or sharpening. For such machines, the drive power is determined taking into account the average energy losses during operation.

Short-time duty (S2) This mode is used for auxiliary mechanisms of machine tools, such as the movement of crossbars or the clamping of workpieces in fixtures. The active operating time of the motor in this mode is usually limited; for example, for small machine tools, this time is from 5 to 15 seconds, and for large ones — up to 1-1.5 minutes.

1.5 Problems with underloading of electric motors

The underloading of electric drives in metalworking machine tools can lead to a decrease in their operational efficiency. When a motor does not operate at full power, its efficiency factor decreases, which causes an increase in the share of reactive power in the network, as well as additional energy costs. To solve this problem, compensating devices are used to help optimize electricity consumption.

1.6 Requirements for electric drives on CNC machine tools

On computer numerical control (CNC) machine tools, electric drives have additional functional requirements. They must not only ensure a stable rotation speed but also allow for the precise positioning of the machine's working elements. This requires precise regulation of the spindle speed, as well as maintaining stability during load changes.

1.7 Factors affecting the stability of electric drives

To ensure the stable operation of electric drives, it is important to consider several factors:

- **Speed regulation accuracy:** On CNC machine tools, even minor speed fluctuations can significantly affect the quality of part machining.
- **Voltage fluctuations in the network:** Unstable voltage can cause drive failures and a deterioration in accuracy.
- **Load changes:** For CNC machine tools, the error during load changes should not exceed 2%.

Conclusion to the chapter

Thus, to ensure the stable and effective operation of metalworking machine tools, it is necessary to consider the specifics of their operating modes and to develop electric drive control systems that allow for optimal performance under conditions of variable load.

