

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" _____ " _____ 2023р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої
освіти

на тему

" Система автоматичного керування частотою обертання двигуна
приводу верстата з ЧПК
"

Виконав: здобувач вищої освіти

ІІІ курсу, групи АК-20-3ск

ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані

технології»

_____ Горелік І. І.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

_____ Мірошніченко М. С.

" _____ " _____ 2023р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра Автоматизації виробничих процесів
Рівень вищої освіти бакалавр
Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Автоматизації
виробничих процесів
Дідик О. К.
“ ” 2023 року

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
здобувача вищої освіти

Гореліка Іллі Ігоровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Система автоматичного керування частотою обертання
двигуна приводу верстата з ЧПК

2.Керівник роботи Мірошніченко М.С., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3.Строк подання роботи до захисту

4. Мета та завдання випускової кваліфікаційної роботи
Метою кваліфікаційної роботи є: автоматизувати систему контролю приводу
подачі оброблювального центру за принципом відхилення вихідної
величини.

5. Завдання кваліфікаційної роботи: Провести аналіз існуючих систем
керування приводу подачі. Розглянути верстати багатоцільового
призначення. Розробити загальну функціональну систему верстата.
Обґрунтувати модернізацію системи керування приводу подачі. Устрій,
принцип регулювання та принцип дії системи. Зробити оцінку якості
регулювання системи, як замкненої, так і розімкненої

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих систем керування приводу подачі		
2	Огляд існуючих верстатів багатоцільового призначення		
3	Розробка загальної функціональної системи верстата		
4	Модернізація системи керування приводу подачі		
5	Устрій, принцип регулювання та принцип дії системи		
6	Оцінка якості регулювання системи		
7	Оформлення бакалаврської роботи		

6. Дата видачі завдання

“ ____ ” ____ 20__ р.

Підпис керівника

____ Мірошніченко М.С.

Завдання прийнято до виконання

“ ____ ” ____ 20__ р.

Підпис здобувача

____ Горелік І.І.

Анотація

Основна задача бакалаврської роботи автоматизувати систему контролю приводу подачі оброблювального центру за принципом відхилення вихідної величини та довести техніко-економічні показники.

Використовуючи модернізовану систему керування приводу головного руху оброблювального центру верстату МС 032, покращено управління верстатом, підвищено точність роботи, а отже підвищено якісні та економічні показники процесу обробки деталей.

Annotation

The main task of the diploma project is to automate the control system of the feed drive of the processing center according to the principle of deviation of the initial value and to prove technical and economic indicators.

Using the modernized control system of the main drive of the machining center of the MS 032 machine, the control of the machine has been improved, the accuracy of work has been increased, and therefore the quality and economic indicators of the processing of parts have been increased.

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Характеристика підприємства як об'єкта автоматизації	6
1.1 Характеристика господарської діяльності підприємства	6
2 Огляд існуючих рішень	7
2.1 Загальні поняття про багатоцільові верстати	7
2.2 Аналіз існуючих багатоцільових верстатів	9
2.3 Огляд існуючих систем керування	11
3 Характеристика багатоцільового верстату MC 032	17
3.1 Опис верстата MC 032	17
3.2 Технічні характеристики верстату	19
4 Опис функціональної та електричної схеми блоку керування	23
4.1 Розробка загальної функціональної системи верстата MC 032	23
4.2 Характеристика електричної системи числового програмного керування на базі Fanuc 0i	27
5 Модернізація системи керування приводу подачі	29
5.1 Вихідні дані для розробки САР	29
5.2 Устрій, принцип регулювання та принцип дії САР	31
5.3 Функціональна схема СЛР	31
5.4 Структурна схема САР	33
5.5 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння замкнутої системи	34
5.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ, та ЛФЧХ розімкнутої системи	35
5.7 Побудова дійсної частотної характеристики замкненої системи	40
5.8 Визначення стійкості і запасів стійкості, побудова області	42

5.9 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи	47
5.10 Побудова перехідного процесу замкнутої системи	48
5.11 Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом. Уточнення вимог до САР для її аналізу та синтезу	51
Висновки	53
Література	54
Додаток А	55

Вступ

За останні десятиріччя автоматизація промислових процесів знайшла широке застосування в усіх галузях промисловості ставши необхідним та невід'ємним елементом нової техніки.

Автоматизація – один з напрямів науково-технічного прогресу, спрямований на застосування саморегульованих технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, що звільняють людину від участі в процесах отримання, перетворення, передачі і використання енергії, матеріалів чи інформації, істотно зменшують міру цієї участі чи трудомісткість виконуваних операцій.

Мета автоматизації – підвищення продуктивності праці, поліпшення якості продукції, оптимізація управління, усунення людини від виробництв, небезпечних для здоров'я.

Автоматизація, окрім об'єкта керування вимагає додаткового застосування датчиків (сенсорів), керуючих пристроїв (контролерів із засобами вводу-виводу), виконавчих механізмів та у переважній більшості базується на основі використання електронної техніки та методів обчислень, що іноді копіюють нервові і розумові функції людини.

Автоматизуються наступні види діяльності:

- виробничі (технологічні) процеси;
- проектування;
- організація, планування та управління;
- наукові дослідження;
- бізнес-процеси.

Галузі, в яких автоматизація є актуальною: виробництво сталі, гірничої справа, машинобудування, хімічне виробництво, харчова промисловість, енергетика, керування автомобільним, залізничним і повітряним транспортом.

Автоматика сприяє підвищенню результатів праці та економії енергоносіїв.

У результаті застосування автоматичного регулювання підвищується надійність управління і культура експлуатації агрегатів, створюються умови для багатоагрегатного обслуговування, підвищується якість виготовленої продукції.

На багатьох об'єктах для організації правильного технологічного процесу необхідно довгостроково підтримувати задані значення різних фізичних параметрів або змінювати їх у часі за визначеним законом. Унаслідок різних зовнішніх впливів на об'єкт ці параметри відхиляються від заданих. Оператор або машиніст повинен так впливати на об'єкт, щоб значення регульованих параметрів не виходили за припустимі межі, тобто керувати об'єктом. Окремі функції оператора можуть виконувати різні автоматичні прилади. Вплив їх на об'єкт здійснюється за командою людини, яка стежить за станом параметрів. Таке керування називають автоматичним. Щоб цілком виключити людину з процесу керування, система повинна бути замкнутою: прилади повинні стежити за відхиленням регульованого параметра і відповідно давати команду на керування об'єктом. Така замкнута система керування називається системою автоматичного регулювання (САР).

Сучасний етап розвитку автоматизації характеризується значним ускладненням задач автоматичного керування: збільшенням числа регульованих параметрів і взаємозв'язком об'єктів регулювання; підвищенням необхідної точності регулювання, їхньої швидкодії; збільшенням дистанції керування тощо. Ці задачі можуть бути вирішені тільки на базі сучасної електронної техніки, широкого впровадження мікропроцесорів й універсальних комп'ютерів.

З технічної точки зору, автоматизація може розглядатися як останній етап промислової революції. Перший етап цієї революції можна було б охарактеризувати словом «механізація»; ключовим чинником на цьому

етапі було використання механізмів і машин замість м'язів. Протягом одного століття частка фізичної праці людини та тварин в промисловості і сільському господарстві знизилася з 90 до приблизно 10%. Малоймовірно, що автоматизація змінить це співвідношення, тому що більшість людей більше не служать в якості в'ючних тварин або простих джерел енергії.

Найважливішою характеристикою автоматизації є здатність машин до саморегулювання, що стало можливим завдяки техніці зворотного зв'язку. Зворотній зв'язок, поєднаний зі швидкою і автоматичною обробкою інформації, - ось у чому секрет широкого поширення і успіхів автоматизації.

Найяскравіші досягнення в управлінні процесами були результатом використання цифрових комп'ютерів. Цифрові комп'ютери можуть бути запрограмовані так, що будуть справлятися з непередбаченими ситуаціями, які можуть виникнути у технологічному процесі. При цьому автоматично кероване обладнання може функціонувати з винятково малими допусками і негайно реагувати на відхилення від правильного перебігу процесу. Сучасні телеметричні засоби дозволяють інтегрувати ці комп'ютери в єдину інформаційну систему управління ресурсами.

Зусилля з автоматизації деяких операцій виробництва почалися із розробки верстатів із числовим програмним керуванням. Коли в середині 1970-х років стали доступні мікропроцесори, з'явилося комп'ютерне числове управління, яке дозволило створити верстати керовані окремими перепрограмовувальними мікропроцесорами, що виявилися економічно ефективними.

Успіхи в інформаційній технології, особливо в інтерактивній графіці, зв'язку, системи управління базами даних та прикладне програмне забезпечення, дозволили розвинути два важливі напрями проектування з допомогою комп'ютерів (САПР) та виробництво з допомогою комп'ютерів(АСУП).

1 Характеристика підприємства як об'єкта автоматизації

1.1 Характеристика господарської діяльності підприємства

ТОВ РБАЦ «Златопольє» спеціалізується на випуску та реалізації сільськогосподарських машин: сівалок, жаток, культиваторів, навантажувачів, самохідних косарок, зчіпок для двосівалочних агрегатів, а також товарів народного вжитку: причепів вантажних до легкових автомобілів, ручного ґрунтообробного інструменту та інше.

Якість вироблюваної продукції і щорічне освоєння нових моделей сільськогосподарських машин повністю задовольняють замовників, про що свідчать постійне нарощування випуску продукції та поставка її не тільки на внутрішній ринок, але й у регіони Середньої Азії, Балтії та інших країн.

Завод виготовляє посівну, ґрунтообробну та збиральну техніку для агропромислового комплексу, зокрема спеціалізується на виготовленні сівалок для посіву зернових і орних культур, культиваторів для суцільної і міжсмугової обробки ґрунту.

Виробництво має незалежне інженерне забезпечення. Інженерно-технічні служби виконують повний цикл робіт — від розробки до впровадження у виробництво сільськогосподарської техніки, що виробляється на підприємстві.

Провідна роль полягає в задоволенні потреб селян у сільськогосподарських машинах базується на створенні нової техніки на основі нових технологій вирощування сільськогосподарських культур, універсальності моделей, впровадженні новітніх комп'ютерних систем проектування та постійним підвищенням рівня технології виробництва.

Вся продукція, що випускається підлягає, згідно законодавства України, обов'язковій сертифікації, має сертифікати відповідності в системі УкрСЕПРО.

2 Огляд існуючих рішень

2.1 Загальні поняття про багатоцільові верстати

Багатоцільовий верстат - це металорізальний верстат, призначений для виконання різних видів обробки різанням, оснащений ЧПУ і автоматичною зміною інструменту.[3]

Багатоцільові верстати, які поєднують можливості токарних верстатів з ЧПУ, фрезерних обробних центрів, в даний час є однією з найбільш динамічно розвиваючих концепцій металообробки. Поєднання п'яти-координатної обробки з автоматичною зміною інструменту дозволяє виконувати безліч операцій. Можливо навіть виконання таких операцій як шліфування, зубофрезерування, загартування. Крім технологічної гнучкості можливо отримати ще і високу надійність.

Серцем верстата є інструментальний шпиндель, який може повертатися щодо осі В верстата, за рахунок цього забезпечується складна траєкторія переміщення інструменту. Оснащені сучасною системою ЧПУ, багатоцільові верстати можуть виконувати операції, для яких раніше використовувалися більш складні верстати або навіть кілька верстатів. Конструкції багатоцільових верстатів постійно удосконалюються, додається все більше нових можливостей. В якості опції можна замовити додатковий токарний шпиндель, а також револьверну голівку для того, щоб поліпшити технологічні можливості, підвищити продуктивність і економічну ефективність обробки.

На багатоцільових верстатах можна повністю обробляти вали, корпуси, лопатки турбін, та багато інших деталей. Крім того, ці верстати підходять для будь-якого типу виробництва, від масового до одиничного.

Основні переваги, якими забезпечують багатоцільові верстати це менший час обробки, збільшення такту випуску, стабільність якості продукції. Плюсом обробки за один установ є виключення похибки, що з'являється при переустановленні заготовки. Також необхідно зазначити, що

програмування багатоцільового верстата складніше, ніж токарних, фрезерних обробних центрів з ЧПУ, тому потрібен висококваліфікований персонал; через високу складність обладнання потрібно відповідне обслуговування і забезпечення безпеки роботи. Але ці завдання ефективно вирішуються верстатобудівниками, розвиваються системи управління і програмне забезпечення.

Багатоцільові верстати призначені для свердлильно-фрезерно-розточної обробки призматичних, конусних і плоских деталей, а також для токарної обробки деталей типу тіл обертання з наступним їх свердлінням, фрезеруванням і розточуванням.

