Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр .

(ступінь вищої освіти)

на тему **Розроблення крокового електроприводу установки нанесення тонких плівок при виробництві мікросхем**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Єндіяров Є.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Свінцицький С.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2022 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій

_____О.В. Шефер

“ ___ ” _____ 202 _ р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Єндіярову Єгору Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) **«Розроблення крокового електроприводу установки нанесення тонких плівок при виробництві мікросхем»**

керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталія Василівна, к.т.н., доцент затверджена наказом вищого навчального закладу від “12 ” 08 2022 року № 544 фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на восьмипозиційну вакуумну установку для виробництва інтегральних мікросхем. Провести вдосконалення електроприводу на базі крокового двигуна з використанням штучного дроблення кроку. Перевірити розроблений електропривод на якість та стійкість.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис технологічного процесу та огляд існуючих установок виробництва інтегральних мікросхем. Розроблення механічної частини електропривода стола масок. Розрахунок навантажень та вибір електродвигунів електропривода стола масок. Синтез системи автоматизованого керування електроприводом стола масок. Математичне моделювання. Дослідження перехідних процесів. Визначення якості та стійкості системи автоматичного керування. Висновки по роботі.

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

1) будова восьмипозиційної вакуумної установки для виробництва інтегральних мікросхем;
2) структурна схема блока керування підйомника масок;
3) функціональна схема електропривода стола масок;
4) принципова схема електропривода стола масок;
5) структурна схема САК електроприводом підйомника стола масок;
6) структурна схема двошвидкісного крокового електродвигуна;
7) графіки визначення стійкості та логарифмічні характеристики;
8) графіки кутових характеристик;
9) висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Опис технологічного процесу та огляд існуючих установок виробництва інтегральних мікросхем. Постановка задач на проектування	13.09.22		15%	Пл. 1
2	Розроблення механічної частини електропривода стола масок	27.09.22	I	30%	Пл. 2
3	Розрахунок навантажень та вибір електродвигунів електропривода стола масок	10.10.22		40%	Пл. 3
4	Синтез САК. Математичне моделювання	24.10.22	II	60%	Пл. 4,5
5	Дослідження перехідних процесів	01.11.22		70%	Пл. 6
6	Визначення якості та стійкості системи автоматичного керування	08.11.22		90%	Пл. 7,8
7	Оформлення магістерської роботи	07.12.22	III	100%	Пл. 9

Магістрант _____ Єндіяров Є.О.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи_____Єрмілова Н.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП 6

1 Технологічна частина **8**

1.1 Опис технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем 8

1.2 Огляд існуючих установок вакуумного нанесення тонких плівок 16

1.3 Принцип роботи восьмипозиційної вакуумної установки для виробництва гібридних інтегральних мікросхем 19

1.4 Вибір системи електропривода установки для виробництва ІМС 22

2 Розробка системи механічної частини електропривода 23

2.1 Розрахунок кінематичної передачі підйомника стола масок 23

2.1.1 Розрахунок передаточного числа черв'ячної передачі 23

2.1.2 Розрахунок статичного навантаження черв'ячної передачі 24

2.1.3 Попередній розрахунок черв'ячної передачі 27

2.1.4 Уточнений розрахунок параметрів черв'ячної передачі 29

2.1.5 Розрахунок ККД черв'ячної передачі 31

2.2 Розрахунок навантажень електропривода підйомника стола масок 31

2.2.1 Розрахунок статичних навантажень на валу електродвигуна 31

2.2.2 Розрахунок динамічних навантажень на валу електропривода 32

2.3 Вибір електродвигунів стола масок 36

3 Розроблення системи автоматизованого керування електроприводом стола масок 38

3.1 Розроблення функціональної схеми керування електроприводом стола масок 38

3.2 Розроблення принципової схеми керування електроприводом стола масок 42

3.3 Розрахунок принципової схеми електропривода стола масок 46

3.3.1 Розрахунок силового транзисторного ключа 46

3.3.2 Розрахунок генератора прямокутних імпульсів 49

3.3.3 Розрахунок формувача імпульсів 51

3.3.4 Розрахунок блока живлення 52
3.3.5 Розрахунок та вибір силового трансформатора 60
3.4 Синтез системи автоматичного керування електроприводом стола масок 62
3.4.1 Визначення передаточної функції системи автоматичного керування 62
3.4.2 Визначення стійкості системи автоматичного керування за критерієм Михайлова 66
3.4.3 Розрахунок та побудова логарифмічних амплітудо-частотної та фазо-частотної характеристик системи автоматичного керування 67
4 Дослідна частина 69
4.1 Постановка проблеми та мета дослідження 69
4.2 Розроблення структурної схеми двохшвидкісного крокового ЕП 70
4.3 Проведення досліджень та їх аналіз 71
Висновки **79**
Список використаних джерел **80**
Додатки **82**

ВСТУП

Актуальність теми. Тонкі плівки, які наносяться у вакуумі, широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем (ІМС), а також при виготовленні фотошаблонів - основного технологічного інструмента мікроелектроніки. У наш час тонкоплівкові елементи займають до 80% площі напівпровідникових кристалів, що обумовлено постійним функціональним ускладненням ІМС.

Отримання високоякісних та продуктивних за електрофізичними параметрами тонких шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур як активних, так і пасивних елементів ІМС. Тонкі плівки наносяться також і при заключних технологічних операціях виготовлення напівпровідникових приладів та ІМС, тобто після виконання більшості інших операцій. При цьому економічний брак особливо небезпечний і тому повинен бути зведений до мінімуму.

Таким чином від досконалості технологічних процесів нанесення тонких плівок у значній степені залежить надійність та якість мікроелектронних виробів, технологічний рівень та економічні показники їх виробництва. Тонкоплівкова технологія будується на складних фізико-хімічних процесах і застосуванні різних металів та діелектриків. Так, тонкоплівкові резистори, електроди конденсаторів та міжз'єднання виконують осадженням металічних плівок, а міжшарову ізоляцію та захисне покриття - діелектричних.

Важливим етапом є контроль параметрів тонких плівок (швидкості їх нанесення, товщини та її рівномірності, поверхневого опору), який проводиться за допомогою спеціальних приладів як при виконанні окремих технологічних операцій, так і по завершенні всього процесу.

Наносять тонкі плівки у вакуумі методом термічного випаровування та іонного розпилення. При першому методі використовують випаровування із резисторним або електропроменевим нагрівом, а при другому - системи діодного або матричного розпилення.

Для реалізації цих методів необхідні спеціальні вакуумні установки періодичної, напівперіодичної та неперервної дії, на яких можна наносити декілька різних за складом та властивостями шарів з різних джерел в єдиному технологічному циклі. При цьому виключається дія атмосферного повітря на кожен нанесений шар, підвищується продуктивність за рахунок зменшення циклів відкачки робочих камер, а також нагріву та охолодження підложок, з'являється можливість повної автоматизації установок на основі мікропроцесорних систем керування.

Об'єктом дослідження є електропривод підйомника стола масок.

Предметом дослідження є динамічні процеси у системі автоматичного керування електроприводу підйомника стола масок.

Метою роботи є створення регульованого електроприводу керування підйомника стола масок із застосуванням крокового двигуна, що підвищує продуктивність і якість продукції.

Для цього необхідно вирішити наступні ***задачі дослідження:***

1. Провести аналіз технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем, виявити його недоліки та визначити шляхи покращення.
2. Розробити механічну частину електропривода стола масок.
3. Розробити систему автоматизованого керування електроприводом стола масок.
4. Створити систему керування електроприводом двигуна, що сприяє його плавному пуску, розгону і зупинці, довести доцільність виконаної роботи.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем

Виробництво як дискретних (окремих) напівпровідникових приладів, так і інтегральних мікросхем (ІМС) в цілому базується на одних і тих же технологічних процесах (епітаксії, фотолітографії, травленні, дифузії нанесення плівок у вакуумі та ін.). Слід зазначити, що при виготовленні усіх видів напівпровідникових приладів та ІМС в тому чи іншому обсязі використовується технологічний процес нанесення тонких плівок у вакуумі - тонкоплівкова технологія.

Розглянемо застосування тонких плівок на прикладі виготовлення транзистора, так як він є не тільки дискретним напівпровідниковим приладом, але і основним елементом ІМС.

Планарний транзистор (рис.1.1) являє собою кристал напівпровідника з двома p-n-переходами, які утворюють колектор 5, емітер 3 і базу 4. Після формування p-n-переходів у кристалі напівпровідника нанесенням металічних плівок у вакуумі утворюють омічні контакти 1 до бази та емітера.

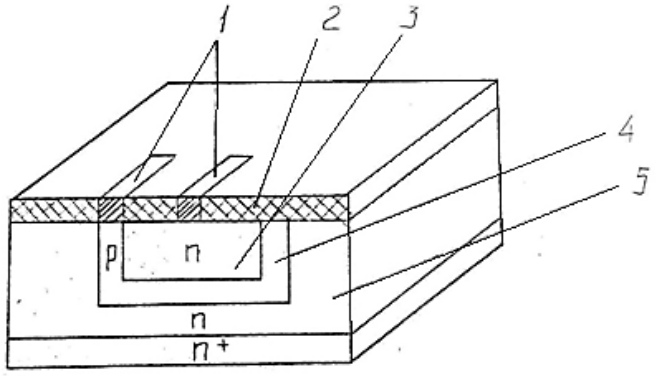


Рисунок 1.1 - Структура планарного транзистора:
1 - тонкоплівкові контакти; 2 - оксидний шар; 3 - емітер; 4 - база;
5 – колектор

Найбільш часто для простоти та технологічності застосовують омічні контакти з алюмінію. Якщо виводи під'єднують пайкою, алюміній додатково

вкривають шаром золота. Омічні контакти на кремнії електропровідності n-типу виготовляють із золота, яке для покращення адгезії впаюють при температурі 370-500^0 С. Високотемпературні контакти на кремнії отримують послідовним нанесенням шару хрому, а потім нікелю, який дозволяє пайку звичайними припоями. Широке розповсюдження отримали алюмінієві контакти з підшаром титана, який має властивість високої адгезії до кремнію. Так як шар титану у повітрі швидко окислюється, що перешкоджає надійному під'єднанню електричного виводу, на нього наносять шар золота, срібла або нікелю.

Мікроміниатюрний функціональний електронний блок, сукупність робочих елементів якого виготовлена в єдиному комплексі групових технологічних процесів, називають інтегральною мікросхемою. Показником складності ІМС виступає ступінь інтеграції, яка характеризується кількістю елементів, що увійшли в інтегральну схему. За технологічними методами виготовлення ІМС розподіляються на плівкові, гібридні та напівпровідникові (монолітні). Ці методи не є конкуруючими, а доповнюють один одного. Тому зупинимося на кожному із них.

В плівкових ІМС усі елементи (резистори, конденсатори) та міжелементні з'єднання виконують у вигляді плівок. Плівкові ІМС виконують пошаровим нанесенням тонких плівок різних матеріалів на загальну основу - діелектричну підложку. На плівкових елементах як правило, виконують різні резисторно - ємнісні схеми (RC-схеми).

Тонкоплівковий резистор (рис.1.2. а, б) – елемент мікросхеми розташований на діелектричній підложці 3 і здатний утворювати опір електричному струму, складається із двох контактних виводів 1 і резистивної плівки 2 лінійної або зигзагоподібної конфігурації.

Опір плівкових резисторів визначають по опору R (Ом/квадрат) квадрата тонкоплівкового матеріалу завтовшки $d_п$, до двох протилежних сторін якого підведені контактні виводи:

$$R=q/d_п . \qquad (1.1)$$

Таким чином опір плівкового резистора не залежить від розміру сторони квадрата і дорівнює його поверхневому опору.

Для виготовлення тонкоплівкових резисторів використовують сплави, опір яких в багато разів більший опору чистих металів (наприклад, ніхром, МЛТ, нітрид танталу, суміш хрому і оксиду кремнію, металокерамічні суміші-кермети).

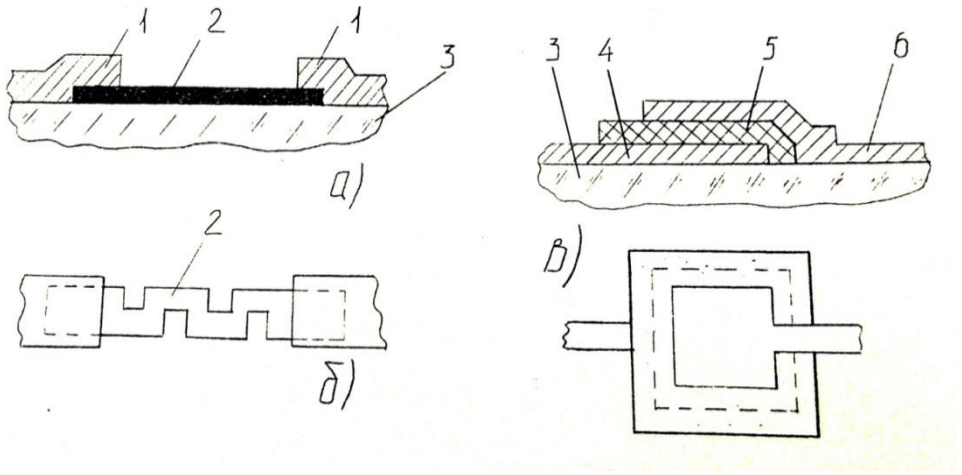


Рисунок 1.2 - Структура тонкоплівкових резисторів (а, б) і конденсатора (в):

1 - контактні виводи; 2 - резистивна плівка; 3 - діелектрична підложка; 4,6 - нижній і верхній металеві плівкові електроди; 5 - плівковий діелектрик

Тонкоплівковий конденсатор (рис.1.2, в) – це елемент мікросхеми, здатний накопичувати електричний заряд і являє собою плоску тришарову структуру, яка складається із шару діелектрика, розташованого між двома металевими шарами - електродами (обкладками). Як зазначено у [1] питома ємність плоского плівкового конденсатора ($Ф/м^2$) визначається за формулою:

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12} E / d_a ; \qquad (1.2)$$

де d_a – товщина шару діелектрика ;

E - діелектрична проникливість матеріалу.

Бажано, щоб питома ємність плівкового конденсатора була як можливо найбільшою. Для цього використовують діелектрик, який має велику діелектричну проникливість E, і намагаються зменшити товщину d_a плівки з нього. Але ці параметри неможливо змінювати в широких діапазонах.

Більшість використаних в тонкоплівковій технології діелектриків мають Е від 3 до 1000. При цьому товщина отриманих плівок складає не менше 0,3 мкм.

Основним технологічним завданням при виготовленні плівкових конденсаторів є отримання допустимо тонких діелектричних плівок мінімальної пористості.

Номінали тонкоплівкових конденсаторів визначаються точністю, з якою можливо сформувати діелектричний шар. Допустима товщина діелектричних плівок обмежується їх електричною міцністю, яка знижується внаслідок наскрізних пор та інших дефектів.

Найбільш часто в якості діелектрика у тонкоплівних конденсаторах використовують плівки оксидів кремнію SiO_2 та титану Ti_2O_5, а в якості обкладок - плівки металів високої провідності. Але плівки золота, срібла та міді для цих цілей не застосовують, так як атоми цих металів мають високу рухливість і, проникаючі у діелектричну плівку, призводять до відмов у роботі конденсаторів.

У більшості випадків обкладки конденсаторів виготовляють із плівок алюмінію. При цьому верхні обкладки танталових конденсаторів виготовляють із плівок алюмінію з підшаром ванадію.

Контактні площадки плівкових ІМС звичайно існують продовженням з'єднувальних провідникових ліній (міжз'єднань) і призначені для припайки або приварки зовнішніх виводів корпуса.

Для підложок плівкових ІМС використовують прямокутні пластини діелектрика, які мають невеликі розміри (декілька міліметрів). Зазвичай на одну підложку одночасно наносять декілька плівкових ІМС, а потім їх розрізають. Попередньо підложки ретельно шліфують і полірують, так як подряпини та мікротріщини на їх поверхні викликають нестійкість тонкоплівкових ІМС.

Матеріали, з яких виготовляють підложки, повинні мати високий електричний опір і теплопровідність, термостійкість до 500 – 600 ^{0}С, малу діелектричну проникливість, достатню механічну міцність і стабільність

розмірів, можливість обробки поверхні до величин $Rz^{0.1}$ – $Rz^{0.05}$, відсутність газовиділення в умовах вакууму та підвищеної температури, хімічну інертність до матеріалів плівок та їхніх розчинників. Крім цього, їх температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) повинен бути близький до ТКЛР матеріалу плівок. Найбільш широке розповсюдження для виготовлення підложок отримали сітали, алюмокераміка і скло. Сітали являють собою продукт кристалізації скла з дуже мілкими (до 0,01 мм) і рівномірно розподіленими по об'єму кристалами [1].

Одним з найважливіших факторів, який впливає на відтвореність електрофізичних параметрів тонких плівок, що наносяться у вакуумі, є ступінь чистоти поверхні підложок. На практиці ідеально чисті поверхні отримати неможливо, так як вони надзвичайно активні та швидко вкриваються газами, які знаходяться в оточуючому середовищі, а також вологою, пилом та різними поверхнево-активними речовинами, тонкі шари яких дуже важно виділити, Очищають підложки різними фізико-хімічними способами.

Заздалегідь молекули води і абсорбовані молекули газів видаляють з поверхні підложок перед нанесенням плівок у вакуумній камері при температурі 200 – 300 ^{0}C на протязі 2-3 хв. Завершуючу очистку виконують бомбардуванням у вакуумній камері. Якщо підложки помістити у зону іонів великих енергій, процес очищення протікає у тліючому розряді і молекулярні шари води, газів, а також інших з'єднань виділяються за декілька хвилин.

Крім того необхідно пам'ятати, що можливе повторне забруднення підложок при транспортуванні їх у вакуумній камері. Небезпечність подвійного забруднення полягає в тому, що їх хімічний склад невідомий і не завжди однаковий. Тому такі забруднення призводять до несподіваних результатів, особливо в умовах промислового виробництва.

Гібридні інтегральні мікросхеми (ГІМС) – це тонкоплівкові мікросхеми, які складаються з пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, контактних площадок) та дискретних активних елементів (діодів, транзисторів). Гібридна ІМС (рис.1.3) являє собою діелектричну підложку з нанесеними на неї

мікроелементами - плівковими конденсаторами і резисторами і під'єднаним навісним транзистором, база якого з’єднана з верхньою обкладкою конденсатора шиною у вигляді дуже тонкої дротини.

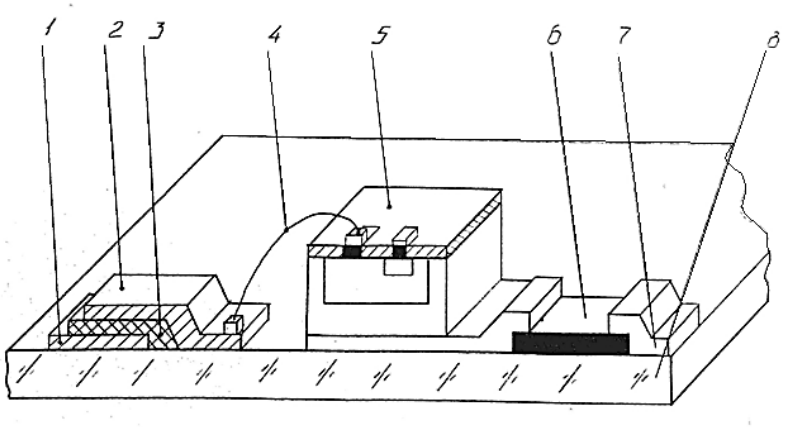


Рисунок 1.3 - Структура плівкової гібридної ІМС:
1,2 – нижній та верхній електроди конденсатора; 3 – шар діелектрику;
4 – провідникова з’єднувальна шина; 5-навісний транзистор;
6 – плівковий резистор; 7 – контактний вивід; 8 – діелектрична підложка

В напівпровідникових ІМС всі елементи і міжелементні з'єднання виконуються в об’ємі і на поверхні кристалу напівпровідника. Напівпровідникові ІМС являють собою плоский кристал напівпровідника (підложку) у поверхневому шарі якого різними технологічними засобами сформовані еквівалентні елементи електричної схеми - локальні проміжки (діоди, транзистори, конденсатори, резистори та ін.), об’єднані на поверхні плівковими металевими з'єднаннями (міжз'єднаннями).

У якості підложок у напівпровідникових ІМС використовують пластини кремнію, германія або арсениду гелію, які мають діаметр 60 – 150 мм і завтовшки 0,2 – 0,4 мм.

Напівпровідникова підложка є груповою заготовкою, на якій одночасно виготовляють велику кількість ІМС. Після завершення основних технологічних операцій її розрізають на частини – кристали 2, які інколи називають «чіпами». Розміри сторін кристалів можуть бути від 3 до 10 мм.

Базовий зріз 1 пластини (рис. 1.4) відіграє роль орієнтації її при різних технологічних процесах.

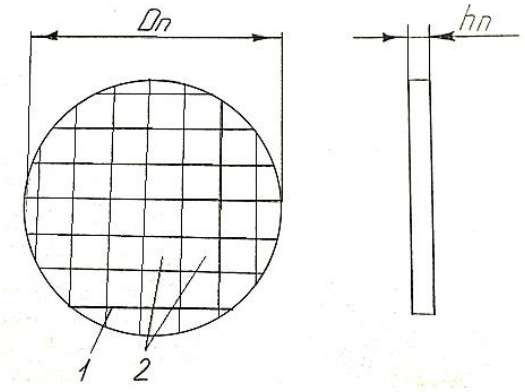


Рисунок 1.4 - Групова кремнієва пластина:
1 – базовий зріз; 2 – окремі кристали - «чіпи»

Структури елементів напівпровідникової ІМС - транзистора, діода, резистора та конденсатора виготовляються відповідним легуванням локальних ділянок напівпровідника методами планарної технології. Планарна технологія характеризується тим, що всі виводи елементів ІМС розташовують в одній площині на поверхні і одночасно з’єднують в електричну схему тонкоплівковими міжз'єднаннями. При застосуванні планарної технології проводиться групова обробка, тобто на протязі одного технологічного процесу на підложках отримують велику кількість ІМС, що забезпечує високу технологічність і економічність, а також дозволяє автоматизувати виробництво ІМС. Процес нанесення тонких плівок у вакуумі потребує ізольованого від атмосфери об’єму, в якому створюється необхідне розрідження. Процес нанесення плівок складається з утворення атомарного або молекулярного потоку речовини із джерела випаровування або розпилення, переносу цього потоку від джерела до підложки, конденсації атомів або молекул на підложці та утворення плівки [2,3].

Основні вимоги до установок вакуумного нанесення тонких плівок (УВН) полягають в забезпеченні максимальної чистоти плівки, її адгезії до підложки, заданій структурі та розміру зерна, отриманнні високої рівномірності товщини

плівки, забезпеченні потрібного виробництва обробки. Ці вимоги задовольняються шляхом вибору способу нанесення плівки та вакуумної системи, вибору найбільш ефективного джерела випаровування або розпилення матеріалу, способу підготовки поверхні підложки, точного розрахунку відстані від джерела випаровування до поверхні осадження та траєкторії їх відносного переміщення. Важливу роль відіграє вибір методів контролю параметрів технологічного процесу та системи автоматичного керування (САК). Забезпечення високої продуктивності виробництва досягається вибором оптимального варіанту структури і розподілення, типу агрегатного обладнання, утворенням високонадійних конструкцій.

Існують два вакуумні методи нанесення тонких плівок, які відрізняються між собою за способом генерації потоку часток: метод термічного випаровування та метод розпилення матеріалу іонним бомбардуванням. Зупинимось на першому з них, бо саме цей метод було покладено в основу розроблюваної установки [1].

Принцип метода термічного випаровування (рис. 1.5) полягає у нагріванні матеріалу в спеціальному випаровувачі 2 до температури, при якій починається інтенсивний процес випаровування, потім відбувається наступна конденсація парів матеріалу у вигляді тонкої плівки на поверхні підложки 5, розташованої на підложкотримачі 4 на деякій відстані від випаровувача 2. Для керування початком та закінченням процесу осадження використовується засувка 6, яка здатна перекривати потік часток 3, що випаровуються.

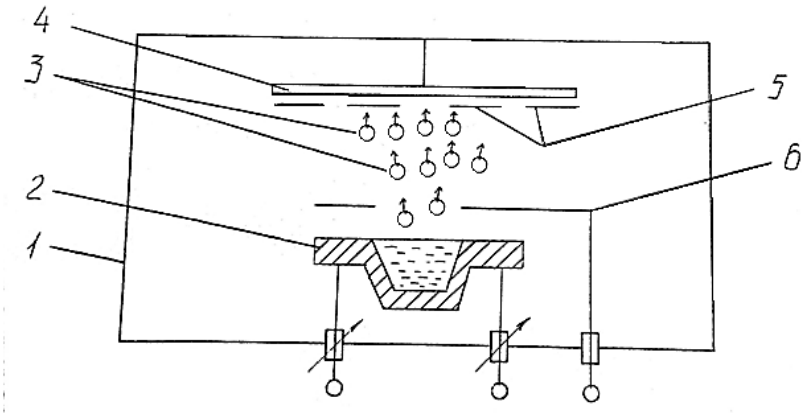


Рисунок 1.5 - Метод нанесення тонких плівок у вакуумі:
1 – робоча камера; 2 – випаровувач; 3 – частки, що випаровуються;
4 – підложкотримач; 5 – підложки; 6 – засувка

1.2 Огляд існуючих установок вакуумного нанесення тонких плівок

Перші промислові установки вакуумного нанесення тонких плівок (УВН) для виробництва тонкоплівкових елементів ІМС являють собою установки ковпакового типу (рис. 1.6), які створені на базовій моделі УВН-70А-1. Під ковпаком 6 на платі 2 встановлені випаровувачі резистивного типу 1 і 3, або діодні розпиляючі системи, які мають змогу перекриватися засувками 4. Підложки, закріплені на каруселі 7, нагріваються спіраллю 8 і при осадженні різних шарів послідовно співпадають з масками, розташованими на каруселі 5. При такому розташуванні внутрішньокамерних механізмів реалізується індівідуальний метод виготовлення плівкових елементів гібридних ІМС на ситалових підложках через маски.

Використання декількох випаровувачів дозволяє послідовно отримувати наприклад, підшар, шар і змішаний перехід від підшару до шару за один цикл відкачки. На одній із позицій каруселі 7 може бути розміщений імітатор, на якому змонтовані терморезистор для виміру температури підложки і датчик опору плівки що наноситься. На робочих позиціях встановлені швидко залізні спіралі, ізолюючі друг від друга джерела випаровування.

В промислових модифікаціях ковпакових установках наприклад УВН - 2М-1, УВН-62П-1, УВН-75Р-2, УВН-71П-3, використовуються резистивні елементи та електронно-променеві випаровувачі, діодні системи іонного розпилення, плоскі і сферичні каруселі з підложками, реалізуючи як індивідуальний, так і груповий методи обробки (одним джерелом одночасно обробляється декілька підложок).

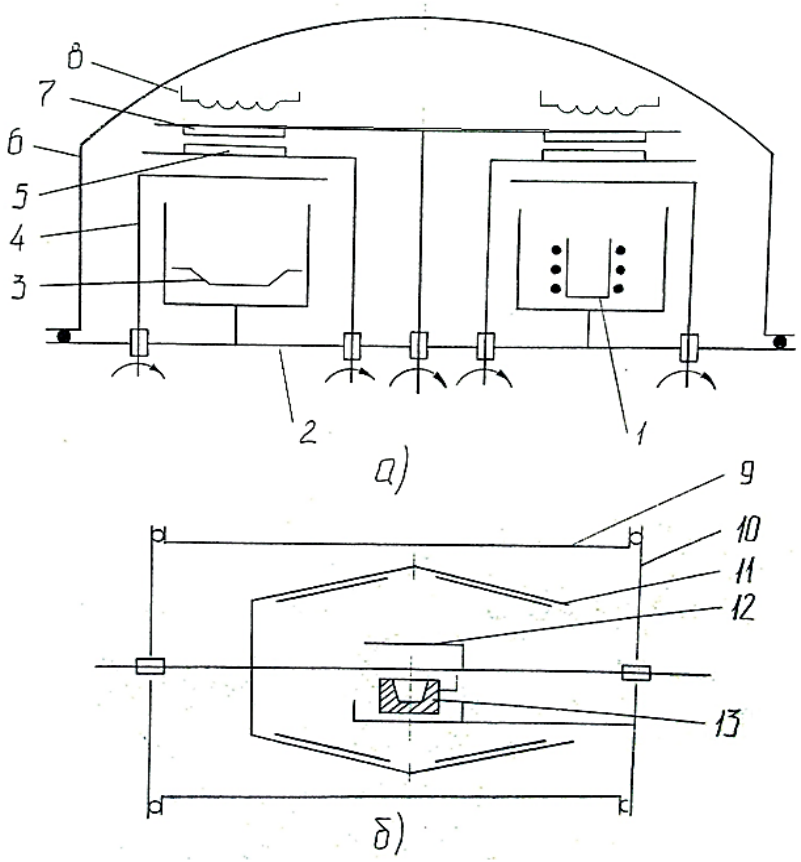


Рисунок 1.6 - Обладнання для нанесення тонких плівок у вакуумі:
1 – випаровувач резистивного типу; 2 – плата; 3 - діодна розпилююча система; 4 – засувка; 5 – карусель; 6 – ковпак; 7 – карусель підложок; 8 – підігрівна спіраль; 9 – робоча камера; 10 – торцова кришка; 11 – підложконосійний барабан; 12 – засувка; 13 – система випаровування

Вакуумна система забезпечує розрідження 10^{-4}... 10^{-5} Па, побудована на базі паромасляного насоса Н-2Т або Н-2Т-3, керування процесом відкачки напівавтоматичне. Продуктивність установок багато в чому визначається вмістом каруселі, яка для більшості УВН цього типу складає 8-12 підложок розміром 60·48 мм. Похибка товщини плівки складає ± (20…25)%. На обладнанні такого типу обробляються ІМС 3-й ступені інтеграції (до 1000 елементів на кристал) з мінімальними розмірами елементів більше 10 мкм.

В умовах масового виробництва ІМС та при прямуванні до збільшення розмірів оброблюваних підложок невелика кількість одночасно завантажувальних підложок в ковпакових УВН була стримуючим фактором

та причиною появи більш продуктивного обладнання. Використання в якості підложки барабана 11 (рис.1.6. б) дозволяє збільшити число одночасно завантажувальних ситалових підложок до 70-80, паралельно зменшити товщину осаджувальних плівок до 5-10 мкм з відносною похибкою по товщині до ± (15…20)%, а також підвищити коефіцієнт використання матеріалу до 0,7…0,8 (для карусельних підложкотримачів цей коефіцієнт складає 0,08…0,1). Робоча камера виконана у вигляді циліндру 9 з горизонтальною віссю і має торцеві кришки 10, що можуть відкочуватися по направленню вздовж вісі циліндру. У ролі базової моделі виступає установка УВН-70А-2, на основі якої було створено декілька технологічних модернізацій (УВН-71П-4, УВН-75П-1 та ін.) шляхом монтування внутрішньокамерних пристроїв (систем випаровування 13 або розпилення датчиків, підігрівачів, засувок 12 і т.п., – рис.1.6) і доукомплектування відповідною системою живлення та керування.