*Кінематична схема головного привода
вальцетокарного станка моделі 1К824*

Статична характеристика системи

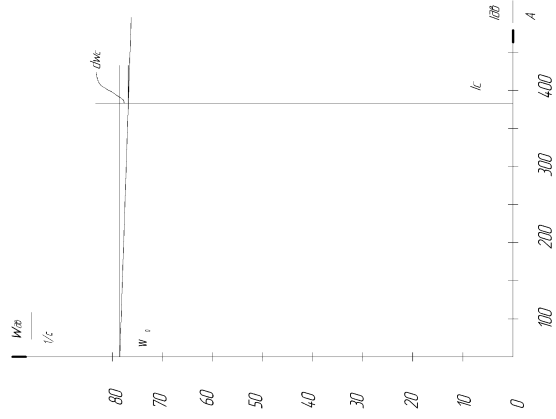
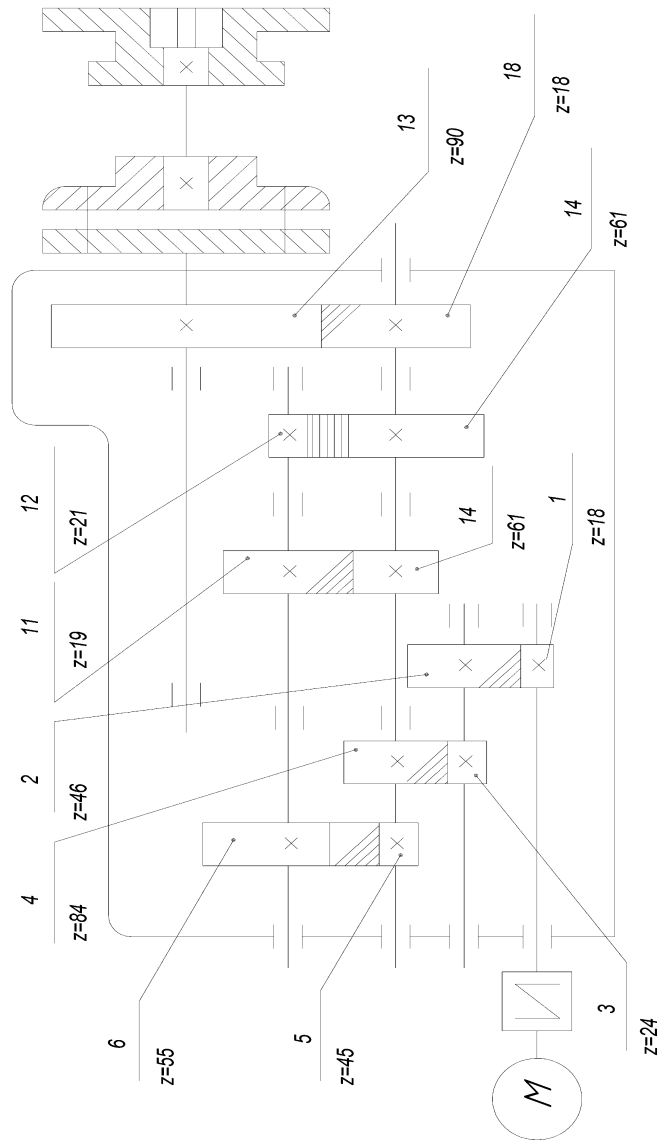
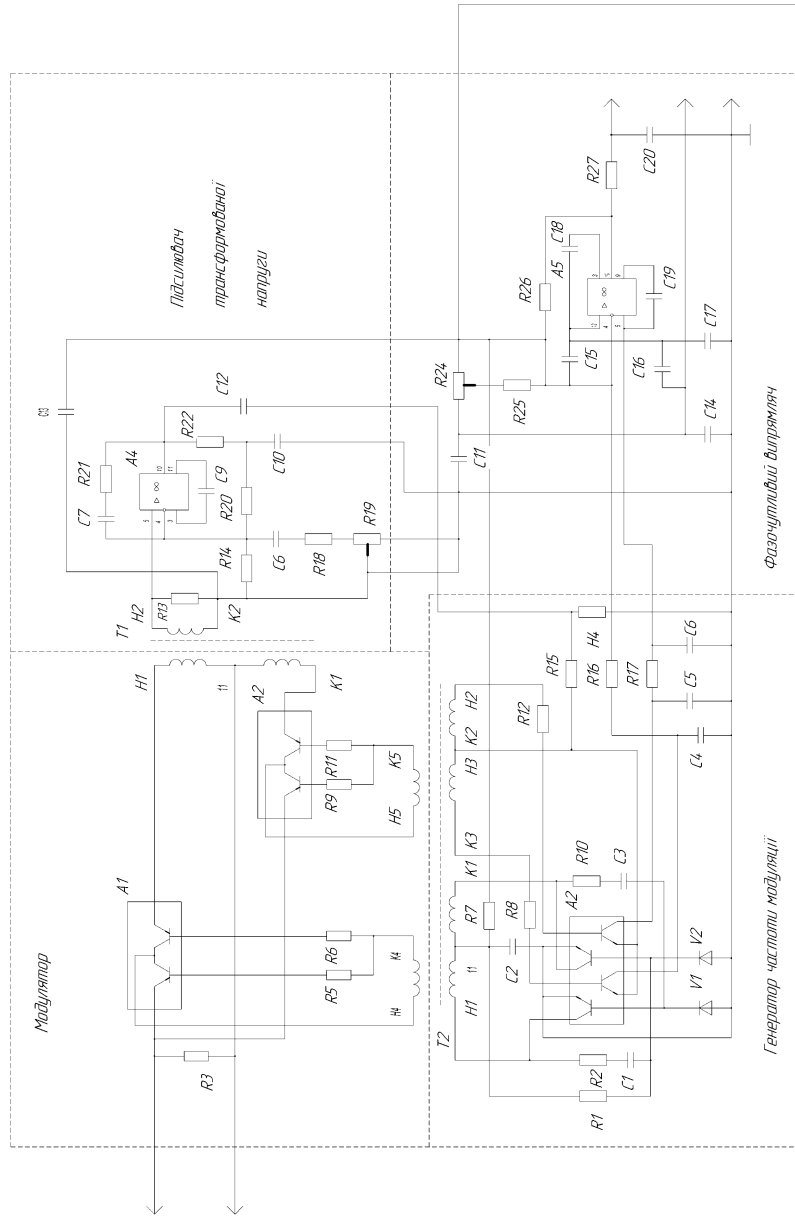
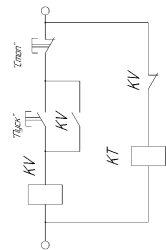