Верстати з ЧПУ для гнучкого механікооброблюючого виробництва краще створювати на базі уніфікованих компонентів, використовуючи принцип агрегатно-модульного будування.

Ряд уніфікованих конструктивних компонентів верстатів, визначений виконуваними в процесі обробки функціями, і включає в себе:

- несучі елементи конструкції (станини, стійки, портали тощо);
- шпиндельні коробки з проводами, що забезпечують потрібні швидкості і сили різання;
- столи з прямолінійними і круговими рухами разом з приводами подачі, що забезпечують взаємний простір переміщення інструмента і оброблювального виробу;
- допоміжні прилади для накопичення і заміни ріжучих інструментів на станку (магазини, автооператори з приводами і оснащеннями);
- пристрої для автоматичної заміни заготовок (накопичувачі і навантажувально-розвантажувальні механізми, маніпулятори або промислові роботи), що забезпечують роботу верстата в складі РТК і ГВМ.

Основною особливістю уніфікованих конструкційних компонентів верстатів є можливість управління їх роботою пристроєм ЧПУ, що

забезпечує швидке і автоматичне переналаштування на обробку різноманітних виробів.

Для можливості управління пристроєм ЧПУ є окремі модулі і їх компоненти оснащуються регулюючими або слідкуючо-регулюючими електроприводами, а також датчиками зворотного зв'язку по положенню рухомих елементів або по параметрах технологічного процесу для реалізації адаптивних функцій.

2.2 Аналіз існуючих багатоцільових верстатів

В даний час розроблено багато видів багатоцільових верстатів, їх класифікують в залежності від виконуваних задач.[5,6]

По принципу зміни інструментів станки з ЧПУ поділяються на три групи:

- з ручною зміною;
- з автоматичною зміною в револьверній головці;
- з автоматичною зміною в магазині.

По принципу зміни заготовок станки з ЧПУ поділяються на станки з ручною і автоматичною зміною заготовок.

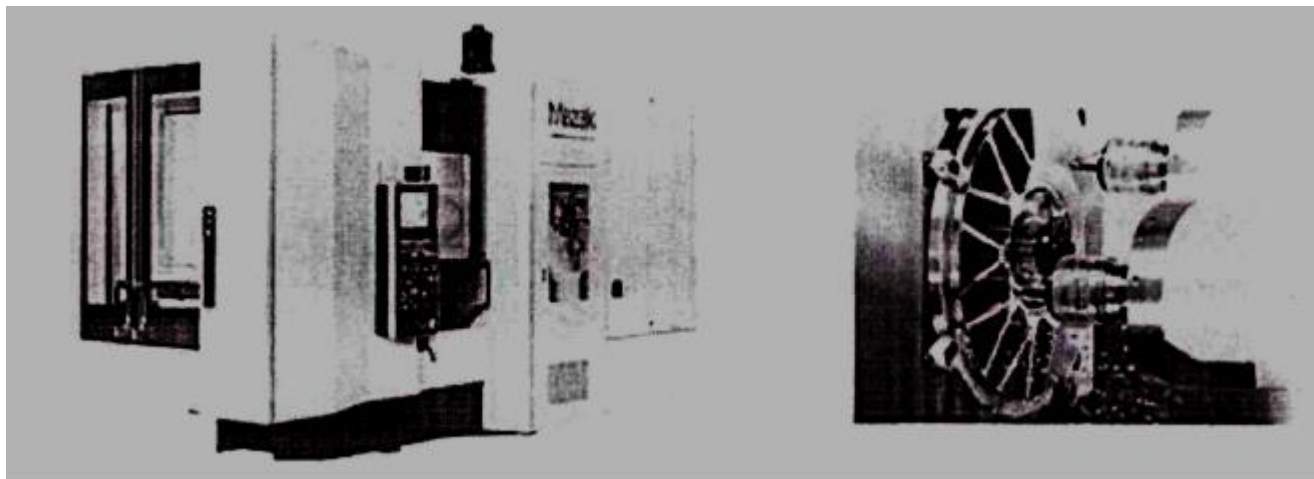
Верстати з автоматичною зміною заготовок оснащені автоматичними приверстатними накопичувачами заготовок можуть працювати довгий час без участі оператора.

Такі верстати дістали назву гнучких виробничих модулів (ГВМ).

Багатоцільові верстати для обробки заготовок корпусних деталей підрозділяють на горизонтальні (рис. 2.1) і вертикальні (рис. 2.2).

Вертикальний багатоцільовий верстат з внутрішніми ребрами жорсткості цієї моделі складається з станини, колони та інших комплектуючих. Володіє такими характеристиками, як надійність, міцність конструкції, довговічність, висока точність обробки, створення гладкої поверхні, екологічність, зручність управління, вдалий дизайн. Двигун системи забезпечує високу потужність і швидкість роботи верстата.

Швидкість обертання шпинделя становить 8000 об/хв, швидкість швидкої подачі на осях X і Y дорівнює 32 м/хв, на осі Z – 30 м/хв.



а)

б)

Рисунок 2.1 - Зображення горизонтального багатоцільового свердильно-фрезерно-розточного верстату з ЧПУ: а) Зовнішній вигляд, б) Положення шпинделя верстата

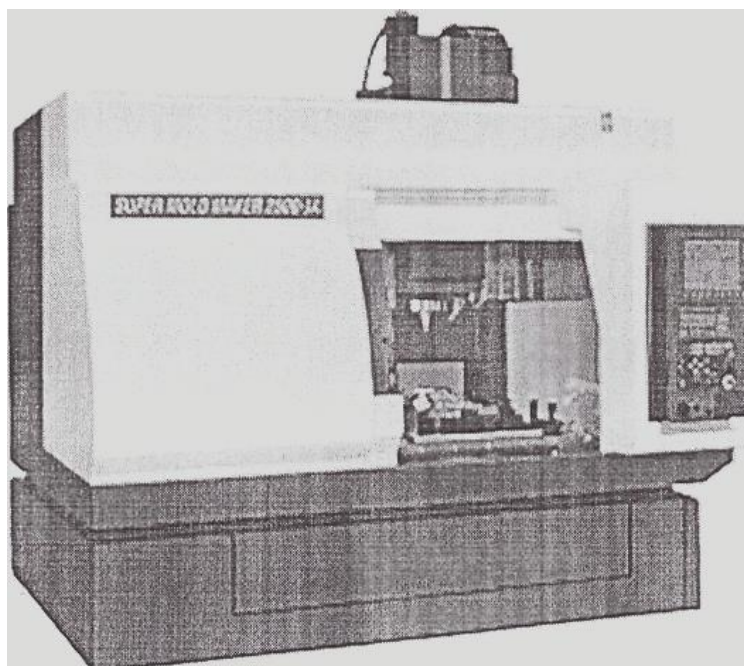


Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд вертикального багатоцільового верстату з ЧПУ

2.3 Огляд існуючих систем керування

Сучасні металорізальні верстати можуть бути оснащені різними системами керування. До найбільш популярних систем належать наступні [4].

Системи числового програмного управління WL4T, WL4M і WL5M призначені для управління металообробними верстатами, оснащені регульованими або кроковими приводами подач. Всі ці системи мають конфігуруючий контролер електроавтоматики і в комплект поставки входить програма-редактор електроавтоматики для можливості прив'язки системи до конкретного обладнання. УЧПУ WL4T (токарний варіант) УЧПУ WL4M (фрезерний варіант) УЧПУ WL5M (фрезерний варіант)

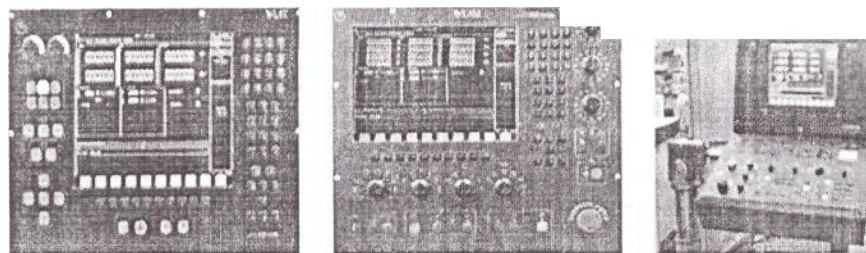


Рисунок 2.3 – Зображення систем управління верстатів

Система числового програмного управління WL4T є базовою моделлю 2-х - координатної контурної системи управління другого покоління сімейства WL4 і призначена для використання в карусельних верстатах і токарних верстатах з базовими функціями автоматичного керування. Система числового програмного управління (СЧПУ) WL4M і WL5M - для верстатів фрезерної групи. WL4M орієнтована на застосування в інструментальному виробництві. В СЧПУ сімейства WL закладені наступні можливості:

- Підключення цифрових (енкодер) і аналогових (резольвер, сельсин, індуктосин) датчиків положення до 8 каналів цифрування,

можливість розширення; частота опитування датчиків задається параметрично, до 4.885 кГц;

- Аналогове (16-бітний ЦАП 10В) і цифрове управління регульованими приводами подач до 6 каналів управління, можливість розширення; частота оновлення керуючих впливів на привід задається параметрично);

- Комбіноване управління по шляховому каналу (розузгодження, швидкість, прискорення);

- Можливість тонкого налаштування колійного каналу і корекція швидкісного каналу управління; можливість застосування в приводах двигунів без тахогенераторів;

- Одночасна і незалежна обробка групових переміщень по осях (вихід в нуль, позиціонування в точку);

- Лінійна, кругова, гвинтова, сплайнова інтерполяція (до 8 осей) з забезпеченням заданої контурної подачі; відпрацювання поліноміальних параметрично заданих, згладжування кривих; частота сервоцикла інтерполяції задається параметрично, до 2кГц; верстатах використовуються в інструментальному виробництві.

Sinumerik 802C base line - це система ЧПУ для управління двома або трьома осями подачі і шпинделем з регульованою швидкістю. Шпиндель і осі подач використовують аналогове керування ($\pm 10\text{В}$) і підключення інкрементальних датчиків зворотного зв'язку з TTL сигналом.

SINUMERIK 802C base line забезпечує найпростіший спосіб автоматизації верстату. Сімейство пристроїв ЧПУ SINUMERIK 802C base line має наступні особливості:

- виконання єдиним моноблоком, що має компактні розміри
- програмне забезпечення входить до складу поставки
- проста і швидка інтеграція з компактними верстатами
- просте програмування і зручне управління.

Технічні і функціональні можливості ЧПУ SINUMERIK 802C base line:

- обсяг пам'яті для програм користувача 256 Кб
- робота із завантаженням програм через RS232
- 8-дюймовий LCD екран
- плівкова клавіатура
- 12 програмованих клавіш
- вбудовані цифрові входи/виходи - 48/16
- одночасна лінійна інтерполяція до 3-х осей
- 3 кнопки і 2 індикатора процентовки подачі шпинделя і 2

маховичка

SIEMENS SINUMERIK 802D sl - це система управління, яка об'єднує всі компоненти ЧПУ (NC, PLC, HMI) в одному пристрої. Через інтерфейс DRIVE-CLiQ можливо підключити до 5 цифрових приводів. Із них 2 осі можуть бути заявлені як шпинделі. Просте управління входами/виходами здійснюється через шину PROFIBUS. Така конструкція забезпечує дуже просте і надійне підключення з мінімумом з'єднувальних проводів. Разом з модульною структурою системи приводів Sinamics S120, система управління спроектована для забезпечення максимальної гнучкості. Обсяг функцій системи управління робить її ідеальною для використання на стандартних токарних, фрезерних, токарно-фрезерних і шліфувальних верстатах, починаючи з одиничного виробництва і закінчуючи 3-осьовими завданнями виробництва прес-форм. Наявність додаткової не інтерпольованої осі в групі приводів, керованої від PLC, розширює область застосування системи.



Рисунок 2.4 - Зображення систем управління токарного верстата
ЧПУ SIEMENS

Для нескладних верстатів з кількістю керованих осей до 4 ідеально підійде недорога, але повнофункціональна система ЧПУ моделі Fagor 8040 CNC, яка оснащується кольоровим або монохромним рідкокристалічним дисплеєм і різними панелями оператора в залежності від області застосування. Дана система входить в пакет найбільш конкурентоспроможних пропозицій компанії Fagor.

Системи ЧПУ серії Fagor 8055 призначені для управління верстатами з кількістю осей до 7, серії Fagor 8040 CNC - з кількістю осей до 4, і серії Fagor 8070 CNC - з кількістю осей до 16.