Установки такого типу мають більшу місткість тигельного випаровувача непрямого підігріву з можливістю завантаження випарюваного матеріалу у тигель. Система відкачки виконана на базі дифузійних насосів Н-5К, Н-10К та інших і забезпечує робочий тиск на рівні 10^{-5} Па. На цих установках стало можливим обробляти ВІС (великі інтегральні схеми) з числом елементів на кристалі від $5 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^4$ і мінімальними розмірами елементів 5…10 мкм.

Всі вищеописані УВН ковпакового та горизонтально-циліндричного типу є установками періодичної дії, принцип роботи яких полягає у періодичній розгерметизації робочої камери для вивантаження відпрацьованих і завантаження нових підложок, ковпака або виводу на режим систем розпилення, контролю параметрів потоку осаджувальних часток, відкриванні засувки, проведенні деяких інших операцій.

1.3 Принцип роботи восьмипозиційної вакуумної установки для виробництва гібридних інтегральних мікросхем

Схема розміщення елементів підковпакового механізму восьмипозиційної вакуумної установки для виробництва гібридних інтегральних мікросхем (установка для виробництва ІМС) показана на рис.1.7. Напилення пасивної частини гібридних ІМС за технологічним процесом послідовного типу, сутність якого полягає у послідовному нанесенню (напиленню) одного і того ж шару на всі підложки або напиленні всіх шарів через комплект масок на одну підложку, потребує введення у командний пристрій автоматизованої установки складного алгоритму керування.

До початку процесу напилення всі елементи підковпакового механізму встановлюються у початковий стан: стіл підложок 1 з підложками 3, стіл масок 8, стіл випаровувачів 19 на вісь напилення 0; підйомник стола масок 14 піднімається; засувка 17 закривається (положення II). Стіл масок та стіл підложок переміщуються у двох взаємно перпендикулярних напрямах (вісі X,Y). Столи приводяться у рух за допомогою крокових двигунів (КД) встановлених на координатних вісях. Крокові двигуни (КД) 5,7,11,15 зв'язані зі столами через редуктори 4,6,10,16. Підйомник масок 14 переміщується по вісі Z і приводиться у рух КД 12 через редуктор 13. На столі 19 знаходиться 16 випаровувачів 18, які виводяться на вісь напилення 0 КД 21, зв'язаним зі столом через редуктор 20.

При напиленні всіх шарів через комплект масок 9 на одну підложку перша підложка прогрівається до заданої температури пічкою 2. Перший випаровувач, виведений на вісь напилення прогрівається до досягнення заданої температури і швидкості напилення. Напилення здійснюється на вимірювальний елемент датчика швидкості напилення через отвір 22 у засувці 17. Після досягнення заданої швидкості напилення засувка 17 відчиняється і здійснюється напилення першого шару через отвір 22 до тих пір, поки не буде досягнута задана товщина діелектрика, або заданий номінал опору. По сигналу з датчика про досягнення заданої товщини засувка 17 зачиняється, випаровувач 18 вимикається, пічки відводяться, і стіл масок переміщується вліво на одну маску. Після виводу на вісь напилення наступної маски

підйомник масок піднімається, пічки повертаються у початковий стан і, якщо потрібно на вісь напилення виводиться наступний випаровувач. При напиленні резисторів підйомник масок притискає маску впритул до підложки. При напиленні діелектрика конденсаторів відстань між маскою та підложкою після підйому знаходиться у межах 0,2…0,5 мкм.

Аналогічно здійснюється напилення наступних шарів через інші маски. Після напилення через четверту маску стіл масок зміщується по вісі Y на наступний ряд, а після напилення через п’яту маску стіл масок рухається по вісі X у зворотному напрямку. Після закінчення процесу напилення першої ІМС через n-масок на вісь напилення виводиться перша маска і друга підложка, і всі операції процесу напилення повторюються. Якщо для напилення однієї ІМС потрібно менше восьми масок, то після напилення першої ІМС на вісь напилення виводиться дев'ята маска, так як стіл масок встановлюється другий комплект масок.

Коли при роботі маска нерухома, а переміщуються підложки, вони прогріваються до температури, необхідної для напилу першого шару. Перший випаровувач прогрівається до досягнення заданої швидкості напилення, засувка 17 відкривається, здійснюється напилення шару заданої товщини. Після чого засувка 17 зачиняється, підйомник 14 опускає маску, стіл підложок 1 переміщує другу підложку на вісь напилення. Підйомник масок 14 піднімається, відчиняється засувка 17 і здійснюється напилення першого шару на другу підложку і так далі до напилення першого шару на останню підложку. Після напилення першого шару на останню підложку випаровувач 18 вимикається, і на вісь напилення виводиться попередньо підігрітий другий випаровувач. Одночасно на вісь напилення переміщується друга маска. Наступні операції напилення другого та всіх інших шарів аналогічні операціям напилення першого шару.

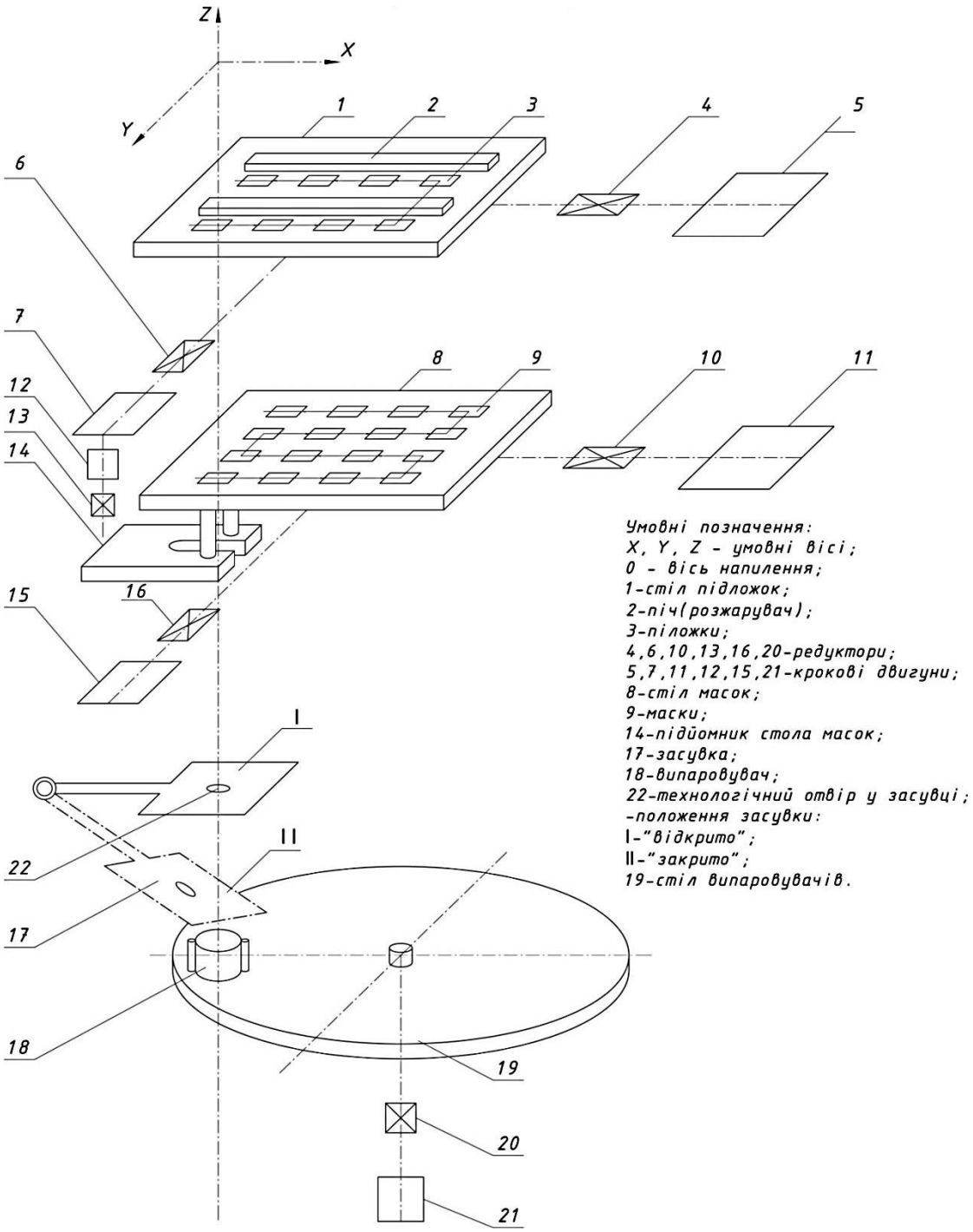


Рисунок 1.7 - Восьмипозиційна вакуумна установка для виробництва гібридних інтегральних мікросхем

1.4 Вибір системи електропривода установки для виробництва ІМС

До пристроїв керування електроприводом установки для виробництва ІМС пред’являються наступні вимоги:

а) можливість довільного набору програми перед початком роботи установки і зміни її у процесі напилення;

б) забезпечення повної автоматизації процесу напилення комплекту ІМС, які находяться у вакуумній камері;

в) можливість здійснення, у разі необхідності, ручного керування установкою;

г) простота, надійність, економічність та безпечність установки.

Розгляд цих вимог щодо електропривода установки дає можливість використовувати у якості привідних двигунів електродвигуни всіх існуючих типів. Але дискретність та точність з якою відбуваються всі процеси, що пов’язані з переміщенням робочих органів установки, найкраще виконуються кроковими двигунами (КД). Адже саме крокові двигуни забезпечують необхідну точність позиціонування робочих органів установки в межах ±0,01мм з відносною швидкодією не гірше 3 мс, а також добре пов'язуються зі схемою керування, виконаною на базі логічних елементів, яка у свою чергу, добре співпрацює з мікропроцесорною системою керування установкою.

Застосування різноманітного крокового електропривода в якості слідкуючої системи дозволяє значно спростити структуру САК, що особливо ефективно для установок з великим числом виконавчих органів, так як при цьому спрощується їх синтез і аналіз. Структура САК спрощується за рахунок відсутності корегуючих зворотніх зв’язків, а її статична похибка обмежується одним кроком. При цьому не потрібно ускладнювати САК для забезпечення регулювання швидкості від номінальної до нуля зі збереженням синхронності та синфазності в усьому робочому діапазоні швидкостей.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Розрахунок кінематичної передачі підйомника стола масок

2.1.1 Розрахунок передаточного числа черв'ячної передачі

Розрахунок кінематичної передачі і її навантаження проводимо у відповідності з [7,8]. Слід також зауважити, що для підйому та опускання платформи з масками застосовується не одна, а дві кінематичні передачі «черв'як -черв'ячне колесо - гвинт - гайка». У такому випадку розрахунок ведемо для однієї кінематичної передачі «черв'як - черв'ячне колесо - гвинт - гайка» враховуючи, що статичні і динамічні моменти, які виникають при підйомі та опусканні платформи, розподіляються рівномірно між цими кінематичними передачами. Сумарний же момент, який необхідно створити на валу двигуна, буде рівний двом моментам однієї з цих передач.

Визначаємо кутову швидкість обертання черв'ячного колеса виходячи з потрібної швидкості підйому чи опускання платформи з масками за формулою:

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot V/p; \qquad (2.1)$$

де V – потрібна швидкість переміщення гайки відносно гвинта, м/с;

p – крок різьби передачі гвинт-гайка, м.

При p =2мм = $2*10^{-3}$м і потрібній швидкості переміщення V=1мм/с =$1 \cdot 10^{-3}$ м/с , маємо:

$$\omega_2 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}001/2 \cdot 10^{-3} = 3{,}1416 \text{ рад/с.}$$

Передаточне число черв'ячного редуктора вибираємо виходячи із кроку різьби передачі гвинт-гайка – p і максимальної частоти прийомистості крокового двигуна. Приймаючи крок крокового двигуна $\alpha = 3^0$ (звичайний номінальний крок для крокових двигунів з реактивним ротором) та максимальну частоту прийомистості рівною $f_{пр}$ = 500 Гц, яку забезпечує більшість кронових двигунів, визначаємо максимально допустиму кутову швидкість обертання крокового двигуна за формулою:

$$\omega_{дв.max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{пр} \cdot \alpha}{360^0}; \quad (2.2)$$

$$\omega_{дв.max} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 500 \cdot 3}{360^0} = 26.18 \text{ рад/с}.$$

Вибираємо передаточне число черв'ячної передачі U виходячи із співвідношення:

$$U_{дв.max} \leq \frac{\omega_{дв.max}}{\omega_2} \quad (2.3)$$

$$U_{дв.max} \leq \frac{26.18}{3.1416} = 8.33 .$$

Приймаємо U = 8 (стандартизоване для черв'ячної передачі). Тоді кутова швидкість обертання черв'яка черв'ячної передачі:

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot U; \quad (2.4)$$

$$\omega_1 = 3.1416 \cdot 8 = 25.16 \text{ рад/с}.$$

2.1.2 Розрахунок статичного навантаження черв'ячної передачі

Крутний момент, який необхідно створити на валу черв'ячного колеса, визначаємо за формулою:

$$T_2' = T_{2H} + T_{2S}, \quad (2.5)$$

де T_{2H} – момент, який необхідно створити на вході передачі гвинт-гайка;

T_{2S} – момент опору, який йде на тертя ковзання в опорах, напрямних, тощо.

Величину $T_{2н}$ визначаємо за формулою:

$$T_{2H} = \frac{F_n \cdot V}{\omega_2 \cdot \eta_{22}}, \quad (2.6)$$

де F_n – сила опору, яка діє на гайку, Н

η_{22} – коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі гвинт-гайка.

ККД передачі гвинт-гайка визначаємо за формулою:

$$\eta_{22} = \frac{tg\psi}{tg(\psi + \varphi')}, \qquad (2.7)$$

де ψ - кут підйому витків різьби передачі гвинт-гайка, град (^{0});

φ – приведений кут тертя, град. (^{0}).

Спочатку визначимо кут підйому витків різьби за формулою:

$$tg\psi = \frac{p \cdot Z}{\pi \cdot d^2}, \qquad (2.8)$$

де Z – число заходів передач гвинт-гайка;

d^2 – середній діаметр передачі гвинт-гайка.

За відомими значеннями Z = 1, d^2 = 15,5 мм [7] , знаходимо:

$$tg\psi = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{3.1416 \cdot 15.5 \cdot 10^{-3}} = 0.020536 \ ;$$

$$\psi = 1.1765^0 .$$

Приведений кут тертя визначаємо за формулою:

$$tg\varphi' = \frac{f}{\cos\delta}, \qquad (2.9)$$

де f - коефіцієнт тертя ковзання;

f = 0,05 - для змащених сталевих деталей;

$\delta = 3^0$ - для трикутної різьби передачі гвинт-гайка.

Підставляємо відомі значення-отримаємо:

$$tg\varphi' = \frac{0.05}{\cos 3} = 0.05007 ;$$

$$\varphi' = 2.8624^0.$$

Умова самогальмування різьбової пари виконується, тому що:

$$\varphi' \geq \psi .$$

Тоді вже можна розрахувати шуканий ККД передачі гвинт-гайка:

$$\eta_{22} = \frac{tg1.1765^0}{tg(1.1765^0 + 2.8624^0)} = 0.291 .$$

Далі визначаємо силу опору платформи з масками за рахунок опору ковзання у напрямних за формулою:

$$F_{Н} = f \cdot n \cdot g \cdot m, \quad (2.10)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання, f = 0,05;

n – кількість прямолінійних напрямних, n = 4;

g – прискорення вільного падіння, g - 9,81 м/с^2;

m – маса платформи з масками, m = 4 кг.

Підставляючи відомі значення отримаємо:

$$F_{Н} = 0.05 \cdot 4 \cdot 9.81 \cdot 4 = 7.848 \ H.$$

Визначаємо силу опору платформи з масками при її підніманні за формулою:

$$F_{n} = F_{Н} + mg; \quad (2.11)$$

$$F_{n} = 9{,}81 \cdot 4 + 7{,}484 = 47.088 \text{ Н}.$$

Визначаємо силу опору платформи з масками при її опусканні за формулою:

$$F_{on} = F_{Н} - mg; \quad (2.12)$$

$$F_{on} = 7.848 - 9.81 \cdot 4 = -31.392 \text{ Н}.$$

Середня сила опору платформи з масками за рахунок її підйому та опускання визначається за формулою:

$$F_{ср} = F_{n} - F_{on}; \quad (2.13)$$

$$F_{ср} = 47.088 - 31.392 = 15.7 \text{ Н}.$$

За рахунок нерівномірного змащування приймаємо $F_{ср}$ = 16 Н.

Момент, який необхідно створити на вході передачі гвинт - гайка при заданій силі $F_{ср}$ = 16 Н :

$$T_{2Н} = \frac{16 \cdot 0.001}{3.1416 \cdot 0.291} = 0.0175 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент опору, отриманий за рахунок тертя ковзання в опорах, на валу черв'ячного колеса знаходимо за формулою:

$$T_{2S} = \frac{\pi \cdot Q \cdot f \cdot d}{4}, \qquad (2.14)$$

де Q – навантаження діюче на вал, Н ;

f – коефіцієнт тертя ковзання в опорах ;

d – діаметр вала, м.

За відомими значеннями Q = 10 Н і d = 8 мм при f = 0.05 отримаємо:

$$T_{2S} = \frac{3.1416 \cdot 10 \cdot 0.05 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{4} = 0.003 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тоді сумарний крутний момент, який необхідно створювати на валу черв'ячного колеса, визначиться за вищевказаною формулою (2.5):

$$T_2' = 0{,}0175 + 0{,}003 = 0{,}0205 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Враховуючи, що таких передач ми маємо дві, сумарний крутний момент, який необхідно створити на спільному валу буде визначатися за формулою:

$$T_2 = 2T_2'; \qquad (2.15)$$

$$T_2 = 2 \cdot 0.0205 = 0.041 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.1.3 Попередній розрахунок черв'ячної передачі

Попередньо визначаємо орієнтовну швидкість ковзання за формулою:

$$V_s = \frac{4 \cdot \omega_1}{1 \cdot 10^3} \cdot \sqrt[3]{T_2'}; \qquad (2.16)$$

$$V_s = \frac{4 \cdot 25.13}{1 \cdot 10^3} \cdot \sqrt[3]{0.0205} = 0.0275 \text{ м/с}.$$

Для виготовлення черв'яка беремо сталь 45. Для вінця черв'ячного колеса із швидкістю ковзання Vs =0,0275 м/с беремо чавун марки Сч 15.

Визначаємо мінімальну міжосьову відстань передачі за формулою:

$$\alpha_{\omega_{min}} = k_a \cdot \left(\frac{z_2}{q} + 1\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{T_2' \cdot k_{HB} \cdot q^2}{z_2 \cdot [\sigma]_H^2}}; \qquad (2.17)$$

де - k_a допоміжний коефіцієнт для взаємодії матеріалів сталь-чавун; вибираємо k_a=315 МПа$^{1/3}$;

Z_2 - число зубців черв'ячного колеса; число витків черв'яка беремо $Z_1 = 4$, тоді число зубців черв'ячного колеса визначиться за формулою:

$$Z_2 = Z_1 \cdot U; \qquad (2.18)$$

$$Z_2 = 8 \cdot 4 = 32 \text{ зубця.};$$

q – коефіцієнт діаметра черв'яка, вибираємо із [7], q=10;

k_{HB} – коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження по ширині вінця черв'ячного колеса ;

$[\sigma]_H^2$ - допустиме контактне навантаження, МПа.

Коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження по ширині вінця черв'ячного колеса, визначаємо за формулою:

$$k_{HB} = 1 + (\frac{Z_2}{\Theta})^3 \cdot (1 - x); \qquad (2.19)$$

де Θ - коефіцієнт деформації черв'яка ; вибираємо Θ=70 у відповідності з [7];

x - коефіцієнт, що враховує вплив режиму роботи передачі на приробку зубців; для нашого режиму роботи вибираємо x = 0,31.

Тоді :

$$k_{HB} = 1 + (\frac{32}{70})^3 \cdot (1 - 0.31) = 1.066.$$

Допустиме контактне навантаження для вінця черв'яка, виготовленого із чугуна, визначаємо у відповідності з виразом:

$$[\sigma]_H = [\sigma]_{H0} = 175 - 35 \cdot V_s ; \qquad (2.20)$$

$$[\sigma]_H = [\sigma]_{H0} = 175 - 35 \cdot 0.0275 = 174.04 \text{ Мпа.}$$

Тоді мінімальна міжосьова відстань черв'ячної передачі :

$$\alpha_{\omega_{min}} = 315 \cdot (\frac{32}{10} + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{0.0275 \cdot 1.066 \cdot 10^2}{32 \cdot 174.04^2}} = 17.35 \text{ мм.}$$

Визначаємо модуль черв'ячної передачі за формулою:

$$m' = \frac{2 \cdot a_{\omega min}}{Z_2 + q}; \qquad (2.21)$$

$$m' = \frac{2 \cdot 17.35}{32 + 10} = 0.826$$

Виходячи з конструктивних міркувань вибираємо m=1,00, якому відповідає значення q=10.

2.1.4 Уточнений розрахунок параметрів черв'ячної передачі

Ділильні діаметри черв'яка та черв'ячного колеса визначаємо у відповідності з формулами:

$$d_1 = m \cdot q \ ; \qquad (2.22)$$

$$d_2 = m \cdot Z_2 ; \qquad (2.23)$$

$d_1 = 1.00 \cdot 10 = 10$ мм.

$d_2 = 1{,}00 \cdot 32 = 32$ мм.

Діаметри вершин витків черв'яка і черв'ячного колеса визначаємо за формулою:

$$d_{a1} = d_1 + m ; \qquad (2.24)$$

$$d_{a2} = d_2 + m ; \qquad (2.25)$$

$d_{a1} = 10 + 1.00 = 11$мм.

$d_{a2} = 32 + 1{,}00 = 33$ мм.

Міжосьову відстань черв'ячної передачі знаходимо за формулою :

$$a_\omega = 0.5 \cdot (d_1 + d_2) ; \qquad (2.26)$$

$a_\omega = 0.5 \cdot (10 + 32) = 21$ мм.

Ширину вінця черв'ячного колеса визначаємо у відповідності з [7] за формулою:

$$b_2 \le 0.67 \cdot d_{a1} ; \qquad (2.27)$$

$b_2 \le 0.67 \cdot 11 = 7.37$ мм.

Вибираємо:

$b_2 = 7$ мм.

Ділильний кут підйому лінії витка черв'яка :

$$tg\gamma = \frac{Z_1}{q}; \quad (2.28)$$

$$tg\gamma = \frac{4}{10} = 0.4,\ \gamma = 21.8.$$

Швидкість ковзання у зчепленні :

$$V_s = \frac{0.5 \cdot \omega_1 \cdot d_1}{\cos^3 \gamma}; \quad (2.29)$$

$$V_s = \frac{0.5 \cdot 25.13 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{\cos^3 21.8} = 0.1568 \text{ м/с}.$$

Еквівалентне число зубців черв'ячного колеса :

$$Z_{V2} = \frac{Z_2}{\cos^3 \gamma}\ ; \quad (2.30)$$

$$Z_{V2} = \frac{32}{\cos^3 21.8} = 39.98$$

Розміри елементів витків черв'яка і зубців черв'ячного колеса :

- висота головки витка черв'яка і зубця колеса :

$h_a = m = 1.00$ мм.

- висота ніжки витка і зубця :

$h \cdot f = 1.2 \cdot m = 1.2 \cdot 1.00 = 1.2$ мм.

- висота витка і зубця ;

$h = 2.2 \cdot m = 2.2 \cdot 1.00 = 2.2$ мм.

- розрахункова товщина витка :

$S = 0.5 \cdot \pi \cdot m = 0.5 \cdot 3.1416 \cdot 1.00 = 1.57$ мм.

Розміри вінців черв'яка і черв'ячного колеса :

- діаметри впадин:

$$d_{f1} = d_1 - 2.4 \cdot m \quad (2.31)$$

$$d_{f2} = d_2 - 2.4 \cdot m \quad (2.32)$$

$d_{f1} = 10 - 2.4 \cdot 1.00 = 7.6$ мм.

$d_{f2} = 32 - 2.4 \cdot 1{,}00 = 29{,}6$ мм.

- найбільший діаметр черв'ячного колеса :

$$d_{am} \le d_{a2} + 2 \cdot m; \quad (2.33)$$

$$d_{am} \le 33 + 2 \cdot 1.00 = 35 \text{ мм.}$$

- довжина нарізної частини черв'яка :

$$b_1 \ge (12.5 + 0.09 \cdot Z_2) \cdot m; \quad (2.34)$$

$$b_1 \ge (12.5 + 0.09 \cdot Z_2) \cdot 1.00 = 15.38 \text{ мм.}$$

Вибираємо $в_1$ = 16 мм.

2.1.5 Розрахунок ККД черв'ячної передачі

ККД черв'ячного редуктора визначаємо за формулою:

$$\eta = \frac{tg\gamma}{tg(\gamma + \phi')}, \quad (2.35)$$

де φ' - приведений кут тертя; у відповідності з [7] вибираємо $\varphi' = 5{,}15^0$.

Тоді ККД черв'ячної передачі

$$\eta = \frac{tg21.8}{tg(21.8 + 5.15)} = 0.79.$$

2.2 Розрахунок навантажень електропривода підйомника стола масок

2.2.1 Розрахунок статичних навантажень на валу електродвигуна

Момент опору на валу електродвигуна визначаємо за формулою:

$$T'_{ст} = T_{1H} + T_{1S}, \quad (2.36)$$

де $T_{1н}$ - момент, який необхідно створити на вході черв'ячної передачі, Н·м;

T_{1S} - момент опору, який йде на тертя ковзання в опорах, Н·м.

$$T'_{1H} = \frac{T'_2 \cdot \omega_2}{\omega_1 \cdot \eta}, \quad (2.37)$$

де η –ККД черв'ячної передачі .

Тоді в результаті розрахунку маємо

$$T'_{1H} = \frac{0.0205 \cdot 3.1416}{25.13 \cdot 0.79} = 0.0032 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент опору, який йде на тертя ковзання в опорах, знаходимо за формулою (2.14):

$$T_{1S} = \frac{\pi \cdot Q \cdot f \cdot d}{4},$$

де Q – навантаження, діюче на вал черв'яка, Н ;

f – коефіцієнт тертя ковзання в опорах;

d – діаметр вала, м;

За відомими значеннями Q =10 Н і d=8 мм, знаходимо

$$T_{1S} = \frac{3.1416 \cdot 10 \cdot 0.05 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{4} = 0.0031 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Враховуючи, що кінематичних передач в електроприводі підйомника стола масок дві, момент опору на валу електродвигуна подвоюємо:

$$T_{ст} = 2 \cdot T'_{ст} ; \qquad (2.38)$$

За формулою (2.36) маємо:

$$T'_{ст} = 0,0032 + 0,0031 = 0,0063 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тоді :

$$T_{ст} = 2 \cdot 0,0063 = 0,0126 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.2.2 Розрахунок динамічних навантажень на валу електропривода

Розрахунок динамічних навантажень на валу електродвигуна проводимо у відповідності з [9].

Динамічний момент опору на валу електродвигуна визначаємо за формулою:

$$T_{дин} = J_{\sum мех.} \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_{\sum мех.} \cdot E_{доп}, \qquad (2.39)$$

де $J_{\sum мех.}$ - сумарний момент інерції всіх частин механізму які знаходяться у русі, $кг \cdot м^2$;

$E_{доп}$ – допустиме кутове прискорення частин, що обертаються, рад/с^2.

Сумарний приведений до валу двигуна момент інерції визначаємо за формулою :

$$J_{\sum мех.} = J_{дв} + J_{муф} + J_{вал} + J_{ст.м.} + 2 \cdot (J_{ч.} + J_{ч.к.} + J_{гв.}), \quad (2.40)$$

де $J_{дв}$ - момент інерції ротора двигуна, кг$\cdot$м^2;

$J_{муф}$ - момент інерції муфти, кг$\cdot$м^2;

$J_{вал}$ - момент інерції вала, кг$\cdot$м^2 ;

$J_{ст.м.}$ - момент інерції платформи з масками, кг$\cdot$м^2;

$J_{ч.}$ - момент інерції черв'яка, кг$\cdot$м^2;

$J_{ч.к.}$ - момент інерції черв'ячного колеса, кг$\cdot$м^2 ;

$J_{гв.}$ - момент інерції гвинта, кг$\cdot$м^2.

Так як $J_{дв}$ - невідоме, то користуючись [9] приймаємо його рівним: $J_{дв} = 0{,}5 \cdot J_{\sum мех.}$, де $J_{\sum мех.}$ - сумарний момент інерції механізму, крім моменту інерції ротора двигуна.

Тоді:

$$J_{муф.} = \frac{m_{муф} \cdot R^2_{муф}}{2}, \quad (2.41)$$

де $m_{муф}$ - маса з'єднувальної муфти, кг;

$R^2_{муф}$ - радіус муфти, м;

Підставляючи відомі значення, отримаємо:

$$J_{муф.} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{2} = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції вала визначається за формулою:

$$J_{вал} = \frac{m_{вал} \cdot R^2_{вал}}{2}; \quad (2.42)$$

де $m_{вал}$ - маса вала, кг; $m_{вал}$=0,02 кг;

$R_{вал}$ - радіус вала, м; $R_{вал}$ = 0,004 м.

$$J_{вал} = \frac{0{,}02 \cdot 0{,}004^2}{2} = 0{,}16 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Момент інерції черв'яка визначається за формулою:

$$J_{ч.} = \frac{m_{ч.} \cdot R^2_{ч.}}{2} ; \qquad (2.43)$$

де $m_{ч.}$ - маса черв'яка, кг; $m_{ч.}$=8*10^{-3} кг;

$R_{ч.}$ - середній радіус черв'яка, м; $R_{ч.}$=0,005 м;

$$J_{ч.} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}005^2}{2} = 0{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Момент інерції черв'ячного колеса визначається за формулою:

$$J_{ч.к.} = \frac{m_{ч.к.} \cdot R^2_{ч.к.}}{2} ; \qquad (2.44)$$

де $m_{ч.к.}$ – маса черв'ячного колеса, кг; $m_{ч.к.}$ = 0,01 кг ;

$R_{ч.к.}$ – радіус черв'ячного колеса, м; $R_{ч.к.}$ = 0,016 м ;

$$J_{ч.к.} = \frac{0{,}01 \cdot 0{,}016^2}{2} = 1{,}28 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Момент інерції платформи з масками визначаємо за формулою:

$$J_{ст.н.} = m_{ст.н} \frac{V^2_{ст.н.}}{\omega^2_{гв.} \cdot \eta_{мех}}, \qquad (2.45)$$

де $m_{ст.н}$ - маса платформи з маслами, $m_{ст.н}$=4 кг ;

$V_{ст.н.}$ - швидкість підйому платформи, м/с; $V_{ст.н.}$=1 мм/с.