Схема електрична принципова датчика і регулятора потужності

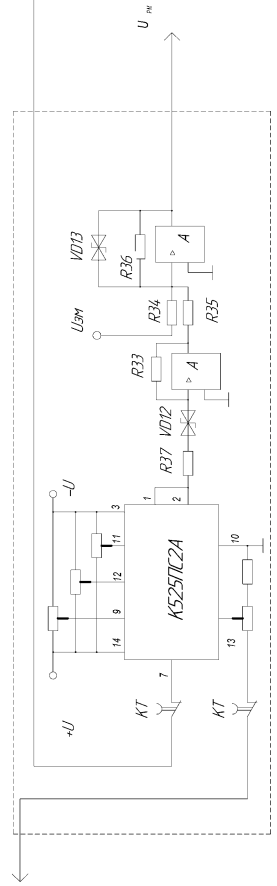
Датчик струму



Від шунта

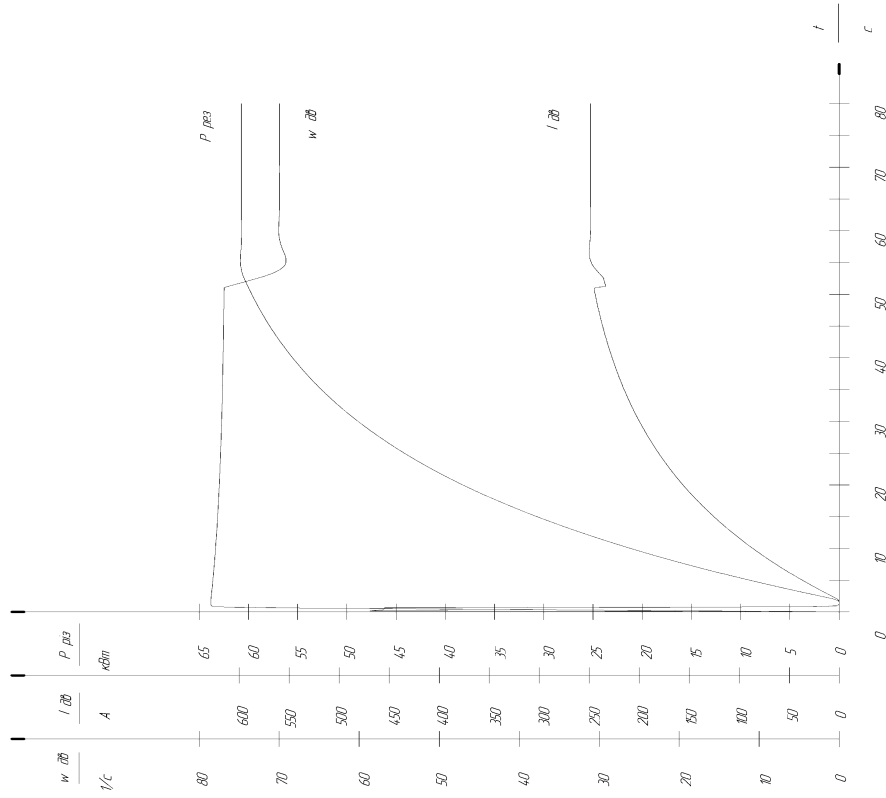


Контур потужності

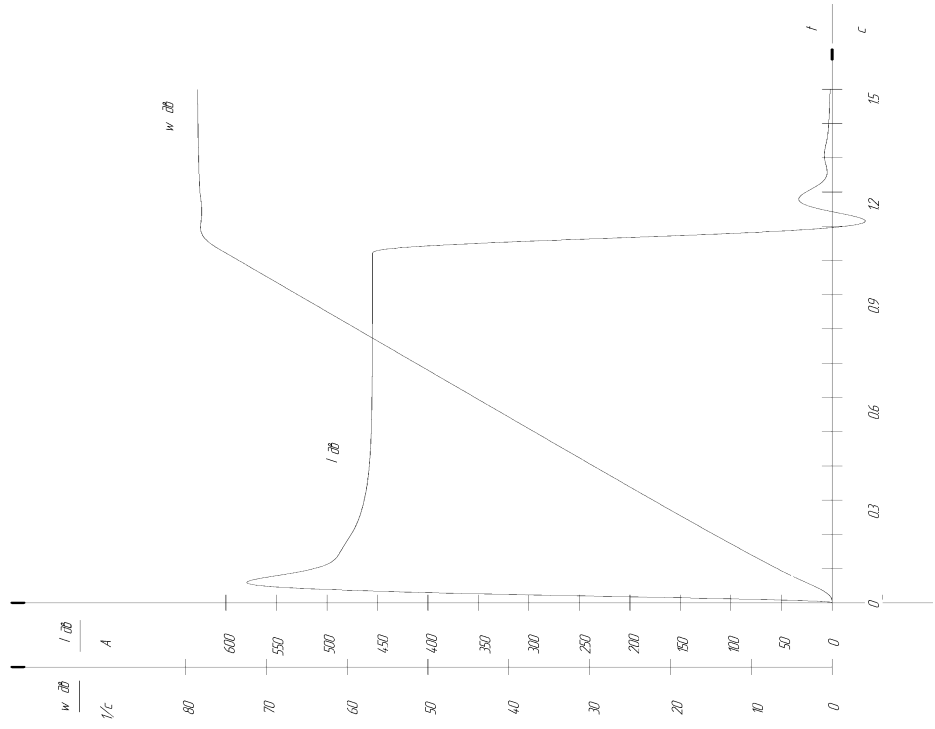


Від магнетрона

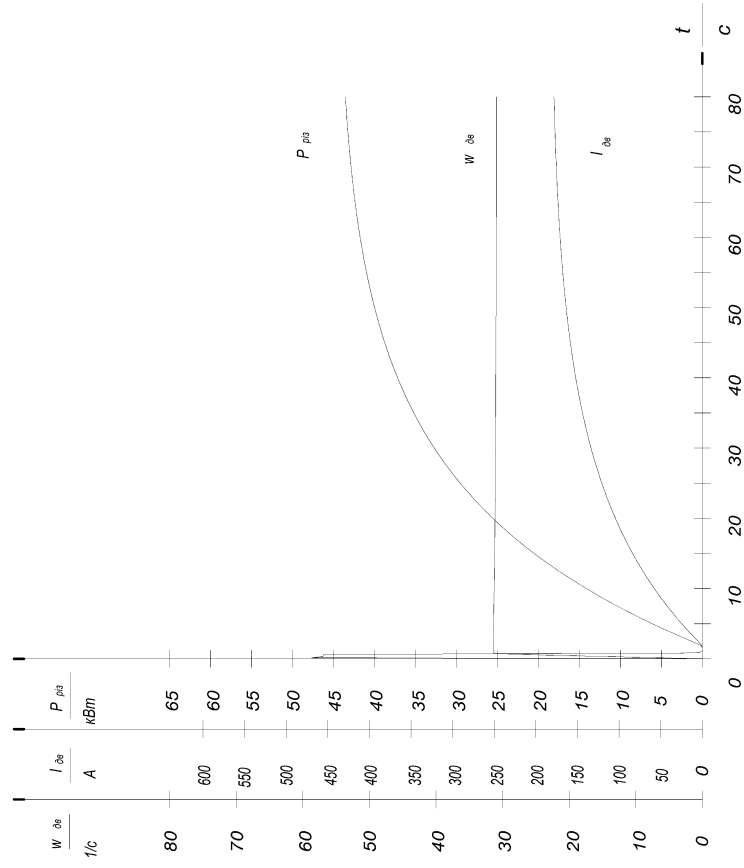
Перехідний процес стабілізації потужності в проектуємій системі



Перехідний процес пуска двигуна в проектуємій системі стабілізації потужності



Перехідний процес стабілізації потужності різання в проектуємій системі при зменшенні K на 50%



Перехідний процес стабілізації потужності різання в проектуємій системі при збільшенні K на 50%

