

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор ІнАЕКСУ

\_\_\_\_\_ А.С. Васюра  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2013 р.

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***  
***до виконання практичних занять***  
***та контрольних робіт з дисципліни***  
***“Управління в мехатронних системах”***  
***для студентів спеціальності 8.05020101***  
***“Комп’ютеризовані системи управління та автоматика”***

Укладачі:

професор кафедри АІВТ Васюра А.С.

доцент кафедри АІВТ Папінов В.М.

Ухвалено методичною  
комісією ІнАЕКСУ

МВ затверджено на  
засіданні кафедри АІВТ.

Протокол № 6 від 18.02.2013 р.

Протокол № 11 від 12.02.2013 р.

Голова методичної комісії

Завідувач кафедри АІВТ

\_\_\_\_\_ А.С.Васюра  
(підпис) (ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_ Р.Н. Кветний  
(підпис) (ініціали, прізвище)

## Зміст

Вступ .....	5
<b>1 Практичне заняття №1 “Механіка електромашинних та електромеханічних систем”</b>	
1.1 Короткі теоретичні відомості .....	8
1.2 Методика виконання практичних завдань .....	10
1.3 Практичні завдання .....	15
<b>2 Практичне заняття №2 “Аналіз динамічних властивостей елементів ЕМЕМС”</b>	
2.1 Короткі теоретичні відомості .....	20
2.2 Методика виконання практичних завдань .....	22
2.3 Практичні завдання .....	23
<b>3 Практичне заняття №3 “Основи ідентифікації ЕМЕМС”</b>	
3.1 Короткі теоретичні відомості .....	28
3.2 Методика виконання практичних завдань .....	28
3.3 Практичні завдання .....	33
<b>4 Практичне заняття №4 “Дослідження динамічних елементів ЕМЕМС”</b>	
4.1 Короткі теоретичні відомості .....	38
4.2 Методика виконання практичних завдань .....	43
4.3 Практичні завдання .....	45
<b>5 Контрольні завдання .....</b>	<b>50</b>
<b>Завдання №1 “Синтез системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа” .....</b>	<b>50</b>
5.1 Методика виконання контрольного завдання .....	51
5.2 Варіанти контрольних завдань .....	59
<b>Завдання №2 “Синтез цифрового регулятора переміщень каретки координатографа” .....</b>	<b>59</b>
5.3 Методика виконання контрольного завдання .....	59
5.4 Варіанти контрольних завдань .....	63

<b>Завдання №3 “Розробка апаратної та програмної частин цифрового зворотного зв’язку по переміщенню каретки координатографа”</b> .....	63
5.5 Методика виконання контрольного завдання .....	65
5.6 Варіанти контрольних завдань .....	66
<b>Завдання №4 “Розробка програми цифрового формувача задаючого діяння на контур регулювання переміщень каретки”</b> .....	67
5.7 Методика виконання контрольного завдання .....	67
<b>Завдання №5 “Розробка системи виведення для цифрового регулятора переміщень каретки”</b> .....	69
5.8 Методика виконання контрольного завдання.....	69
5.9 Варіанти контрольних завдань .....	71
<b>Завдання №6 “Розробка програми цифрової компенсації дії неточності механізму координатографа”</b> .....	72
5.10 Методика виконання контрольного завдання .....	72
<b>Завдання №7 “Розробка програми цифрової компенсації дії нежорсткості механічної передачі”</b> .....	75
5.11 Методика виконання контрольного завдання .....	75
Література .....	77
Додаток 1 . Технічні дані виконавчих електродвигунів постійного струму .....	79
Додаток 2 . Технічні дані тахогенераторів постійного струму .....	80

## Вступ

**Мехатроніка** – це нова прикладна наукова дисципліна, що займається розробкою методів та засобів цифрового управління різноманітними електромеханічними та електромашинними системами (ЕМЕМС). Саме досягнення цієї наукової дисципліни реалізуються в сучасних промислових роботах та маніпуляторах, верстатах з числовим програмним управлінням та периферійних пристроях ЕОМ, в сучасних автоматичних вимірювальних приладах та складній побутовій електронній техніці. Суміщення механізму та цифрової управляючої електроніки дає змогу різко підвищити точність роботи ЕМЕМС, які з цього приводу відокремлюються до, так званого, класу мехатронних систем автоматичної, що знаходиться зараз в стані бурхливого розвитку .

Так зростання вимог до продуктивності праці та ефективності виробництва, ускладнення технологічних процесів та поглиблення їх автоматизації, прагнення максимальної економії матеріальних та енергетичних ресурсів і т. і., привели до появи в промисловості та в дослідницьких установах великої кількості електромеханічних систем, що мають складну кінематичну структуру. Можна назвати деякі з таких систем : багатокординатні металорізальні верстати типу “обробляючий центр”, складальні промислові роботи, пристрої відображення графічної інформації, що є зовнішніми пристроями цифрових ЕОМ, автоматичні креслярські пристрої, що використовуються при виробництві фотошаблонів друкованих плат та інтегральних схем, динамічні випробувальні стенди , що забезпечують фізичне моделювання, наприклад, авіаційні тренажери та пілотажні стенди, радіотелескопи, що управляються від цифрової ЕОМ . Необхідність автоматизації цих об’єктів викликала до життя новий підклас мехатронних систем – систем відтворення рухів (СВР). СВР призначені для відтворення робочими органами електромеханічних систем плоских або просторових траєкторій з заданими динамічними характеристиками, а також для забезпечення інших допоміжних режимів.

Успішна реалізація сучасних СВР неможлива без застосування засобів цифрової обчислювальної техніки, яка дозволяє різко зменшити , так звані , траєкторні похибки відтворення рухів і тим самим забезпечити високу ефективність роботи таких систем.

Траєкторні похибки, тобто відхилення від заданої траєкторії відтвореного руху, обумовлені наявністю похибок в контурах регулювання переміщень за кожною з просторових координат. На траєкторні похибки сильно впливають такі фактори, як неідентичність координатних контурів переміщення, нежорсткість та неточність механічної передачі, квантування за часом та рівнем, наявність струмообмеження в електричних елементах (нелінійність) і т.і.