Рисунок 2.5 - Зображення систем управління токарного верстатів
ЧПУ FAGOR



Рисунок 2.6 - Зображення систем управління токарного верстатів
ЧПУ HEIDENHAIN ITNC530

HEIDENHAIN ITNC530 призначена для роботи на оброблювальних центрах, на фрезерних і свердлильних верстатах. Має вбудований блок керування цифровими приводами. ITNC530 може керувати 13 осями і шпинделем. Час обробки кадру становить 0,5 мс. В якості програмної пам'яті використовується жорсткий диск. У двопроцесорній версії обладнання ITMC 530 система додатково оснащена операційною системою Windows XP, яка дозволяє використовувати стандартні прикладні програми Windows.

Системи ЧПУ, FANUC 18i-MB є досить поширеними для багатоцільових верстатів.

GE Fanuc - спільне підприємство американського промислового гіганта General Electric і японської компанії Fanuc, відомої своїми пристроями ЧПУ і роботами. Сьогодні GE Fanuc - один з провідних

виробників програмно-апаратних засобів для автоматизації промислових підприємств.

Максимально загальна кількість осей управління: 26 осей (20 осі подачі, 6 шпинделів)

Максимальна кількість одночасних контролюючих осей: 5 осей

Особливістю даної моделі є обробка складних функцій робота зі складними формами на високій швидкості, з високою точністю та якістю.



Рисунок 2.7 - Зображення систем управління токарними верстатами ЧПУ Fanuc

Із наведених вище систем керування, було обрано систему керування моделі FANUC 0i-MB, тому що ця система є дуже функціональною. Забезпечення керування великою кількістю осей та легкість в управлінні робить її більш пріоритетною для даного типу верстатів.

3 Характеристика багатоцільового верстату MC 032

3.1 Опис верстата MC 032

Вертикальні обробні центри призначені для різноманітних металорізальних операцій з високою швидкістю і точністю [3,4].

Осі X, Y і Z, базуються на інтегрованих напрямних фірми ІНА, що дозволяє виробляти високоточну обробку деталей із чавуну, сталі, алюмінію, кольорових металів і пластмас при оптимальній стабільності, гарної вантажопідйомності і високої продуктивності. Стабільна чавунна станина центру приймає великі навантаження і максимально гасить вібрації. Високоточні кулькові гвинтові приводи-гвинтові пара осі Y, діаметр 40 мм, закріплена на центрі осі і встановлена на двох підшипниках.

Електродвигун подачі встановлений позаду під колоною з метою захисту від забруднення та пошкодження. Масивні хрестові полозок підтримують робочий стіл по всій довжині поздовжнього ходу, щоб запобігти його провисання. Кулькові гвинтові приводи-гвинтові пара осі X закріплена в центрі полозка. Електродвигун подачі осі X цілком закривається телескопічним захистом від забруднення та пошкодження. Робочий стіл встановлений на прецизійних інтегрованих напрямних. Шпиндель і шпиндельна головка, встановлюються на колоні як єдиний вузол. Всі зусилля різання рівномірно передаються колоні протягом всього робочого ходу по осі Z. Вузол збалансований з допомогою противаги розташованого в колоні.

Шпиндель встановлений 4-х прецизійних підшипниках 4-го класу точності з кутовим контактом, що забезпечують високу твердість і точність навіть при самих важких режимах різання.

Головний електродвигун обробного центру - асинхронний, передає обертання шпинделя з допомогою пасової передачі. Конус шпинделя ISO / BT40. Автоматичний охолодження забезпечує очищення конуса шпинделя і хвостовика інструменту перед затиском нового інструменту. Мінімальна

відстань між торцем шпинделя і поверхнею столу 125 мм, максимальна - 635 мм. Це дозволяє встановлювати деталі прямо на робочий стіл без додаткових пристосувань і полегшує налагодження та перевірку деталей. Обробні центри М 550 і М 500 обладнані 24-х позиційним магазином.

Час зміни інструменту - менш ніж 3 секунди. М 400 і М 450 обладнані 16-ти позиційним інструментальним горизонтальним магазином, час зміни інструменту 10 сек. Робоча зона верстата повністю закрыта. Це забезпечує захист, як оператора, так і приміщення від стружки і бризок ЗОР.

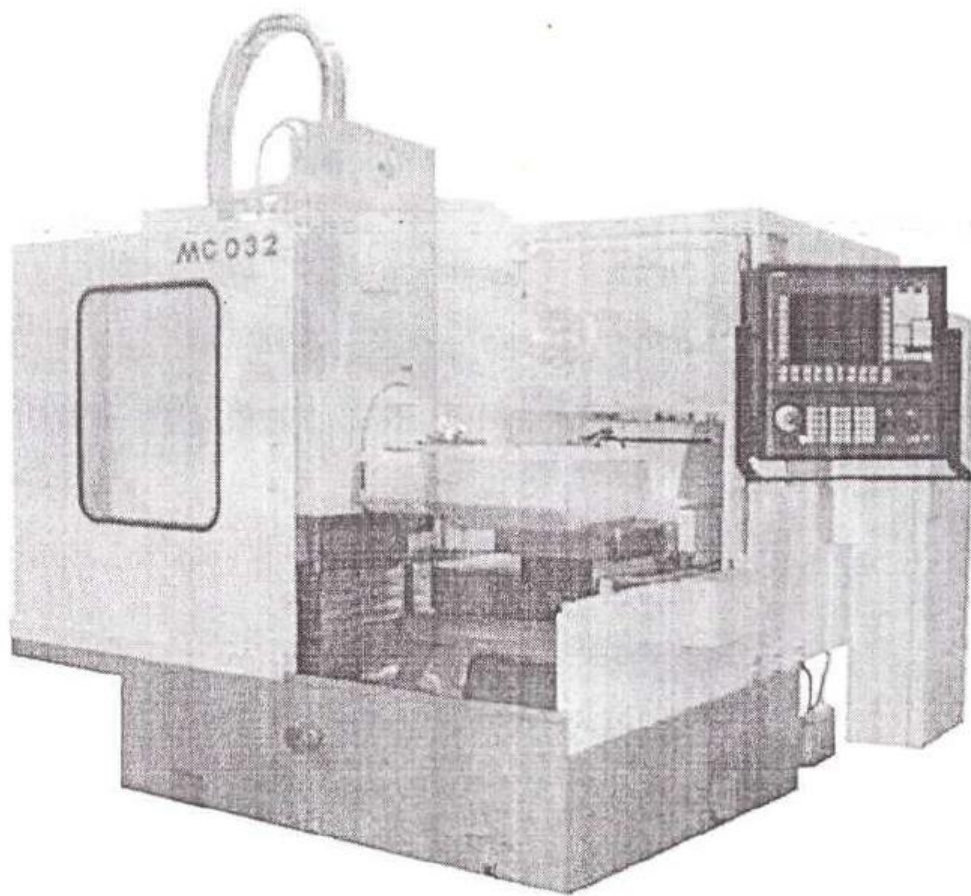


Рисунок 3.1 - Багатоцільовий верстат МС 032

3.2 Технічні характеристики верстату

Станина

- Монолітний виливок із чавуну для більшої стабільності, який забезпечує відмінне стружковідведення.
- Загартовані і відшліфовані напрямні за якими супорт по осі X, (шпиндельна коробка) виконує свій поздовжній хід.

Колона

- Стабільно спроектована. Монолітний виливок із чавуну, закріплений болтами до станини її задньої частини, де містяться вертикальні напрямні для супорта по осі Y.

Шпиндель

- Чавунний виливок для шпиндельної коробки в якому знаходиться двоступенева трансмісійна шестернева передача.
- Шпиндельний блок змонтований на попередньо затягнуті і змазані роликові підшипники класу точності HG.
- DC електродвигун шпинделя, потужністю 11 кВт.
- Швидкість обертання шпинделя до 6000 об/хв.
- Повітряний обдув конуса шпинделя.

Засувки подач

- АС Сервомотори з високим крутним моментом, пов'язані з високопрецизійні кулькові гвинтові приводи, з гвинтовими парами діаметром 40 мм. і різьбленням 10.
- Відмінний захист напрямних від стружок.

Робочий стіл

- Оригінальна компактна концепція робочого столу. Стіл виконує наступні функції:
 - Лінійний хід по напрямних колони (вісь Y);
 - Нахил столу (від -90° до +136°) (вісь A);
 - Обертання стола (0 до 360°) (вісь B);

- Висока точність позиціонування, забезпечена серво засувкою та прецизійними радіально-аксіальними підшипниками на яких змонтований робочий стіл.

ЧПУ

- Мікропроцесор ЧПУ з інтегрованим персональним комп'ютером - ЧПУ FANUC 0i;

- Контроль по 5 осям;
- Кольоровий дисплей LCD; DNC зв'язок;
- Розширення вхідних даних і ступінь дисплея до 1 мікрометра для лінійних осей, і до $0,0001^{\circ}$ для кутових осей;

- Одночасний контроль 3 основних осей;
- Корекції по довжині інструменту та зазору;
- Вимірювальна цифрова система зі зворотним зв'язком;
- Зворотній зв'язок за допомогою пульсодера по кожній з осей;
- Захист робочої зони;
- Огорожа для цілісного захисту робочої зони;
- Замикання замків під час роботи для досягнення максимальної безпеки.

Основні паспортні дані даного верстата наведені в таблиці 2

Таблиця 2 - Паспортні дані багатоцільового верстату MC032

Параметри	Розмірність	Значення
1	2	3
Переміщення по осях		
вісь X	мм	550
вісь Y	мм	500
вісь Z	мм	500

Продовження таблиці 2

1	2	3
Поворотний стіл		
Вісь А	град	220
Вісь С	град	360
Точність позиціонування		
Лінійні осі А, Y, Z	мм	0,03
Кругові осі А і С	град/с	40/20
Робочий стіл		
Діаметр	мм	320
Максимальна вага оброблюваної деталі	кг	100
Потужність головного двигуна		
Обороти шпинделя	об/хв	12...6000
Потужність головного електропривода	кВ	11
Подання	Nm	227
Осі X, Y, Z	мм/хв.	1...4000
Осі А і С		0,1...2
Прискорений хід по осях X, Y, Z	мм/хв	12000
Прискорений хід по осі А		5
Прискорений хід по осі С		10
Пристрій автоматичної зміни інструменту		
Гнізда в магазині	No	32
Максимальний діаметр інструменту	мм	80

Продовження таблиці 2

1	2	3
Максимальна довжина інструменту		250
ЧПУ	Fanuc	
Встановлена потужність	кВ	40
Вага	кг	7500

4 Опис функціональної та електричної схеми блоку керування

4.1 Розробка загальної функціональної системи верстата МС 032

Верстат є складною функціональною системою, що поєднує системи більш низького рівня:



Рисунок 4.1 - Сукупність функціональних систем

Система формоутворення призначена для одержання на обробленій заготовці поверхні, що задаються керуючою програмою. Для одержання заданої поверхні деталі необхідно правильно забезпечити взаємне переміщення заготовки й інструмента, а саме: головний рух і рух подачі.

Система обслуговування верстата призначена для скорочення втрат часу при допоміжних операціях в автоматичному режимі роботи верстата.

Несуча система верстата – це комплекс базових деталей, з'єднаних у порядку, що забезпечує виконання верстатом робочих функцій. До несучої системи кріпляться начіпні деталі і системи, що забезпечують функціонування верстата.

Система енергоживлення призначена для забезпечення силовою електроенергією систем верстата. Складається з пристроїв, що перетворюють силову електроенергію таким чином, щоб напруга відповідала напрузі живлення електроапаратури.

Система керування верстатом призначена для забезпечення функціонування вузлів, механізмів і систем верстата, а також для керування у різних режимах роботи.

Функції УЧПУ поділяють на основні та додаткові. Основна функція УЧПУ – керування приводами подач у відповідності із заданою програмою. Додаткові функції передбачають зміну за програмою швидкостей шпинделя, вигляду інструменту тощо.

Програмне забезпечення УЧПУ передбачає такі режими роботи:

- автоматичний;
- напіваавтоматичний;
- пошук;
- введення;
- редагування;
- тест;
- ручне управління.

Автоматичний режим роботи призначений для відпрацювання на верстаті технологічної програми, що вводиться з ФСУ, пам'яті, або з ЕОМ верхнього рівня.

Перехід у автоматичний режим можливий з напіваавтоматичного режиму у будь-який час; з інших режимів – у випадку завершення даного. При роботі в автоматичному режимі є можливість вибору додаткових

підрежимів: відпрацювання програми з ФСУ, з пам'яті УЧПУ, зупинка у кінці програми.

Режим редагування дозволяє редагувати управляючі програми і виводити відредаговану програму на зовнішній пристрій зберігання.

Блок приладів **Fanuc 0i** призначений для приймання сигналів від периферійних пристроїв і верстату, їх аналізу і видачі керуючих сигналів у відповідності до алгоритму роботи, який закладено у програмне забезпечення, на верстат і периферійний пристрій.