$\omega_{гв.}$ - кутова швидкість гвинта-гайки, рад/с; $\omega_{гв.}$ = 3,1416 рад/с;

$\eta_{мех}$ - ККД механізму, який визначається за формулою:

$$\eta_{мех} = \eta_{муф} \cdot \frac{\eta_{чер} \cdot \eta_{гв.г.}}{2}, \qquad (2.46)$$

де $\eta_{муф}$ - ККД з'єднувальної муфти; $\eta_{муф}$=0,99;

$\eta_{чер}$ - ККД черв'ячної передачі; $\eta_{чер}$=0,79;

$\eta_{гв.г.}$ - ККД передачі гвинта; $\eta_{гв.г.}$ =0,291.

Тоді:

$$\eta_{мех} = 0{,}99 \cdot \frac{0{,}79 \cdot 0{,}291}{2} = 0{,}12.$$

Підставляючи відомі значення у формулу (2.45) отримаємо:

$$J_{ст.н.} = 4 \cdot \frac{0{,}001^2}{3{,}1416^2 \cdot 0{,}12} = 3{,}38 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Сумарний момент інерції механізму без урахування моменту інерції ротора двигуна:

$$J_{\sum мех.} = 0{,}1 \cdot 10^{-6} + 0{,}16 \cdot 10^{-6} + 3{,}38 \cdot 10^{-6} + J_{ст.м.} + 2 \cdot (0{,}1 \cdot 10^{-6} + 1{,}28 \cdot 10^{-6} + 0{,}05 \cdot 10^{-6}) =$$
$$= 6{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Тоді:

$$J_{дв} = 0{,}5 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-6} = 3{,}25 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Остаточно визначаємо:

$$J_{мех} = 6{,}5 \cdot 10^{-6} + 3{,}25 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 9{,}75 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо допустиме кутове прискорення механізму за формулою:

$$E_{доп} = \frac{a_{доп}}{\rho}, \qquad (2.47)$$

де $a_{доп}$ - допустиме лінійне прискорення платформи з масками, м/с; вибираємо із [9] $a_{доп}$=1м/с ;

ρ - приведений радіус обертання, м.

Приведений радіус обертання визначаємо за формулою:

$$\rho = \frac{d_{гв}}{2 \cdot U}, \qquad (2.48)$$

де $d_{гв}$ - діаметр гвинта передачі гвинт-гайка, м;

U - передаточне число черв'ячної передачі;

$$\rho = \frac{0{,}0155}{2 \cdot 8} = 0{,}969 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$E_{доп} = \frac{1}{0{,}969 \cdot 10^{-6}} = 1032 \text{ рад/с}^2.$$

Визначаємо час пуску електродвигуна за формулою:

$$t_п = \frac{\omega_{гв}}{E_{доп}} \ ; \qquad (2.49)$$

$$t_п = \frac{3{,}1416}{1032} = 0{,}003 \text{ с.}$$

Визначаємо динамічний момент опору електродвигуна за формулою:

$$T_{дин} = J_{МЕХ} \cdot E_{ДОП} = 9{,}75 \cdot 10^{-6} \cdot 1032 = 0{,}01 \text{ Нм.} \qquad (2.39)$$

2.3 Вибір електродвигунів стола масок

Визначаємо сумарний обертовий момент, який повинен створювати електродвигун за основним рівнянням руху:

$$T_{дв.} = T_{ст.} + T_{дин.}. \qquad (2.50)$$

Підставляючи раніше розраховані значення, отримаємо:

$$T_{дв.} = 0{,}0126 + 0{,}01 = 0{,}0226 \text{ Нм.}$$

Вибір привідного крокового електродвигуна проводимо у відповідності з умовами:

$$M_{дв.} \geq T_{дв.}; \qquad (2.51)$$

$$\omega_{дв.} \geq \omega_1, \qquad (2.52)$$

де $M_{дв.}, \omega_{дв.}$ - момент і кутова швидкість обертання ротора крокового двигуна відповідно;

$T_{дв.}, \omega_1$ - потрібні момент і кутова швидкість для електроприводу підйомника стола масок.

Тоді

$$M_{дв.} \geq 0{,}0226 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$\omega_{дв.} \geq 25{,}13 \text{ рад/с.}$$

Виходячи з умови (2.51) вибираємо із [10] кроковий двигун з реактивним ротором типу ШДР-711.

Дано: максимальний статичний синхронізуючий момент : $M_{макс.с}$ =0,0294 Н м; номінальна фазна напруга; $U_{н.ф.}$=10В; номінальний струм фази ; $I_{н.ф.}$= 1,5 А; число пар полюсів: $Z_р$=30; номінальний крок $\alpha = 3^0$; номінальний момент інерції ротора: $J_р$=4,5*10^{-6} кгм^2 ; сталі часу: $T_н$=5,9*10^{-3} с; $T_е$=0585*10^{-3} с; номінальна частота прийомистості $f_{пр}$=600 Гц.

Для отримання максимального моменту використовуємо одночасне живлення двох фаз крокового двигуна.

Перевіримо обраний двигун для заданих умов навантаження;

$M_{дв.} = 0{,}0294 \geq T_{дв.}$
$0{,}0294 = 0{,}0226\ Нм.$ – умова виконується.

Визначаємо допустиму кутову швидкість обертання ротора крокового двигуна у відповідності із формулою:

$$\omega_{доп.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{пр.}}{Z_р \cdot m}, \qquad (2.53)$$

де m - число фаз крокового двигуна, або тактів роботи блока керування (комутатора) кроковим двигуном; при чотирьохтактному режимі керування роботою КД (m=4) маємо:

$$\omega_{доп.} = \frac{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 600}{30 \cdot 4} = 31{,}42 \text{ рад/с.}$$

Перевіряємо умову (2.52) :

$\omega_{дв.} = 31{,}42 \geq \omega_1 = 25{,}13$ рад/с – умов

Висновки

1. Даний кроковий двигун типу ШДР-711 задовольняє умовам (2.51) та (2.52), таким чином підходить до застосування його у якості приводного електродвигуна підйомника стола масок.

2. Даний тип двигуна, виходячи з технологічних міркувань, можна рекомендувати застосувати у якості приводних двигунів електропривода стола масок, стола підложок, а також стола випаровувачів. Адже застосування електродвигунів обраного типу значно спрощує систему автоматичного керування, а також робить її взаємозамінною.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТОЛА МАСОК

3.1 Розроблення функціональної схеми керування електроприводом стола масок

Функціональна система електропривода стола масок установки для виробництва ІМС (рис.3.1) складається з: лічильника імпульсів Ліч 1, блока лічильника повних переміщень Ліч ПП, блока лічильника переміщень комплекту Ліч ПК, блока установки вихідного стану УВС, блока виборчої схеми підйому підйомника масок ВСППМ, датчика заданої товщини нанесеної плівки ДЗТ, блока фіксації положення стола підложок ФСП та стола масок ФСМ, які являють собою розподільник імпульсів Р1, а також блока керування підйомником масок КПМ, блока керування столом випаровувачів КСВ, блоків керування столом підложок по координатним осям X, Y – відповідно КСП х, КСПу.

Якщо розглядати функціональну схему більш ретельно, з точки зору принципу дії окремих її елементів, то можливо отримати алгоритм дії установки в цілому і в окремих випадках.

Розглянемо один із таких випадків, коли для виготовлення мікросхем застосовується повний комплект масок. Припустимо, що на вісі напилення 0 знаходиться перша маска і перша підложка, підйомник масок піднятий, маска притулена до підложки, йде процес напилення.

При досягненні заданої товщини напилюваного шару, сигнал з датчика заданої товщини ДЗТ надходить у схему програмного пристрою на блок керування підйомником масок КПМ. Основними вузлами блока КПМ є чотирьохтактний комутатор К3, генератор прямокутних імпульсів, командний тригер Т3. Сигнал з ДЗТ надходить через логічний елемент АБО7 на один із входів тригера Т3 і змінює його стан. Від'ємний потенціал з виходу тригера

ТЗ надходить на один із входів логічного елемента 17 і імпульс керування з Г13, проходячи через лінію затримки ЛЗ надходить на комутатор крокового двигуна $КД_{пм}$ К3. Одночасно з змінного стану тригера ТЗ запускається формувач імпульсів Ф17. Сформований ним сигнал надходить на діодний інформатор лічильника імпульсів Ліч1, заносячи в останній код на переміщення підйомника маски. Імпульси керування, які надходять з Г13 на К3, потрапляють також на лічильний вхід Ліч1, списуючи при цьому код переміщення. Після того як лічильник очиститься, що буде відповідати повному переміщенню підйомника масок, схема аналізу на всі «нулі» лічильника видасть сигнал на зміну стану тригера ТЗ і подача імпульсів на $КД_{пм}$ припиняється. У свою чергу при поверненні ТЗ у вихідний стан на виході Ф16 з'являється сигнал, який надходить на блоки керування столом масок $КСМ_х$ та $КСМ_у$.

Напрямок руху стола масок визначається його місцезнаходженням у момент приходу сигналу з блока КПМ. Фіксація положення стола масок забезпечується розподільником імпульсів Р1, який являє собою кільцеву перерахункову схему, зібрану на двійковому лічильнику та дешифраторі. Р1 має шістнадцять розрядів, що відповідає кількості масок, встановлених на столі. Всі розряди Р1 у відповідності зі схемою переміщення стола масок зв’язані з блоками керування столом масок наступним чином:

- розряди 1,2,3,9,10,11 з'єднані з КСМх і забезпечують переміщення стола масок вліво по вісі Х (на вісь напилу виводяться маски 2,3,4,10,11,12);

- розряди 5,6,7,13,14,15 зв'язані з КСМх і дають дозвіл на переміщення стола масок вправо по вісі Х (на вісь напилення виводяться маски 6,7,8,14,15,16);

- розряди 4,8,12 подають дозволяючий сигнал на КСМу при русі стола масок по вісі Y униз (на вісь напилення виводяться маски 5,9,13);

- розряд 16 зв'язаний з КСМу і забезпечує переміщення стола масок таким чином, що на вісь напилення виводиться замість шістнадцятої перша маска (переміщення стола масок вгору по вісі Y).

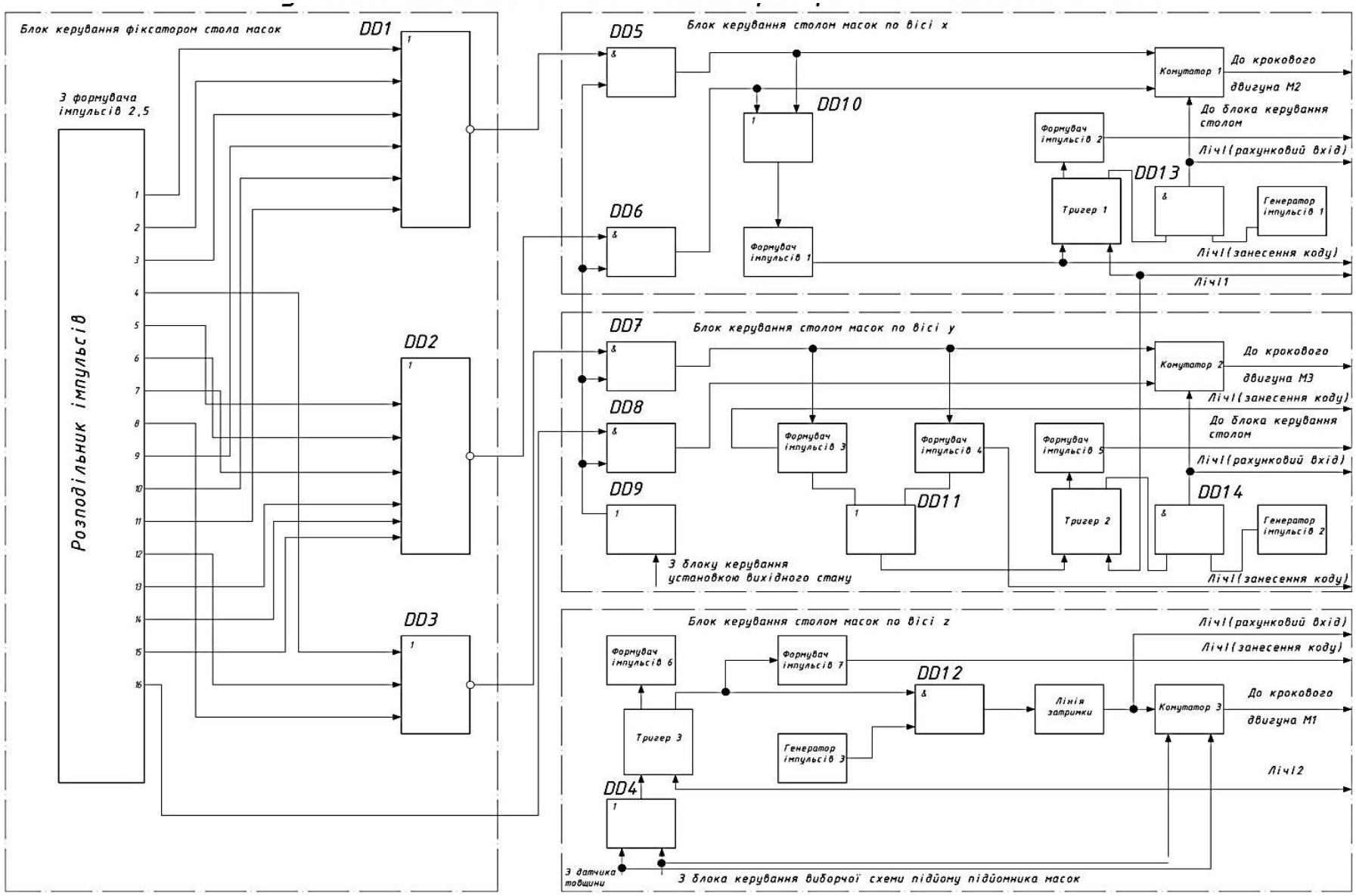


Рисунок 3.1 - Функціональна схема блока керування електроприводом стола

Перед початком процесу напилення, коли на вісі напилення 0 знаходиться перша маска, тригер першого розряду Р1 переводиться у стан інверсії по відношенню до інших. Таким чином фіксується вихідне положення стола масок. Від'ємний потенціал з першого розряду Р1 через логічний елемент АБО1 потрапляє на один із входів логічного елемента 11. З приходом командного імпульсу з КПМ на виході 11 з'являється сигнал, який встановлює комутатор К1 у положення «вперед» і запускаючий формувач імпульсів Ф11. Імпульс з виходу Ф11 потрапляє на відповідний вхід діодного шифратора Ліч1 і записує код переміщення стола масок. Крім цього, сформований імпульс своїм заднім фронтом змінює внутрішній стан командного тригера Т1, і на імпульсний вхід К1 через логічний елемент 13 починають надходити керуючі імпульси з Г11. Ці ж самі імпульси надходять на лічильний вхід Ліч1 і зчитують занесений у нього код. Після очищення лічильника з блоку Ліч1 надходить сигнал, повертаючий Т1 у вихідне положення, подача імпульсів на К1 припиняється, двигун $КДС_{мх}$ зупиняється. Імпульс, сформований у Ф12 при поверненні Т1 у вихідне положення, надходить на вхід Р1, переміщує «одиницю» із першого розряду у другий, фіксуючи при цьому нове положення стола масок, і дає команду на роботу блока керування столом випаровувачів КСВ. При подальшій роботі установки коли на вісь напилення повинна бути виведена п’ята маска, дозволяючий сигнал потрапляє з ФСП на логічний елемент 14 блока $КСМ_у$. Блок керування столом масок по вісі Y подібний блоку $КСМ_х$ з тією лише різницею, що імпульси на занесення коду переміщення по вісі Y вгору і вниз надходять на різні шини діодного шифратора Ліч1, так як код на переміщення вгору по вісі Y від шістнадцятої маски до першої у три рази більший за код переміщення униз.

Таким чином, після виведення чергової маски на вісь напилення з блока $КСМ_х$ ($КСМ_у$) надходить команда на переміщення стола випаровувачів. Блок керування столом випаровувачів КСВ подібний до блока КПМ, і поворот стола випаровувачів на потрібний кут відбувається у відповідності з вищеописаним циклом опускання підйомника масок.

3.2 Розроблення принципової схеми керування електроприводом стола масок

Принципову схему блоку керування електроприводом стола масок розробляємо на базі логічних мікросхем виготовлених за технологією ТТЛ серії К155 (рис.3.2 а,б). Мікросхеми цієї серії характеризуються наступними параметрами:

- напруга живлення +5В від стабілізованого джерела напруги;
- рівень логічного «О» U_o = 0,4 В ;
- рівень логічної «1» U_1 = 2,4 В.

Блок розподільника імпульсів Р1 реалізується за допомогою двійкового лічильника D04 та дешифратора «4-16» DD6. Інверсні виходи дешифратора під'єднані до елементів логіки «АБО-НЕ» - мікросхеми DD8.1-DD8.3 та DD9.1 і DD9.2, а їхні виходи до елементів логіки DD2.3, DD2.4 – «АБО».

Блок керування столом масок по вісі Х $КСМ_x$ реалізується за допомогою логічних елементів: на вході – елементи «1» DD7.2, DD7.3, в залежності від вихідного сигналу яких визначається напрямок руху стола масок по вісі Х (вперед-назад). Елементи «І-НЕ» DD13.1 та DD13.2 утворюють одновібратор, який за допомогою R6, С9,V05 створює керуючий імпульс, який надходить на вхід JK-тригера DD15. Також блок має генератор прямокутних імпульсів зібраний на елементах «НЕ» - DD1.4 – DD1.6, який за допомогою елементів R7, С10 утворює послідовність прямокутних імпульсів, котрі через комутатор надходять на силові транзисторні ключі, а потім, підсилившись, на кроковий двигун. Одновібратор, зібраний на елементах DD13.3, DD13.4, R9, С12, V06, створює командний імпульс який надходить у блок керування столом випаровавучів, а також на вхід розподільника Р1.

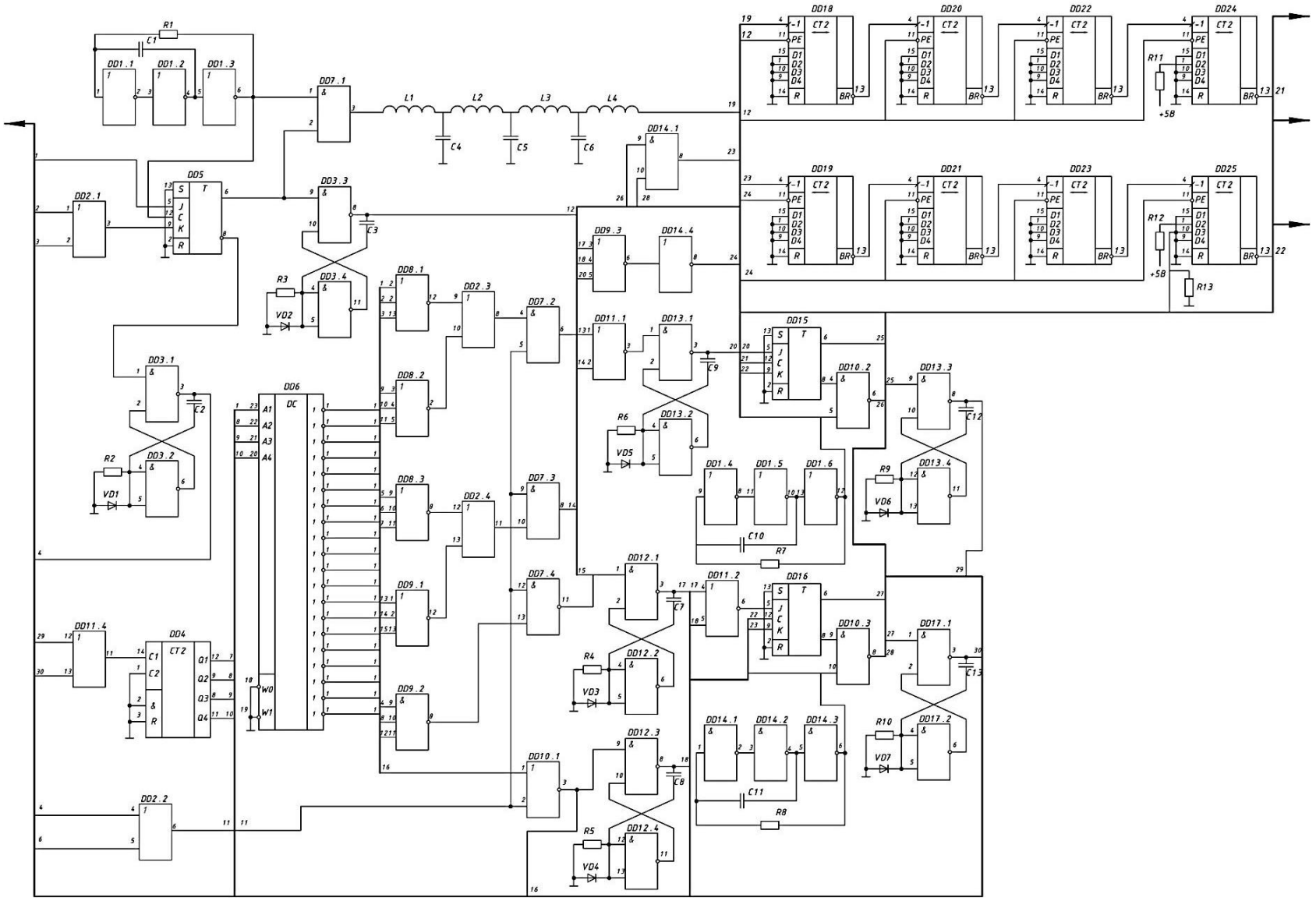


Рисунок 3.2а - Принципова схема блоку керування електроприводом стола

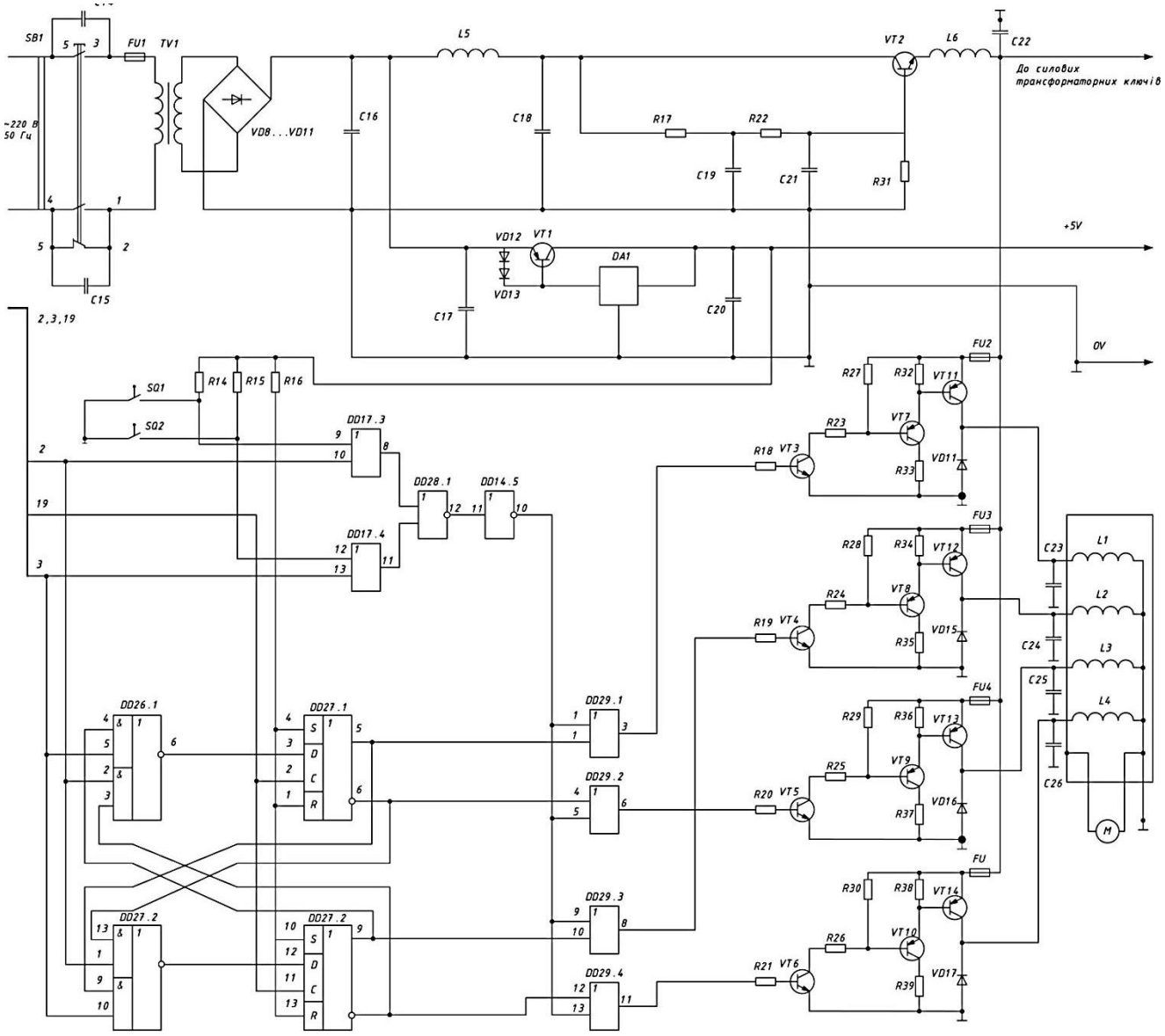


Рисунок 3.2б - Принципова схема блоку керування електроприводом стола масок

Блок керування столом масок по вісі Y $КСМ_y$ подібний за своїми схемними рішеннями до блоку керування столом масок по вісі X. На вході логічна «1» DD7.4, DD10.1. Одновібратор, зібраний на елементах DD12.1, DD12.2, R4, C7, V03, визначає своїм імпульсом код переміщення стола масок вгору, а одно вібратор, зібраний на елементах DD12.3, DD12.4, R5, C8, V04 – униз, тому що код на переміщення униз у 3 рази більший за код на переміщення стола масок угору. Також блок $КСМ_y$ має командний JK- тригер

DD16, генератор прямокутних імпульсів – елементи DD14.1 – DD14.3, R8, C11 та одновібратора DD17.1, DD17.2, R10, C13, V07.

Блок керування підйомника стола масок КПМ виконано за таким же принципом, що і блоки $КСМ_x$ та $КСМ_y$. Різницею лише є лінія затримки L1 – L4. C4 – C6 яка використовується для забезпечення надійного запису коду переміщення стола масок по вісі Z. Елементи DD1.1 – DD1.3, R1, C1 утворюють генератор прямокутних імпульсів, які надходять на один із входів елемента «1» - DD7.1 і в залежності від стану тригера DD5 надходять на вхід комутатора.

Блок лічильників імпульсів виконаний на мікросхемах DD16 – DD25, які являють собою двійкові реверсивні лічильники ввімкнені на віднімання занесеного у них коду переміщення робочого органу. Елементи DD18, DD20, DD22, DD24 утворюють 16-ти розрядний двійковий лічильник, у який заноситься двійковий код на переміщення: 8192-ом імпульсам, які надходять на кроковий двигун M1. Елементи DD19, DD21, DD23, DD25 утворюють 16-ти розрядний двійковий лічильник з двома різними двійковими кодами, які заносяться відповідно при переміщенні вперед і назад, притому один із двох у 3 рази більший за інший.

Блок комутатора крокового двигуна зібрано на елементах DD14.5, DD17.3, DD17.4, DD26, DD28.1, DD29, а також двох R – S тригерах DD27.1 та DD27.2. З виходів елементів DD29.1 – DD29.4 сигнал надходить на транзисторні ключі зібрані на транзисторах VT3 – VT14. Транзистори VT11 – VT14 працюють у ключовому режимі, безпосередньо під'єднуючого обмотки крокового двигуна M1 до ланцюга напруги живлення. Кремнієві діоди VD14 – VD17 захищають силові транзистори VT11 – VT14 від зворотної напруги на переходах при комутації обмоток крокового двигуна M1.

Живлення схеми керування електропривода стола масок здійснюється від 2-ох джерел постійної напруги, яку виробляє блок живлення. Напругою +5 В живляться всі мікросхеми серії К155 (DD1- DD29). Напругою +10 В

живляться транзисторні ключі VT3 – VT4, які комутують цю напругу на обмотки крокового двигуна М1.

До мережі живлення напругою 220 В, 50 Гц установка для виробництва ІМС під'єднується за допомогою штепсельної вилки ХР1. У якості вимикача живлення використовується кнопка SB1. Для захисту мережі живлення та виходу з ладу блока живлення +10 В від можливих коротких замикань, використовуються плавкі запобіжники FU1 – FU5. Для захисту виходу блока живлення напругою +5 В використовується електронний захист, зібраний на діодах VD12, VD13 та транзисторі VT1.

3.3 Розрахунок принципової схеми електропривода стола масок

3.3.1 Розрахунок силового транзисторного ключа

Проведемо розрахунок силового транзисторного ключа (рис.3.3) ввімкненого в ланцюг керування крокового двигуна М1. Вихідними даними для розрахунку транзисторного ключа є:

- номінальний струм фази крокового двигуна, А; $I_{н.ф}$ - 2,5 А;
- номінальна напруга живлення фази крокового двигуна, В; $U_{н.ф.}$ =10 В;
- мінімальна вхідна керуюча напруга, В; $U_{в.мін.}$ =5 В.

У відповідності з [11] вибираємо у якості VT3 транзистор типу КТ816Б, для якого максимально допустимий постійний струм колектора $I_{кмах}$=3 А; максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{кемах}$=50 В; коефіцієнт передачі по струму $h_{21e} \geq 20$.

Визначаємо струм бази транзистора VT3 за формулою:

$$I_{\delta i} = S_i \cdot \frac{I_{ki}}{h_{21ei}}; \qquad (3.1)$$

де S_i - коефіцієнт для надійного насичення і-транзистора у потрібному діапазоні ;

$I_{кі}$ – струм колектора і-транзистора ;

h_{21ei} - коефіцієнт передачі по струму і-транзистора.