Нежорсткість механічної частини веде до зміни динамічних властивостей контурів переміщення і, як наслідок, до непередбачених координатних похибок. Тому нежорсткість механічної частини впливає на траєкторну похибку в кожній точці траєкторії та при будь-яких траєкторних швидкостях.

Для компенсації дії нежорсткості механічної передачі на роботу СВР використовують апріорну інформацію про конкретну електромеханічну систему. Ця інформація містить в собі дані про коефіцієнти жорсткості окремих ланок механізму, моменти інерції рухомих мас та інші додаткові параметри. На основі цих даних реалізуються певні передавальні функції цифрових фільтрів, що обробляють вихідні сигнали цифрових регуляторів швидкості та переміщення і тим самим вводять до них відповідні поправки. При зміні перерахованих вище параметрів механізму в процесі експлуатації СВР необхідно також вводити корективи в параметри цих цифрових фільтрів, щоб їх дія була максимально пристосована до конкретного механізму.

Для компенсації впливу неточності механічної передачі (наявність проміжків, викривлення форми поверхонь) на роботу СВР на практиці також застосовують різноманітні статистичні методи, що ґрунтуються на застосуванні обчислювальної техніки. Завдяки можливості запам'ятовування великих об'ємів інформації в таких системах вдається вводити поправки в вихідний сигнал цифрового регулятора переміщення на основі накопиченого раніше досвіду експлуатації даної конкретної електромеханічної системи. Тобто цей статистичний матеріал відображає реальні неточності та нелінійності, що мають місце в конкретній СВР на певний проміжок часу. С плином часу характеристики механізму поступово змінюються і тому необхідно постійно оновлювати статистичний матеріал, що зберігається в пам'яті ЕОМ.

До сучасних СВР висуваються такі головні вимоги:

- багатомірність відтворюваних траєкторій та, як наслідок, необхідність формування задавальних діянь, що забезпечують узгодженість та синхронність рухів координат робочого органу або кількох органів;
- висока точність, повторюваність та динамічні характеристики відтворюваних рухів;
- високе значення відношення діапазону переміщень до точності;
- різноманітність технологічних режимів;
- комплексність автоматизації;
- висока надійність та готовність до роботи;
- широкі можливості, що дають оперативному та обслуговуючому персоналу: ручне управління, індикація, діагностика.

Розробка, налагоджування та експлуатація таких сучасних систем неможливі без участі спеціалістів з комп'ютеризованих систем управління та автоматики. Однак їх розповсюдження та подальше вдосконалення в

багатьох випадках затримується саме за причиною недостатньої підготовленості цих спеціалістів для роботи з мехатронними системами автоматичності. Навчальна дисципліна “Мехатроніка”, що введена в Вінницькому державному технічному університеті до навчальних планів підготовки інженерів із спеціальності “Комп’ютеризовані системи управління і автоматичності”, призначена саме для виправлення такого стану речей. Головним видом занять у цьому курсі є практичні та лабораторні заняття, де студенти найбільш ефективно засвоюють отримані на лекціях теоретичні знання, набувають практичного досвіду по розрахунках та експериментальних дослідженнях мехатронних систем автоматичності. Крім того, самостійне виконання контрольних завдань є дуже ефективною формою опанування студентами заочної форми навчання розрахункових методів дослідження мехатронних систем автоматичності.

# 1 Практичне заняття №1

## “Механіка електромашинних та електромеханічних систем”

### 1.1 Короткі теоретичні відомості

Приведення в рух виконавчих механізмів та управління цим рухом для виконання технологічних операцій є основним завданням електромеханічних та електромашинних систем (ЕМЕМС). Спеціаліст з комп'ютеризованих систем автоматичного управління повинен знати загальні особливості механічної частини ЕМЕМС, головні її елементи, зв'язки та параметри, а також математичні методи її опису та аналізу. Він повинен вміти на основі заданої кінематичної схеми механізму, його технічних даних та відомостей про технологічний процес складати розрахункові схеми та визначати параметри механічної частини ЕМЕМС, описувати її рух диференціальними рівняннями, розраховувати частотні характеристики та механічні перехідні процеси з використанням методів механіки та теорії автоматичного управління.

Механічна частина ЕМЕМС містить у собі всі зв'язані рухомі маси: ротора електродвигуна, передавального пристрою (ПП) та виконавчого механізму (ВМ). До ротора електродвигуна при швидкості  $\omega$  прикладений електромагнітний момент обертання  $M$ , під дією якого механічна частина приводиться в рух і робочий орган конкретної установки здійснює механічну роботу, що передбачена технологією. Безпосереднє уявлення про рухомі маси механізму певної установки та механічні зв'язки між ними дає кінематична схема ЕМЕМС.

Конкретні кінематичні схеми відрізняються великою різноманітністю, хоча мають також і загальні властивості, які можна встановити, розглянувши кінематичну схему ЕМЕМС на рисунку 1.1. Із схеми видно, що електродвигун ЕД через з'єднувальну муфту ЗМ1, клиноремінну передачу КРП, низку зубчатих передач  $ЗП_1 \div ЗП_i$  та з'єднувальну муфту ЗМ2 приводить в обертання барабан Б, що перетворює обертальний рух у поступальне переміщення ряду зв'язаних мас.

Наведена кінематична схема наочно відображає те положення, що в загальному випадку механічна частина ЕМЕМС являє собою систему механічно зв'язаних мас, що рухаються з різними швидкостями обертально чи поступально. При навантаженні елементи системи (вали, клиноремінні передачі, зубчаті зчеплення, троси та ін. ) деформуються, тому що механічні зв'язки не є абсолютно жорсткими. При зміні навантаження маси можуть взаємно переміщуватись у залежності від жорсткості зв'язку.