Блок регулювання складається з керуючого тиристорного випрямляча (КТВ), підсилювача постійного струму (ППС), генератора пилоподібної напруги (ГПН), формувача імпульсів (ФІ), розподільника імпульсів по тиристорам (РІ), джерела живлення (ДЖ), схеми обмеження струму (СОС), стабілізатора обмоток збудження (СОЗ).

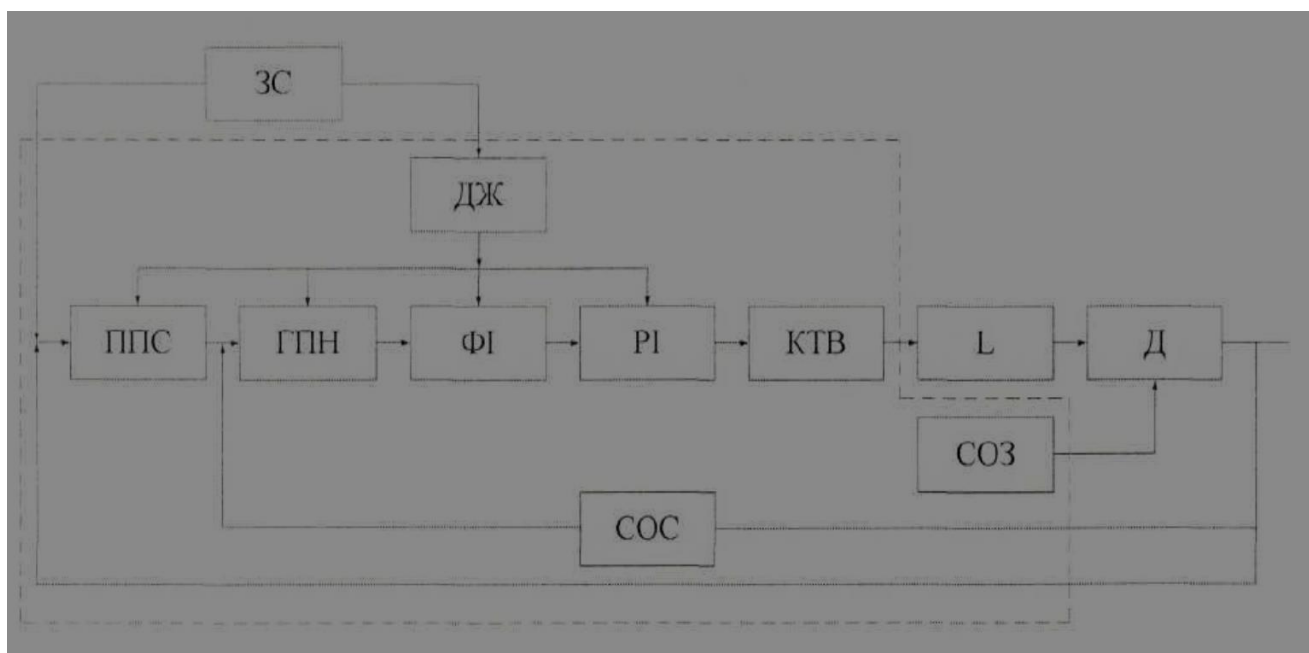


Рисунок 4. 2 - Схема функціональна приводу

Керуючий тиристорний випрямляч (КТВ) призначений для перетворення змінної напруги в регулюючу випрямну напругу.

Підсилювач постійного струму (ППС) призначений для віднімання сигналів задавача швидкості і від'ємного зворотнього зв'язку з тахомоста

для типорозмірів ETIE1, ETIE2, з тахогенератора для типорозмірів ETIE1, ETIE2 і підсилення різного сигналу.

Генератор пилкоподібної напруги (ГПН) призначений для створення пилкоподібних імпульсів з частотою $2f$ мережі, синхронізованих з напругою мережі.

Формувач імпульсів (ФІ) призначений для формування прямокутних імпульсів керування тиристорами.

Розподільник імпульсів (РІ) призначений для розподілення імпульсів на півперіоди випрямленої напруги на відповідні тиристори, які в даний півперіод мають на аноді додатні значення напруги мережі.

Джерело живлення (ДЖ) призначено для живлення кіл керування і кола задавачів швидкості.

Схема обмеження струму (СОС) призначена для обмеження струму якоря.

Стабілізатор напруги обмоток збудження (СОЗ) призначений для живлення постійною напругою обмотки збудження двигуна.

Дросель (L) складається з двох обмоток: силової та компенсаційної. Початки обох обмоток з'єднанні. Силова обмотка дроселя входить разом з якірною обмоткою двигуна в одне плече тахомоста, а компенсаційна обмотка послідовно з резисторами R_2 , R_3 в друге плече тахомоста для приводів типу виконання ETIE1, ETIE2. Такий спосіб створення тахомоста дозволяє здійснити реверс двигуна по якірному колу, що зменшує час перехідного процесу при реверсі і збільшує надійність реверса в порівнянні з реверсом по колу збудження.

4.2 Характеристика електричної системи числового програмного керування на базі Fanuc 0i

Керуючий тиристорний випрямляч – це однофазний напівкерований випрямляючий міст, який складається з ключів V43, V44 і тиристорів V45, V46. Кола R55, C20, R56, C21, R58 і C25 призначені для захисту тиристорів і ключів від комутуючих перенапруг і перенапруг, що виникають у первинній мережі. Захист від коротких замикань виконуються запобіжниками F1, F2.

Підсилювач зібраний на мікросхемі АІ. Коло зворотнього зв'язку підсилювача R16, C4 призначене для формування необхідної динаміки приводу. Коло R19, C6, C5 забезпечує стійкість підсилювача.

Всі випрямлячі зібрані по двохпівперіодній схемі на трансформаторі з середньою точкою.

Випрямляч з фільтрами, зібраний на півобмотках трансформатора T1, діодах VD11, VD12, резисторі R27, стабілітронах VS8, VS9, VS13, VS14, конденсаторах C8, C9, C11, який видає чотири стабілізовані напруги: +15В, -15В, +10В, -10В з відхиленням не більше $\pm 2В$ відносно загальної точки x2-5, з достатньо малою пульсацією ($2f$ мережі). Ці напруги живлять ППС, емітерний повторювач ГПН, одно перехідний транзистор VT23, кола задавачів швидкості.

Випрямляч зібраний на обмотках 31, 32, 33 трансформатора T1, діодах VD17, VD18 служать для синхронізації ГПН з частотою $2f$ мережі.

Випрямляч з фільтром, зібраний на тих самих обмотках трансформатора T1, діодах VD17, VD18, VD22 і конденсаторі C14 забезпечує напругу - 20В відносно контактів 23. Ця напруга живить транзистори VT26, VT27 розподільник імпульсів.

Випрямляч з фільтром, зібраний на тих самих обмотках трансформатора T1, діодах VD19, VD20 і конденсаторі C13 забезпечує

напругу +20В відносно контактів 23. Ця напруга живить транзистори VT28, VT29 узгоджуючи трансформаторним каскадом.

Випрямляч стабілізатора зібраний по мостовій однофазній схемі з одним тиристором.

Сигнал зворотнього зв'язку з обмотки збудження через фільтр R51, C17, подається па підсилювач постійного струму, зібраний на транзисторі VT35. На той самий вхід подається сигнал зворотної полярності від джерела опорної напруги, зібраної па діоді VD38, резисторах R47, R48 і стабілітроні VD36. ППС керує зарядним струмом ГПН, зібраних на транзисторі VT34, резисторах R43, R45, конденсаторі C18. Величина зарядного струму визначає час заряду накопичувального конденсатора C18, а значить і момент спрацьовування генератора імпульсів, зібраного на одпоперехідному транзисторі VT37. Так здійснюється керування імпульсами по фазі. Блокування імпульсів в наступний півперіод здійснюється тим, що напруга на стабілітроні відсутня, так як він працює в тому випадку на прямій гілці своєї вольт-амперної характеристики.

Принцип роботи блока регулювання заснований на здатності керуючих ключів змінювати в широких межах середнє значення випрямної напруги шляхом зміни часу тиристорів по відношенню до початку додатної півхвилі підводячого змінної напруги. Згладжування випрямної напруги КТВ відбувається за допомогою фільтра, створеного індуктивністю.

5 Модернізація системи керування приводу подачі

5.1 Вихідні дані для розробки САР

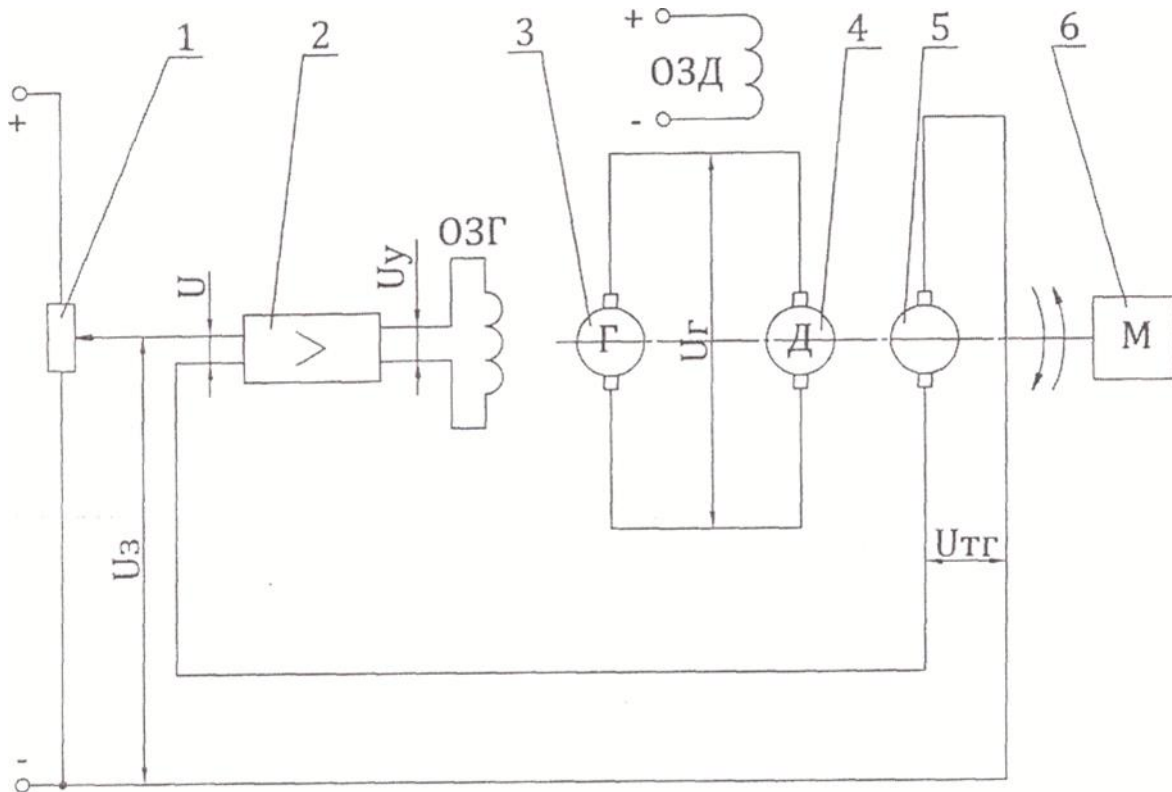


Рисунок 5.1 - Принципова схема САР частоти обертання електродвигуна постійного струму

- 1 - задавач (потенціометр);
 - 2 - підсилювач;
 - 3 - генератор;
 - 4 - електродвигун постійного струму;
 - 5 - тахогенератор постійного струму;
 - 6 - робочий механізм (навантаження);
- ОЗГ - обмотка збудження генератора;
ОЗД - обмотка збудження двигуна.

Рівняння елементів системи:

$$\text{Підсилювача:} \quad T_y \left(\frac{dU_y}{dt} \right) + U_y = k_y U, \quad (1)$$

$$\text{Генератора:} \quad T_r \left(\frac{dU_r}{dt} \right) + U_r = k_r U, \quad (2)$$

$$\text{Двигуна:} \quad T_D \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + \omega = k_M U_r - k_M M, \quad (3)$$

$$\text{Тахогенератора:} \quad U_{TH} = k_{TH} \omega, \quad (4)$$

$$\text{Рівняння замикання:} \quad U = U_3 - U_{TH}, \quad (5)$$

Параметри:

ω - кутова швидкість двигуна; M - момент статичного навантаження;
 U і U_y відповідно вхідна і вихідна напруги підсилювача; U_{TH} напруга тахогенератора; U_3 - задане значення напруги; U_r - напруга генератора.