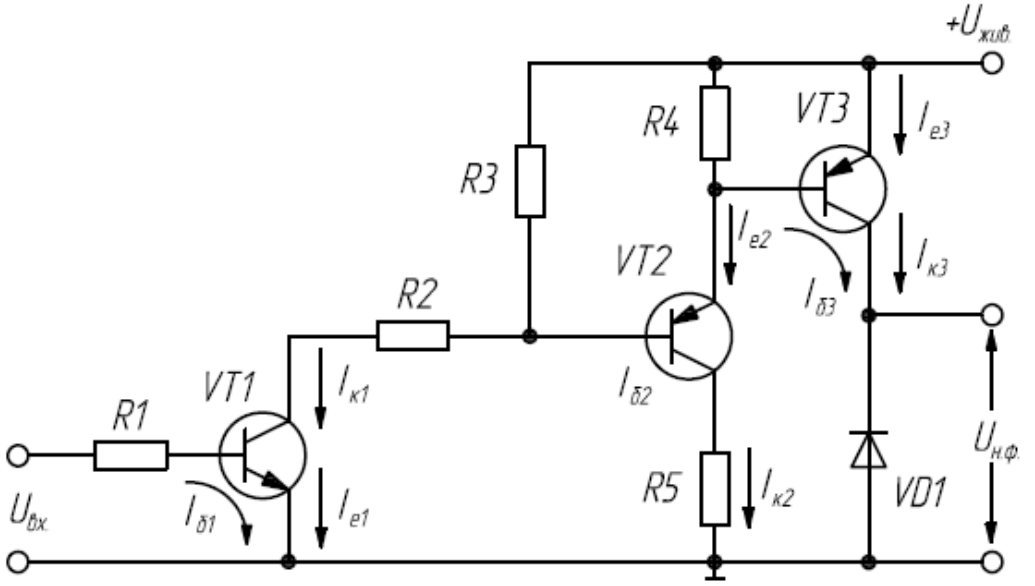


Рисунок 3.3 - Силовий транзисторний ключ

Приймаємо коефіцієнт запасу S_3 =1,5 та $I_{к3}$ =$I_{н.ф.}$=2,5 А, маємо:

$$I_{\delta 1} = 1{,}5 \cdot \frac{2{,}5}{20} = 0{,}1875\ A.$$

Для транзистора VT3 за вольтамперними характеристиками (ВАХ) з [11], для отриманих струмів бази та колектора, знаходимо падіння напруги на переходах колектор–емітер та база – емітер:

$$U_{ke3} = 0.9\ \text{В};\ U_{\delta e3} = 1.7\ \text{В};$$

Транзистор VT2 вибираємо з [11] типу КТ814Б з наступними характеристиками: максимально допустимий постійний струм колектора $I_{кмах}$ =1,5 А; максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{кемах}$=50 В; коефіцієнт передачі по струму h_{21e} = 40.

За формулою (3.1) враховуючи що S_2 = 1,5 та I_{e2} =$I_{б3}$, знаходимо струм бази транзистора VT2:

$$I_{\delta 2} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}1875}{40} = 0{,}007\ \text{А}.$$

Для транзистора VT2 за ВАХ, для отримання струмів бази та емітера, знаходимо:

$$U_{ke2} = 0.55\ \text{В};\ U_{\delta e} = 1.37\ \text{В};$$

Транзистор VT1 вибираємо з [11] типу КТ 316 В для якого максимально допустимий постійний струм колектора $I_{кмах}$=30 МА; максимально напруга колектор-емітер $U_{кемах}$=15 В; коефіцієнт передачі по струму h_{21e}=40…120.

Для надійного відкриття транзистора VT2 струм бази приймаємо рівним $I_{б2}$ =0,05 А. Тоді за формулою (3.1) враховуючи S = 15 та 1_{e1} =$1_{б2}$, знаходимо струм бази транзистора VT1:

$$I_{б1} = 1{,}5 \cdot \frac{0{,}05}{40} = 1{,}875 \text{ мА}.$$

Для транзистора VT1 по ВАХ, для отриманих значень струмів бази та емітера, знаходимо :

$U_{ке1}$ =0,42 В; $U_{бе1}$ =1,2 В.

Опір резистора R1 знаходимо виходячи із вхідної напруги $U_{вх}$=5 В=U_1 та напруги спаду на переході база-емітер транзистора VT1, за формулою:

$$R1 = \frac{U_{вх} - U_{бе1}}{I_{б1}}; \qquad (3.2)$$

$$R1 = \frac{2{,}4 - 1{,}1}{1{,}875 \cdot 10^{-3}} = 2080 \text{ Ом}.$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення опору резистора R1=2 кОм.

Опір резистора R5 вибираємо виходячи із струму бази транзистора VT3 та спаду напруги на переходах транзисторів, за формулою:

$$R5 = \frac{U_{жив.} - U_{бе3} - U_{ке2}}{I_{б3}}; \qquad (3.3)$$

$$R5 = \frac{10 - 1{,}7 - 0{,}55}{0{,}1875} = 41{,}33 \text{ Ом}.$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення опору резистора R5 =40 Ом.

Опір резистора R2 знаходимо виходячи із струму бази транзистора VT2 і спаду напруги на переходах транзисторів, за формулою:

$$R2 = \frac{U_{жив.} - U_{бе3} - U_{бе2} - U_{ке1}}{I_{б2}}; \quad (3.4)$$

$$R2 = \frac{10 - 1{,}7 - 1{,}37 - 0{,}55}{0{,}05} = 127{,}6 \text{ Ом.}$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення резистора R2 =130 Ом.

Резистори R3, R4 призначені для завдання транзисторам VT2, VT3 запірного значення напруги. Опори цих резисторів вибираємо набагато більшими від опорів резисторів R2, R5 для запобігання їх впливу при відкритих транзисторах VT2, VT3. При цьому значення R3 повинно бути більшим за значення R4. Вибираємо згідно ряду номінальних значень резисторів R3=9.4 кОм, R4 = 1,1 кОм.

Діод VD1 призначений для шунтування від'ємної напруги на обмотці крокового двигуна, яка з'являється при комутаціях. Від'ємний струм комутації набагато менший номінального значення струму у фазній обмотці двигуна, тому вибираємо діод VD1 типу КД1095 для якого: максимально допустимий середній прямий струм $I_{ср.пр.}$ = 0,3 А; максимально допустима постійна зворотня напруга $U_{зв.max}$ = 300 В .

3.3.2 Розрахунок генератора прямокутних імпульсів

Проведемо розрахунок генератора прямокутних імпульсів за допомогою якого утворюється послідовність імпульсів керування комутатором крокового двигуна М1. Вихідними даними для розрахунку генератора прямокутних імпульсів є: номінальна частота слідування імпульсів; $f_н$=600 Гц; максимальний струм на виході генератора $I_{мах.2}$ =50 мА. Параметри імпульсу: час зростання сигналу від рівня 0,1 $U_н$ до рівня 0,9 $U_н$; $t_{фронт.}$ =10 мкс; час спаду сигналу від рівня 0,9 $U_н$ до рівня 0,1 $U_н$; $t_{спад}$ = 30 мкс; амплітуда імпульсу; $U_н$ = 2,4 В.

Для синтезу генератора прямокутних імпульсів ГП1 скористаємося [12].

Як видно з [12] ГП1 для цифрової техніки бажано синтезувати з логічних елементів які добре з’єднуються з технікою даного виду і не потребують додаткових подільників чи підсилювачів напруги, гальванічних розв'язок і т.ін.

Також слід зазначити, що генератор прямокутних імпульсів найбільш просто синтезується зі звичайного симетричного мультивібратора на логічних елементах НЕ. Принципова схема такого ГП1 (мультивібратора) зображена на (рис.3.4).

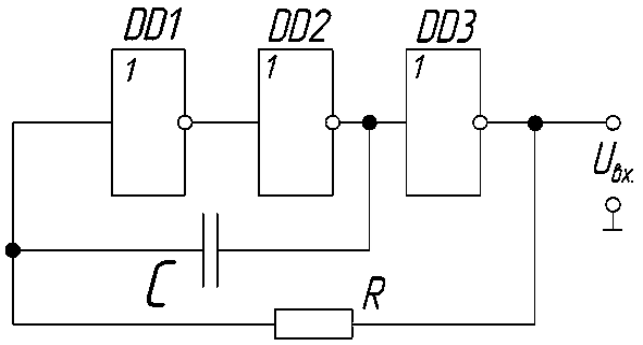


Рисунок 3.4 - Симетричний мультивібратор

Генератор прямокутних імпульсів має ланцюг додаткового зворотного зв’язку через конденсатор С та ланцюг від'ємного зворотного зв’язку через резистор R. Для визначення ємкості С та опору резистора R скористуємося наступною формулою:

$$C = \frac{1}{0{,}707 \cdot R \cdot f}; \qquad (3.4)$$

Задаємося стандартним значенням із ряду опорів резистора R=2,4 кОм, тоді за формулою (3.4) ємність конденсатора С буде мати значення:

$$C = \frac{1}{0{,}707 \cdot 2400 \cdot 600} = 0.982 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Приймаємо стандартне номінальне значення ємності конденсатора найближче з ряду С=1 мкф.

Перевіримо фактичну частоту ГП1 за формулою:

$$f_{ф.} = \frac{1}{0{,}707 \cdot R \cdot C}; \qquad (3.5)$$

$$f_{ф.} = \frac{1}{0{,}707 \cdot 2400 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 589.3 \text{ Гц.}$$

Визначаємо відхилення фактичної частоти від номінальної за формулою:

$$|\Delta f| = \frac{f_н - f_{ф.}}{f_н} \cdot 100\%; \qquad (3.6)$$

$$|\Delta f| = \frac{600 - 589{,}3}{600} \cdot 100\% = 1{,}78\%.$$

Бачимо, що відхилення частоти становить $|\Delta f| = 1{,}78\%$, тобто не виходить за допустимі норми $|\Delta f| = 5\%$. Тому остаточно приймаємо для ГП1 опір резистора R = 2,4 кОм, ємність конденсатора С = 1 мкф.

3.3.3 Розрахунок формувача імпульсів

Проведемо розрахунок формувача імпульсів, за допомогою якого з діючих прямокутних імпульсів формуються короткі імпульси з заданими параметрами. Даними для розрахунку формувача імпульсів є дані про вихідний імпульс. Вихідні дані: тривалість вихідного імпульсу; $t_н$ =5 мс; амплітуда вихідного імпульсу; $U_и$ = 2,4 В; номінальний вихідний струм формувача імпульсів ; $I_н$ = 50 мА; час зростання від 0,1 $U_н$ до 0,9 $U_{н;}$ $t_ф$=10 мкс; час спаду сигналу від 0,9$U_н$ до 0,1$U_н$; $t_{спад}$ = 35 мкс.

Для розрахунку формувача імпульсів (Ф1) скористуємось [12]. Як показує практика, для створення Ф1 найбільш підходить несиметричний чекаючий мультивібратор (одновібратор) зібраний на двох логічних елементах І – НЕ (рис.3.5).

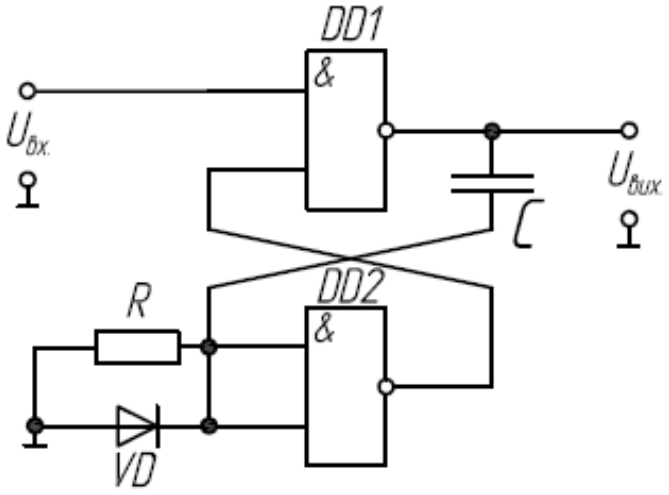


Рисунок 3.5 - Несиметричний мультивібратор

Для визначення ємкості С та опору резистора R скористаємося формулою:

$$C = \frac{t_u}{0{,}707 \cdot R}; \qquad (3.7)$$

Приймаючи R = 15 кОм отримаємо:

$$C = \frac{t_u}{0{,}707 \cdot 15 \cdot 10^3} = 0.47 \cdot 10^{-6}\ \Phi = 0{,}47\ \text{мкФ}.$$

Остаточно для формувача імпульсів приймаємо: R = 15кОм; $C = 0{,}47$ мкФ; VD –КД 105Б.

3.3.4 Розрахунок блока живлення

Для живлення блоків керування електроприводом вакуумної установки для виробництва ІМС необхідно два джерела постійної напруги: +5В, +10В.

Джерело напруги +5В забезпечує живлення всіх мікросхем блоків керування і повинно забезпечувати струм у навантаженні до $I_н$ =2,5 А. Джерело напруги +10 В забезпечує живлення вихідних каскадів комутаторів, а саме силових транзисторних ключів, через які вона заживляє статорні обмотки крокових двигунів. Так як в установці для виробництва ІМС використовується шість крокових двигунів типу ШДР-711, але максимальна

кількість паралельно ввімкнених двигунів не перевищує двох (рух від шістнадцятої маски до першої з паралельною роботою стола випаровувачів), з одночасним живленням двох сусідніх фаз, то номінальний струм споживання по ланцюгу з напругою +10 В може досягати значень порядку 6 А.

Джерело напруги +5 В виконуємо на базі мікросхемного стабілізатора напруги. Для джерела напругою +10 В стабілізація не є дуже важливим фактором, але відчутний коефіцієнт пульсації, який повинен бути у межах $К_н$ = 0,005. Тому у джерелі живлення напругою +10 В застосовуємо Г - подібний LC-фільтр для згладжування пульсацій.

Для джерела напруги +5 В вибираємо мікросхемний стабілізатор КР142ЕН5А, для якого: вхідна напруга $U_{вх.}$ =7,5…15 В; вихідна напруга $U_{вих.}$ =4,9…5,1 В; максимальний вихідний струм $I_{вих.}$=3 А; мінімальне падіння напруги на стабілізаторі не більше $U_{сп.}$ = 2,5 В.

Але слід зауважити, що експлуатація мікросхем серії КР142ЕН5 з допустимо граничним довготривалим струмом навантаження більше ніж 1,5 А небажана, так як це потребує застосування ефективних тепловідводів (радіаторів), тому що допустима робоча температура кристала нижче ніж у більшості потужних транзисторів. Забезпечити задовільний режим роботи мікросхемного стабілізатора у подібних випадках можливо, під'єднавши до неї зовнішній регулюючий транзистор.

Принципова схема з зовнішнім регулюючим транзистором стабілізатора напруги +5 В приведена на (рис.3.6).

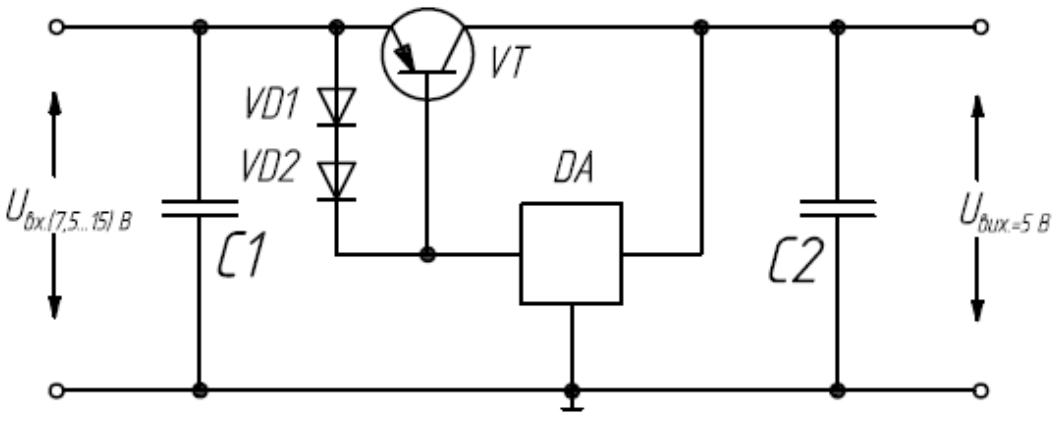


Рисунок 3.6 - Принципова схема з зовнішнім регулюючим транзистором стабілізатора напруги +5 В

Вказана схема також забезпечує обмеження струму через транзистор VT при короткому замиканні у навантаженні. Цю задачу вирішують ввімкнені паралельно емітерному переходу транзистора VT два, з'єднаних послідовно діода VD1 та VD2 які відкриваються, якщо струм у навантаженні досягає небезпечного значення, забезпечуючи таким чином захист блока живлення від перевантаження. В якості транзистора VT вибираємо з [11] транзистор КТ818А для якого: максимально випрямлений струм колектора $I_{кмах}$=10 А. Максимальна напруга діюча між колектором та емітером $U_{ке}$ =35 В. Діоди VD1, VD2 вибираємо типу КД212А для яких: максимально допустимий постійний прямий струм $I_{пр.мах.}$ =1 А; максимально допустима постійна зворотна напруга $U_{звор.мах.}$ = 200 В; середня пряма напруга $U_{пр.}$ = 1 В.

Конденсатори С1, С2 необхідно розташувати на відстані не більшій ніж 60 мм від мікросхеми DA, а з'єднувальні провідники, які з'єднують виводи конденсаторів з виводами мікросхеми не повинні бути довшими за 70 мм.

Призначення конденсаторів С1, С2 - покращення перехідних процесів у стабілізаторі. Більш за всіх підходить для використання у стабілізаторах танталово-оксидні конденсатори, які мають малий повний опір навіть на високих частотах. Тому вибираємо конденсатори С1, С2 типу К53-1 (танталово-оксидні) ємкістю 1 мкф.

Джерело напруги +10 В складається з: випрямляча, зібраного на елементах VD1 – VD4, С1; згладжувального Г-подібного LC-фільтра, елементи L1, С2, транзисторного фільтра, елементи R1-R3, С3, С4 та високочастотного фільтра для усунення паразитної високочастотної генерації транзистора VT, елементи L2, С5.

Випрямляч виконаний за мостовою схемою (рис.3.7), при номінальній випрямленій постійній напрузі на виході LC-фільтра U_0 = 12 В і струмові у

навантаженні I_0 =6А, при якому коефіцієнт пульсації на виході випрямляча не перевищує $К_{по}$ =0,2.

Визначаємо зворотню напругу на діодах за формулою:

$$U_{зв.} = 1.5 \cdot U_0; \quad (3.8)$$

$$U_{зв.} = 1.5 \cdot 12 = 18 \text{ В}.$$

Середнє значення струму у діодах за формулою:

$$I_{ср.} = \frac{I_0}{2}; \quad (3.9)$$

$$I_{ср.} = \frac{6}{2} = 3 \text{ А}.$$

Максимальне значення струму у діодах за формулою:

$$I_m = 3.5 \cdot I_0; \quad (3.10)$$

$$I_m = 3.5 \cdot 6 = 21 \text{ А}.$$

За розрахованими даними вибираємо у якості VD1-VD4 діодну збірку (матрицю) типу KBPC2504 для якої:

- максимально допустимий постійний прямий струм $I_{пр.макс.}$=25А;
- максимально допустима постійна зворотня напруга $U_{зв.макс.}$=400В,
- середня пряма напруга $U_{пр.}$ = 1В.

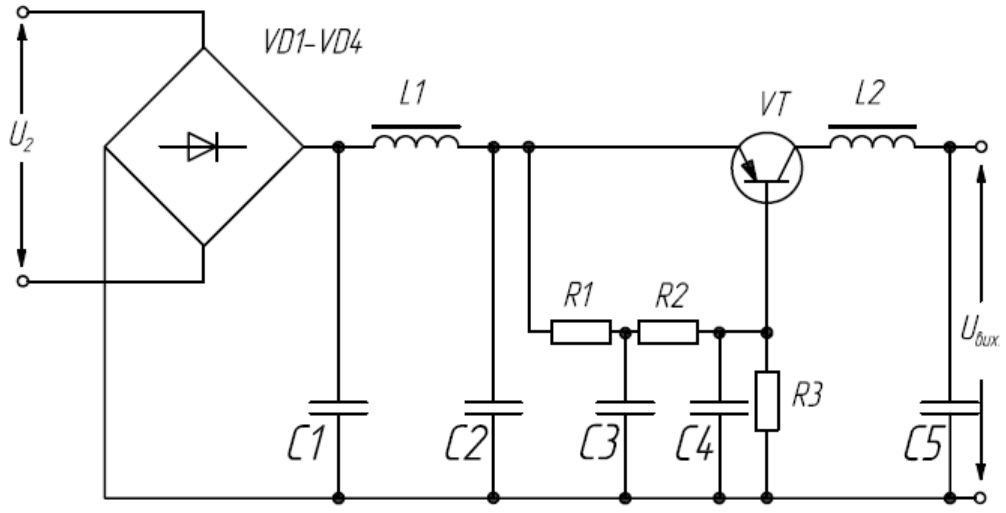


Рисунок 3.7 - Випрямляч

Визначаємо опір навантаження випрямляча за формулою:

$$R_н = \frac{U_0}{I_0}; \quad (3.11)$$

$$R_н = \frac{12}{6} = 2 \text{ Ом.}$$

Опір обмоток силового трансформатора розраховуємо як для випрямлячів потужністю 100-150Вт за формулою:

$$r_{тр} = 0{,}07 \cdot R_н; \quad (3.12)$$

$$r_{тр} = 0{,}07 \cdot 2 = 0{,}14 \text{ Ом.}$$

Визначаємо прямий опір діода за формулою:

$$r_{пр} = \frac{U_{пр}}{3 \cdot I_{пр}}; \quad (3.13)$$

$$r_{пр} = \frac{1{,}0}{3 \cdot 3} = 0{,}111 \text{ Ом.}$$

Активний опір фази випрямляча знаходимо за формулою:

$$r = r_{тр} + 2 \cdot r_{пр}; \quad (3.14)$$

$$r = 0{,}14 + 2 \cdot 0{,}111 = 0{,}362 \text{ Ом.}$$

Знаходимо основний розрахунковий коефіцієнт за формулою:

$$A = \frac{1{,}6 \cdot r}{R_н}; \quad (3.15)$$

$$A = \frac{1{,}6 \cdot 0{,}362}{2} = 0{,}2896$$

Визначаємо допоміжні коефіцієнти B, D, F, H із [11]:

B=1,05; D=2,2; F=5,8; H=450 Ом*мкФ.

За точними формулами для мостової схеми випрямляча визначаємо значення напруги на вторинній обмотці трансформатора за формулою:

$$U_2 = B \cdot U_0; \quad (3.16)$$

$$U_2 = 1{,}05 \cdot 12 = 12{,}6 \text{ В.}$$

Зворотню напругу на діодах за формулою:

$$U_{зв.} = \sqrt{2} \cdot U_2; \quad (3.17)$$

$$U_{зв.} = \sqrt{2} \cdot 12{,}6 = 17{,}82 \text{ В}.$$

Максимальне значення струму у діодах за формулою:

$$I_m = 0.5 \cdot F \cdot I_0; \quad (3.18)$$

$$I_m = 0.5 \cdot 5.8 \cdot 6 = 17.4 \text{ А}.$$

Таким чином вибрана діодна зборка типу KBPC2504 задовольняє уточненому розрахунку.

Далі визначаємо ефективні значення струму вторинної обмотки за формулою:

$$I_2 = \frac{D \cdot I_0}{\sqrt{2}}; \quad (3.19)$$

$$I_2 = \frac{2.2 \cdot 6}{\sqrt{2}} = 9.33 \text{ А}.$$

Визначаємо вихідну ємність випрямляча за формулою:

$$C1 = \frac{H}{r \cdot k_{по}}; \quad (3.20)$$

де С1 - ємність фільтруючого конденсатора, мкФ ;

r - активний опір фази випрямляча, Ом ;

$$C1 = \frac{450}{0{,}362 \cdot 0{,}2} = 6215 \text{ мкФ}.$$

Приймаємо номінальне значення ємності конденсатора С1 = 10000 мкф.

Виконаємо розрахунок згладжувального фільтра, враховуючи, що необхідний коефіцієнт пульсації на виході фільтра повинен бути:

$К_{п1}$ =0,005.

Коефіцієнт згладжувального фільтра визначаємо за формулою:

$$q = \frac{k_{по}}{k_{п1}}; \quad (3.21)$$

де $k_{по}$, $k_{п1}$ – коефіцієнти пульсації на вході та виході фільтра відповідно.

$$q = \frac{0{,}2}{0{,}005} = 40$$

Задаємося індуктивністю L1 = 0,2 Гн, тоді значення ємності С2 визначаємо за формулою:

$$L1 \cdot C2 = \frac{2.5 \cdot 10^4 \cdot (q+1)}{m^2 \cdot f^2}; \quad (3.22)$$

де L1 - індуктивність згладжувального фільтра, Гн;

С2 - ємність згладжувального фільтра, мкФ;

m - число фаз випрямляча;

f - частота мережі живлення, Гц.

Враховуючи m=1 та f =50 Гц, отримаємо:

$$C2 = \frac{2.5 \cdot 10^4 \cdot (q+1)}{m^2 \cdot f^2 \cdot L1}; \quad (3.23)$$

$$C2 = \frac{2.5 \cdot 10^4 \cdot (40+1)}{1^2 \cdot 50^2 \cdot 0.2} = 2050 \text{ мкФ}.$$

Приймаємо стандартне значення С2=2000 мкф.

Виконаємо розрахунок транзисторного фільтра, враховуючи, що коефіцієнт пульсації на виході транзисторного фільтра повинен бути:

$k_{п2}$ =0,0005.

Коефіцієнт згладжування транзисторного фільтра визначаємо за формулою (3.21):

$$q_2 = \frac{0,005}{0,0005} = 10.$$

Резистор R3 використовується для підвищення температурної стабільності фільтра, який утворює з резистором R1 = R2 подільник напруги.

Опір резистора R3 розраховується за формулою:

$$R3 = \frac{U_н}{5 \cdot I_б}; \quad (3.24)$$

де $U_н$ - напруга на виході фільтра під навантаженням, В;

$I_б$ - струм бази, А, визначений за вольт-амперними характеристиками транзистора в залежності від заданого струму навантаження $I_н = I_к$.

Визначаючи за ВАХ для далі вибраного транзистора КТ827А струм бази для заданого струму навантаження $I_н = I_к = 6А$, отримуємо: $I_б = 10Ма$.

Підставляючи у формулу (3.24) отримані значення:

$$R3 = \frac{10}{5 \cdot 0{,}01} = 200 \text{ Ом.}$$

Приймаємо стандартне значення резистора R3 = 200 Ом.

Визначаємо опір резисторів R1. R2 за формулою:

$$R1 = R2 = \frac{0.5 \cdot U_{ке} \cdot R3}{U_н}; \qquad (3.25)$$

де $U_{ке}$ - допустима напруга колектор-емітер транзистора, В ; $U_{ке}$ =100В.

$$R1 = R2 = \frac{0.5 \cdot 100 \cdot 200}{10} = 1000 \text{ Ом.}$$

Приймаємо опір резисторів R1=R2=1кОм.

Для визначення ємкості С4 скористаємося формулою:

$$C4 = \frac{160 \cdot q_2 \cdot h_{22б}}{m \cdot f}; \qquad (3.26)$$

де q_2 - коефіцієнт згладжування транзисторного фільтра;

$h_{22б}$ – параметр транзистора, мкСм;

m – число фаз випрямляча ;

f - частота мережі живлення, Гц.

Підставляючи вже відомі значення, отримаємо:

$$C4 = \frac{160 \cdot 10 \cdot 3}{1 \cdot 50} = 96 \text{ мкФ.}$$

Приймаємо стандартне значення ємкості С4=100мкф.

Визначаємо ємкість С3 за формулою:

$$C3 = \frac{80 \cdot \sqrt{q_2}}{m \cdot f \cdot R1}; \qquad (3.27)$$

де R1 - опір резистора R1 в Ом;

$$C3 = \frac{80 \cdot \sqrt{10}}{1 \cdot 50 \cdot 0.2} = 25.3 \text{ мкФ.}$$

Приймаємо стандартне значення конденсатора С3 = 20мкф. Транзистор VT (рис.3.7) вибираємо з [11] типу КТ827А для якого: максимально допустимий постійний струм колектора $I_{кмах}$=20А; максимально допустима постійна напруга колектор-емітер, В. $U_{ке}$=100В ;

Максимально допустима потужність розсіювання (з тепловідводом) $P_{дон}$ =125Вт.

Елементи L2 та С5 використовуються для усунення високочастотної пульсації, яка може виникати завдяки великому коефіцієнту підсилення за струмом (h_{21}=750) транзистора КТ827А. Тому вибираємо у якості С5 танталово-оксидний конденсатор ємністю 1мкф, а у якості котушки індуктивності L2 котушку з індуктивністю 0,2 мкГн.

3.3.5 Розрахунок та вибір силового трансформатора

Визначаємо загальну потужність, яку повинен віддавати у навантаження силовий трансформатор установки для виробництва ІМС, тобто потужність вторинної обмотки трансформатора за формулою:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 + I_{2ст} \cdot U_{2ст}; \quad (3.28)$$

де $I_{2ст}$ – струм споживаний від стабілізатора напруги;

$U_{2ст}$ – напруга на виході мікросхемного стабілізатора;

Підставляємо відомі значення, отримаємо:

$$P_2 = 12{,}6 \cdot 9{,}33 + 2{,}55 \cdot 5 = 130 \text{ Вт.}$$

Визначаємо потужність трансформатора, споживану з мережі живлення за формулою:

$$P_{пот.} = P_2 + \Delta P_{х.х.} + \Delta P_{м.} + \Delta P_{дод.}; \quad (3.29)$$

де $\Delta P_{х.х.}$ - втрати потужності на вихрові струми та гістерезис (втрата у сталі), Вт;

$P_м$ - втрати потужності у проводах первинної та вторинної обмоток трансформатора (втрати у міді), Вт;

$P_{дод}$ - додаткові втрати у трансформаторі, Вт.

Так як $P_{х.х.}$, $P_{м.}$, $P_{дод.}$ невідомі, то загальну потужність трансформатора визначаємо через коефіцієнт запасу по потужності $k_{пот}$ за формулою:

$$P_{пот.} = k_{пот.} \cdot P_2; \quad (3.30)$$

Приймаємо $k_{пот} = 1,2$, тоді:

$$P_{пот.} = 1,2 \cdot 130 = 156 \text{ Вт.}$$

Виходячи з розрахункових значень напруг та струмів, а також загальної потужності трансформатора, вибираємо стандартизований тип трансформатора ОСМ-0,1643.

Параметри трансформатора:

- потужність трансформатора : $S_н$ = 0,16 кВ*А;
- частота мережі живлення : f = 50 (60) Гц;
- клас захисту: IPOO ; ГОСТ 16710-76;
- напруга мережі живлення: U_1 = 220 + 22 В;
- напруга на вторинній обмотці: U_2 = 12.6 + 1.3 В;
- номінальний струм первинної обмотки: $I_{1н}$ = 0,72 А;
- номінальний струм вторинної обмотки: $I_{2н}$ = 12А.

3.4 Синтез системи автоматичного керування електроприводом стола масок

3.4.1 Визначення передаточної функції системи автоматичного керування

Спрощена структурна схема системи автоматичного керування (САК) електроприводом стола масок зображена на рис.3.8.