При складенні кінематичної схеми на рисунку 1.1 прийнято, що механічна частина містить  $n$  обертально рухомих зосереджених мас та  $k$  поступально, а механічна інерція елементів, які з'єднують маси, не

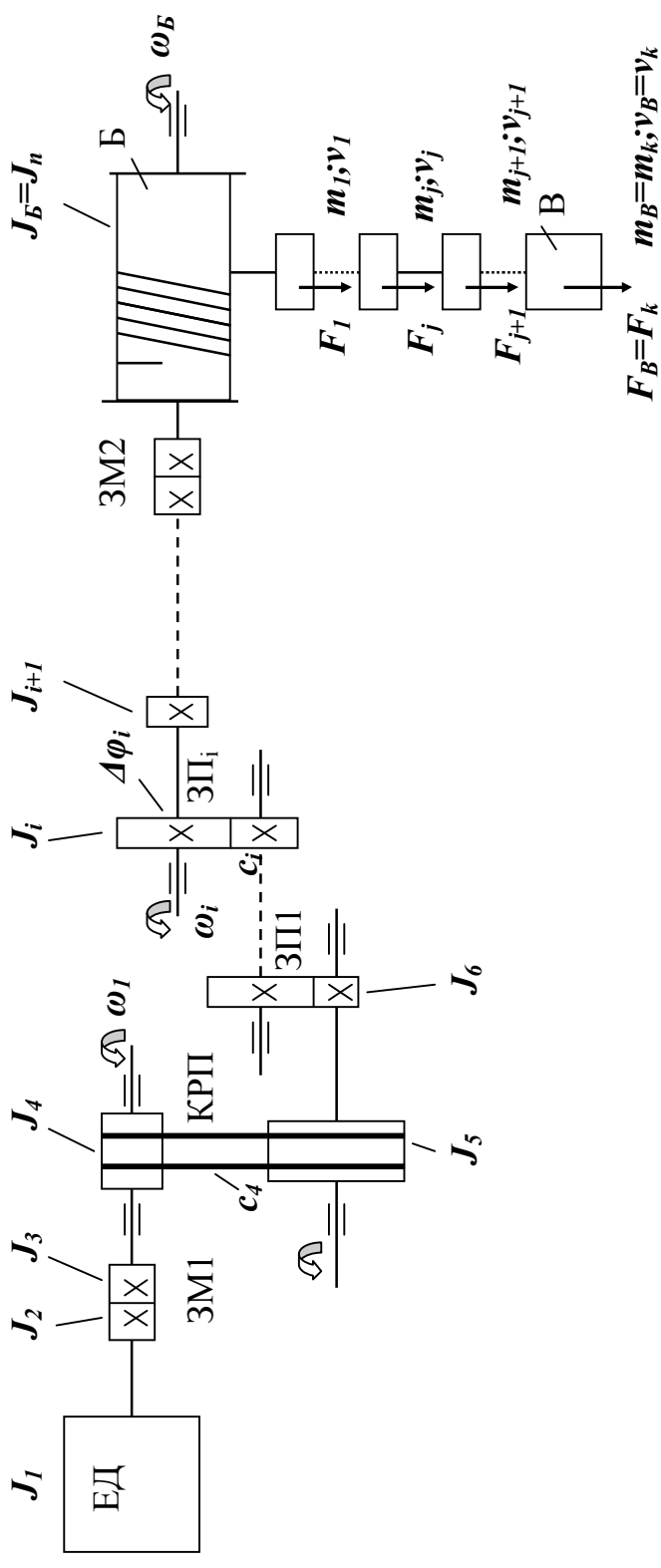


Рисунок 1.1 – Приклад кінематичної схеми механізму ЕМЕМС

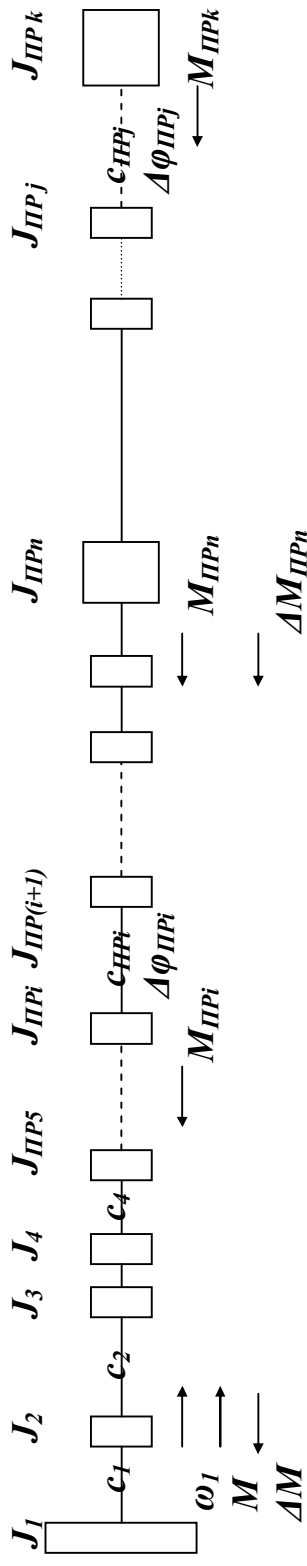


Рисунок 1.2 – Початкова розрахункова схема механізму ЕМЕМС



враховується. Кожний обертально рухомий елемент має момент інерції  $J_i$  та зв'язаний з  $(i + 1)$ -м елементом механічним зв'язком із жорсткістю  $c_i$ . Відповідно кожний поступально рухомий елемент має масу  $m_j$  та зв'язаний з наступним елементом механічним зв'язком з жорсткістю  $c_j$ . Маси елементів та жорсткості зв'язків у кінематичній схемі ЕМЕМС різні. Але головний вплив на рух елементів системи роблять найбільші маси та найменші жорсткості зв'язків. Тому однією з перших задач проектування та дослідження ЕМЕМС є складення спрощених розрахункових схем механічної частини, що нехтують досить жорсткими механічними зв'язками та малими рухомими масами.

Елементи кінематичної схеми рухаються з різними швидкостями. Тому при складенні спрощених розрахункових схем неможливо безпосередньо порівнювати їх моменти інерції  $J_i$ , маси  $m_j$ , жорсткості  $c_i$  та  $c_j$  або переміщення  $\Delta\varphi_i$  (кутові) та  $\Delta s_i$  (лінійні). Для отримання правильних результатів порівняння всі параметри елементів кінематичної схеми спочатку приводять до однієї загальної для всіх розрахункової швидкості руху. У більшості випадків такою швидкістю вибирається швидкість обертання валу електродвигуна ЕД, але інколи більш зручнішим є приведення параметрів кінематичної схеми до швидкості руху робочого органу ЕМЕМС.