Вихідні дані:

$$T_y = 0,020 \text{ с}; \quad k_y = 5,5; \quad k_r = 1,2; \quad T_r = 0,29 \text{ с}; \quad k_{ДВ} = 8,4 \text{ об/хв.} \cdot \text{В}; \quad T_{ДВ} = 0,85 \text{ с};$$

$$k_M = 0,6 \text{ об/хв.} \cdot \text{кГм}; \quad M = 3,7 \text{ кГм};$$

$$k_{TH} = 0,05 \text{ В} \cdot \text{хв./об.}$$

Вимоги до синтезованої САР:

- час регулювання приймається зменшеним на 25% від отриманого для заданих параметрів системи;
- максимальне перерегулювання не повинне перевищувати 25%;
- запас стійкості за модулем не менше 15 дБ, за фазою не менше 30°;
- в процесі синтезу САР розробити систему, оптимальну за швидкодією.

5.2 Устрій, принцип регулювання та принцип дії САР

Завдання САР - підтримка заданої частоти обертання електродвигуна постійного струму на заданому рівні [1].

На рисунку 5.1 показано принципову схему САР частоти обертання електродвигуна постійного струму. Частота обертання двигуна (об'єкта керування) задається за допомогою задавача (потенціометра), опір якого визначає напругу U_3 на виході задавача. Отримана напруга підсилюється підсилювачем і надходить на генератор частоти обертання (керуючий орган) який керує роботою двигуна за допомогою напруги U_g . Частота обертання двигуна вимірюється тахогенератором, на який подається напруга U_{tg} .

В усталеному режимі, після визначення необхідної частоти роботи двигуна за допомогою задавача, після підсилювача, на обмотці збудження генератора формується електрорушійна сила, котра керує роботою генератора. Генератор у свою чергу подає напругу на двигун, обмотка збудження якого підключена до мережі постійного струму, і тим самим встановлює частоту роботи двигуна на постійній частоті. Двигун у свою чергу приводить в дію робочий механізм (навантаження) із заданою частотою обертання. Тахогенератор виробляючи напругу постійного значення, подає її на пристрій порівняння, котрий в усталеному режимі роботи не змінює вихідну напругу підсилювача.

Робочий механізм може представляти собою складну систему, яка здатна збільшувати навантаження на двигун. В свою чергу, зміна навантаження призводить до зміни частоти обертання двигуна. При відхиленні частоти від норми, пропорційне значення відхилення з тахогенератора надходить на порівнюючий підсилювач, де отримане значення порівнюється із заданим. В залежності від величини і знаку похибки генератор буде гальмувати або прискорювати двигун. Тобто, частота обертання двигуна, завдяки даній системі автоматичного

регулювання буде підтримуватись на заданому за допомогою реостата рівні, незалежно від навантаження на двигун постійного струму.

Таким чином, в даній схемі використаний принцип регулювання за відхиленням дійсного значення вихідної величини об'єкта від його заданого значення. Для реалізації принципу керування за відхиленням, САР є замкнутою від'ємним зв'язком. Основною особливістю і перевагою цієї системи є те, що САР реагує на відхилення дійсного значення регульованої величини від заданого значення незалежно від причин, які зумовили це відхилення.

5.3 Функціональна схема САР

На основі принципової схеми САР побудовано функціональну схему САР, яка представлена на Рисунку 5.2.

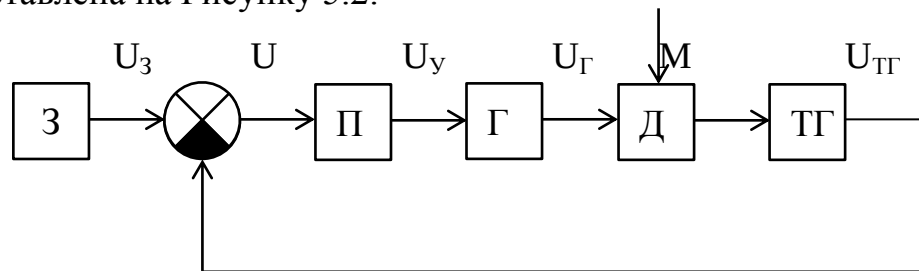


Рисунок 5.2 - Функціональна схема САР частоти обертання електродвигуна постійного струму

З - задаючий пристрій;

П - підсилювач;

Г - генератор;

Д - датчик;

ТГ - тахогенератор.

5.4 Структурна схема САР

При побудові структурної схеми САР були використані диференціальні рівняння елементів схеми. Перейдемо від диференціальних рівнянь елементів системи до передаточних функцій цих елементів. Передаточна функція елемента - це відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної величини при нульових початкових умовах [1].

Для отримання передаточної функції об'єкта прирівняємо до нуля збурююче діяння f , так як наша задача - отримати передаточну функцію за керуючим діянням, отже отримаємо диференціальне рівняння об'єкта в такому вигляді:

$$T_d \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_d \cdot U_r \quad (6)$$

Для отримання передаточних функцій елементів схеми застосовано пряме перетворення Лапласа:

$$T_d \cdot \bar{\omega} \cdot p + \bar{\omega} = k_d \cdot \bar{U}_r$$

, де p - оператор Лапласа.

$$W_d(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{U}_r} = \frac{k_d}{T_d \cdot p + 1} \quad \text{- аперіодична динамічна ланка}$$

Аналогічним чином отримуємо передаточні функції інших елементів системи:

- Підсилювач:

$$W_H(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{U}_y}{\bar{U}} = \frac{k_y}{T_y \cdot p + 1} \quad \text{- аперіодична динамічна ланка;}$$

- Генератор:

$$W_r(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{U}_r}{\bar{U}_y} = \frac{k_r}{T_r \cdot p + 1} \quad \text{- аперіодична динамічна ланка;}$$

Тахогенератор:

$$W_{\pi}(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вх}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{U}_{\pi}}{\omega} = k_{\pi} \quad - \text{підсилювальна динамічна ланка.}$$

З'єднавши типові динамічні ланки відповідно до передачі діянь, отримаємо структурну схему системи автоматичного регулювання тиску повітря.

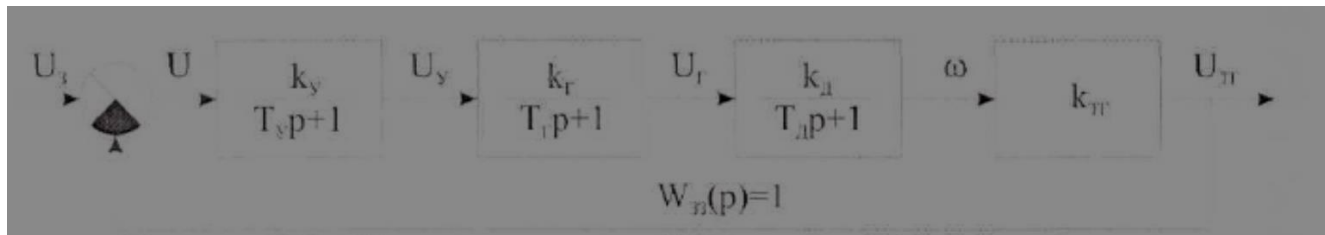


Рисунок 5.3 - Структурна схема САР частоти обертання електродвигуна постійного струму

5.5 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння замкнутої системи

Елементи структурної схеми САР розташовані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи, потрібно перемножити передаточні функції всіх елементів [2]:

$$W_{\text{pc}}(p) = W_U(p) \cdot W_r(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{\pi}(p) = \frac{k_y \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_{\pi}}{(T_y \cdot p + 1) \cdot (T_r \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}$$

Для спрощення запису введемо позначення:

$$k = k_y \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_{\pi}$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи матиме вигляд:

$$W_{\text{pc}}(p) = \frac{k}{(T_y \cdot p + 1) \cdot (T_r \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)} \quad (7)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з урахуванням того, що $W_{\pi}(p) = 1$, розраховується за формулою:

$$\begin{aligned}
W_{\kappa}(p) &= \frac{W_{pc}(p)}{1+W_{pc}(p)} = \frac{\frac{k}{(T_y \cdot p+1) \cdot (T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1)}}{1 + \frac{k}{(T_y \cdot p+1) \cdot (T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1)}} = \\
&= \frac{k}{(T_y \cdot p+1) \cdot (T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1) + k}
\end{aligned}$$

$$W_{\kappa}(p) = \frac{k}{(T_y \cdot p+1) \cdot (T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1) + k} \quad (8)$$

Характеристичне рівняння:

$$\begin{aligned}
(T_y \cdot p+1) \cdot (T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1) + k &= 0 \\
(T_y \cdot T_r \cdot p^3 + T_y \cdot p + T_r \cdot p+1) \cdot (T_d \cdot p+1) + k &= 0 \\
T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot p^3 + T_y \cdot T_r \cdot p^2 + T_y \cdot T_d \cdot p^2 + T_y \cdot p + T_r \cdot T_d \cdot p^2 + T_r \cdot p + T_d \cdot p+1 + k &= 0 \\
T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot p^3 + p^2 \cdot (T_y \cdot T_r + T_y \cdot T_d + T_r \cdot T_d) + p(T_y + T_r + T_d) + 1 + k &= 0
\end{aligned} \quad (9)$$

5.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ, та ЛФЧХ розімкнутої системи

5.6.1. Побудова АФЧХ розімкнутої системи.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну $p = j \cdot \omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω -частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до нескінченості, відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned}
W_K(j\omega) &= \frac{k}{(T_Y \cdot j\omega + 1) \cdot (T_F \cdot j\omega + 1) \cdot (T_R \cdot j\omega + 1)} = \\
&= \frac{k}{(T_Y \cdot T_F \cdot (j\omega)^2 + T_Y \cdot j\omega + T_F \cdot j\omega + 1) \cdot (T_R \cdot j\omega)} = \\
&= \frac{k}{T_Y \cdot T_F \cdot T_R (j\omega)^3 + T_Y \cdot T_F (j\omega)^2 + T_Y \cdot T_R (j\omega)^2 + T_Y \cdot j\omega + T_F \cdot T_R (j\omega)^2 +} \\
&\quad + T_F \cdot j\omega + T_R \cdot j\omega + 1 = \\
&= \frac{k}{(-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot j \cdot \omega^3 + T_Y \cdot j \cdot \omega + T_F \cdot j \cdot \omega + T_R \cdot j \cdot \omega) + (-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 -} \\
&\quad T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1) =
\end{aligned}$$

домножимо на спряжений вираз:

$$\begin{aligned}
&= \frac{k((-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 - T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1) - j(-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot \omega^3 + T_Y \cdot \omega + T_F \cdot \omega +} \\
&\quad + T_R \cdot \omega))}{((-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 - T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1)^2 + j(-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot \omega^3 + T_Y \cdot \omega + T_F \cdot \omega +} \\
&\quad + T_R \cdot \omega))^2}
\end{aligned}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$\begin{aligned}
P(\omega) &= \frac{k(-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 - T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1)}{(-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 - T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1)^2 + (-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot \omega^3 + T_Y \cdot \omega + T_F \cdot \omega +} \\
&\quad + T_R \cdot \omega)^2} = \\
Q(\omega) &= \frac{-k(-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot \omega^3 + T_Y \cdot \omega + T_F \cdot \omega + T_R \cdot \omega)}{(-T_Y \cdot T_F \cdot \omega^2 - T_Y \cdot T_R \cdot \omega^2 - T_F \cdot T_R \cdot \omega^2 + 1)^2 + (-T_Y \cdot T_F \cdot T_R \cdot \omega^3 + T_Y \cdot \omega + T_F \cdot \omega +} \\
&\quad + T_R \cdot \omega)^2} = \\
&= \frac{2.772(-0.02 \cdot 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^3 + 0.02 \cdot \omega + 0.29 \cdot \omega + 0.85 \cdot \omega + 1)}{(-0.02 \cdot 0.29 \cdot \omega^2 - 0.02 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 - 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 + 1)^2 + (-0.02 \cdot 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^3 + 0.02 \cdot \omega +} \\
&\quad + 0.29 \cdot \omega + 0.85 \cdot \omega)^2}
\end{aligned}$$

Таблиця 3 - Значення $P(\omega)$ та $Q(\omega)$ для побудови АФЧХ.