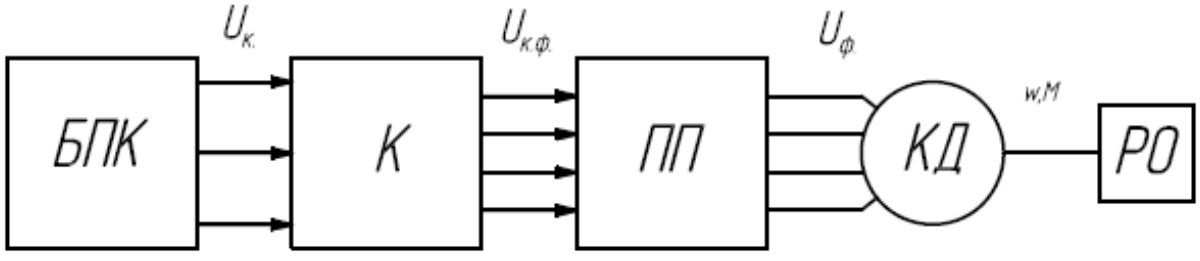


Рисунок 3.8 - Спрощена структурна схема системи автоматичного керування

Основними функціональними пристроями цієї системи є:

БПК – блок програмного керування ;

К – чотиритактний комутатор;

ПП – підсилювач потужності;

КД - кроковий двигун ;

РО – робочий орган .

Визначимо передаточні функції кожної ланки окремо.

Для цього ми будемо розглядати цю САК як неперервну у межах одного кроку крокового двигуна КД. Сталими часу БПК та К нехтуємо, бо вони мають дуже мале значення по відношенню до сталих часу блоків ПП та КД. Коефіцієнт підсилення ланок БПК та К вибираємо рівним 1 і вважаємо, що напругою керування (у даному випадку) виступає напруга $U_{к.ф.}$ – напруга на виході комутатора.

Передаточна функція підсилювача потужності – силового транзисторного ключа (рис.3.1) являє собою аперіодичну ланку зі сталою часу $T_{пп}$ і коефіцієнтом підсилення $k_{пп}$.

Користуючись [13], визначаємо передаточну функцію підсилювача потужності за формулою:

$$W_{пп}(p) = \frac{k_{пп}}{T_{пп} \cdot p + 1}; \qquad (3.31)$$

де $T_{пп}$ - стала часу підсилювача потужності, С;

$k_{пп}$ - коефіцієнт підсилення підсилювача потужності.

Сталу часу $T_{пп}$ знаходимо як суму сталих часу транзисторів VT1-VT3 користуючись [11], ввімкнених послідовно (рис.3.1):

- для транзистора VT1 типу КТ3102Е стала часу $t_{т1}$ = 100нс;
- для транзистора VT2 типу КТ814А стала часу $t_{т2}$ = 1500нс;
- для транзистора VT3 типу КТ816А стала часу $t_{т3}$ = 1500нс.

Сталу часу $T_{пп}$ знаходимо за формулою:

$$T_{пп} = \tau_{T1} + \tau_{T2} + \tau_{T3}; \quad (3.32)$$

$$T_{пп} = 100 \cdot 10^{-9} + 1500 \cdot 10^{-9} + 1500 \cdot 10^{-9} = 3{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Коефіцієнт підсилення $k_{пп}$ знаходимо як відношення вихідної напруги ПП, яка надходить на обмотки крокового двигуна $U_ф$, до вхідної напруги керування $U_{кф}$ за формулою:

$$k_{пп} = \frac{U_ф}{U_{к.ф.}}; \quad (3.33)$$

де $U_ф$ – номінальна фаза напруги кронового двигуна, В;

$U_{к.ф}$ - мінімальна допустима напруга керування ПП, В;

Приймаємо $U_{к.ф.} = 2$В, тоді для $U_ф = 10$В отримаємо:

$$k_{пп} = \frac{10}{2} = 5.$$

Тоді передаточна функція підсилювача потужності:

$$W_{пп}(p) = \frac{5}{3{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1}.$$

Передаточна функція крокового двигуна КД являє собою аперіодичну ланку другого порядку або дві послідовно з'єднані аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом підсилення $k_{кд}$ і визначається за формулою:

$$W_{кд} = \frac{k_{кд}}{(T_м \cdot p + 1) \cdot (T_е \cdot p + 1)}; \quad (3.34)$$

Сталі часу $T_м$, $T_е$ беремо з довідникових даних крокового двигуна типу ШДР-711 для якого:

$$T_м = 5{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \; T_е = 0{,}585 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Коефіцієнт передачі крокового двигуна $k_{кд}$ знаходимо як відношення кута повороту ротора α до напруги живлення статорних обмоток $U_ф$ за формулою:

$$k_{кд} = \frac{\alpha}{U_ф}; \quad (3.35)$$

де $\alpha = 3^o$ - номінальний крок в геометричних градусах крокового двигуна.

$$k_{кд} = \frac{3}{10} = 0{,}3 \; {}^{0}\!/\!_{\text{В}}.$$

Тоді передаточна функція крокового двигуна має вигляд:

$$W_{кд} = \frac{0{,}3}{(5{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1) \cdot (0{,}585 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}.$$

Передаточна функція робочого органу являє собою пропорційну ланку і визначається за формулою:

$$W_{ро}(p) = k_{ро}; \qquad (3.36)$$

Передаточний коефіцієнт $k_{ро}$ знаходимо як відношення лінійного переміщення гайки відносно гвинта, яке визвано поворотом ротора КД на один номінальний крок α, до кута повороту ротора КД за формулою:

$$k_{ро} = \frac{\Delta l}{\alpha}; \qquad (3.37)$$

де Δl - лінійне переміщення гайки відносно гвинта, визвано кроком КД, визначаємо за формулою:

$$\Delta l = \frac{\alpha \cdot p}{360 \cdot i}; \qquad (3.38)$$

де p – крок гвинта передачі гвинт-гайка, м;

i - передаточне число черв'ячної передачі.

Підставляючи (3.38) у (3.37), отримаємо:

$$k_{ро} = \frac{p}{360 \cdot i}; \qquad (3.39)$$

$$k_{ро} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{360 \cdot 8} = 6{,}94 \cdot 10^{-6} \;\; м / град.$$

Тоді передаточна функція робочого органу має вигляд:

$$W_{ро}(p) = 6{,}94 \cdot 10^{-6}.$$

Визначаємо передаточну функцію всієї системи автоматичного керування при послідовному з’єднанні ланок за формулою:

$$W(p) = W_{пп}(p) \cdot W_{кд}(p) \cdot W_{ро}(p); \qquad (3.40)$$

Підставляючи у (3.40) значення передаточних функцій окремих ланок (3.31), (3.34), (3.36), отримаємо:

$$W(p) = \frac{k_{пп} \cdot k_{кд} \cdot k_{ро}}{(T_{пп} \cdot p + 1) \cdot (T_{м} \cdot p + 1) \cdot (T_{е} \cdot p + 1)}; \qquad (3.41)$$

Підставляючи у (3.41) відомі значення передаточних функцій окремих ланок, отримаємо:

$$W(p) = \frac{5 \cdot 0{,}3 \cdot 6{,}94 \cdot 10^{-6}}{(3{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot p + 1) \cdot (5{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1) \cdot (0{,}585 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)};$$

Після математичних перетворень передаточна функція всієї системи приймає вигляд:

$$W(p) = \frac{0{,}4167 \cdot 10^{-6}}{10{,}7 \cdot 10^{-12} \cdot p^3 + 3{,}4716 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 6{,}4881 \cdot 10^{-3} \cdot p}.$$

3.4.2 Визначення стійкості системи автоматичного керування за критерієм Михайлова

Характеристичне рівняння системи має вид:

$$10{,}7 \cdot 10^{-12} \cdot p^3 + 3{,}4716 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 6{,}4881 \cdot 10^{-3} \cdot p = 0$$

Підставимо заміну оператора p на $(j\omega)$ і виділимо дійсну (R_e) та уявну (I_m) частини:

$$10{,}7 \cdot 10^{-12} \cdot (j\omega)^3 + 3{,}4716 \cdot 10^{-6} \cdot (j\omega)^2 + 6{,}4881 \cdot 10^{-3} \cdot (j\omega) = 0$$

$$R_e : X(\omega) = 1 - 3.4716 \cdot 10^{-6} \cdot \omega^2;$$

$$I_m : Y(\omega) = 6.4881 \cdot 10^{-3} \cdot \omega - 10.7 \cdot 10^{-12} \cdot \omega^3.$$

Визначаємо точки перетину годографа Михайлова з осями X та Y.

Годограф Михайлова перетинає вісь X у точках $\omega_1 = 0$ та $\omega_3 = 2.46 \cdot 10^3$ с$^{-1}$, а вісь Y у точці $\omega_2 = 536.7$ с$^{-1}$.

Схематично будуємо годограф Михайлова (рис.3.9).

Аналізуючи вид кривої Михайлова можна зробити висновок, що система автоматичного керування стійка.

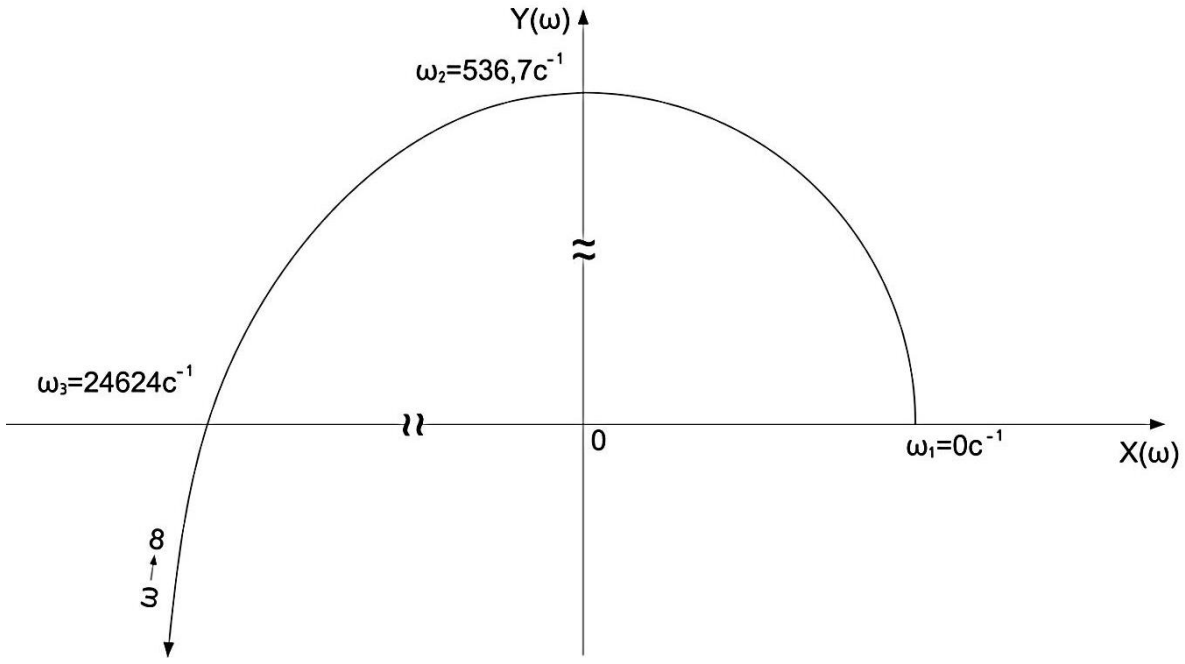


Рисунок 3.9 - Годограф Михайлова

3.4.3 Розрахунок та побудова логарифмічних амплітудо-частотної та фазо-частотної характеристик системи автоматичного керування

Передаточна функція системи автоматичного керування має вид:

$$W(p) = \frac{K}{(T_{пп} \cdot p + 1) \cdot (T_м \cdot p + 1) \cdot (T_е \cdot p + 1)}; \qquad (3.42)$$

де К - загальний коефіцієнт підсилення системи.

Запишемо амплітудо-фазову частотну характеристику (ЛАЧХ) у наступному вигляді: замість оператора р підставимо $j\omega$, отримаємо:

$$W(j\omega) = \frac{K}{(T_{пп} \cdot j\omega + 1) \cdot (T_м \cdot j\omega + 1) \cdot (T_е \cdot j\omega + 1)}; \qquad (3.43)$$

Після нескладних математичних перетворень амплітудо-фазова частотна характеристика запишеться у наступному вигляді:

$$W(j\omega) = K \cdot [U_1(\omega) + V_1(\omega)] \cdot [U_2(\omega) + V_2(\omega)] \cdot [U_3(\omega) + V_3(\omega)]; \qquad (3.44)$$

де U_i – дійсна частина передаточної функції і-ої ланки;

V_i – уявна частина передаточної функції і-ої ланки;

Тоді амплітудо-частотна характеристика запишеться у наступному виді (3.45):

$$A(\omega) = K \cdot \sqrt{[U_1(\omega)]^2 + [V_1(\omega)]^2} \cdot \sqrt{[U_2(\omega)]^2 + [V_2(\omega)]^2} \cdot \sqrt{[U_3(\omega)]^2 + [V_3(\omega)]^2}; \quad (3.45)$$

Проведемо перетворення, амплітудо-частотна характеристика запишеться у наступному виді:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(T_{пп}^2 \cdot \omega^2 + 1) \cdot (T_м^2 \cdot \omega^2 + 1) \cdot (T_е^2 \cdot \omega^2 + 1)}}; \quad (3.46)$$

а ЛАЧХ матиме вигляд (3.47):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20\left[\lg K - \lg \sqrt{(T_{пп}^2 \cdot \omega^2 + 1) \cdot (T_м^2 \cdot \omega^2 + 1) \cdot (T_е^2 \cdot \omega^2 + 1)}\right] \quad (3.47)$$

в свою чергу фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) матиме вид:

$$F(\omega) = -\text{arctg}(T_{пп}\omega) - -\text{arctg}(T_м\omega) - \text{arctg}(T_е\omega); \quad (3.48)$$

Підставляючи у (3.47) та (3.48) відомі значення, отримаємо вирази для побудови логарифмічних амплітудо-частотної та фазо-частотної характеристики системи автоматичного керування. Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ, побудовані за виразами (3.47) та (3.48), зображені на рис.3.10.

$$L(\omega) = 20\left[\lg 3{,}16 - \lg \sqrt{(9{,}61 \cdot 10^{-12} \cdot \omega^2 + 1) \cdot (3{,}48 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^2 + 1) \cdot (3{,}42 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^2 + 1)}\right]$$

Остаточний вираз ЛФЧХ має вигляд:

$$F(\omega) = -arctg(3{,}1 \cdot 10^{-6}\omega) - -arctg(5{,}85 \cdot 10^{-4}\omega) - arctg(5{,}9 \cdot 10^{-3}\omega).$$

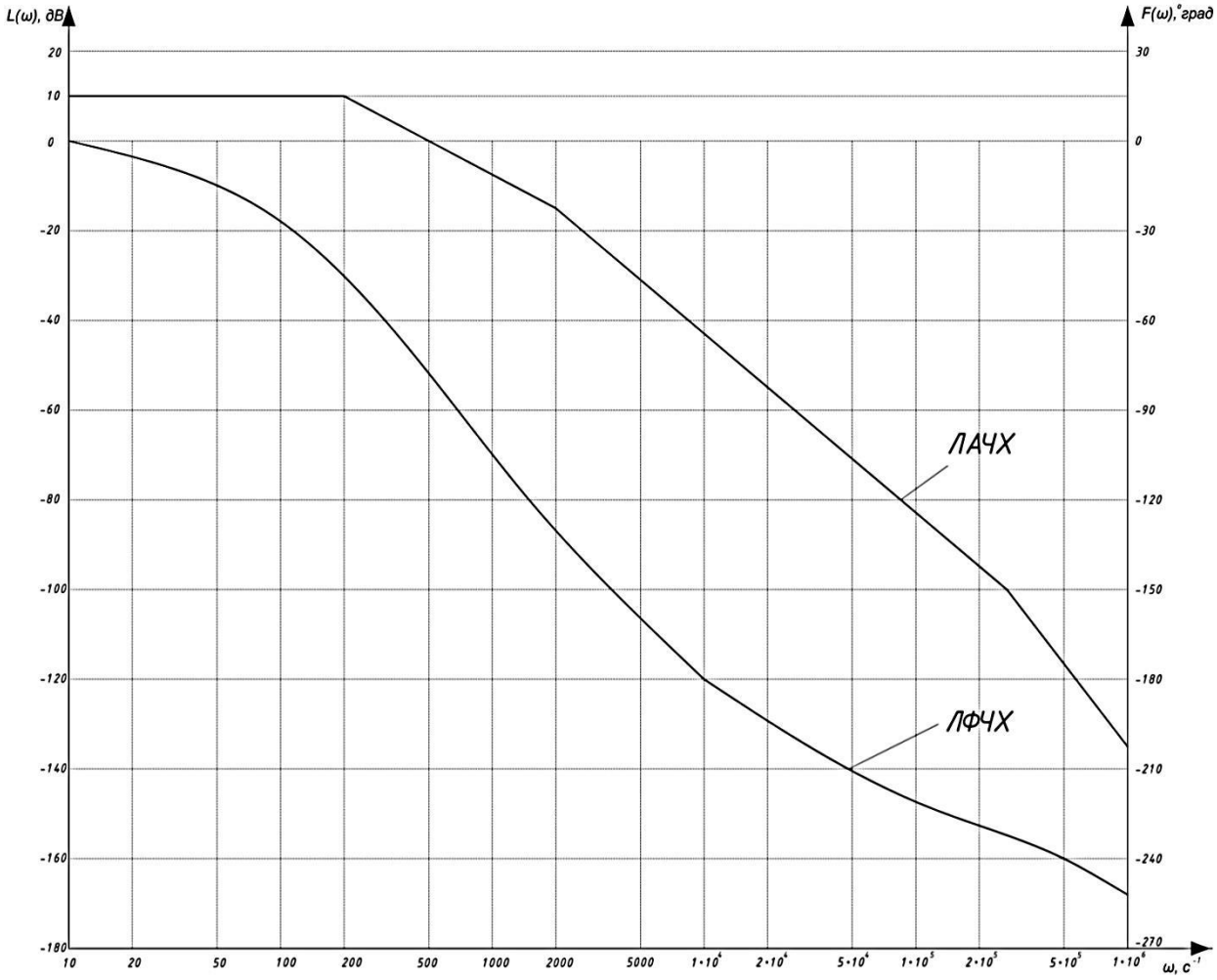


Рисунок 3.10 - ЛАЧХ та ЛФЧХ системи автоматичного керування

Проведені дослідження показали, що система є стійкою за критерієм Михайлова та має достатні запаси по амплітуді та фазі.

4 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Постановка проблеми та мета дослідження

Значною перевагою застосування крокового електроприводу є те, що він досить вдало поєднується з керуванням від сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК). При дискретному керуванні такі системи є найбільш надійними, компактними та точними.

При впливі механічних перевантажень, несприятливих кліматичних факторів та інших збурювальних впливів заміна звичайних виконавчих механізмів в цифрових системах управління кроковими двигунами обумовлена значною стійкістю роботи останніх. Вихідна величина в розімкненому кроковому електроприводі визначається тільки частотою й кількістю імпульсних посилок на вході. При цьому статична й динамічна помилки обмежені значеннями, які залежать від ціни кроку та числа тактів комутації двигуна, що є необхідним для забезпечення стійкого руху привода і повного збереження отриманої інформації. Треба відмітити, що помилки, які виникають в такому приводі при пуску, гальмуванні, реверсі та резонансах, важко піддаються управлінню, тому підвищення вимог до точності і швидкості слідкуючих систем призводить до необхідності розроблення як нових методів управління кроковими двигунами, так і структур, що можуть реалізовувати ці методи.

В наш час відомо**,** що кроковий привод з розімкненою системою не здатний вирішити протиріччя між дискретністю керованих сигналів і швидкістю виконавчого валу механізму. Таку проблему можна вирішити використанням локально-замкненого крокового приводу з датчиком, вихід якого підключений на вхід комутатора двигуна. Це дозволить сформувати траєкторію руху механізму по оптимальному закону, так як усуваються обмеження по динамічній похибці.

Для покращення характеристик роботи крокового приводу необхідно підвищити добротність слідкуючого контуру електропривода за рахунок підвищення граничної швидкості обертання двигуна або зменшення динамічної похибки, що можна зробити за допомогою програмного частотного розгону двигуна до робочих частот, а також при використанні методів штучного дроблення кроку.

4.2 Розроблення структурної схеми двохшвидкісного крокового ЕП

Розроблена структурна схема двохшвидкісного крокового електроприводу, яка використовувалася для проведення досліджень, наведена на рис.4.1.

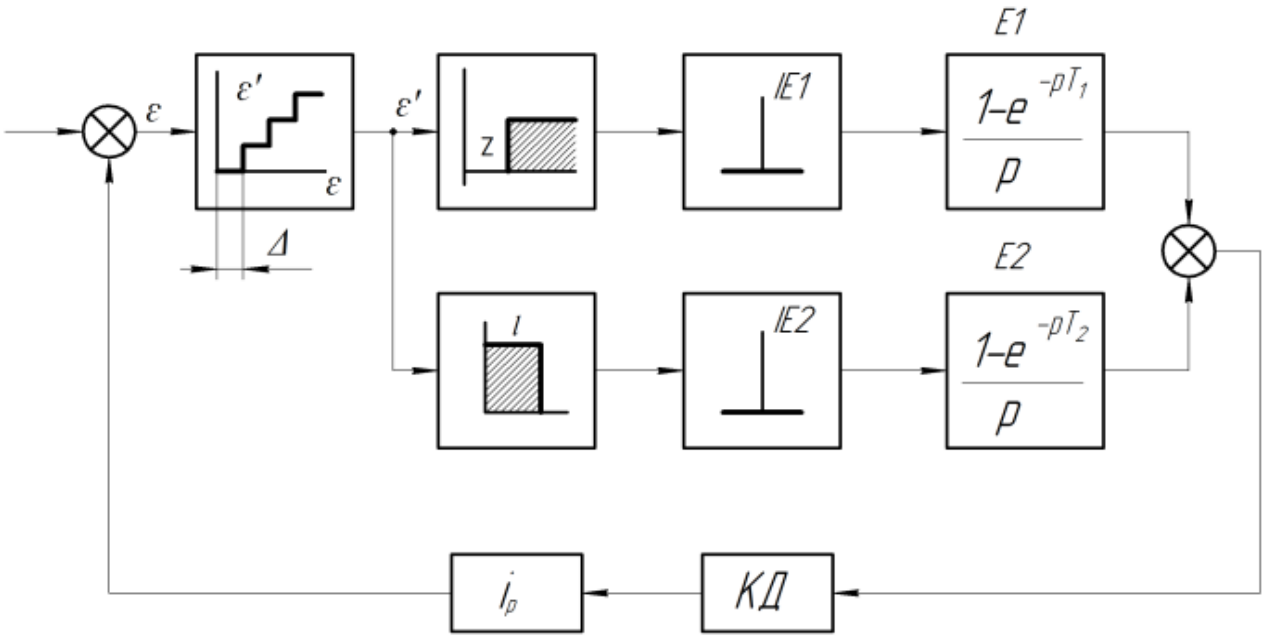


Рисунок 4.1 – Структурна схема двохшвидкісного крокового електроприводу

Для дослідження двигуна в режимі дроблення основного кроку використовувалися наступні режими роботи [15]:

а) пуск із стану спокою на частоті швидких переміщень;

б) негранічний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті швидких переміщень;

в) неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті доведення;

г) перехід з частоти швидких переміщень на частоту доведення;

д) фіксація ротора.

При цьому робота швидкісних каналів обмежувалася роботою релейних елементів, котрі перемикаються при рівності неузгодженості ε' величиною l, що відповідає сумі кроків, які відпрацьовуються в режимі доведення механізму.

4.3 Проведення досліджень та їх аналіз

При проведенні досліджень були прийняті наступні допущення:

1) вважаємо, що струми в обмотках управління двигуна змінюються майже миттєво, так як в якості підсилювачів потужності, що живлять обмотки управління, використовуються ШИМ (широтно-імпульсні модулятори), які працюють на частоті, котра значно перевищує частоту приємистості крокового двигуна, і, отже, час електромагнітних перехідних процесів значно нижче, ніж час відпрацювання кроку;

2) вважаємо кутову статичну характеристику синхронізуючого моменту синусоїдальною, так як для режиму дроблення основного кроку використана машина спеціальної конструкції, в якій конструктивно досягнуто розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі за синусоїдальним законом;

3) двигун навантажений моментом M_{mp} типу «сухе тертя»:

$$M_{mp} = M_{mp} sign\left[\frac{d\alpha}{dt}\right] = \begin{cases} +M_{mp} \text{ при } \dfrac{d\alpha}{dt} \geq 0, \\ -M_{mp} \text{ при } \dfrac{d\alpha}{dt} < 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

Тоді з урахуванням прийнятих припущень диференційне рівняння електромеханічної рівноваги системи буде мати вигляд:

$$J\frac{d^2\alpha}{dt}+D\frac{d\alpha}{dt}+M_{тр}sign\left[\frac{d\alpha}{dt}\right]=M_{м}sin(\alpha-\gamma), \qquad (4.2)$$

Де $J=J_{р}+J_{н}$ – сумарний приведений момент інерції ротора двигуна і навантаження, D– внутрішнє електромагнітне демпфірування, $M_{тр}$ – момент тертя, $M_{м}$ – максимальний статичний синхронізуючий момент, α-γ – величина динамічної помилки, α – кут повороту ротора, γ – кут повороту магнітного поля статора.

При дослідженнях приймалися наступні чисельні значення параметрів:

- момент інерції ротора $J_{Р}=0{,}98\cdot10^{-5}$ кг·м^2;
- максимальний синхронізуючий момент $M_{м}=0{,}56$ Н·м;
- момент інерції навантаження $J_{н}=0{,}98\cdot10^{-4}$ кг·м^2;
- момент тертя $M_{тр}=0{,}028$ Н·м;
- число зубців ротора $z = 90$;
- частота власних колових коливань ротора

  $\omega_0=\sqrt{zM_{м}/\left(J_{р}+J_{н}\right)}=680$ с$^{-1}$;
- струм в обмотці двигуна $I= 6{,}4$ А;
- напруга живлення обмоток двигуна $U=27$ В;
- опір обмотки двигуна $R= 4{,}2$ Ом;
- безрозмірне внутрішнє демпфірування $\delta = 1{,}13$;
- величина внутрішнього електромагнітного демпфірування

  $D=\delta^2/U^2\left(\omega_0^2R\right)=4{,}85\cdot10^{-4}$ Н·м·с.

Вважаємо, що значення задавальної частоти генератора при коливаннях ротора навколо точки стійкої рівноваги дорівнює нулю, тоді й кут повороту поля статора γ також приймається рівним нулю.

Тоді рівняння руху матиме вигляд:

$$J\frac{d^2\alpha}{dt}+D\frac{d\alpha}{dt}+M_{тр}sign\left[\frac{d\alpha}{dt}\right]=M_{м}sin(\alpha-\gamma), \qquad (4.3)$$

Це рівняння вирішуємо методом Рунге-Кутта.

Для цього диференційне рівняння (4.3) запишемо у вигляді системи з двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha}{dt}=\omega, \\ \dfrac{d\omega}{dt}=-\dfrac{M_м}{J}\sin\alpha-\dfrac{D}{J}\omega-\dfrac{M_{тр}}{J}\operatorname{sign}[\omega]. \end{cases} \tag{4.4}$$

Після підстановки чисельних значень отримуємо таку систему:

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha_{мех}}{dt}=\omega_{мех}, \\ \dfrac{d\omega_{мех}}{dt}=-5200\sin(90\alpha_{мех})-4{,}5\cdot 90\omega_{мех}-260\operatorname{sign}[\omega_{мех}]. \end{cases} \tag{4.5}$$

У зв'язку з тим, що результати рішення повинні бути приведені до валу крокового двигуна, в рівняннях (4.5) потрібно врахувати такі значення величин: $\omega = 90\omega_{мех}$, $\alpha = 90\alpha_{мех}$.

В даному дослідженні розглядався режим пуску двигуна і неграничний синхронний режим про роботі на частоті швидких переміщень. Характеристику пуску двигуна можна знайти з рішення диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha}{dt}=\omega, \\ \dfrac{d\omega}{dt}=-\dfrac{M_м}{J}\sin(\alpha-\gamma)-\dfrac{D}{J}\omega-\dfrac{M_{тр}}{J}, \end{cases} \tag{4.6}$$

які після підстановки чисельних значень мають вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha}{dt}=\omega, \\ \dfrac{d\omega}{dt}=-5200\sin 90(\alpha_{мех}-\gamma_{мех})-4{,}5\cdot 90\omega_{мех}-260, \end{cases} \tag{4.7}$$

де $\gamma_{мех} = N\alpha_{д.\,мех}$ – кут повороту поля статора; $N = \tau \cdot f$ – порядковий номер імпульсу, що надходить з генератора імпульсів на комутатор; f =6600 Гц – частота пуску (робоча частота швидких переміщень, яка збільшена на 10%); τ – інтервал часу між двома черговими імпульсами; $\alpha_{д.\,мех} = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ рад.

Вводимо припущення, що при пуску швидкість двигуна не змінює знак, тоді в рівняннях (4.7) момент навантаження типу «сухе тертя» прийнятий також одного знака. Результати обчислень цих рівнянь представлені графіками на рис. 4.2, 4.3. На рис. 4.2 побудовані графіки залежності $\gamma = f(N)$ і $\alpha = f(N)$, на рис. 4.3 – графік залежності $\omega = f(N)$.

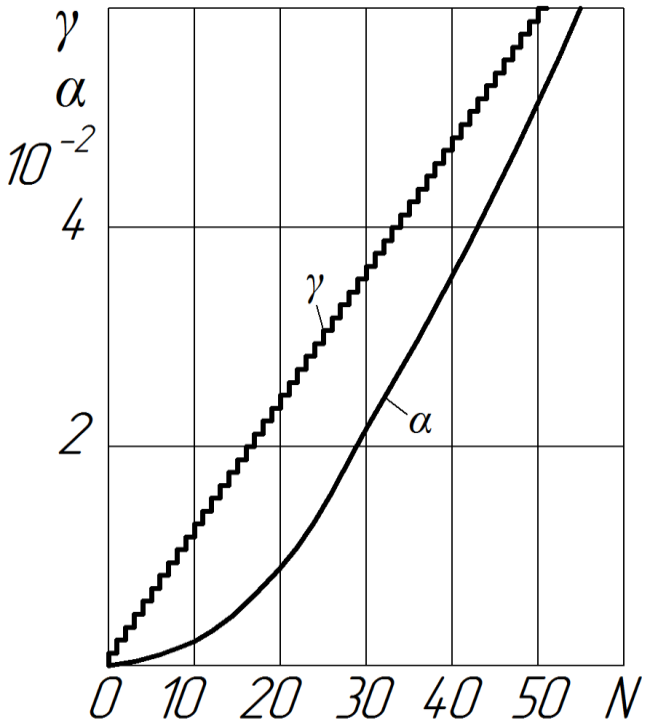


Рисунок 4.2 – Графіки кутових характеристик при пуску двигуна на частоті швидких переміщень (γ, α – кути повороту статора і ротора КД)

З рис. 4.2 видно, що в процесі розгону ротор двигуна відстає від магнітного поля статора, проте по мірі збільшення порядкового номера N імпульсу це розузгодження зменшується, прагнучи до деякої межі. Коливання миттєвої швидкості обертання ротора $\omega_{мех}$ (рис.4.3) показують, що двигун досягає середньої швидкості обертання за 21 імпульс, а процес встановлення

руху займає 90 тактів комутації. Максимальна швидкість обертання ротора несуттєво перевершує середню ($\omega / \omega_{ср}$=1,3), що досягається дробленням кроку, і за рахунок малих дискрет переміщення поля статора в систему вводиться енергія більш рівномірно, ніж на основному кроці. Таким чином, робота крокового двигуна в режимі дроблення основного кроку має переваги перед роботою у звичайному режимі.