## 1.2 Методика виконання практичних завдань

Найперше, що передбачається цією темою практичних занять, є складення спрощеної розрахункової схеми механічної частини ЕМЕМС за її кінематичною схемою.

Умовою складення спрощеної розрахункової схеми реальної механічної системи шляхом приведення її параметрів до однієї загальної швидкості є дотримання закону зберігання енергії. При цьому необхідно забезпечити зберігання запасу кінематичної та потенціальної енергії системи, а також елементарної роботи всіх діючих у системі сил та моментів на можливих переміщеннях її елементів.

При приведенні моменту інерції будь-якого елемента системи, що рухається обертально з швидкістю  $\omega_i$ , або маси  $m_j$ , що рухається поступально з швидкістю  $v_j$ , до розрахункової швидкості електродвигуна  $\omega_1$  повинні виконуватись умови:

$$(W_{K_i})_{\text{ПР}} = J_{\text{ПР}i} \omega_i^2 / 2 = W_{K_i} = J_i \omega_i^2 / 2; \quad (1.1)$$

$$(W_{K_j})_{\text{ПР}} = J_{\text{ПР}j} \omega_i^2 / 2 = W_{K_j} = m_j v_j^2 / 2. \quad (1.2)$$

Звідси отримаємо формули приведення:

$$J_{\text{ПРi}} = J_i / i_{1i}^2; J_{\text{ПРj}} = m_j \rho_{1j}^2, \quad (1.3)$$

де  $i_{1i} = \omega_1 / \omega_i$  – передавальне число від вала електродвигуна до вхідного вала  $i$ -го елемента;

$\rho_{1j} = v_j / \omega_1$  – радіус приведення лінійно рухомої маси зі швидкістю  $v_j$  до вала електродвигуна з швидкістю обертання  $\omega_1$ .

При приведенні кутових  $\varphi_i$  та лінійних  $s_j$  переміщень необхідно враховувати те, що передавальне число  $i_{1i}$  та радіус приведення  $\rho_{1j}$  визначаються відношенням швидкостей. Виходячи з цього, переміщення в системі у загальному випадку пов'язані таким чином:

$$d\varphi_{\text{ПРi}} = d\varphi \cdot i_{1i}; d\varphi_{\text{ПРj}} = ds_j / \rho_{1j}. \quad (1.4)$$

При лінійних кінематичних зв'язках  $i_{1i} = \text{const}$  та  $\rho_{1j} = \text{const}$ . У цьому випадку формули приведення переміщень (1.4) приймають такий вигляд:

$$\varphi_{\text{ПРi}} = \varphi_i \cdot i_{1i}; \varphi_{\text{ПРj}} = s_j / \rho_{1j}. \quad (1.5)$$

Якщо у реальній схемі механізму мають місце неточності передач, наприклад, люфти  $\Delta\varphi_i$  в зубчатому зчепленні або проміжки  $\delta_j$  у поступально рухомому зчепленні, то при дослідженні їх впливу на перехідні механічні процеси в ЕМЕМС вони теж приводяться до вала електродвигуна:

$$\Delta\varphi_{\text{ПРi}} = \Delta\varphi_i \cdot i_{1i}; \Delta\varphi_{\text{ПРj}} = \delta_j / \rho_{1j}. \quad (1.6)$$

При приведенні жорсткості механічного зв'язку має виконуватись умова рівності запасу потенційної енергії деформації. Відповідно можна записати:

$$(W_{\text{Pi}})_{\text{ПР}} = c_{\text{ПРi}} \Delta\varphi_{\text{ПРi}}^2 / 2 = W_{\text{Pi}} = c_i \Delta\varphi_i^2 / 2; \quad (1.7)$$

$$(W_{\text{Pj}})_{\text{ПР}} = c_{\text{ПРj}} \Delta\varphi_{\text{ПРj}}^2 / 2 = W_{\text{Pj}} = c_j \Delta s_j^2 / 2; \quad (1.8)$$

З цих умов можна отримати формули приведення жорсткості обертально рухомого зв'язку  $c_i$  та поступально рухомого зв'язку  $c_j$ :

$$c_{\text{ПРi}} = c_i / i_{1i}^2; c_{\text{ПРj}} = c_j \cdot \rho_{1j}^2. \quad (1.9)$$

Приведення моментів та сил навантаження елементів кінематичної ланки повинно здійснюватись на основі умови рівності елементарної роботи на їх можливих переміщеннях:

$$M_{\text{ПРi}} \cdot \Delta\varphi_{\text{ПРi}} = M_i \Delta\varphi_i; M_{\text{ПРj}} \cdot \Delta\varphi_{\text{ПРj}} = F_j \cdot \Delta S_j. \quad (1.10)$$

Тоді формули приведення моментів та сил навантаження до валу електродвигуна мають такий вигляд:

$$M_{\text{ПРi}} = M_i / i_{1i}; M_{\text{ПРj}} = F_j \cdot \rho_{1j}. \quad (1.11)$$

Після приведення всіх параметрів елементів кінематичної ланки до загальної розрахункової швидкості (швидкості вала електродвигуна) стає можливим (після порівняння всіх приведених моментів інерції та жорсткостей) здійснити вибір головних мас (найбільших) та головних пружних зв'язків (найменша жорсткість) для складання спрощеної розрахункової схеми механічної частини ЕМЕМС. Для більшої наочності порівняння можна збудувати початкову розрахункову схему, зображуючи на ній всі приведені моменти інерції у вигляді прямокутників, площа яких пропорційна значенню приведених моментів інерції, а жорсткості механічних зв'язків між цими моментами інерції у вигляді ліній, довжина яких зворотно пропорційна приведеній жорсткості.