ω, c^l	-40	-30	-20	-10	-5	5	10	20	30	40
$P(\omega)$	852	478	211	51	11	11	51	211	478	852
$Q(\omega)$	-534	-195	-32	13	10	-10	-13	32	195	534

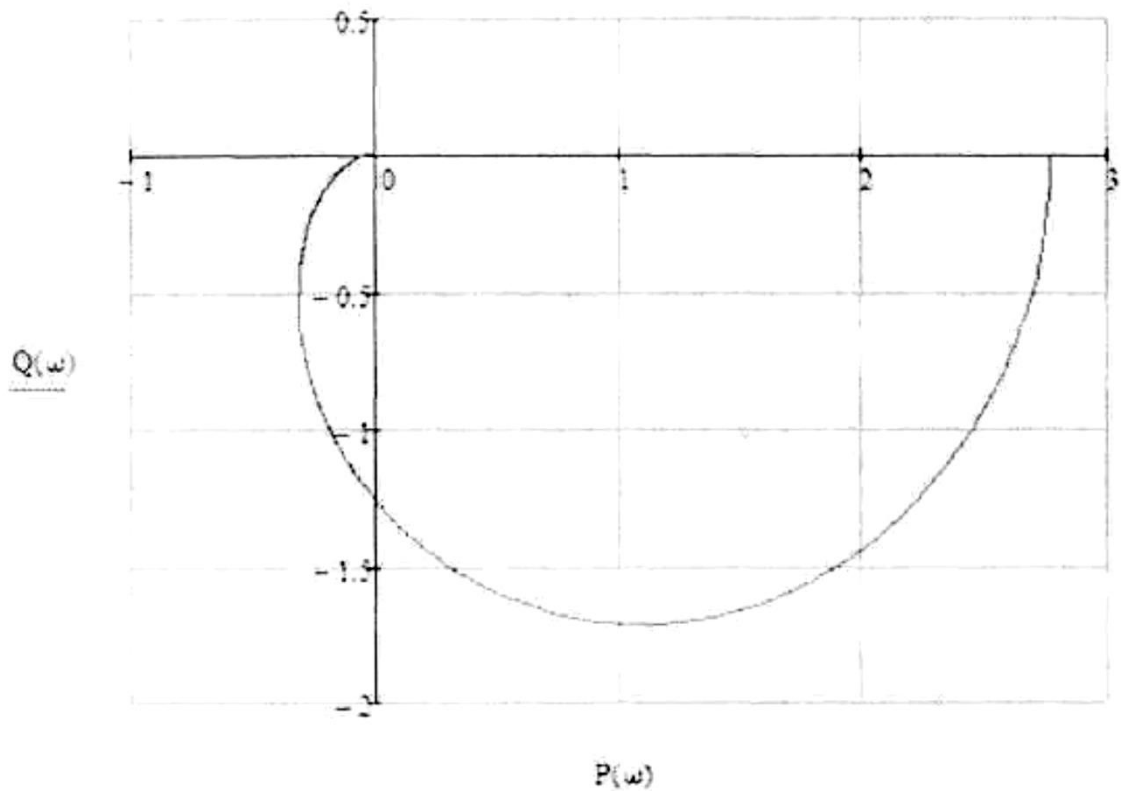


Рисунок 5.4 -. АФЧХ розімкнутої системи

5.6.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

Для побудови асимптотичної ЛАЧХ передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_y = \frac{1}{T_y} = \frac{1}{0.020} = 50 \text{ c}^{-1} \quad \text{належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_r = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{0.29} = 3.448 \text{ c}^{-1} \quad \text{належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_{дв} = \frac{1}{T_{дв}} = \frac{1}{0.85} = 1.176 \text{ c}^{-1} \quad \text{належить аперіодичній ланці};$$

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$, являє собою пряму паралельну осі частот, так як система не містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при $\omega = 1$ має ординату $20 \cdot \lg(k) = 8,856$ дБ ($k=2,772$ - коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

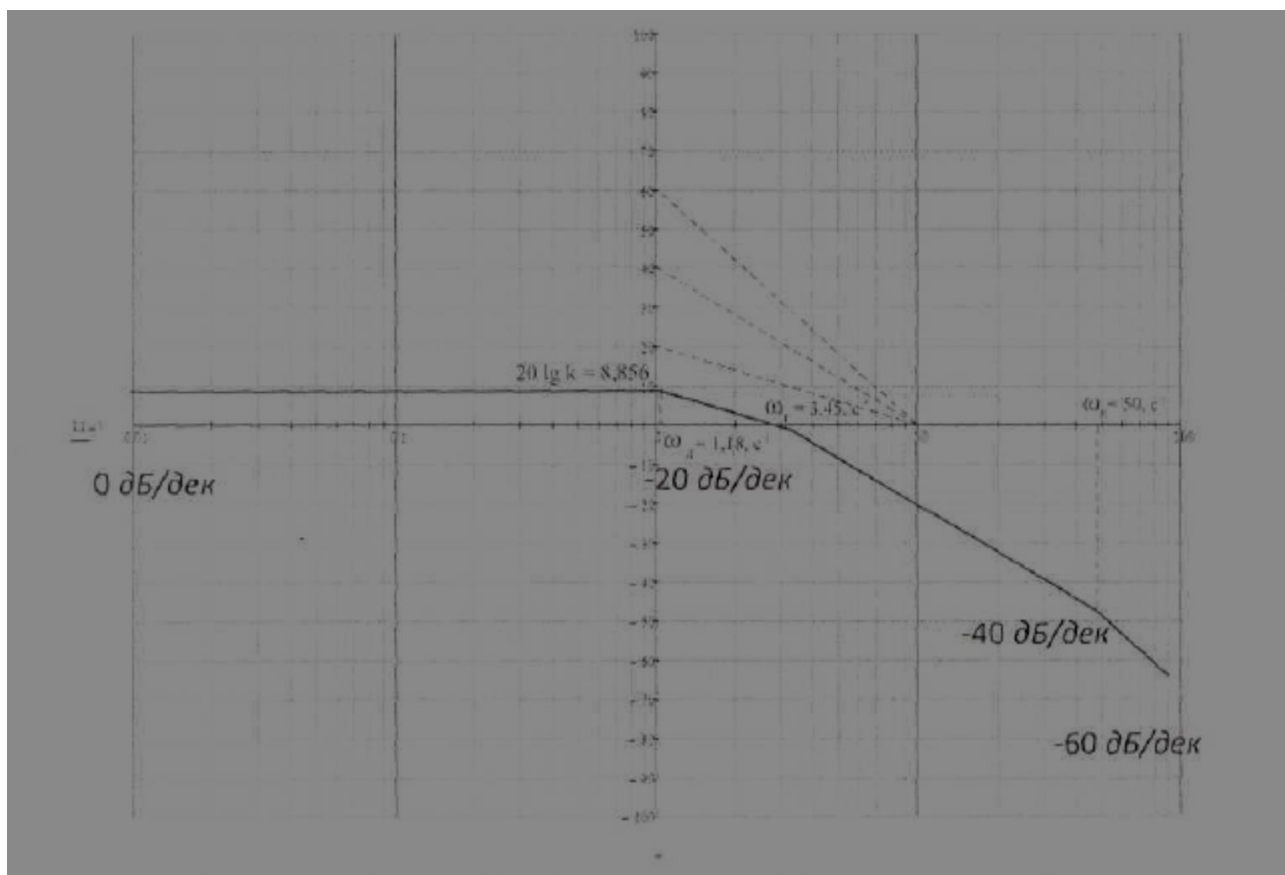


Рисунок 5.5 - ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

Після кожної із спрягаючих частот нахил характеристики $L(\omega)$ змінюється порівняно з попереднім значенням на -20 дБ/дек, так як дані частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку.

Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших ω_y , має нахил - 60 дБ/дек.

5.6.3. Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок, що входять в систему:

$$\varphi(\omega) = \left(-\arctg(\omega \cdot T_y) - \arctg(\omega \cdot T_r) - \arctg(\omega \cdot T_{ДВ}) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (10)$$

Таблиця 4 - Значення $\varphi(\omega)$ вихідної системи.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0,01	0,1	0,8	1	3	8	10	12	100
$\varphi(\omega)$	-0,67	-6,63	-48,2	-57,7	-113	-157	-165	-171	-240

За отриманими значеннями будуюмо ЛФЧХ розімкнутої системи (Рисунок 5.6).

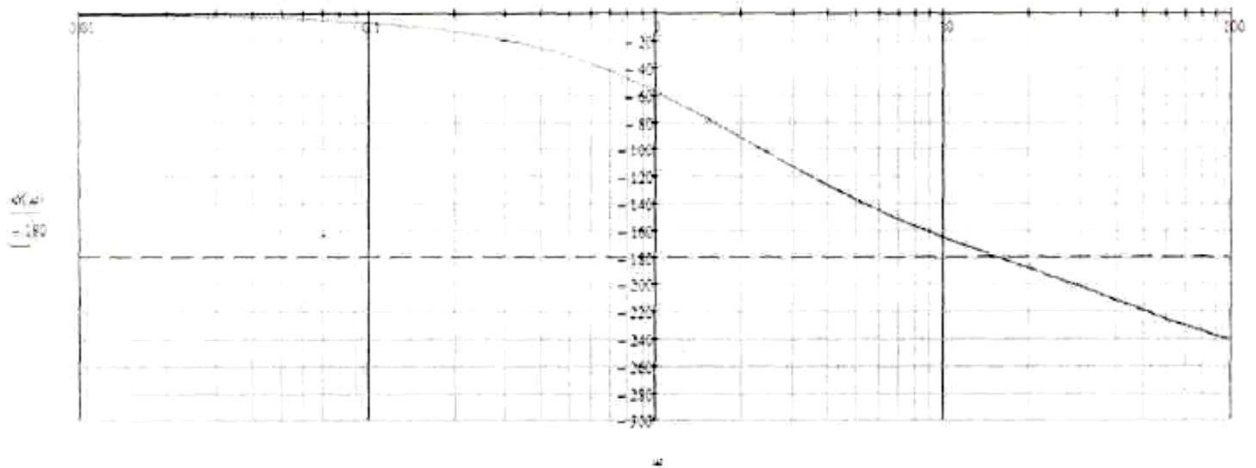


Рисунок 5.6 - ЛФЧХ розімкнутої системи.

5.7 Побудова дійсної частотної характеристики замкненої системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну $p = j \cdot \omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення $P_r(\omega)$;

$$W_{\mathcal{K}}(p) = \frac{k}{(T_y \cdot p + 1) \cdot (T_r \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + k}$$

Підставимо $p = j \cdot \omega$, отримаємо:

$$\begin{aligned} W_{\mathcal{K}}(j\omega) &= \frac{k}{(T_y \cdot j\omega + 1) \cdot (T_r \cdot j\omega + 1) \cdot (T_d \cdot j\omega + 1) + k} = \\ &= \frac{k}{(T_y \cdot T_r \cdot (j\omega)^2 + T_y \cdot j\omega + T_r \cdot j\omega + 1) \cdot (T_d \cdot j\omega + 1) + k} = \\ &= \frac{k}{j(-T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot \omega^3 + T_y \cdot \omega + T_r \cdot \omega + T_d \cdot \omega) + (-T_y \cdot T_r \cdot \omega^2 - T_y \cdot T_d \cdot \omega^2 - \\ &\quad - T_r \cdot T_d \cdot \omega^2 + 1 + k)} = \\ &= \frac{k((-T_y \cdot T_r \cdot \omega^2 - T_y \cdot T_d \cdot \omega^2 - T_r \cdot T_d \cdot \omega^2 + 1 + k) - j(-T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot \omega^3 + T_y \cdot \omega + \\ &\quad + T_r \cdot \omega + T_d \cdot \omega))}{(-T_y \cdot T_r \cdot \omega^2 - T_y \cdot T_d \cdot \omega^2 - T_r \cdot T_d \cdot \omega^2 + 1 + k)^2 + j(-T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot \omega^3 + T_y \cdot \omega + \\ &\quad + T_r \cdot \omega + T_d \cdot \omega)^2} \end{aligned}$$

Виділимо дійсну частину:

$$\begin{aligned} P_{\mathcal{K}}(\omega) &= \frac{k(-T_y \cdot T_r \cdot \omega^2 - T_y \cdot T_d \cdot \omega^2 - T_r \cdot T_d \cdot \omega^2 + 1 + k)}{(-T_y \cdot T_r \cdot \omega^2 - T_y \cdot T_d \cdot \omega^2 - T_r \cdot T_d \cdot \omega^2 + 1 + k)^2 + (-T_y \cdot T_r \cdot T_d \cdot \omega^3 + \\ &\quad + T_y \cdot \omega + T_r \cdot \omega + T_d \cdot \omega)^2} = \\ &= \frac{2.772(-0.02 \cdot 0.29 \cdot \omega^2 - 0.02 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 - 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 + 1 + 2.772)}{(-0.02 \cdot 0.29 \cdot \omega^2 - 0.02 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 - 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^2 + 1 + 2.772)^2 + (-0.02 \cdot 0.29 \cdot 0.85 \cdot \omega^3 + \\ &\quad + 0.02 \cdot \omega + 0.29 \cdot \omega + 0.85 \cdot \omega)^2} \end{aligned} \tag{11}$$

Знайдемо значення дійсної частотної характеристики (11) при зміні частоти ω (результати розрахунків наведено в табл. 3) та побудуємо графік.