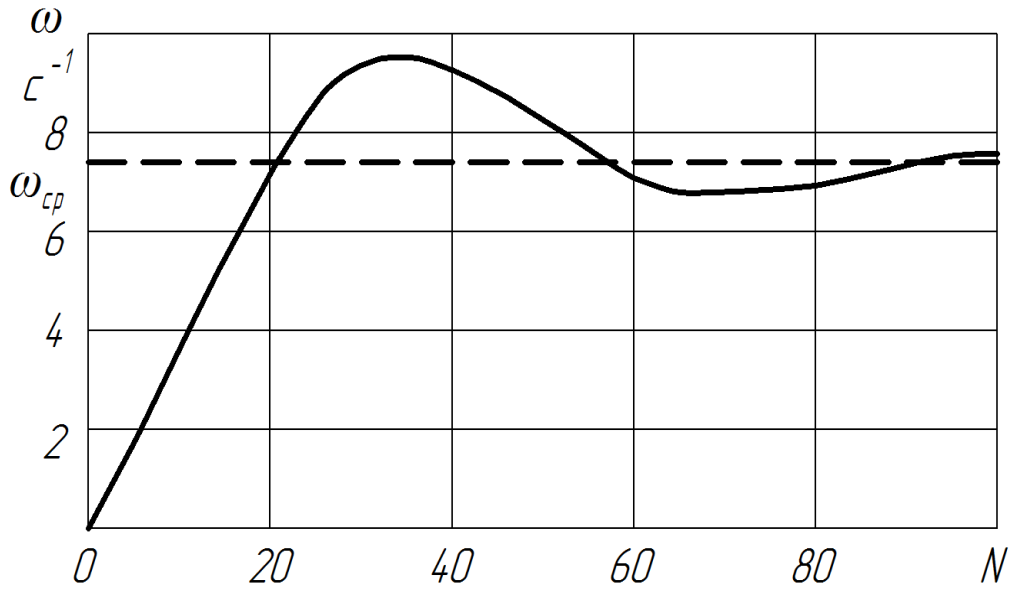


Рисунок 4.3 – Графік зміни миттєвої швидкості обертання ротора на частоті швидких переміщень

За такими ж рівняннями, що і розрахунок пуску на частоті швидких переміщень, тобто за виразами (4.7), був проведений розрахунок пуску і неграничного синхронного режиму на частоті 440Гц (з 10% запасу по частоті щодо частоти, прийнятої за робочу).

Результати розрахунку представлені на рис.4.4.

Як видно з рис. 4.4, рух ротора починається на першому ж кроці, і до моменту подачі 2-го імпульсу двигун встигає відпрацювати половину першого кроку. Потім відставання ротора двигуна на третьому і наступних кроках стає практично однаковим. Швидкість двигуна коливається біля середнього значення, маючи максимум і мінімум на кожному кроці. Цей режим роботи двигуна є дуже близьким до режиму одиничних кроків. Резонансних явищ при

цьому не спостерігається. Вже на п'ятому імпульсі настає практично квазіустановлений режим.

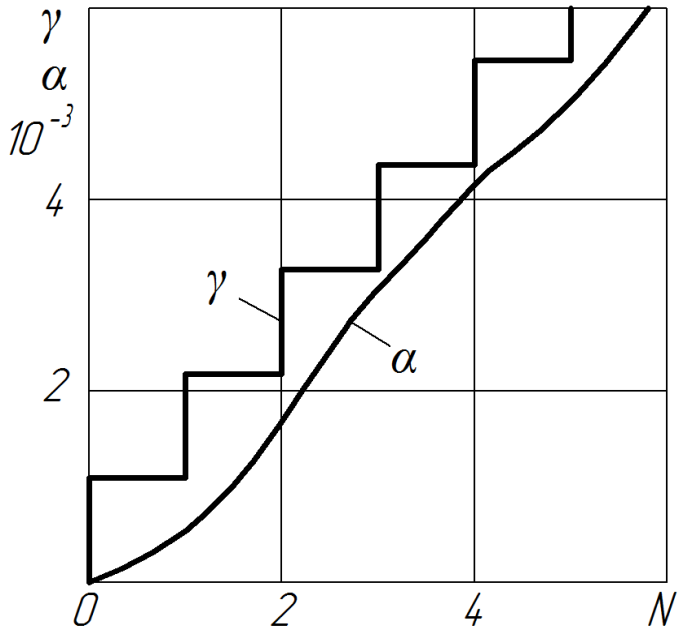


Рисунок 4.4 – Графіки кутових характеристик при неграничному пуску

Метою розрахунку режиму переходу з частоти швидких переміщень на частоту доведення є виявлення мінімальної ділянки переміщення (або мінімального числа, що записане у лічильнику переміщень), яке необхідно для того, щоб двигун погасив свою швидкість і перейшов на сталий режим обертання з частотою 400 Гц.

Для проведення розрахунку були взяті наступні вихідні рівняння:

$$\begin{cases} \dfrac{d\alpha}{dt} = \omega, \\ \dfrac{d\omega}{dt} = -5200\sin 90\left(\alpha_{мех} - \gamma_{мех}\right) - 4{,}5 \cdot 90\omega_{мех} - 260 sign\left[\omega_{мех}\right], \end{cases} \tag{4.8}$$

Результати обчислень представлені у вигляді графіків на рис.4.5, 4.6.

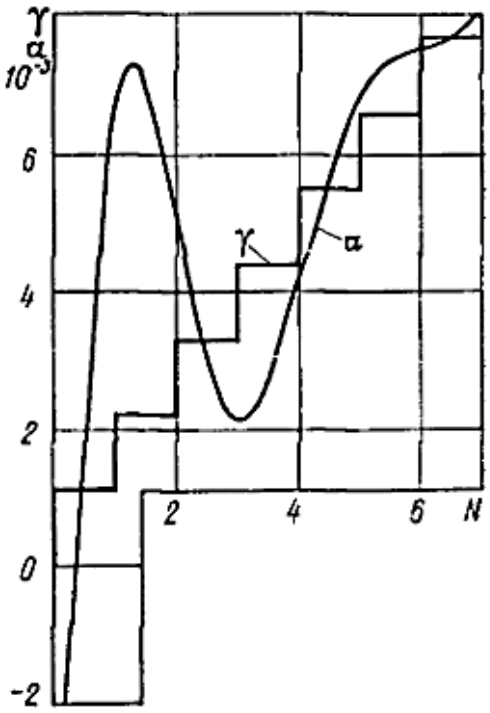


Рисунок 4.5 – Графіки кутових характеристик в режимі перемикання $\gamma_{мех} = f(N)$ та $\alpha_{мех} = f(N)$

При розрахунку в якості початкових умов при інтегруванні диференціальних рівнянь (4.8) використовувалося одне із значень швидкості і кута з негранічного синхронного режиму при f =6600 Гц: $\omega_{мех.\,нач} = 7,4$ рад/с, $\alpha_{мех.\,нач} = -0,0075$ рад.

Можна побачити, що при зниженні керуючої частоти ротор двигуна вибігає в позитивному напрямку на 7 дрібних кроків (рис.4.5) і потрапляє в гальмуюче поле статора. При цьому початкова стадія перехідного режиму носить коливальний характер. Однак, як видно з фазового портрету (рис. 4.6), вже на третьому кроці (частота 440Гц) ротор двигуна потрапляє в область зони нечутливості системи $\pm\Delta$. Тому при остаточному виборі числа імпульсів в лічильнику переміщень, що відпрацьовуються в режимі доведення, потрібно враховувати первісний вибіг ротора, який дорівнює семи крокам, і кількості імпульсів, що подаються на двигун до потрапляння в зону нечутливості (два кроки).

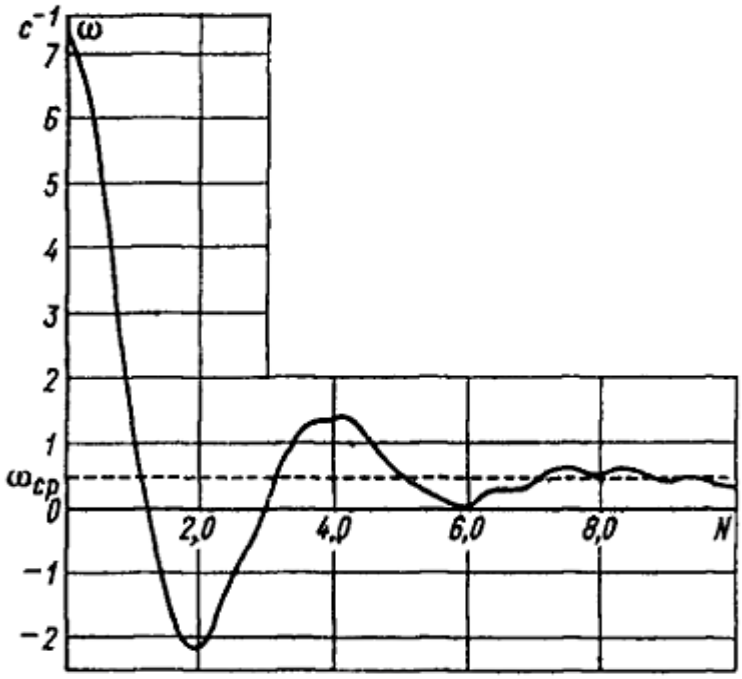


Рисунок 4.6 – Фазовий портрет руху ротора в режимі перемикання

Кількість імпульсів за першою з них більше, ніж за другою, тому слід прийняти мінімальний код в лічильнику, рівний семи. Квантування в часі з частотою f_1 (частота швидких переміщень) або f_2 (частота доведення), що задається імпульсними елементами IE1 і IE2 (рис. 4.1), і запам'ятовування на весь період проходження імпульсів (екстраполятори E1 і E2) враховується зміною величини $\gamma_{мех}$ на початку чергового кроку двигуна.

Таким чином, проведені розрахунки та дослідження показали, що вільний рух даної системи є стійким, при цьому аналіз вимушених рухів не потрібний, так як вхідний вплив системи обмежується стрибком, що рівносильно завданням ненульових початкових умов при вільному русі.

Моделювання двохшвидкісного приводу підтверджує результати розрахунку (з похибкою до 20%) частот приємистості та гальмування, а також межі переходу з максимальної швидкості на мінімальну. Модель розглянутого приводу може бути рекомендована на стадії проектування при визначенні найбільш доцільної структури крокового електроприводу.

ВИСНОВКИ

В наш час тонкоплівкові елементи займають до 80% площі напівпровідникових кристалів, що обумовлено постійним функціональним ускладненням ІМС. Отримання високоякісних та продуктивних за електрофізичними параметрами тонких шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур як активних, так і пасивних елементів ІМС, тому тема роботи є актуальною.

Розгляд вимог щодо електропривода установки підтвердив доцільність використовувати крокові двигуни у якості приводних двигунів електропривода, адже саме крокові двигуни забезпечують необхідну точність позиціонування робочих органів установки в межах $\pm 0{,}01$ мм з відносною швидкодією не гірше 3 мс, а також гарно пов'язуються зі схемою керування, виконаною на базі логічних елементів, яка у свою чергу, добре співпрацює з системою керування установкою.

Розрахований та обраний кроковий двигун задовольняє усім висунутим вимогам, тому підходить до застосування його у якості приводного електродвигуна підйомника стола масок. Для обраного двигуна була розроблена функціональна та принципова схеми керування.

Проведений синтез системи автоматичного керування електроприводом стола масок, система перевірена на стійкість за критерієм Михайлова. Результати перевірки показали, що система є стійкою.

Для поліпшення якості продукції та покращення характеристик роботи крокового приводу провели дослідження, які допомогли підвищити добротність слідкуючого контуру електропривода за рахунок збільшення граничної швидкості обертання двигуна або зменшення його динамічної похибки за допомогою програмного частотного розгону двигуна до робочих частот, а також використанні штучного дроблення кроку.

Проведені дослідження показали, що вільний рух системи є стійким, при цьому аналіз вимушених рухів не потрібний, так як вхідний вплив системи

обмежується стрибком, що рівносильно завданням ненульових початкових умов при вільному русі.

Моделювання двохшвидкісного приводу підтверджує результати розрахунку (з похибкою до 20%) частот приємистості та гальмування, а також межі переходу з максимальної швидкості на мінімальну.

Модель розглянутого приводу може бути рекомендована на стадії ескізного проектування при визначенні найбільш доцільної структури крокового приводу.

Викладене вище дозволяє зробити висновок, що завдання на магістерську роботу виконано. Спроектований електропривод задовольняє висунутим вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калинушкін Є.П., Федоркова Н.М., Синиціна Ю.П. та ін. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2009. – 175 с.

2. Фізика і технологія тонких плівок : навчальний посібник. У 2-х т. – Т. 1. Технологія тонких плівок / Володимир Васильович Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 92 с.

3. Wang; Liya (Ann Arbor, MI), Xu; Chuanjing (Ann Arbor, MI), Miller; John M. (Ann Arbor, MI). Composite material and electrodes made therefrom. United States Patent 7,326,494, Wang , et al. - February 5, 2008.

4. Barker; Jeremy (Shepton-Under-Wychwood, GB), Saidi; M. Yazid (Henderson, NV), Kelley; Tracy E. (Tuscon, AZ). Electrodes comprising mixed active particles . United States Patent 7,041,239. Barker , et al. May 9, 2006

5. Buryk I.P. Numerical simulation of FinFET transistors parameters/ [I.P Buryk, A.O. Golovnia, M.M. Ivashchenko, L.V.Odnodvorets] // J. Nano- and electronic Physics. – V.12, №3. – 2020.

6. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: навч. посібник: у 2 т. /З.Ю.Готра. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – Т.1. – 888 с.

7. Vladimir Rentyuk. Control stepper motors in both directions // EDN. - 2010. - March 18.

8. Кеніо Такаши. Крокові двигуни та їх мікропроцесорні системи керування /К. Такаши. К: Енергоатоміздат, 1987. – 200 с.

9. Щерба А.А. Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 6.050702 "Електромеханіка"/ А.А. Щерба, К.К. Побєдаш, В.А. Святненко; – Київ, НТТУ "КПІ", 2013. – 360 с.

10. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1 / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

11. Карпенко Б.К., Ларченко В.І., Прокоф'єв Ю.А. Крокові електродвигуни. - К .: Техніка, 1972.

12. Зайців А.А. і др. Напівпровідники. Транзистори середньої та великої потужності. Справочник. /Зайців А.А., Міркін А.І.І., Мокряків В.В. і Р. Під редакцією А.В. Голомедова.– К.: Радіо і зв'язок,1989. – 640 с.

13. Бойко В. І., Багрій В. В. Цифрова схемотехніка. – К: ІЗМН, 2001.– 228 с.

14. Куцик А.С. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах: Навч. посіб. – Нац. ун-т «Львівська політехніка»/ А.С. Куцик, В.О. Місюренко.– Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011.– 199 с.

15. Є.О. Єндіяров. Використання крокових електроприводів в установках нанесення тонких плівок при виробництві мікросхем /Єрмілова Н.В., Єндіяров Є.О. // Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 4 листопада 2022р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022, С.29-31.

16. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.

17. Галай М.В. Теорія автоматичного керування: неперервні та дискретні системи. Навч. пос-к. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – 454с.

18. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. –131 с.

19. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.

20. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.

21. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції

«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:

ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»

04 листопада 2022 року

Полтава 2022

УДК 004.89 + 681.51

Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 4 листопада, 2022 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. – 98 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

Редакційна колегія:

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

© Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЗМІСТ

О.І. Лактіонов, М.А. Мовін, В.С. Марченко
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ…… 7

О.Г. Дрючко, В.В. Соловйов, Н.В. Бунякіна, І.О. Іваницька, Є.О. Ошкодьоров
ФОРМУВАННЯ КАТАЛІТИЧНОАКТИВНИХ ШАРІВ АВТОМОБІЛЬНИХ СТРУКТУРОВАНИХ КОНВЕРТОРІВ НА ОСНОВІ ПЕРОВСКИТІВ ЛАНТАНОЇДІВ І ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ……. 8

О.В. Шефер, О.Д. Клєстов
МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКОВОЮ ЛІНІЄЮ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ…. 11

Б.Р. Боряк, А.О. Косинков
МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ПРИМІЩЕННЯХ…….. 13

Н.В. Єрмілова, А.О. Чистота
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НАСОСНИХ УСТАНОВОК ВИПАРЮВАЧІВ СОКУ.. 15

О.І. Безверхий, Р.В. Карманов, В.В .Борецький
УДОСКОНАЛЕННЯ ДИЗАЙНУ САЙТІВ З ТОЧКИ ЗОРУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОДАННЯ ІНФОРМАЦІЇ……. 17

Г.В. Сокол, А.С. Міщенко
АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВИХ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ОСНОВ СИСТЕМ КІБЕРБЕЗПЕКИ КРАЇН ЄС……. 20

Г.М. Кожушко, С.Г. Кислиця, В.С. Дорошенко
СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ВАГИ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ…… 21

О.І. Лактіонов, Ірімісосе Філлінес, І.В. Ільницький, Б.Е. Бивальцев
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО РОБОТОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ LEGO EV3 ДЛЯ ПОЗИЦІЮВАННЯ У ПРМІЩЕННЯХ…….. 24

О.В. Шефер, В.В. Фенько
РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ…. 26

В.В. Косенко, М.В. Кобилинський
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОНТЕНТОМ WORDPRESS КОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА…….. 27

Н.В. Єрмілова, Є.О. Єндіяров
ВИКОРИСТАННЯ КРОКОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УСТАНОВКАХ НАНЕСЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК ПРИ ВИРОБНИЦТВІ МІКРОСХЕМ…….. 29

Л.І. Лєві, А.В. Базарний
МОДЕРНІЗАЦІЯ WEB-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»…… 32

О.В. Шефер, О.С. Ястреба, В.С. Ястреба
ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ…….. 34

Г.М. Кожушко, С.Г. Кислиця, Д.В. Кислиця
СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ – ЕФЕКТИВНИЙ ШЛЯХ ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ…….. 36

О.Г. Дрючко, Б.Р. Боряк, Р.В. Захарченко, В.І. Троянський, В.В. Жданов
ТЕНДЕНЦІЇ ПОБУДОВИ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ…….. 38

Ю.Р. Зоураб, Р.М. Царьков, Р.О. Єрмілов
МЕТОДИКИ ТА ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ РОБОТІВ…… 40

С.Г. Кислиця, С.І. Демус
МУЛЬТИСЕРВІСНА МЕРЕЖА ЯК ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМУНІКАЦІЙ…….. 43

О.Г. Дрючко, О.В. Шефер, О.В. Сухоребрий, Д.О. Ненич, В.П. Будім
ЕФЕКТИВНІСТЬ ВВОДУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛ В ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО……..... 45

О.В. Шефер, Є.М. Плутцов
МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ ТА КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ З ІНТЕГРАЦІЄЮ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНУ МЕРЕЖУ ТОВ «ІНДУСТРІАЛЬНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ»……. 48

О.І. Безверхий, В.А. Дворук, Р.Т. Азізов
РОЗРОБКА ТА ВСТАНОВЛЕННЯ НА ХОСТИНГ ІГРОВОГО СЕРВЕРУ ЗА ДОПОМОГОЮ JAVA ТА ORACLE CLOUD…….. 49

М.Б. Вітер, Д.В. Коровін, Г.О. Швидков
АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕКРУТЕРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В ІТ КОМПАНІЯХ…. 50

DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION SYSTEM FOR WORDPRESS CONTENT MANAGEMENT OF A COMMERCIAL ENTERPRISE

***V. Kosenko**, Doctor of Science, professor,*
***M. Kobylynskyi**, undergraduate*
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

УДК 621.832

***Н.В. Єрмілова**, к.т.н., доцент,*
***Є.О. Єндіяров**, магістрант*
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ВИКОРИСТАННЯ КРОКОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УСТАНОВКАХ НАНЕСЕННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК ПРИ ВИРОБНИЦТВІ МІКРОСХЕМ

Тонкі плівки, які наносяться у вакуумі, широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем (ІМС), а також при виготовленні фотошаблонів - основного технологічного інструмента мікроелектроніки.

Отримання високоякісних та продуктивних за електрофізичними параметрами тонких шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур як активних, так і пасивних елементів ІМС [1]. Тонкі плівки наносяться також і при заключних технологічних операціях виготовлення напівпровідникових приладів та ІМС, тобто після виконання більшості інших операцій. При цьому економічний брак є особливо небезпечним і тому повинен бути зведений до мінімуму. Таким чином, від досконалості технологічних процесів нанесення тонких плівок у значній степені залежить надійність та якість мікроелектронних виробів, технологічний рівень та економічні показники їх виробництва.

В результаті проведеного аналізу щодо електропривода типової установки нанесення тонких плівок було виявлено, що в якості привідних двигунів можна використовувати електродвигуни всіх існуючих типів [2], але дискретність та точність з якою відбуваються всі процеси, котрі пов’язані з переміщенням робочих органів установки, найкраще забезпечуються кроковими двигунами (КД). Адже саме крокові двигуни забезпечують необхідну точність позиціонування робочих органів установки в межах ±0,01мм з відносною швидкодією не гірше 3 мс, а також добре пов'язуються зі схемою керування, виконаною на базі логічних елементів, яка, у свою чергу, добре співпрацює з системою керування установкою. Тут постає задача підвищення добротності слідкуючого контуру крокового електропривода за рахунок збільшення

граничної швидкості обертання двигуна або зменшення його динамічної похибки за допомогою програмного частотного розгону двигуна до робочих частот.

На базі розробленої структурної схеми двохшвидкісного крокового електроприводу були проведені дослідження його роботи в режимі дроблення основного кроку. При цьому використовувалися наступні режими роботи:

а) пуск із стану спокою на частоті швидких переміщень;

б) неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті швидких переміщень;

в) неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті доведення;

г) перехід з частоти швидких переміщень на частоту доведення;

д) фіксація ротора. В результаті проведених досліджень були отримані характеристики:

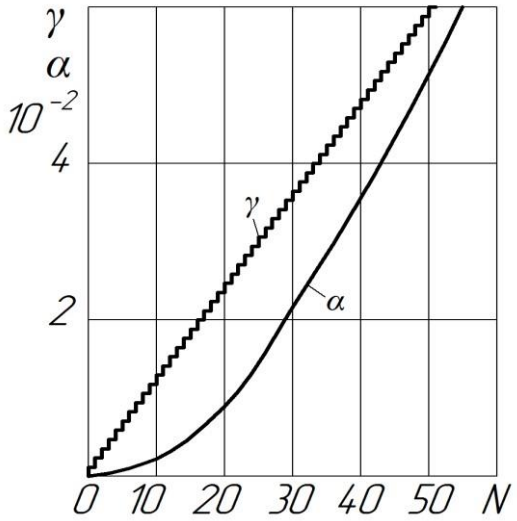


Рис. 1. Графіки кутових характеристик при пуску двигуна на частоті швидких переміщень (γ, α – кути повороту статора і ротора КД)

З рис. 1 можна побачити, що ротор крокового двигуна відстає від поля статора в процесі розгону, але по мірі збільшення порядкового номера N імпульсу КД це розузгодження зменшується, прагнучи до деякої межі.

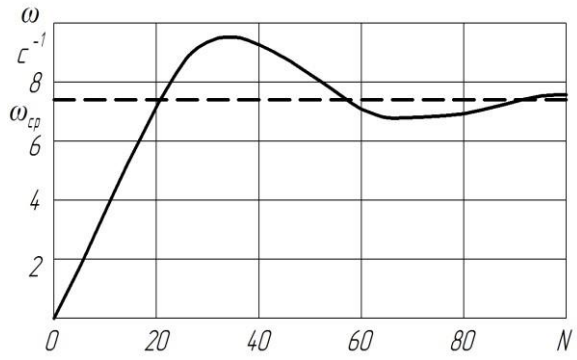


Рис. 2. Графік зміни миттєвої швидкості обертання ротора на частоті швидких переміщень

Коливання миттєвої швидкості обертання ротора ω (рис. 2) показують, що двигун досягає середньої швидкості обертання за 21 імпульс, а процес встановлення руху займає 90 тактів комутації. Максимальна швидкість обертання ротора несуттєво перевершує середню ($\omega / \omega_{ср}$=1,3), що досягається дробленням кроку, і за рахунок малих дискрет переміщення поля статора в систему вводиться енергія більш рівномірно, ніж на основному кроці. Таким чином, можна зробити висновок, що робота крокового двигуна в режимі дроблення основного кроку має переваги перед його роботою у звичайному режимі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Фізика і технологія тонких плівок: навчальний посібник. У 2-х т. – Т. 1. Технологія тонких плівок / В.В. Прокопів. – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 92 с.*

2. *Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко*
О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.

3. *Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика): Навчальний посібник / За ред. М.Г.Поповича, В.В.Кострицького. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.*

USE OF ELECTRICAL STEPPER DRIVES IN ESTABLISHING FOR DEPOSITION OF THIN PELLICLES IN THE MICROCIRCUITS PRODUCTION

N. Yermilova, *Ph.D., Associate professor,*
E. Endiyarov*, Master's Student*
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

1. TECHNOLOGICAL PART

1.1 Description of the technological process of integrated circuits production

The production of both discrete (separate) semiconductor devices and integrated circuits (ICs) in general is based on the same technological processes (epitaxy, photolithography, etching, diffusion of films in vacuum, etc.) It should be noted that in the manufacture of all types of semiconductor devices and ICs, the technological process of thin film deposition in vacuum - thin film technology - is used to a greater or lesser extent.

Consider the use of thin films on the example of manufacturing a transistor, as it is not only a discrete semiconductor device, but also the main element of the IC.

Planar transistor (Fig.1.1) is a semiconductor crystal with two p-n junctions, which form the collector 5, emitter 3 and base 4. After the formation of p-n junctions in a semiconductor crystal by depositing metal films in a vacuum, ohmic contacts 1 to the base and emitter are formed.

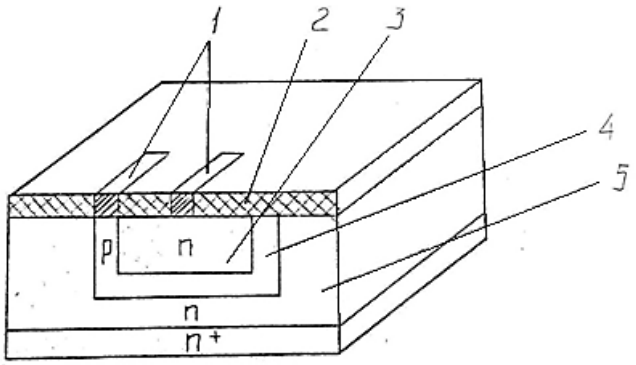


Figure 1.1 - Structure of a planar transistor:
1 - thin film contacts; 2 - oxide layer; 3 - emitter; 4 - base;
5 - collector

Most often, for simplicity and manufacturability, ohmic contacts made of aluminum are used. If the leads are connected by soldering, aluminum is additionally covered with a layer of gold. Ohmic contacts on silicon of n-type electrical conductivity are made of gold, which is soldered at a temperature of 370-500^0 C to

improve adhesion. High-temperature contacts on silicon are obtained by successive application of a layer of chromium and then nickel, which allows soldering with conventional solders. Widespread are aluminum contacts with a sublayer of titanium, which has the property of high adhesion to silicon. Since the titanium layer is quickly oxidized in the air, which prevents the reliable connection of the electrical output, a layer of gold, silver or nickel is applied to it.

A microminiature functional electronic unit, the set of working elements of which is made in a single complex of group technological processes, is called an integrated circuit. The indicator of IC complexity is the degree of integration, which is characterized by the number of elements included in the integrated circuit. According to the technological methods of manufacturing ICs are divided into film, hybrid and semiconductor (monolithic). These methods are not competing, but complement each other. Therefore, let us dwell on each of them.

In film ICs all elements (resistors, capacitors) and interconnections are made in the form of films. Film ICs are made by layer-by-layer application of thin films of different materials on a common base - dielectric substrate. As a rule, various resistor-capacitive circuits (RC-circuits) are made on film elements.

Thin-film resistor (Fig. 1.2. a, b) is a chip element located on a dielectric substrate 3 and capable of forming resistance to electric current, consists of two contact terminals 1 and a resistive film 2 of linear or zigzag configuration.

The resistance of film resistors is determined by the resistance R (Ohm/square) of a square of thin film material with a thickness $d_п$, to the two opposite sides of which the contact leads are connected:

$$R=q/d_п \qquad 11$$

Thus, the resistance of the film resistor does not depend on the size of the side of the square and is equal to its surface resistance.

For the manufacture of thin-film resistors, alloys are used whose resistance is many times higher than that of pure metals (for example, nichrome, MLT, tantalum nitride, a mixture of chromium and silicon oxide, metal-ceramic cermets).

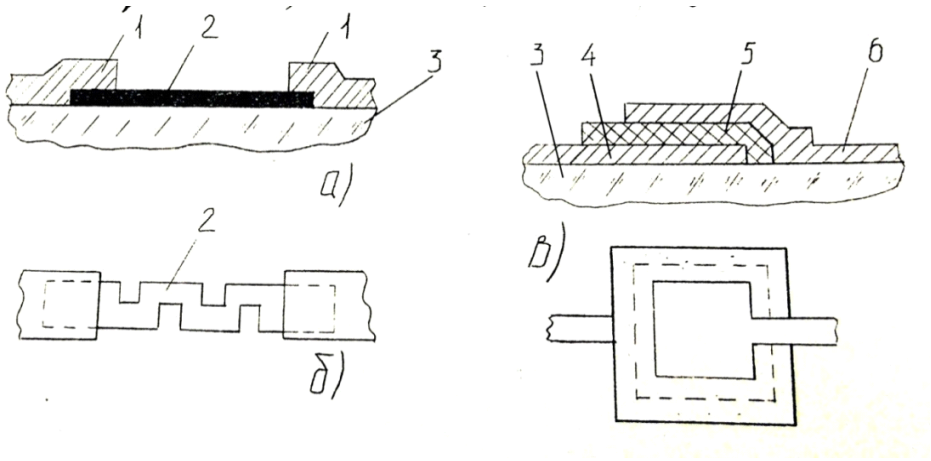


Figure 1.2 - Structure of thin film resistors (a, b) and capacitor (c):

1 - contact leads; 2 - resistive film; 3 - dielectric substrate; 4,6 - lower and upper metal film electrodes; 5 - film dielectric

Thin-film capacitor (Fig.1.2, c) is a chip element capable of accumulating electric charge and is a flat three-layer structure consisting of a dielectric layer located between two metal layers - electrodes (covers). As stated in [1], the specific capacitance of a flat film capacitor (F / m^2) is determined by the formula:

$$C = 8.85\text{-}10^{-12} E / d_a; \quad (1.2$$

where d_a is the thickness of the dielectric layer;

E - dielectric constant of the material.