Так для кінематичної схеми на рисунку 1.1 після приведення всіх мас і жорсткостей зв'язків до швидкості вала електродвигуна можна збудувати початкову приведену розрахункову схему, що наведена на рисунку 1.2. На ній виділяються три найбільші інерційні маси: ротора електродвигуна  $J_1$ , барабана  $J_{\text{ПРi}}$  та вантажу  $J_{\text{ПРk}}$ . Цю початкову схему можна суттєво спростити, якщо інші малі маси докласти до сусідніх великих, а потім визначити еквівалентну жорсткість зв'язків між цими масами за загальною формулою:

$$\frac{1}{c_{\text{ЕКВ}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} + \dots \quad (1.12)$$

На початковій розрахунковій схемі (рисунок 1.2) стрілками показані прикладені до окремих мас відповідні приведені моменти  $M_{\text{ПРi}}$  та  $M_{\text{ПРj}}$  (сил тертя, навантаження, опору). До ротора електродвигуна  $J_1$  прикладений електромагнітний момент обертання  $M$  та момент механічних втрат  $\Delta M$ . При цьому для правильного врахування знаків діючих моментів встановлений додатний напрямок, що збігається з напрямком швидкості

$\omega_1$ . При переході до спрощеної розрахункової схеми необхідно скласти всі зовнішні сили, що діють на інерційні маси, між котрими зв'язки є повністю жорсткими.

Після такого спрощення початкової розрахункової схеми проектувальник отримує узагальнену розрахункову схему механічної частини ЕМЕМС, за допомогою якої він може провести дослідження статичного та динамічного режимів роботи механізму. В більшості практичних випадків в результаті спрощення розрахункова схема зводиться або до трьохмасової (рисунок 1.3), або до двохмасової (рисунок 1.4), або до одномасової (рисунок 1.5) узагальнених розрахункових схем.

Параметрами трьохмасової узагальненої розрахункової схеми (рисунок 1.3) є сумарні приведені моменти інерції  $J_1, J_2$  та  $J_3$ , що утворені приведеними масами, зв'язки між котрими прийняті абсолютно жорсткими, та еквівалентні приведені жорсткості механічних пружних зв'язків між цими трьома інерційними масами  $c_{12}$  та  $c_{23}$ . Перша маса являє собою ротор електродвигуна та жорстко зв'язані з ним елементи механізму. До цієї маси прикладений електромагнітний момент обертання  $M$  та момент статичного навантаження  $M_{01}$ , котрий, як правило, є сумарним моментом втрат на валу електродвигуна та в жорстко зв'язаних з ним елементах. До проміжної маси механізму  $J_2$  прикладений момент опору  $M_{02}$ , а до третьої маси  $J_3$  – момент зовнішнього навантаження  $M_{03}$ . Для дослідження трьохмасової механічної системи застосовується математичне моделювання на аналогових чи цифрових обчислювальних машинах.

В узагальненій двохмасовій схемі (рисунок 1.4) сумарний приведені момент інерції елементів, що жорстко зв'язані з ротором електродвигуна, позначений  $J_1$ . Сумарний приведені момент інерції елементів, що жорстко зв'язані з робочим органом механізму, позначений  $J_2$ . Безінерційний пружний зв'язок між цими масами характеризується приведеною еквівалентною жорсткістю  $c_{12}$ . Сумарні моменти навантаження на валу електродвигуна та механізму позначені, відповідно,  $M_{01}$  та  $M_{02}$ . Електромеханічна система з двохмасовою пружною механічною частиною являє собою найпростішу модель ЕМЕМС, що дуже зручна для дослідження впливу пружних механічних зв'язків на динаміку системи.

Коли параметри системи такі, що вплив пружних зв'язків незначний, то механічна частина зображується як одномасова узагальнена розрахункова схема (рисунок 1.5). У цьому випадку реальна багатомасова механічна частина ЕМЕМС замінюється однією еквівалентною масою з моментом інерції  $J_{\Sigma}$ , на яку діє електромагнітний момент обертання  $M$  електродвигуна та сумарний приведені момент навантаження  $M_0$ .

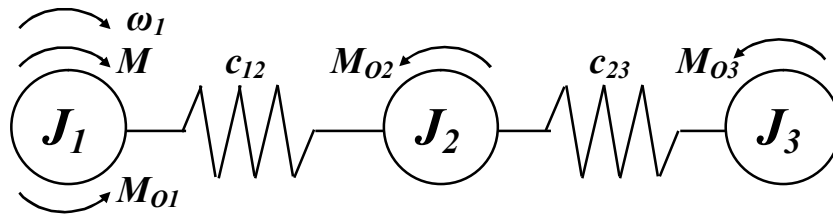


Рисунок 1.3 – Узагальнена трьохмасова розрахункова схема механізму ЕМЕМС

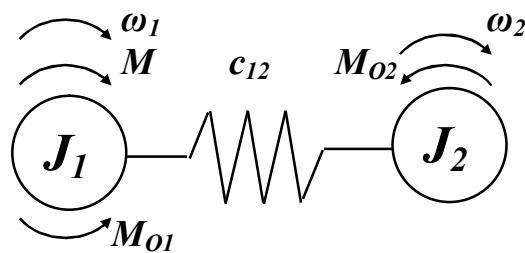


Рисунок 1.4 – Узагальнена двохмасова розрахункова схема механізму ЕМЕМС

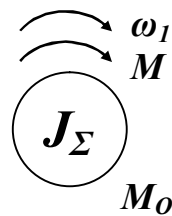


Рисунок 1.5 – Узагальнена одномасова розрахункова схема механізму ЕМЕМС

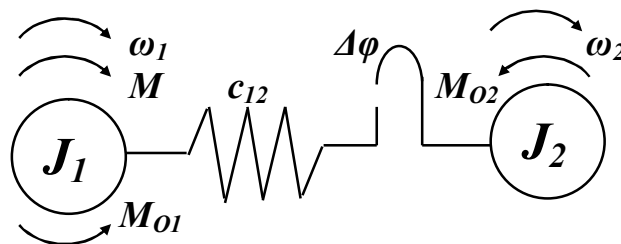


Рисунок 1.6 – Узагальнена розрахункова схема механізму ЕМЕМС при наявності неточності та пружності передачі

Сумарний еквівалентний момент інерції  $J_{\Sigma}$  розраховується за формулою:

$$J_{\Sigma} = J_{ДВ} + \sum_{i=2}^n J_i / i_{1i}^2 + \sum_{j=1}^k m_j \rho_{1j}^2, \quad (1.13)$$

де  $n$  та  $k$  – кількість мас механічної частини ЕМЕМС, що здійснюють відповідно обертальні та поступальні рухи.