Таблиця 5 -. Значення $P_s(\omega)$ вихідної системи.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	2	5	6	10	15	20	30
$P_s(\omega)$	0,73	0,6	-0,23	-0,24	-0,11	-0,05	-0,03	-0,01

За отриманими значеннями побудуємо дійсну частотну характеристику замкнутої системи (рис. 5.7).

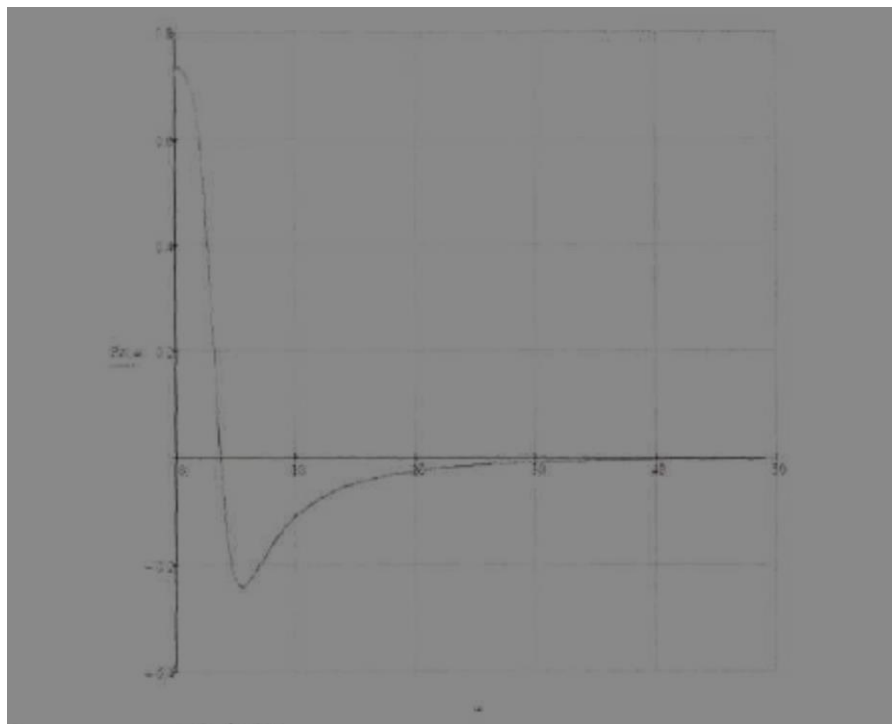


Рисунок 5.7 Дійсна частотна характеристика замкнутої системи.

5.8 Визначення стійкості і запасів стійкості, побудова області

5.8.1 Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца.

Критерій стійкості Гурвіца (алгебраїчний критерій) дає змогу визначити стійкість системи автоматичного регулювання досить високого порядку, але користуватись цим критерієм порівняно легко лише при рівняннях до п'ятого порядку, оскільки надалі зростає складність обчислень.

Згідно з цим критерієм умови стійкості формулюються таким чином.

Всі корені характеристичного рівняння (9) матимуть від'ємні дійсні частини, якщо при додатному знаку всіх коефіцієнтів будуть додатними головний визначник Гурвіца $\Delta_2 > 0$ і його діагональні мінори більше нуля. Підставивши значення коефіцієнтів та сталих часу, отримаємо:

$$0.02 \cdot 0.29 \cdot 0.85 \cdot p^3 + p^2 \cdot (0.02 \cdot 0.29 + 0.02 \cdot 0.85 + 0.29 \cdot 0.85) + p(0.02 + 0.29 + 0.85) + 1 + 2.772 = 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0.269 & 3.772 \\ 0.005 & 1.16 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = 0.923$$

Виходячи з того, що головний визначник $\Delta_2 = 0.923 > 0$, складений за правилом знаходження визначників Гурвіца та всі коефіцієнти мають додатній знак, можна зробити висновок, що система за критерієм стійкості Гурвіца стійка.

5.8.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою критерію Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначають за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання стійка в тому разі, коли складається тільки із стійких динамічних ланок і має не більше однієї інтегруючої ланки. Якщо розімкнута система автоматичного керування є стійкою, то для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо, щоб АФХ розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами $(-1; j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ .

Таким чином (Рисунок 5.8), за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем $Z_m = 0,9$; за фазою $Z_\phi = 76,43^\circ$.

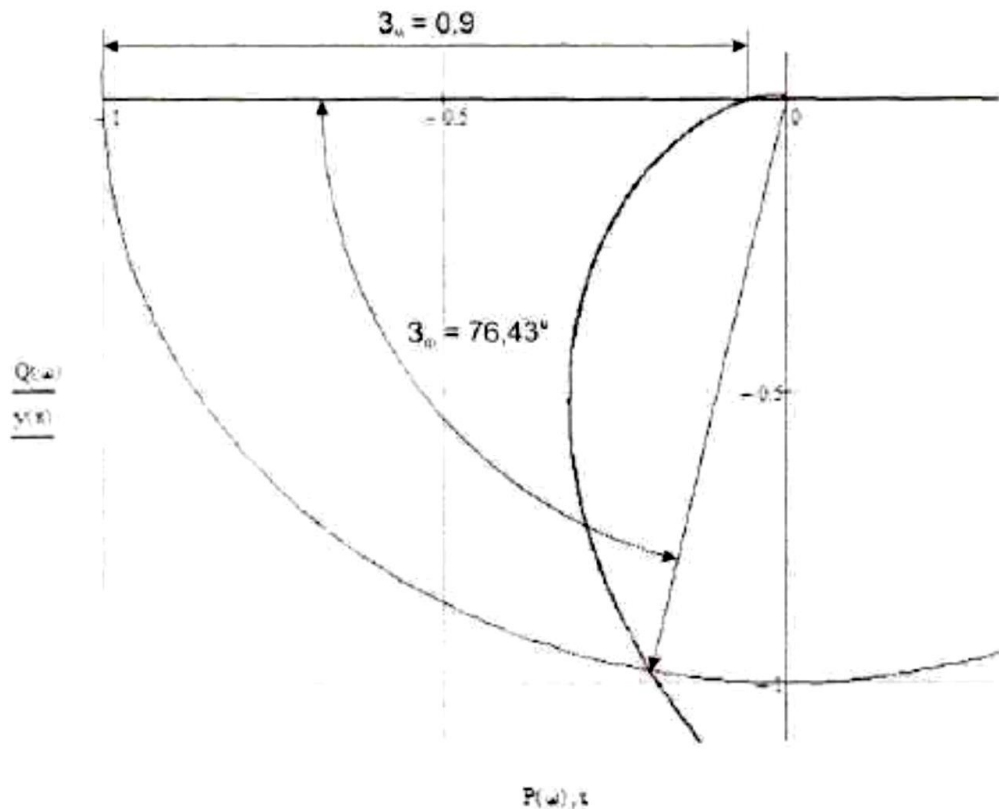


Рисунок 5.8 - Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

5.8.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_y тому що його легко змінювати шляхом підбору коефіцієнту підсилення.

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_y T_f T_{ДВ} p^3 + (T_y T_f + T_y T_{ДВ} + T_f T_{ДВ}) p^2 + (T_y + T_f + T_{ДВ}) p + 1 + k_y k_f k_{ДВ} k_{ТИ} = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_y :

$$k_y(p) = \frac{(-T_y T_f T_{ДВ} p^3 + (T_y T_f + T_y T_{ДВ} + T_f T_{ДВ}) p^2 + (T_y + T_f + T_{ДВ}) p + 1)}{k_f k_{ДВ} k_{ТИ}}$$

Підставивши $p = j \cdot \omega$ та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу отримаємо:

$$k_y(\omega) = \frac{(-jT_y T_\Gamma T_{ДВ} \omega^3 - (T_y T_\Gamma + T_y T_{ДВ} + T_\Gamma T_{ДВ}) \omega^2 + j(T_y + T_\Gamma + T_{ДВ}) \omega + 1)}{k_\Gamma k_{ДВ} k_{ТГ}}$$

$$P(\omega) = \frac{-(T_y T_\Gamma + T_y T_{ДВ} + T_\Gamma T_{ДВ}) \omega^2 + 1}{k_\Gamma k_{ДВ} k_{ТГ}}$$

$$Q(\omega) = \frac{-T_y T_\Gamma T_{ДВ} \omega^3 + (T_y + T_\Gamma + T_{ДВ}) \omega}{k_\Gamma k_{ДВ} k_{ТГ}}$$

Таблиця 6 - Значення $P(\omega)$ та $Q(\omega)$ для побудови кривої D -розбиття.

ω, c^{-1}	-40	-30	-20	-10	-5	5	10	20	30	40
$P(\omega)$	852	478	211	51	11	11	51	211	478	852
$Q(\omega)$	-534	-195	-32	13	10	-10	-13	32	195	534

Побудуємо криву D -розбиття в площині параметру k_y при зміні частоти від $-\infty$ до $+\infty$ (Рисунок 5.9).

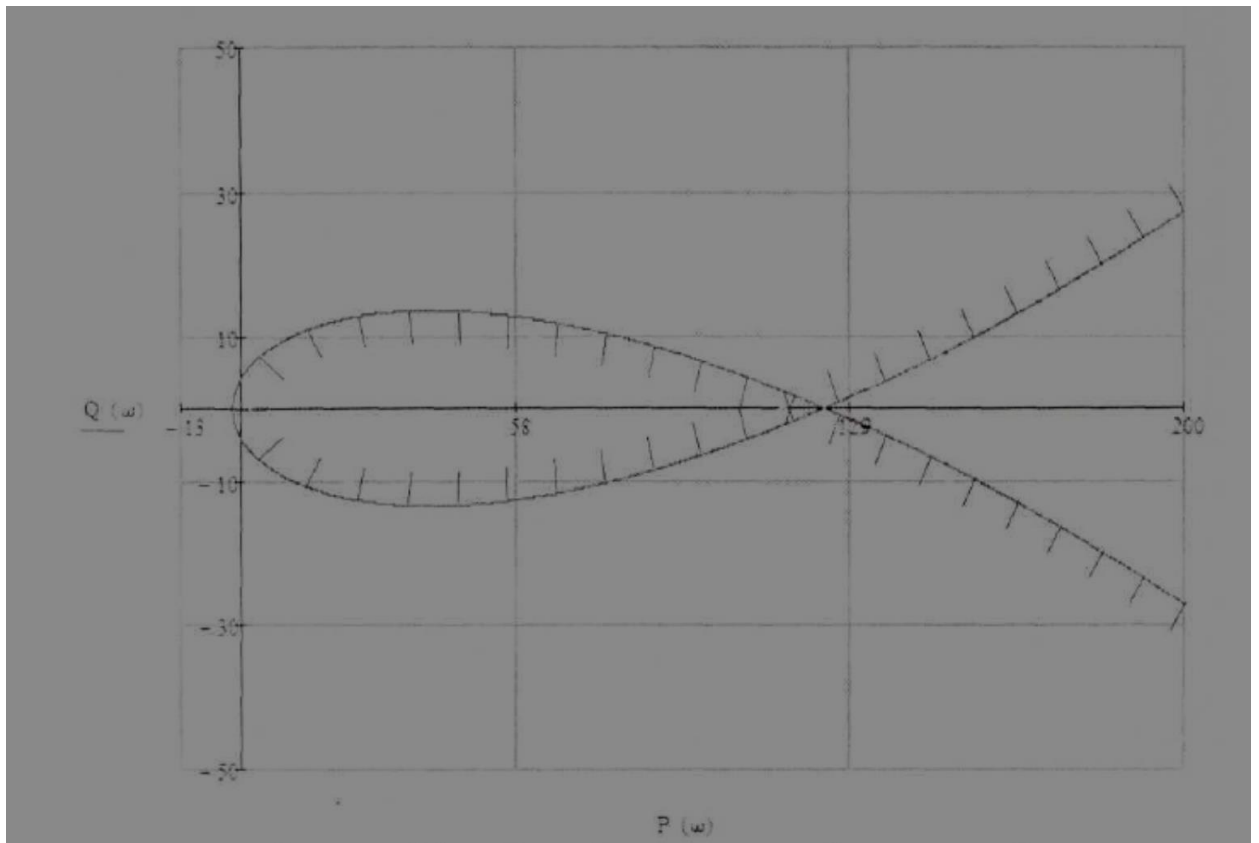


Рисунок 5.9 – *D*-розбиття в площині параметру k_y

Ділянка стійкості буде ліворуч від добутої кривої при русі по ній від $-\infty$ до $+\infty$. З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_y , яке в даному випадку дорівнює $k_{y_{кр}}=124$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача $k_y=5,5$ входить в зону стійкості, а значить для подальших розрахунків можна залишити задане значення цього параметра.