It is desirable that the specific capacitance of the film capacitor was as large as possible. To do this, use a dielectric that has a high dielectric constant E, and try to reduce the thickness d_a of the film from it. But these parameters cannot be changed in wide ranges. Most of the dielectrics used in thin film technology have E from 3 to 1000. The thickness of the resulting films is not less than 0.3 microns.

The main technological task in the manufacture of film capacitors is to obtain permissibly thin dielectric films of minimal porosity.

The ratings of thin film capacitors are determined by the accuracy with which the dielectric layer can be formed. The permissible thickness of dielectric films is limited by their electrical strength, which is reduced due to through pores and other defects.

Most often, films of silicon oxides SiO_2 and titanium $Ti_2 O_5$ are used as a dielectric in thin-film capacitors, and films of high conductivity metals are used as covers. But films of gold, silver and copper are not used for these purposes, since the atoms of these metals have high mobility and, penetrating into the dielectric film, lead to failures in the operation of capacitors.

In most cases, capacitor covers are made of aluminum films. In this case, the upper covers of tantalum capacitors are made of aluminum films with a sublayer of vanadium.

The contact pads of film ICs usually exist as a continuation of the connecting conductor lines (interconnections) and are designed for soldering or welding the external pins of the case.

For film IC substrates, rectangular dielectric plates are used, which have small dimensions (a few millimeters). Usually, several film ICs are simultaneously applied to one substrate, and then they are cut. Previously, the substrates are carefully ground and polished, as scratches and microcracks on their surface cause instability of thin-film ICs.

The materials from which the substrates are made must have high electrical resistance and thermal conductivity, heat resistance up to 500 - 600^0 C, low dielectric constant, sufficient mechanical strength and dimensional stability, the possibility of surface treatment up to $Rz^{0.1}$ - $Rz^{0.05}$, no outgassing in vacuum and elevated temperature, chemical inertness to film materials and their solvents. In addition, their temperature coefficient of linear expansion (TLCE) should be close to the TLCE of the film material. The most widely used substrates for the manufacture of substrates are sitales, alumina ceramics and glass. Sitales are a product of glass crystallization with very small (up to 0.01 mm) and evenly distributed crystals [1].

One of the most important factors affecting the reproducibility of the electrophysical parameters of thin films deposited in vacuum is the degree of surface cleanliness of the substrates. In practice, it is impossible to obtain perfectly clean surfaces, as they are extremely active and quickly covered with gases that are in the environment, as well as moisture, dust and various surfactants, thin layers of which

are very important to isolate, substrates are cleaned by various physical and chemical methods.

Beforehand, water molecules and absorbed gas molecules are removed from the surface of the substrates before the films are deposited in a vacuum chamber at a temperature of 200 - 300^0 C for 2-3 minutes. The final cleaning is performed by bombardment in a vacuum chamber. If the substrates are placed in the zone of high energy ions, the cleaning process takes place in a glow discharge and molecular layers of water, gases and other compounds are released in a few minutes.

In addition, it must be remembered that it is possible to re-contaminate the trays when transporting them in a vacuum chamber. The danger of double contamination is that their chemical composition is unknown and not always the same. Therefore, such contamination leads to unexpected results, especially in industrial production.

Hybrid integrated circuits (HICs) are thin-film microcircuits consisting of passive elements (resistors, capacitors, contact pads) and discrete active elements (diodes, transistors). The hybrid IC (Fig.1.3) is a dielectric substrate with microelements applied to it - film capacitors and resistors and a connected hinged transistor, the base of which is connected to the upper capacitor cover by a bus in the form of a very thin wire.

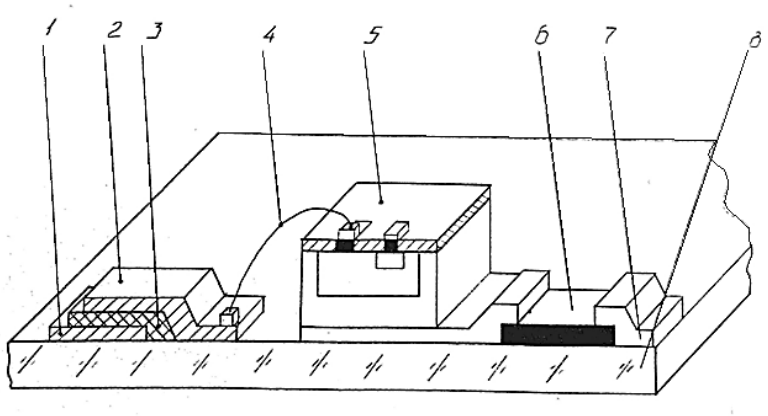


Figure 1.3 - Structure of the film hybrid IC:
1,2 - lower and upper electrodes of the capacitor; 3 - dielectric layer;
4 - conductor connecting bus; 5 - hinged transistor;
6 - film resistor; 7 - contact pin; 8 - dielectric substrate

In semiconductor ICs all elements and interconnections are made in the volume and on the surface of the semiconductor crystal. Semiconductor ICs are a flat semiconductor crystal (substrate) in the surface layer of which equivalent elements of the electrical circuit are formed by various technological means - local gaps (diodes, transistors, capacitors, resistors, etc.), united on the surface by film metal connections (interconnections).

Silicon, germanium or helium arsenide wafers with a diameter of 60 - 150 mm and a thickness of 0.2 - 0.4 mm are used as substrates in semiconductor ICs.

A semiconductor wafer is a group workpiece on which a large number of ICs are simultaneously manufactured. After completion of the main technological operations, it is cut into parts - crystals 2, sometimes called "chips". The dimensions of the sides of the crystals can be from 3 to 10 mm. The basic cut 1 of the wafer (Fig. 1.4) plays the role of its orientation in various technological processes.

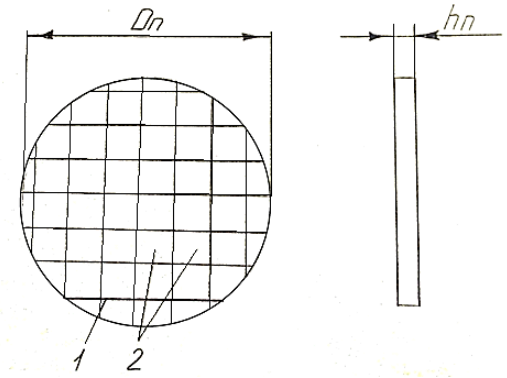


Figure 1.4 - Group silicon wafer:
1 - basic cut; 2 - individual crystals - "chips"

Structures of semiconductor IC elements - transistor, diode, resistor and capacitor are made by appropriate doping of local areas of the semiconductor by planar technology. Planar technology is characterized by the fact that all the outputs of the IC elements are located in the same plane on the surface and simultaneously connected to the electrical circuit by thin-film interconnections. When applying planar technology, group processing is carried out, that is, during one technological process a large number of ICs are obtained on the substrates, which provides high manufacturability and efficiency, as well as allows automating the production of ICs.

The process of thin film deposition in vacuum requires a volume isolated from the atmosphere, in which the necessary vacuum is created. The process of film deposition consists of the formation of an atomic or molecular flow of matter from a source of evaporation or sputtering, the transfer of this flow from the source to the substrate, the condensation of atoms or molecules on the substrate and the formation of a film [2,3].

The main requirements for vacuum thin film deposition (VDD) plants are to ensure maximum purity of the film, its adhesion to the substrate, a given structure and grain size, obtaining high uniformity of the film thickness, ensuring the desired processing production. These requirements are met by choosing the method of film deposition and vacuum system, selecting the most efficient source of evaporation or sputtering of the material, the method of preparation of the substrate surface, accurate calculation of the distance from the evaporation source to the deposition surface and the trajectory of their relative movement. An important role is played by the choice of methods of process parameters control and automatic control system (ACS). Ensuring high productivity of production is achieved by choosing the optimal variant of structure and distribution, type of aggregate equipment, formation of highly reliable structures.

There are two vacuum methods of thin films deposition, which differ from each other by the method of particle flow generation: thermal evaporation method and ion bombardment sputtering method. Let us dwell on the first of them, because this method was the basis of the developed installation [1].

The principle of the thermal evaporation method (Fig. 1.5) is to heat the material in a special evaporator 2 to a temperature at which an intense evaporation process begins, followed by the subsequent condensation of material vapors in the form of a thin film on the surface of the substrate 5, located on the substrate holder 4 at some distance from the evaporator 2. To control the beginning and end of the deposition process, a valve 6 is used, which is capable of blocking the flow of evaporating particles 3.

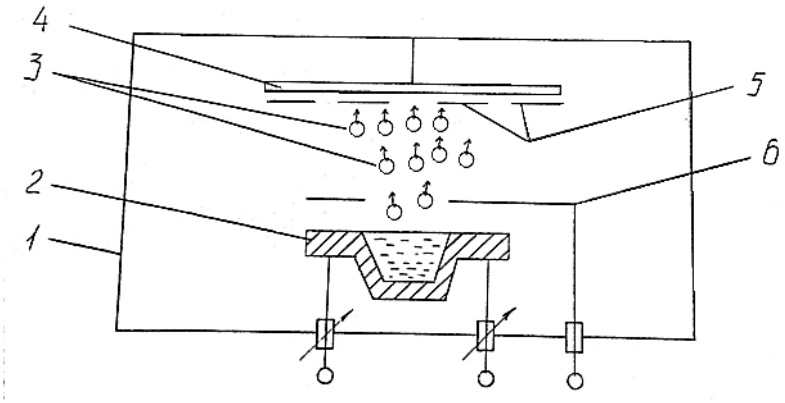


Figure 1.5 - Method of thin film deposition in vacuum:
1 - working chamber; 2 - evaporator; 3 - evaporated particles;
4 - substrate holder; 5 - substrates; 6 - latch

1.2 Overview of existing vacuum thin film deposition plants

The first industrial vacuum thin film deposition (VDD) units for the production of thin-film IC elements are cap-type units (Fig. 1.6), which are based on the basic model UVN-70A-1. Under the hood 6 on the board 2 are installed resistive evaporators 1 and 3, or diode sputtering systems, which can be overlapped by valves 4. The substrates mounted on the carousel 7 are heated by the spiral 8 and during the deposition of different layers consistently coincide with the masks located on the carousel 5. With this arrangement of intra-chamber mechanisms, an individual method of manufacturing film elements of hybrid ICs on sieve substrates through masks is implemented.

The use of several evaporators allows you to consistently obtain, for example, a sublayer, a layer and a mixed transition from sublayer to layer in one pumping cycle. On one of the positions of the carousel 7 can be placed a simulator, which is mounted on a thermistor for measuring the temperature of the substrate and the resistance sensor of the applied film. On the working positions are installed fast iron spirals, isolating from each other sources of evaporation.

In industrial modifications of cap installations, for example, UVN-2M-1, UVN-62P-1, UVN-75R-2, UVN-71P-3, resistive elements and electron beam evaporators, diode ion sputtering systems, flat and spherical carousels with substrates are used,

implementing both individual and group methods of processing (several substrates are simultaneously processed by one source).

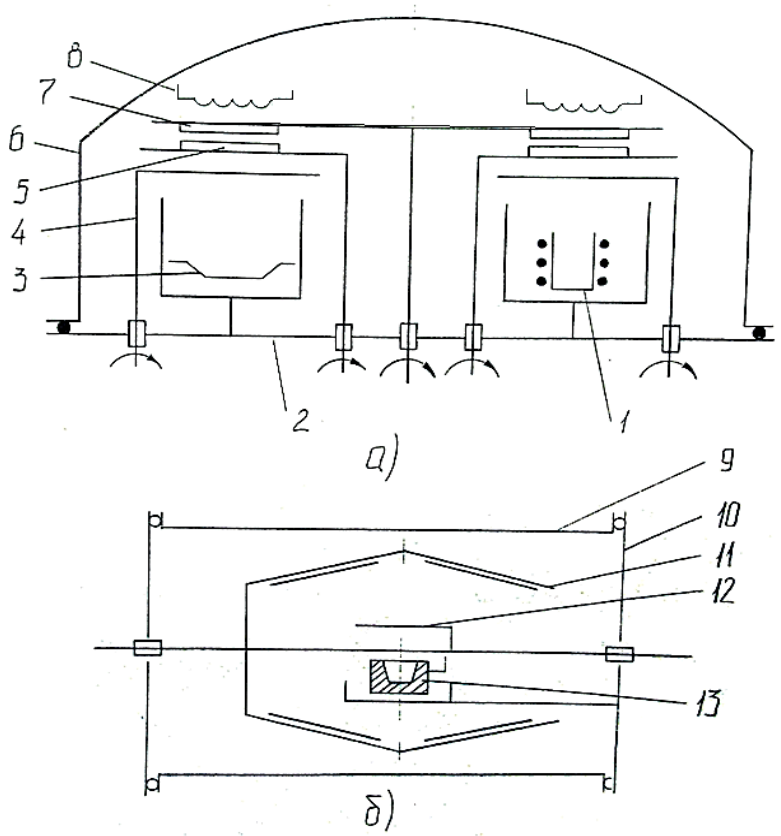


Figure 1.6 - Equipment for thin film deposition in vacuum:
1 - evaporator of resistive type; 2 - board; 3 - diode spraying system; 4 - latch; 5 - carousel; 6 - cap; 7 - carousel of substrates; 8 - heating spiral; 9 - working chamber; 10 - end cover; 11 - substrate-carrying drum; 12 - latch; 13 - evaporation system

The vacuum system provides a vacuum of 10^{-4} ... 10^{-5} Pa, built on the basis of a steam-oil pump H-2T or H-2T-3, the pumping process control is semi-automatic. The productivity of the plants is largely determined by the content of the carousel, which for most of the UHVs of this type is 8-12 substrates with a size of 60-48 mm. The film thickness error is ± (20...25)%. The equipment of this type processes ICs of the 3rd integration stage (up to 1000 elements per crystal) with minimum element sizes of more than 10 microns.

In the conditions of mass production of ICs and in the direction of increasing the size of the processed substrates, a small number of simultaneously loaded substrates in cap UHN was a constraint and the reason for the emergence of more productive equipment. The use of drum 11 as a substrate (Fig. 1.6. b) allows to increase the number of simultaneously loaded sieve substrates up to 70-80, simultaneously reduce the thickness of the deposited films to 5-10 microns with a relative thickness error of up to ± (15...20)%, as well as increase the material utilization factor to 0.7...0.8 (for carousel substrate holders this coefficient is 0.08...0.1). The working chamber is made in the form of a cylinder 9 with a horizontal axis and has end caps 10 that can be rolled back along the axis of the cylinder. The basic model is the unit UVN-70A-2, on the basis of which several technological upgrades were created (UVN-71P-4, UVN-75P-1, etc.) by mounting in-chamber devices (evaporation systems 13 or spraying sensors, heaters, valves 12, etc. - Fig. 1.6) and completing the appropriate power supply and control system.

Installations of this type have a large capacity of the indirectly heated crucible evaporator with the possibility of loading the evaporated material into the crucible. The pumping system is made on the basis of diffusion pumps H-5K, H-10K and others and provides a working pressure of 10^{-5} Pa. On these installations it became possible to process ICs (large integrated circuits) with the number of elements on a crystal from $5\text{-}10^2$ to $5\text{-}10^4$ and minimum element sizes of 5...10 microns.

All of the above-described cap and horizontal-cylindrical type UHVs are batch plants, the principle of operation of which is to periodically depressurize the working chamber for unloading used and loading new substrates, cap or spraying systems, controlling the parameters of the deposition particle flow, opening the valve, and performing some other operations.

1.3 The principle of operation of the eight-position vacuum installation for the production of hybrid integrated circuits

The layout of the elements of the hood mechanism of the eight-position vacuum installation for the production of hybrid integrated circuits (installation for the production of ICs) is shown in Fig. 1.7. Sputtering of the passive part of hybrid ICs according to the technological process of the sequential type, the essence of which is the sequential application (sputtering) of the same layer on all substrates or sputtering of all layers through a set of masks on one substrate, requires the introduction of a complex control algorithm into the command device of the automated installation.

Before the start of the sputtering process, all elements of the sputtering mechanism are set in the initial state: the substrate table 1 with substrates 3, the mask table 8, the evaporator table 19 on the sputtering axis 0; the mask table lift 14 rises; the latch 17 closes (position II). The mask table and the substrate table move in two mutually perpendicular directions (X,Y axes). The tables are driven by stepper motors (CM) mounted on the coordinate axes. Stepper motors 5,7,11,15 are connected to the tables through gearboxes 4,6,10,16. The mask lifter 14 moves along the Z axis and is driven by the stepper motor 12 through the gearbox 13. On the table 19 there are 16 evaporators 18, which are driven to the spraying axis 0 by the gearbox 21 connected to the table through the gearbox 20.

When spraying all layers through a set of masks 9 on one substrate, the first substrate is heated to a predetermined temperature by the furnace 2. The first evaporator, brought to the spraying axis, is heated to reach the set temperature and spraying speed. Spraying is carried out on the measuring element of the spraying speed sensor through the hole 22 in the latch 17. After reaching the set spraying speed, the gate 17 opens and the first layer is sprayed through the hole 22 until the set dielectric thickness or the set resistance value is reached. On a signal from the sensor about reaching the set thickness, the gate 17 closes, the evaporator 18 is turned off, the ovens are retracted, and the mask table moves to the left by one mask. After the next mask is placed on the sputtering axis, the mask lifter rises, the ovens return to their initial state and, if necessary, the next evaporator is placed on the sputtering axis. When sputtering resistors, the mask lifter presses the mask close to

the substrate. When sputtering the dielectric of capacitors, the distance between the mask and the substrate after lifting is within 0.2 ... 0.5 microns.

Similarly, the next layers are sprayed through other masks. After sputtering through the fourth mask, the mask table moves along the Y axis to the next row, and after sputtering through the fifth mask, the mask table moves along the X axis in the opposite direction. After the first IC is sputtered through n masks, the first mask and the second substrate are displayed on the sputtering axis, and all operations of the sputtering process are repeated. If sputtering of one IC requires less than eight masks, then after sputtering of the first IC, the ninth mask is output to the sputtering axis, as the mask table is set to the second set of masks.

When the mask is stationary during operation and the substrates are moved, they are heated to the temperature required for spraying the first layer. The first evaporator warms up to reach the set spraying speed, the valve 17 opens, the layer of the set thickness is sprayed. Then the latch 17 closes, the lift 14 lowers the mask, the substrate table 1 moves the second substrate to the sputtering axis. The mask lifter 14 rises, the latch 17 opens and the first layer is sprayed on the second substrate and so on until the first layer is sprayed on the

the last substrate. After sputtering the first layer on the last substrate, the evaporator 18 is turned off, and a preheated second evaporator is brought to the sputtering axis. Simultaneously, the second mask is moved to the sputtering axis. The following operations of sputtering the second and all other layers are similar to the operations of sputtering the first layer.

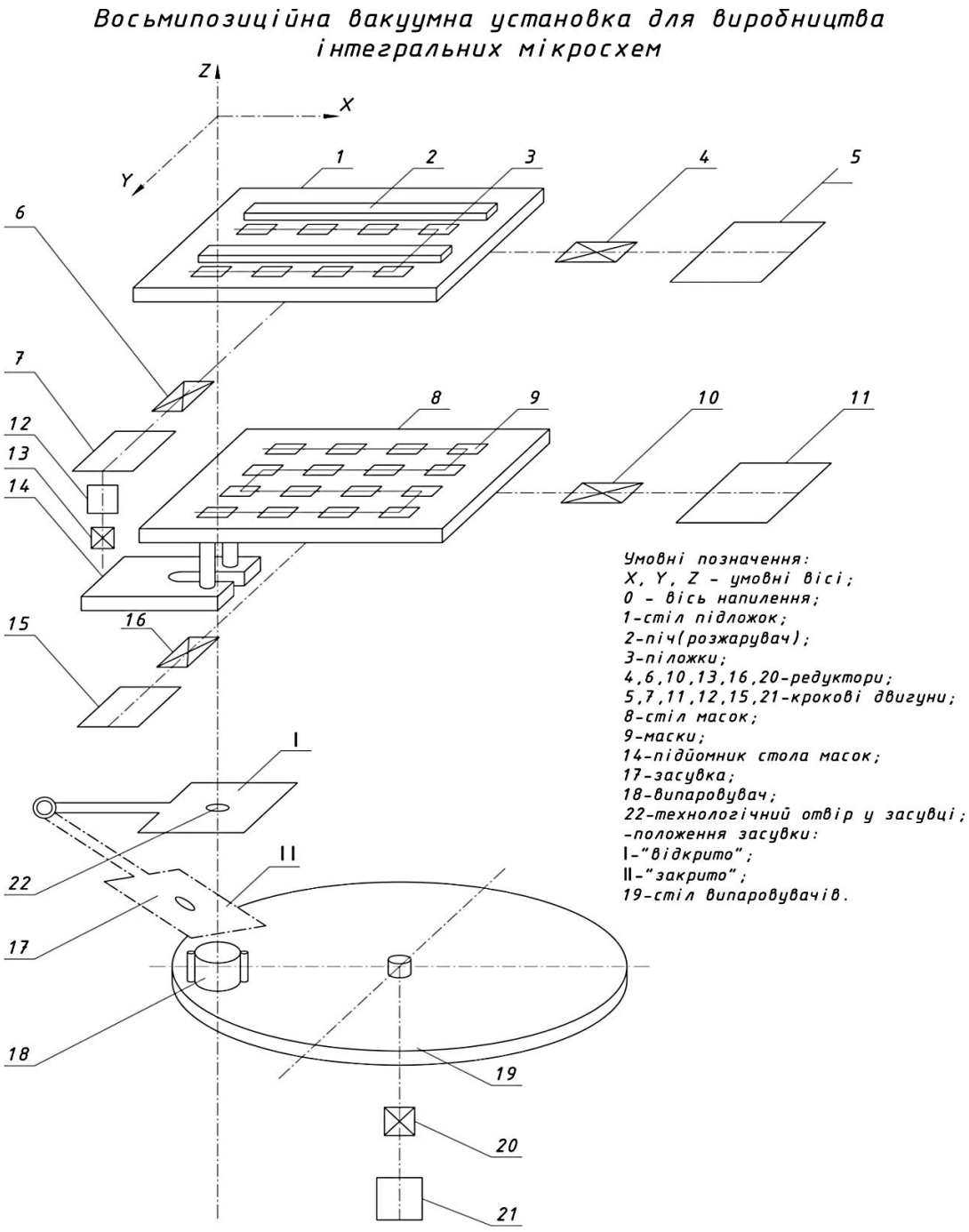


Figure 1.7 - Eight-position vacuum installation for the production of hybrid integrated circuits

1.4 Selection of the electric drive system of the installation for IC production

The following requirements are imposed on the electric drive control devices of the IC production plant:

a) the ability to arbitrarily set the program before the start of the installation and change it during the spraying process;

b) ensuring full automation of the process of sputtering a set of ICs that are in a vacuum chamber;

c) the possibility of manual control of the installation, if necessary;

d) simplicity, reliability, efficiency and safety of installation.

Consideration of these requirements for the electric drive of the installation makes it possible to use electric motors of all existing types as drive motors. But the discreteness and accuracy with which all the processes associated with the movement of the working bodies of the plant are carried out are best performed by stepper motors (CM). After all, it is stepper motors that provide the necessary accuracy of positioning of the working bodies of the installation within ± 0.01 mm with a relative speed of not less than 3 ms, and also communicate well with the control circuit made on the basis of logic elements, which in turn cooperates well with the microprocessor control system of the installation.

The use of a variety of stepper electric drive as a tracking system allows to simplify significantly the structure of the PSC, which is especially effective for installations with a large number of actuators, as it simplifies their synthesis and analysis. The structure of the PSC is simplified due to the absence of corrective feedbacks, and its static error is limited to one step. At the same time, it is not necessary to complicate the PSC to provide speed control from nominal to zero while maintaining synchronism and in-phase throughout the operating speed range.

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Розроблення крокового електроприводу установки нанесення тонких плівок при виробництві мікросхем

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:
Студент групи 601МЕ Єндіяров Є.О.

Керівник:
доцент, канд. техн. наук Єрмілова Н.В.

Полтава 2022

Актуальність теми. *Тонкі плівки, які наносяться у вакуумі, широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, а також при виготовленні фотошаблонів - основного технологічного інструмента мікроелектроніки. Отримання високоякісних та продуктивних за електрофізичними параметрами тонких шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур як активних, так і пасивних елементів мікросхем.*

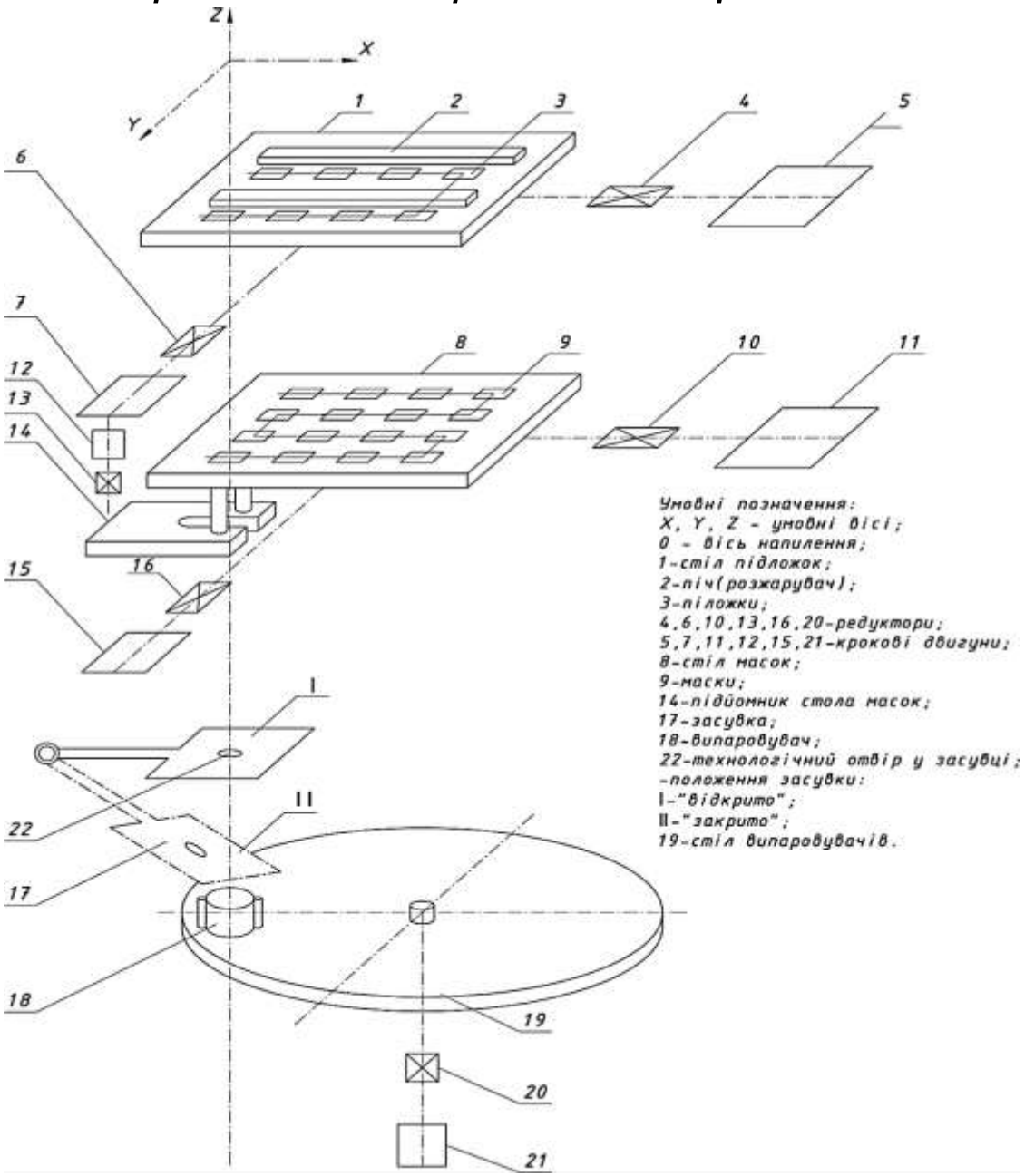
Об'єктом дослідження *є електропривод підйомника стола масок.*

Метою роботи *є створення регульованого електроприводу керування підйомника стола масок із застосуванням крокового двигуна, що підвищує продуктивність і якість продукції.*

Для цього необхідно вирішити наступні ***задачі дослідження:***

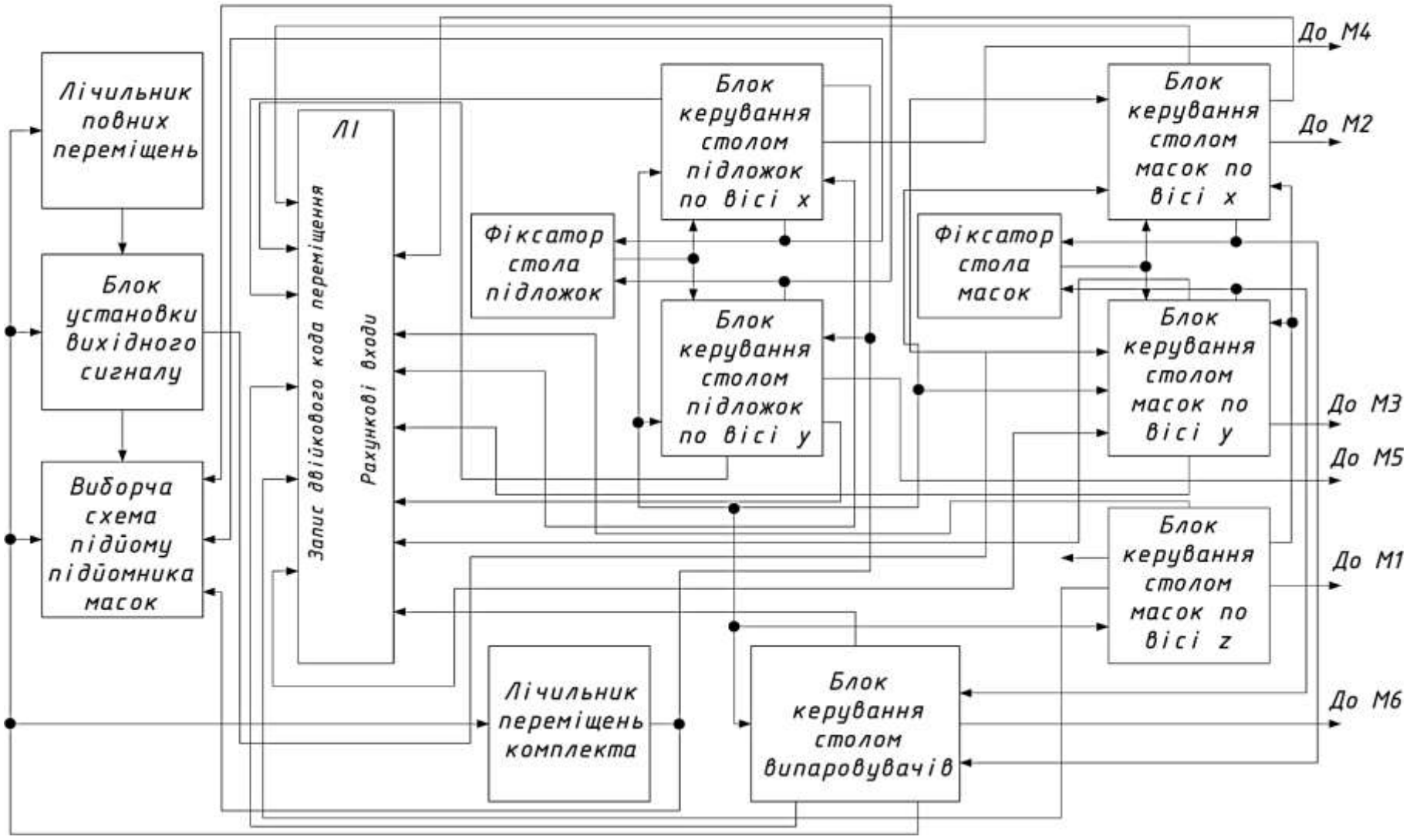
1. *Провести аналіз технологічного процесу виробництва інтегральних мікросхем, виявити його недоліки та визначити шляхи покращення.*
2. *Розробити механічну частину електропривода стола масок.*
3. *Розробити систему автоматизованого керування електроприводом стола масок.*
4. *Створити систему керування електроприводом двигуна, що сприятиме його плавному пуску, розгону і зупинці, довести доцільність виконаної роботи.*

Восьмипозиційна вакуумна установка для виробництва гібридних інтегральних мікросхем



Умовні позначення:
X, Y, Z - умовні вісі;
0 - вісь напилення;
1-стіл підложок;
2-піч(розжарувач);
3-піложки;
4,6,10,13,16,20-редуктори;
5,7,11,12,15,21-крокові двигуни;
8-стіл масок;
9-маски;
14-підйомник стола масок;
17-засувка;
18-випаровувач;
22-технологічний отвір у засувці;
-положення засувки:
I-"відкрито";
II-"закрито";
19-стіл випаровувачів.