Сумарний приведений до вала електродвигуна момент статичного навантаження  $M_O$  можна знайти таким чином:

$$M_O = \sum_{i=1}^q (M_i / i_{1i}) + \sum_{j=1}^p F_j \cdot \rho_{1j}, \quad (1.14)$$

де  $q$  та  $p$  – кількість зовнішніх моментів  $M_i$  та сил  $F_j$ , прикладених до окремих елементів механічної частини.

Якщо в кінематичній схемі механізму є неточності у вигляді люфтів та проміжків, а їх вплив на роботу ЕМЕМС необхідно врахувати, то вони приводяться за формулами (1.6) і зображаються на узагальненій розрахунковій схемі, як показано на рисунку 1.6.

Необхідні навички складення розрахункових схем ЕМЕМС (початкових та узагальнених), визначення параметрів та навантажень механічної частини можна отримати при виконанні практичних завдань, що наведені нижче.

### 1.3 Практичні завдання

1) На рисунку 1.7 наведена кінематична схема механічної частини приладу. Запишіть всі необхідні формули для приведення мас та сил до вала електродвигуна, якщо механічні зв'язки між масами абсолютно жорсткі. Нарисуйте узагальнену розрахункову схему цього механізму.

2) Виконайте попереднє завдання при умові, що трос Т, що з'єднує барабан Б та рухома маса  $m_1$ , має жорсткість  $c_T$ .

3) Виконайте попереднє завдання, якщо рухома маса  $m_1$  зачіплюється за трос Т за допомогою петлі, як показано на рисунку 1.8, що приводить до появи проміжка  $\delta$  в механічній передачі.

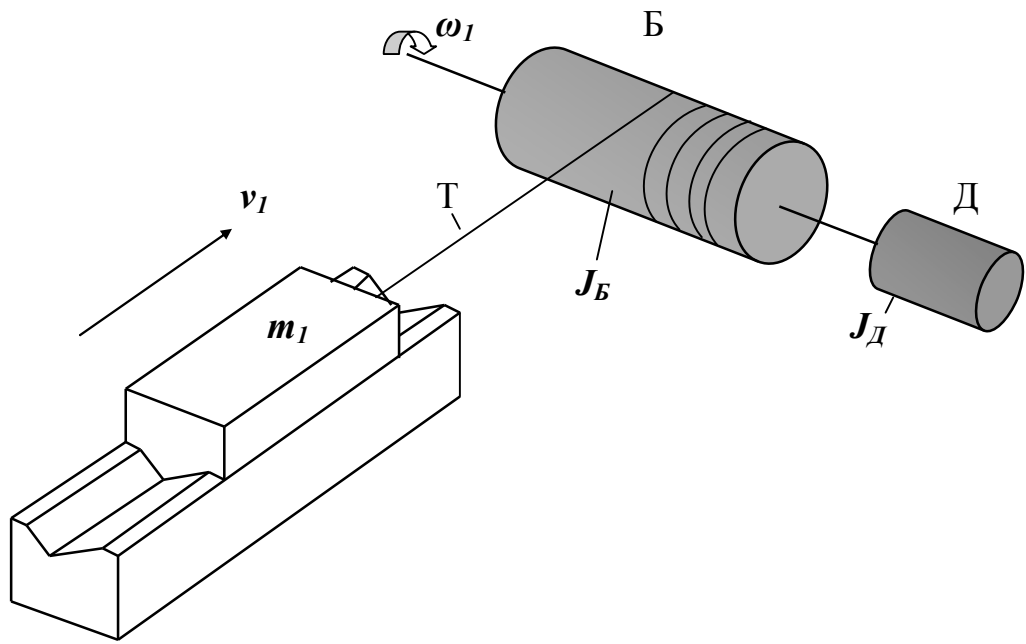


Рисунок 1.7 – Кінематична схема механічної частини приладу  
(до завдання №1)

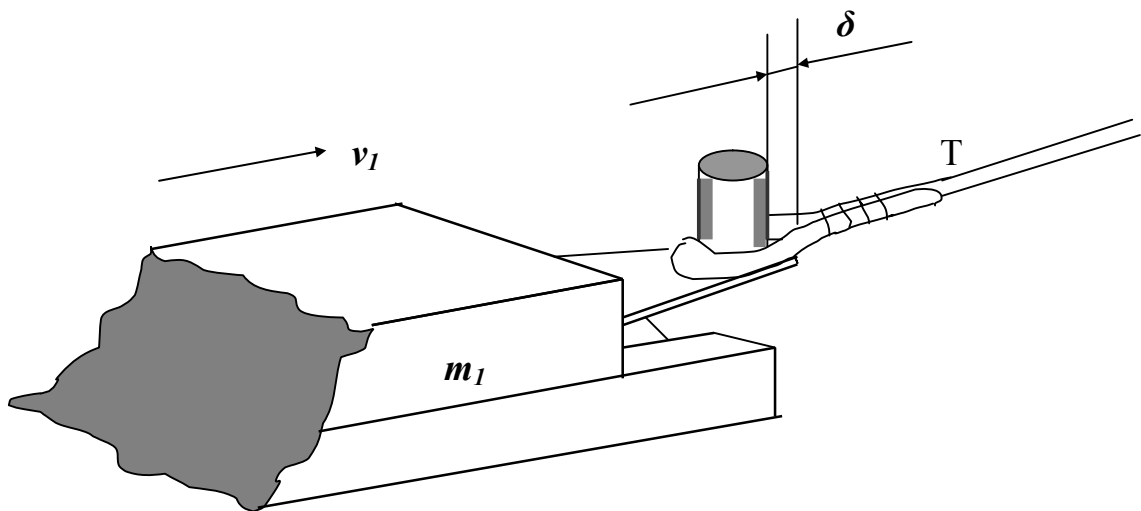


Рисунок 1.8 – Спосіб зачіплення троса до рухомої маси, що веде  
до неточності передачі (до завдання №3)