5.9. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

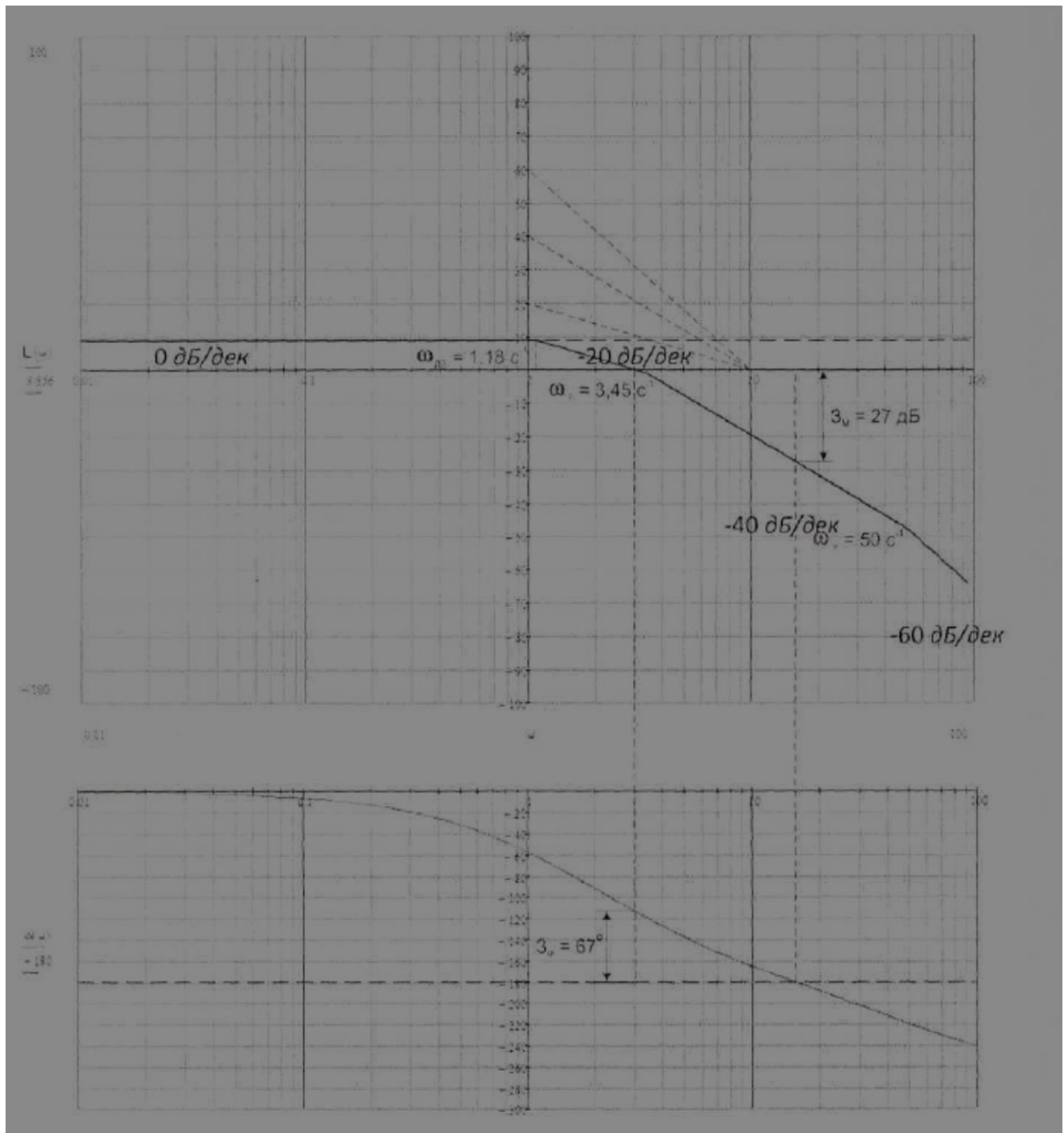


Рисунок 5.10 - Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає у визначенні запасу стійкості (по модулю і фазі), та частоти зрізу. Для визначення цих величин будуюмо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи, причому виконуємо їх взаємне розміщення. Це зображено на рисунку 5.10.

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_{зр} = 3 \text{ с}^{-1}$ звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови, $t_p = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{зр}} = 2.094 \text{ с}$; запас стійкості по амплітуді $Z_m \approx 27 \text{ дБ}$; запас стійкості по фазі $Z_\phi \approx 6^\circ$.

5.10 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_z(\omega) \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega \quad (12)$$

Для побудови перехідного процесу скористаємось методом одиничних трапецій [4]. Для цього апроксимуємо дійсну частотну характеристику трапеціями (Рисунок 5.11).

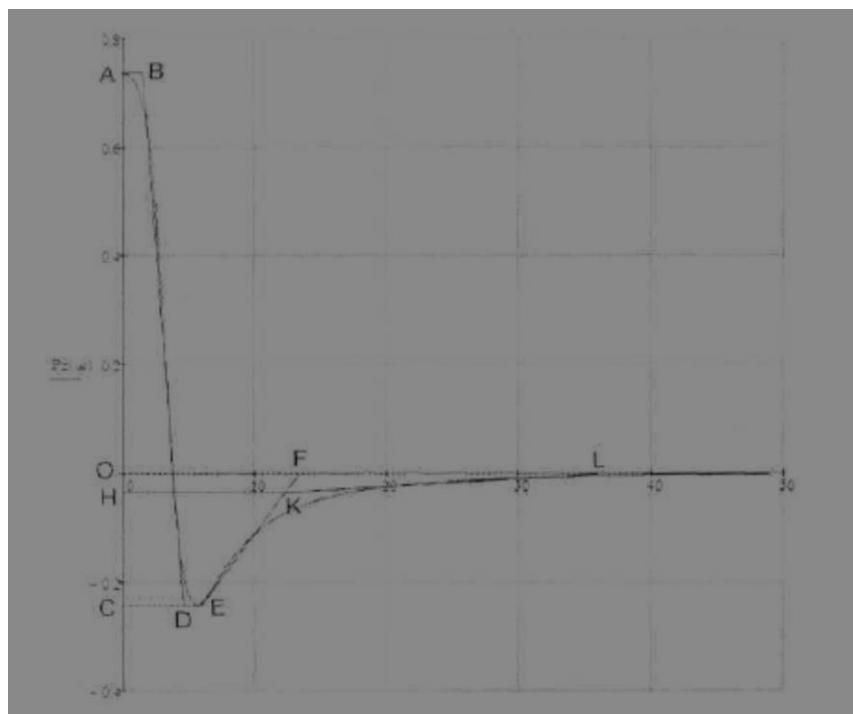


Рисунок 5.11. Розбиття дійсної частотної характеристики замкнутої системи на трапеції

Параметри фігур:

фігура $N1$ - трапеція $ABCD$, $H_{1p} = 0.7 + 0.2 = 0.9$; $\omega_{01p} = 2$; $\omega_{11p} = 5$;
 $v_{1p} = 2 / 5 = 0.4$;

фігура $N2$ - трапеція $OCEF$, $H_{2p} = 0.22$; $\omega_{02p} = 7$; $\omega_{12p} = 13$;
 $v_{2p} = 7 / 13 = 0.538$;

фігура $N3$ - трапеція $ABDC$, $H_{3p} = 0.02$; $\omega_{03p} = 6$; $\omega_{13p} = 35$;
 $v_{3p} = 6 / 35 = 0.171$;

Побудуємо ординату перехідного процесу для реального моменту часу $t_{real} = 1$ с. Знайдемо табличний час відповідних фігур:

$$\tau_{N1} = \omega_{11p} \cdot t_{real} = 5 \cdot 1 = 5;$$

$$\tau_{N2} = \omega_{12p} \cdot t_{real} = 13 \cdot 1 = 13$$

$$\tau_{N3} = \omega_{13p} \cdot t_{real} = 35 \cdot 1 = 35$$

За даними таблиць h -функцій по відповідних значеннях v і τ знайдемо значення h -функцій для фігур $N1$, $N2$, $N3$, $N5$.

$$h(t)_{N1} = 1.112;$$

$$h(t)_{N2} = 1.006;$$

$$h(t)_{N3} = 0.995;$$

Помноживши знайдені табличні значення $h(t)$ на ординати відповідних реальних фігур H_p , дістанемо ординати $h_i(t_{real})$ відповідних фігур

$$h_1(t_{\text{реал}}) = h(t)_{N1} \cdot H_{1p} = 1.112 \cdot 0.95 = 1.056 ;$$

$$h_2(t_{\text{реал}}) = h(t)_{N2} \cdot H_{2p} = 1.006 \cdot 0.22 = 0.221 ;$$

$$h_3(t_{\text{реал}}) = h(t)_{N3} \cdot H_{3p} = 0.995 \cdot 0.02 = 0.02 ;$$

Врахувавши знак $h_2(t_{\text{реал}})$, $h_3(t_{\text{реал}})$, $h_4(t_{\text{реал}})$ знайдемо результуючу ординату перехідної характеристики при $t_{\text{реал}} = 1\text{с}$

$$h_{\Sigma}(t_{\text{реал}}) = h_1(t_{\text{реал}}) - h_2(t_{\text{реал}}) - h_3(t_{\text{реал}}) = 1.056 - 0.221 - 0.02 = 0.815$$

Аналогічно можна дістати й інші ординати перехідного процесу при різних значеннях реального часу $t_{\text{реал}}$ і побудувати відповідну характеристику.

Також побудувати перехідний процес можна з допомогою комп'ютера, використовуючи формули (12). В разі збігу $h_{\Sigma}(t_{\text{реал}})$ значень для кількох моментів часу, отриманих методом одиниць $h_{\Sigma}(t_{\text{реал}})$ трапецій і значень отриманих на комп'ютері при використанні формули (12) для цих же моментів часу, можна прийняти графік перехідного процесу, отриманий з допомогою комп'ютера (Рисунок 5.12).

Таблиця 7 - Значення перехідної функції $h(t)$

$t, \text{с}$	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,55
$h(t)$	0	0,21	0,56	0,77	0,82	0,79	0,75	0,73	0,72	0,73

По графіку можна зробити висновок, що перехідний процес – коливальний (період коливань не змінюється з часом).

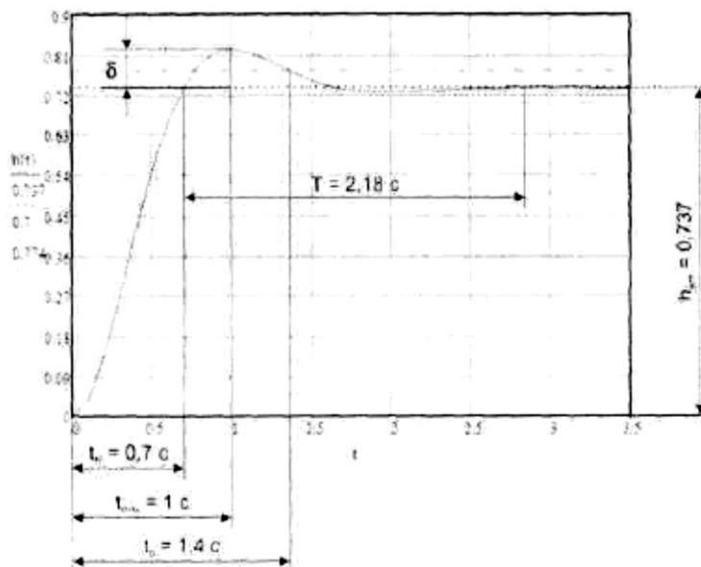


Рисунок 5.12 Графік перехідного процесу вихідної системи.

5.11 Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом.

Уточнення вимог до САР для її аналізу та синтезу.

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

1) час регулювання $t_p \approx 1,4$ с -- це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону 2Δ , він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її аналізу та синтезу, приймається зменшеним на 40 % від отриманого і рівним $t_p = 0,84$ с;

2) перероблювання $\delta = 9,3$ %;

3) частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2,882 \text{ с}^{-1}$, де $T = 2,18$ с – період коливань;

4) кількість коливань перехідного процесу $n = 1$;

5) час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 1$ с;

6) час наростання перехідного процесу $t_n = 0,7$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;

7) декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань $d = 0,01$.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи було вивчено автоматизовану систему керування приводу подачі оброблювального центру за принципом відхилення вихідної величини. Розглянуто призначення та область застосування оброблювальних центрів.

Також розглянуто найбільш відомі системи керування оброблювальних центрів та проведено їх короткий аналіз.

Спроековано та розраховано систему автоматизованого регулювання частоти обертання двигуна приводу головного руху. За допомогою числових розрахунків та отриманих графіків доведено стійкість і якість розробленої САР. Розроблено електричну принципову схему у складі системи програмного управління верстатом.