Структурна схема блока керування підйомника масок



Функціональна схема електропривода стола масок

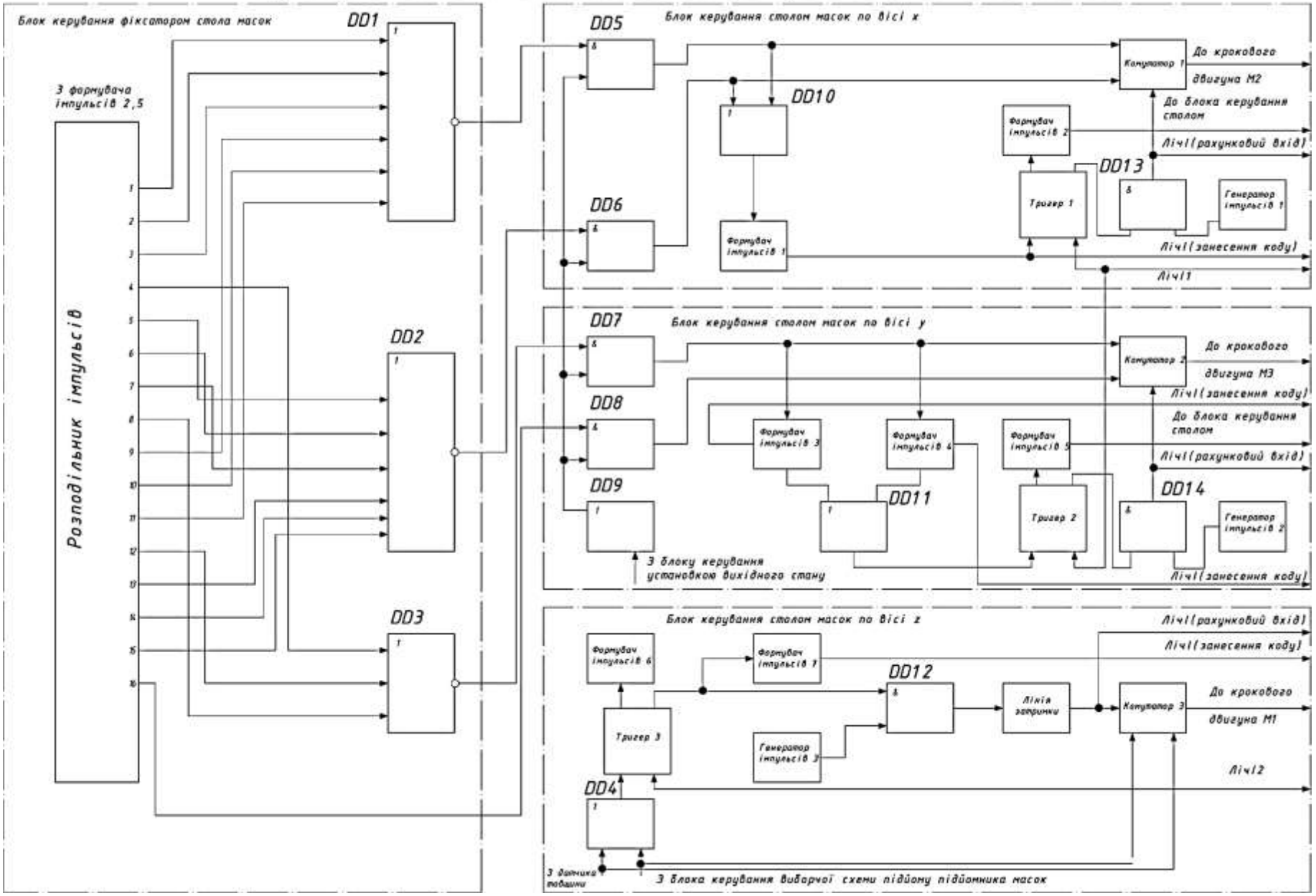


Схема електрична принципова електропривода столу масок

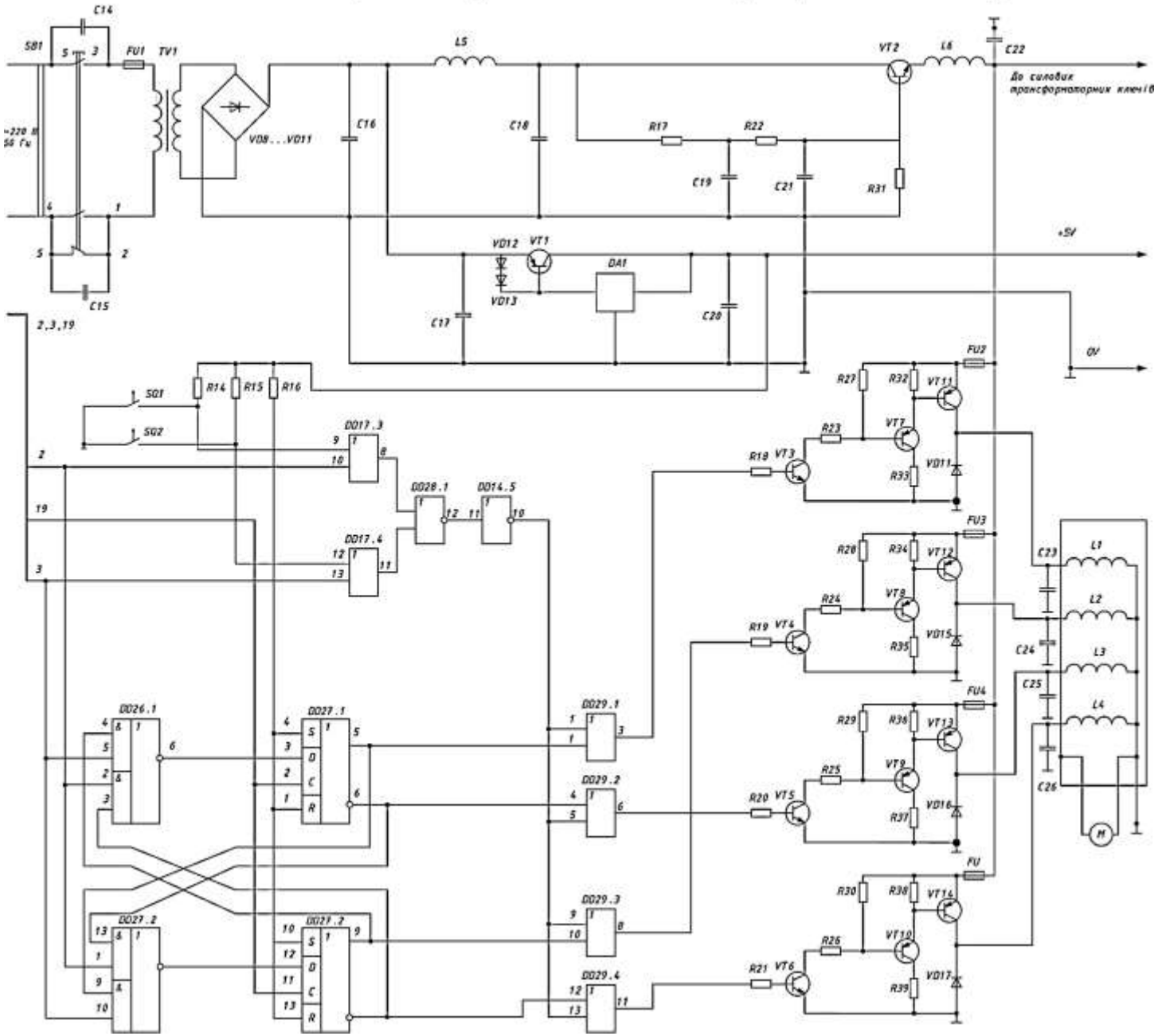
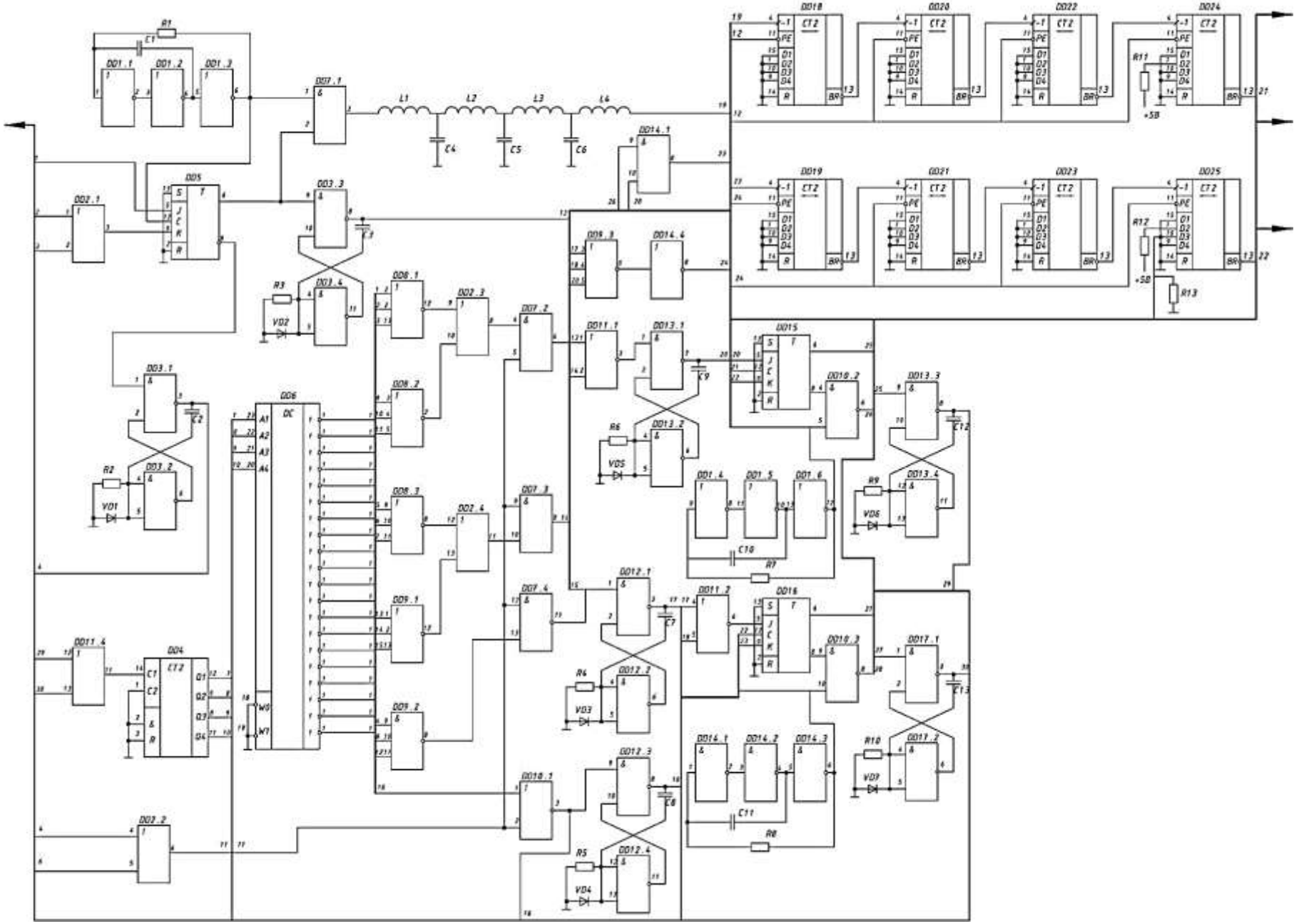
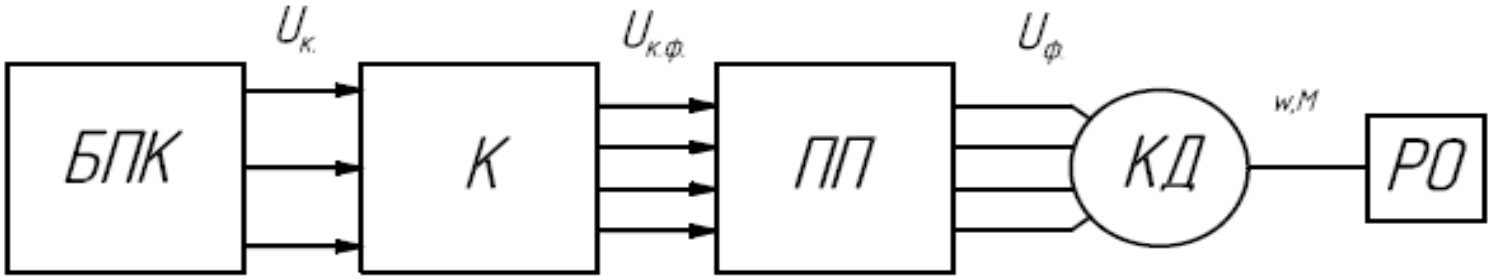


Схема електрична принципова електропривода столу масок



Спрощена структурна схема САК електроприводом стола масок



БПК – блок програмного керування; К – чотиритактний комутатор;
ПП – підсилювач потужності; КД - кроковий двигун ;
РО – робочий орган.

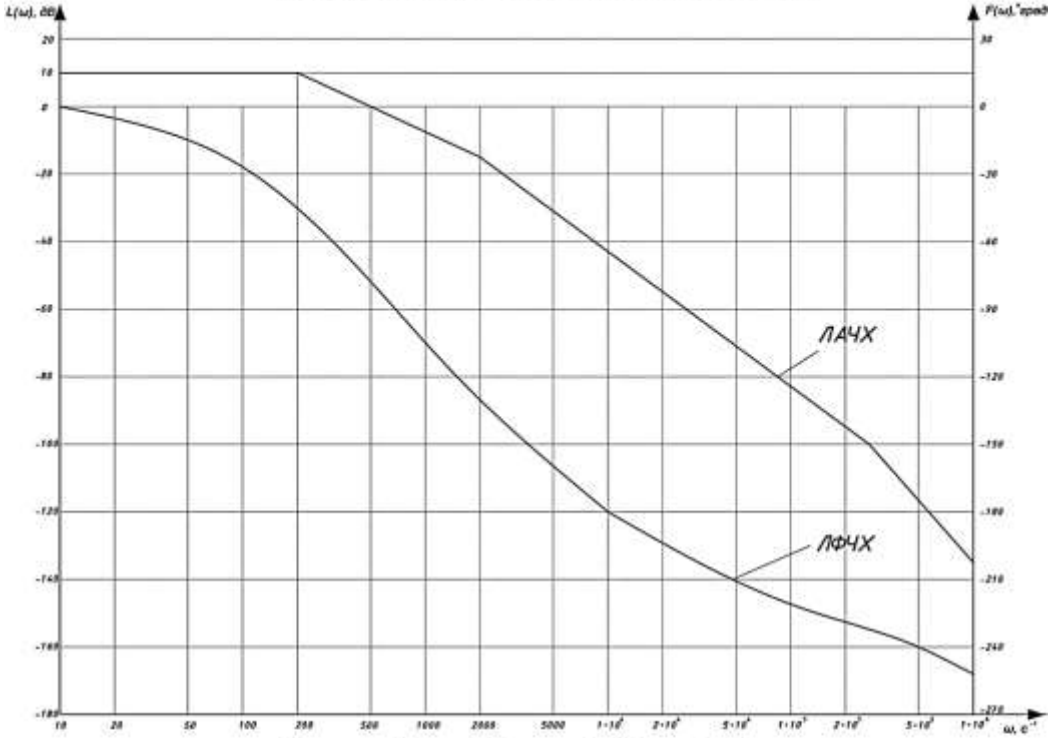
Передавальна функція САК при послідовному з'єднанні ланок

$$W(p) = W_{пп}(p) \cdot W_{кд}(p) \cdot W_{ро}(p);$$

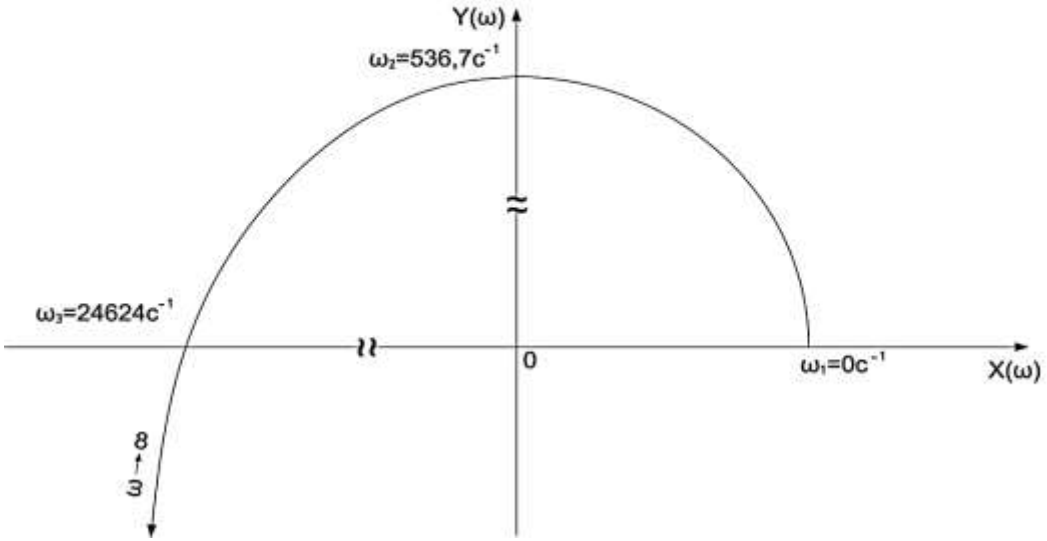
$$W(p) = \frac{k_{пп} \cdot k_{кд} \cdot k_{ро}}{(T_{пп} \cdot p + 1) \cdot (T_м \cdot p + 1) \cdot (T_е \cdot p + 1)};$$

$$W(p) = \frac{0{,}4167 \cdot 10^{-6}}{10{,}7 \cdot 10^{-12} \cdot p^3 + 3{,}4716 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 6{,}4881 \cdot 10^{-3} \cdot p}.$$

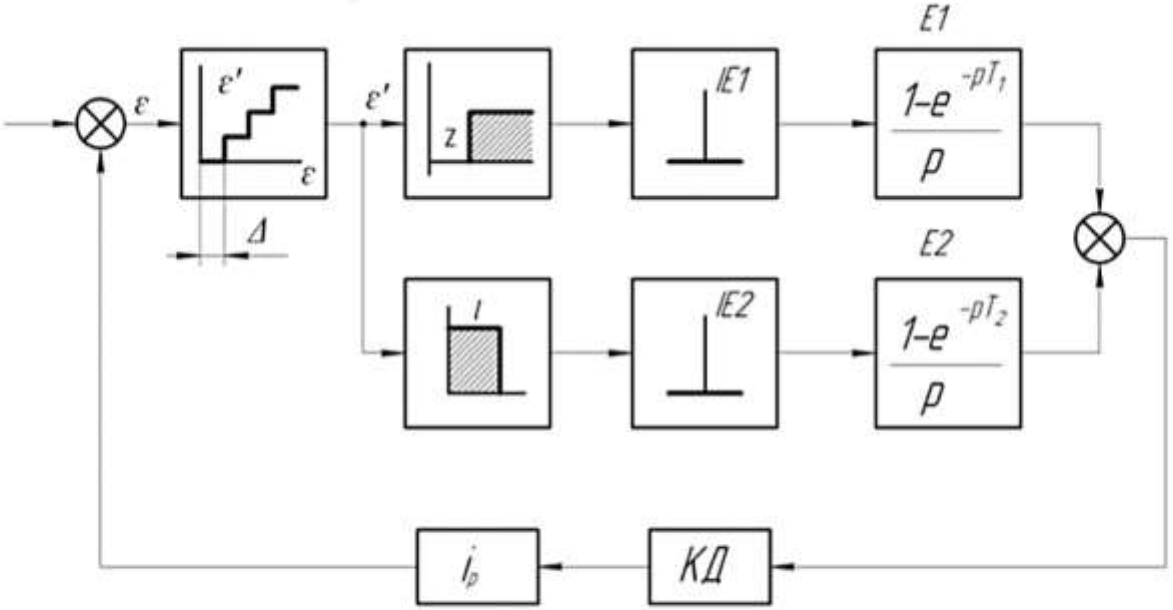
Логарифмічні характеристики САК



Критерій стійкості Михайлова



Проведення досліджень

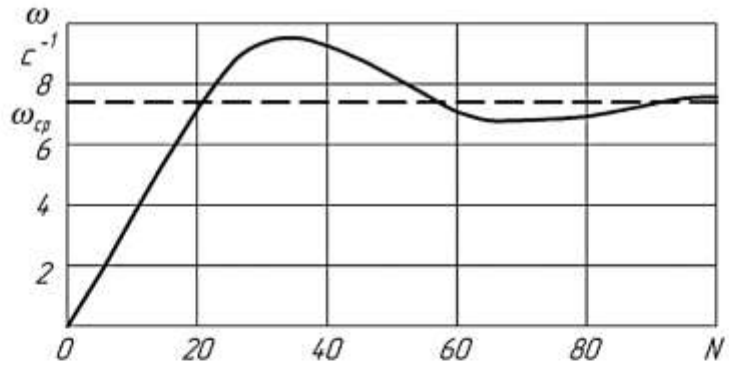


Структурна схема двошвидкісного крокового електропривода

Досліджувались наступні режими роботи:

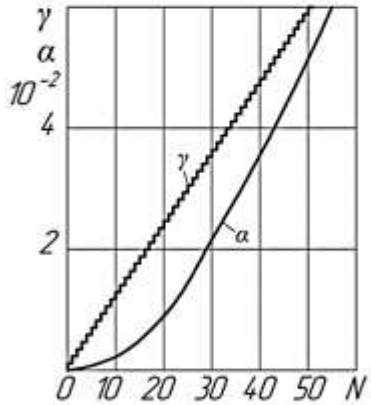
- пуск із стану спокою на частоті швидких переміщень;
- неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті швидких переміщень;
- неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті швидких доведення;
- перехід з частоти швидких переміщень на частоту доведення.

Графіки кутових характеристик



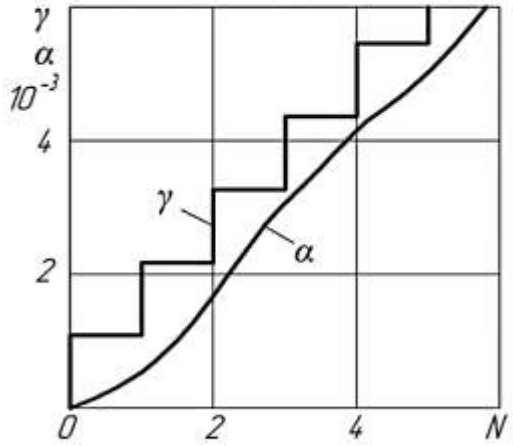
Графік зміни миттєвої швидкості обертання ротора на частоті швидких переміщень

Двигун досягає середньої швидкості обертання за 21 імпульс, а процес встановлення руху займає 90 тактів комутації.



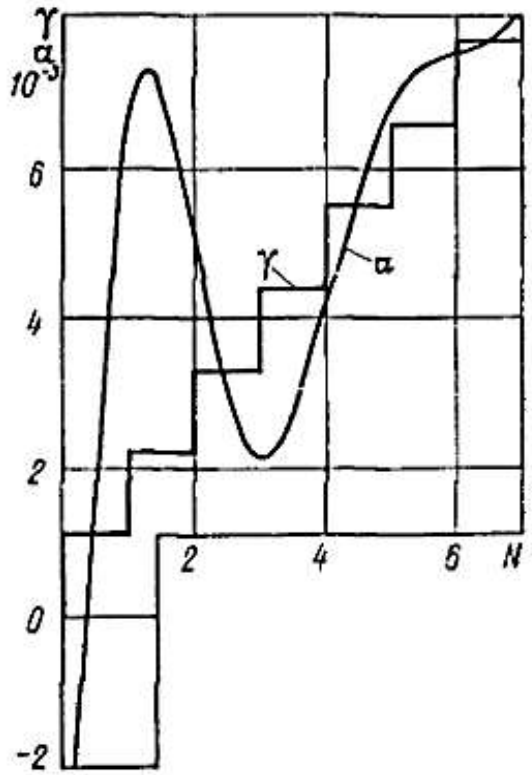
Графік кутових характеристик при пуску двигуна на частоті швидких переміщень

Ротор двигуна відстає від поля статора в процесі розгону, проте по мірі збільшення порядкового номера імпульсу розузгодження зменшується.



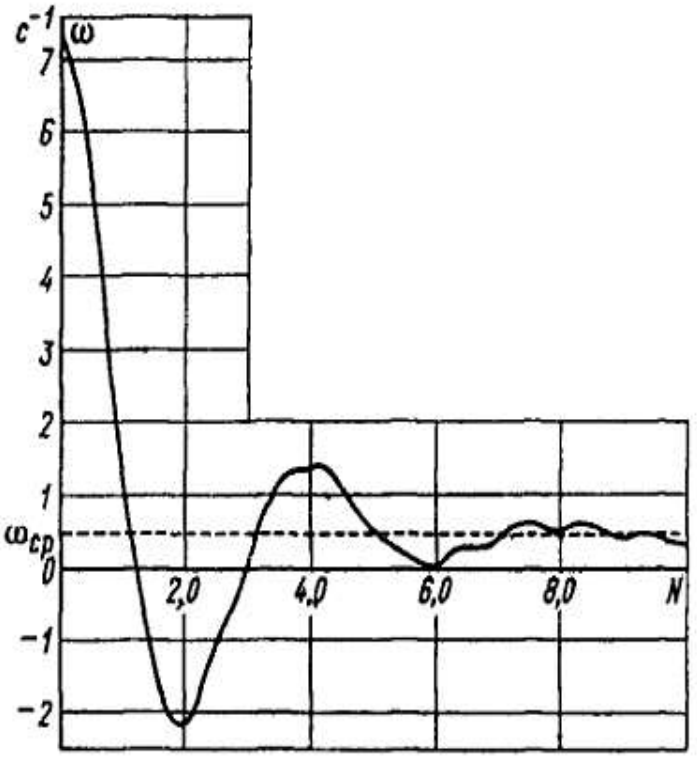
Графік кутових характеристик при неграничному пуску

Швидкість двигуна коливається біля середнього значення, маючи максимум і мінімум на кожному кроці.



Графіки кутових характеристик в режимі перемикання $\gamma_{\text{мех}} = f(N)$ та $\alpha_{\text{мех}} = f(N)$

При зниженні керуючої частоти ротор двигуна вибігає в позитивному напрямку на 7 дрібних кроків і потрапляє в гальмуюче поле статора. При цьому початкова стадія перехідного режиму носить коливальний характер.



Фазовий портрет руху ротора в режимі перемикання

З фазового портрету видно, що вже на третьому кроці (частота 440Гц) ротор двигуна потрапляє в область зони нечутливості системи. Тому при остаточному виборі числа імпульсів в лічильнику переміщень, що відпрацьовуються в режимі доведення, потрібно враховувати первісний вибіг ротора.

Висновки

- *Розгляд вимог щодо електропривода установки підтвердив доцільність використання крокових двигунів у якості приводних двигунів електропривода, адже саме крокові двигуни забезпечують необхідну точність позиціонування робочих органів установки в межах 0,01 мм з відносною швидкодією не гірше 3 мс, а також гарно пов'язуються зі схемою керування, виконаною на базі логічних елементів, яка у свою чергу, добре співпрацює з системою керування установкою.*
- *Розрахований та обраний кроковий двигун задовольняє висунутим вимогам, а значить підходить до застосування його у якості приводного електродвигуна підйомника стола масок. Для обраного двигуна була розроблена схема функціональна та принципова схема керування.*
- *Проведений синтез системи автоматичного керування електроприводом стола масок, система перевірена на стійкість за критерієм Михайлова.*
- *Для поліпшення якості продукції та покращення характеристик роботи крокового приводу провели дослідження, які допомогли підвищити добротність слідкуючого контуру електропривода за рахунок збільшення граничної швидкості обертання двигуна та зменшення його динамічної похибки за допомогою програмного частотного розгону двигуна до робочих частот, а також використання штучного дроблення кроку.*
- *Проведені дослідження показали, що вільний рух системи є стійким, при цьому аналіз вимушених рухів не потрібний, так як вхідний вплив системи обмежується стрибком, що рівносильно завданням ненульових початкових умов при вільному русі.*
- *Модель розглянутого приводу може бути рекомендована на стадії ескізного проектування при визначенні найбільш доцільної структури крокового приводу.*
- *Викладене вище дозволяє зробити висновок, що завдання на магістерську роботу виконано. Спроектований електропривод задовольняє висунутим вимогам.*

Дякую за увагу!