4) На рисунку 1.9 наведена спрощена кінематична схема графопобудовного пристрою. Запишіть формули приведення всіх мас, моментів та жорсткостей до вала електродвигуна Д. Нарисуйте початкову розрахункову схему цього механізму, якщо приведені моменти інерції окремих мас дорівнюють (в умовних одиницях):  $J_D = 3$ ;  $J_{ЗК1} = 1$ ;  $J_{ПР.ЗК2} = 0,5$ ;  $J_{ПР.ЗК3} = 2$ ;  $J_{ПР.Г} = 0,5$ ;  $J_{ПР.м} = 1$ , а приведені жорсткості механічних зв'язків:  $c_1 = 10$ ;  $c_{ПР.2} = 2$ . Зведіть отриману початкову розрахункову схему до узагальненої розрахункової.

5) Проаналізуйте кінематичну схему на рисунку 1.10. Нарисуйте її узагальнену розрахункову схему, якщо між зубчатыми колесами ЗК2 та ЗК3 є люфт  $\Delta\varphi$ , а вал В<sub>2</sub> та трос Т не є абсолютно жорсткими.

6) Виконайте попереднє завдання, якщо до уваги береться наявність моменту втрат  $\Delta M$  у електродвигуні Д, а також момент тертя у зубчатому зчепленні  $M_T$  та сила опору  $F_O$ , що діє на рухому масу  $m$ .

7) Нарисуйте узагальнену розрахункову схему і визначте її параметри для механізму, що зображений на рисунку 1.11, якщо  $J_1 = 0,01 \text{ кг м}^2$ ;  $J_2 = 0,1 \text{ кг м}^2$ ;  $m = 10 \text{ кг}$ ;  $\omega_1 = 100 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_2 = 10 \text{ рад/с}$ ;  $v = 1 \text{ м/с}$ .

8) Нарисуйте узагальнену розрахункову схему і визначте її параметри для кінематичної схеми на рисунку 1.12, якщо  $J_1 = 0,02 \text{ кг м}^2$ ;  $J_2 = 0,15 \text{ кг м}^2$ ;  $m = 18 \text{ кг}$ ;  $\omega_1 = 80 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_2 = 4 \text{ рад/с}$ ;  $v = 0,6 \text{ м/с}$ ;  $c = 400 \text{ Н м/рад}$ .

9) Нарисуйте узагальнену розрахункову схему і визначте її параметри для кінематичної схеми на рисунку 1.13, якщо  $J_1 = 0,03 \text{ кг м}^2$ ;  $J_2 = 0,2 \text{ кг м}^2$ ;  $m = 20 \text{ кг}$ ;  $\omega_1 = 200 \text{ рад/с}$ ;  $\omega_2 = 0,5 \text{ рад/с}$ ;  $v = 2 \text{ м/с}$ ;  $c = 1000 \text{ Н м/рад}$ ;  $\Delta\varphi = 0,01 \text{ рад}$ .



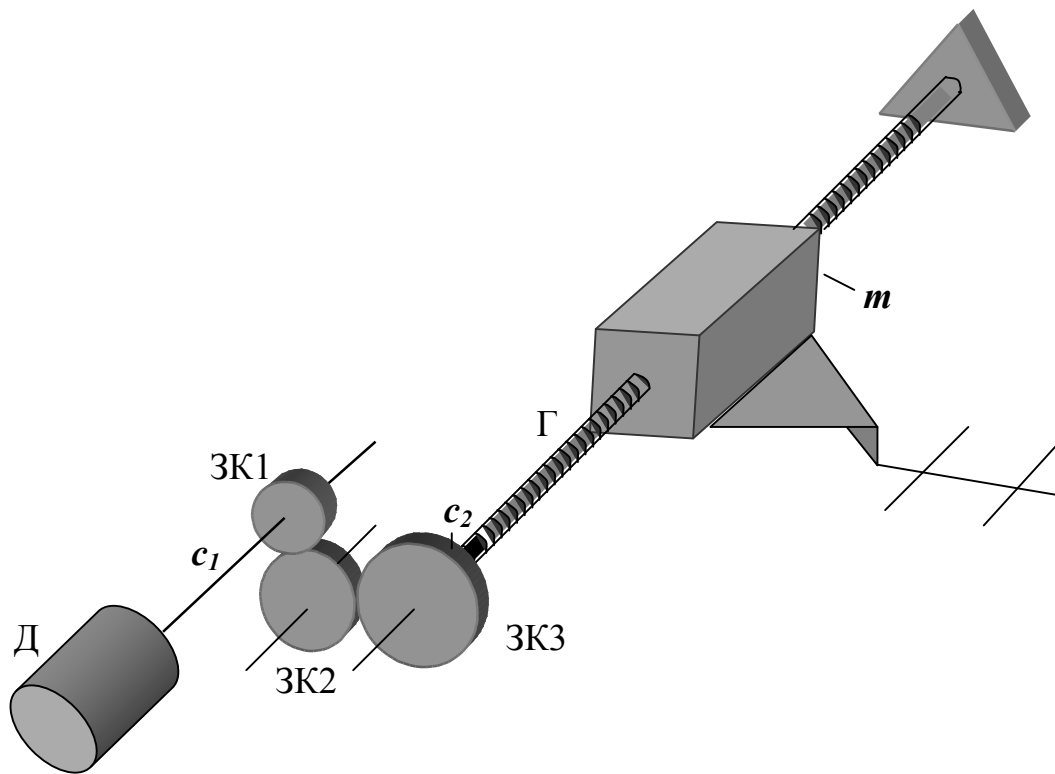


Рисунок 1.9 – Кінематична схема графопобудовного пристрою (до завдання №4)

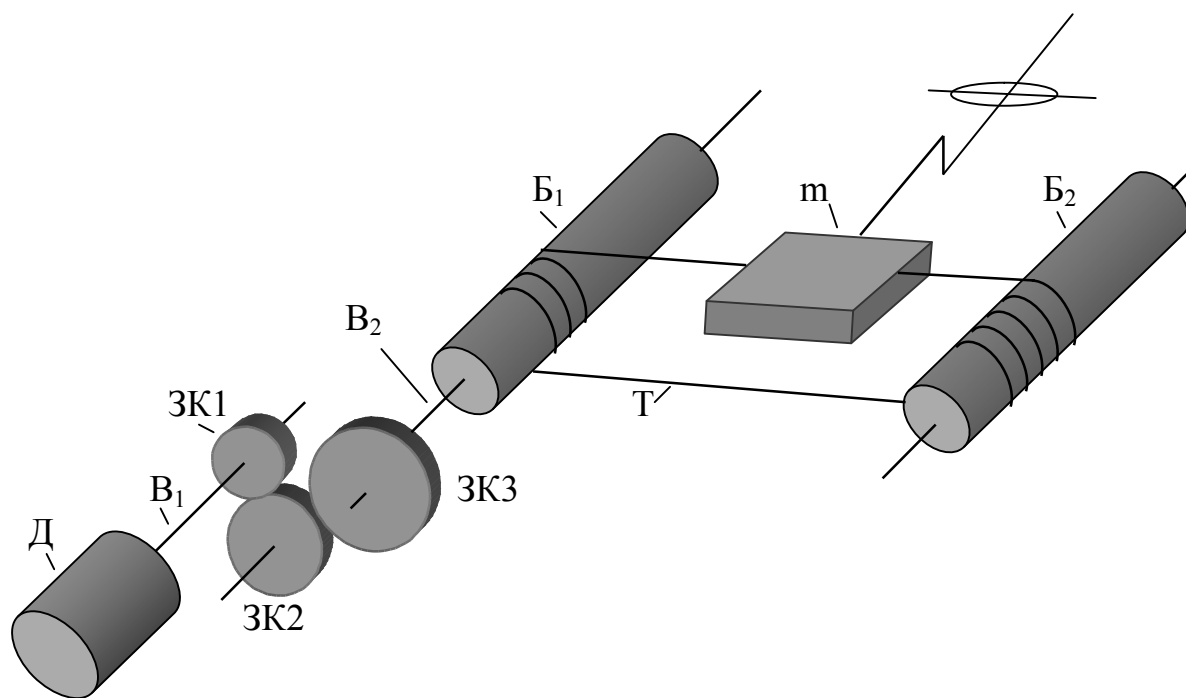


Рисунок 1.10 – Кінематична схема механізму координатографа (до завдання №5)

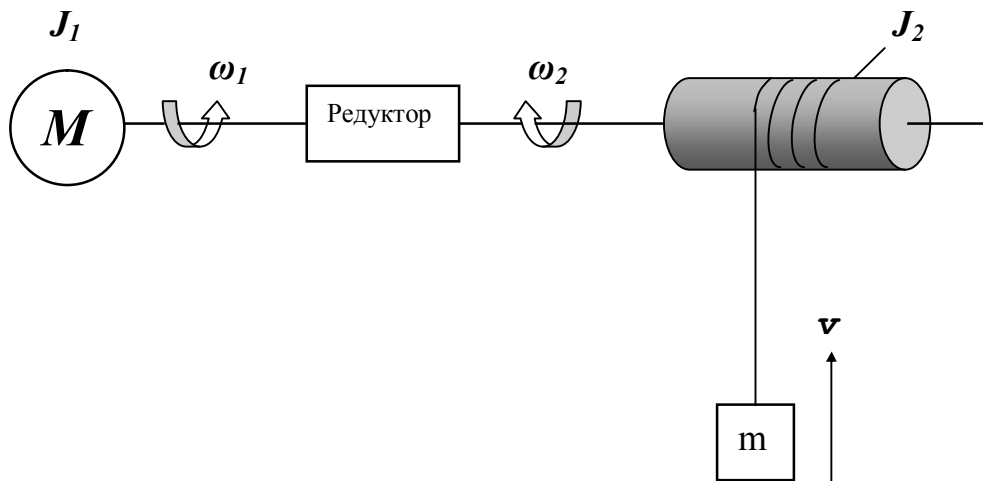


Рисунок 1.11 – Кінематична схема механізму  
(до завдання №7)

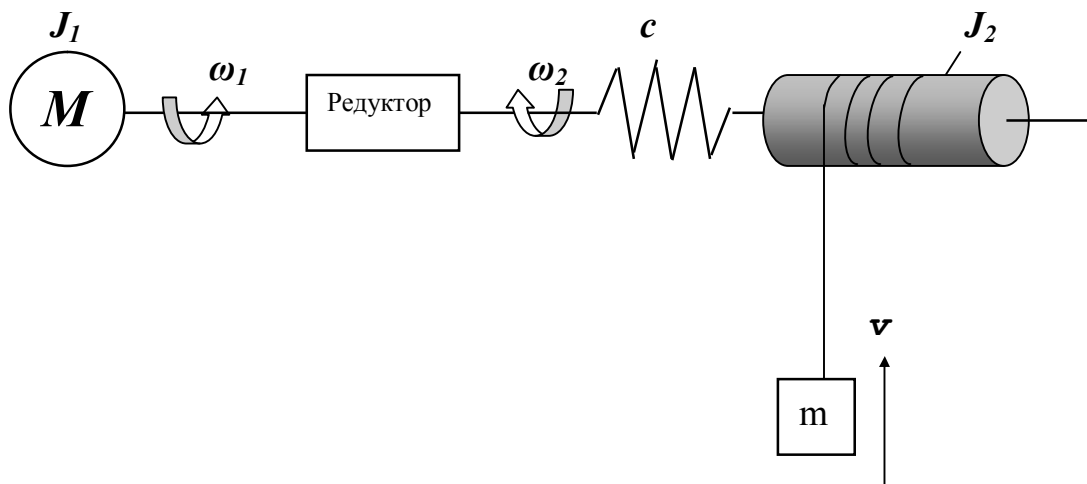


Рисунок 1.12 – Кінематична схема механізму  
(до завдання №8)

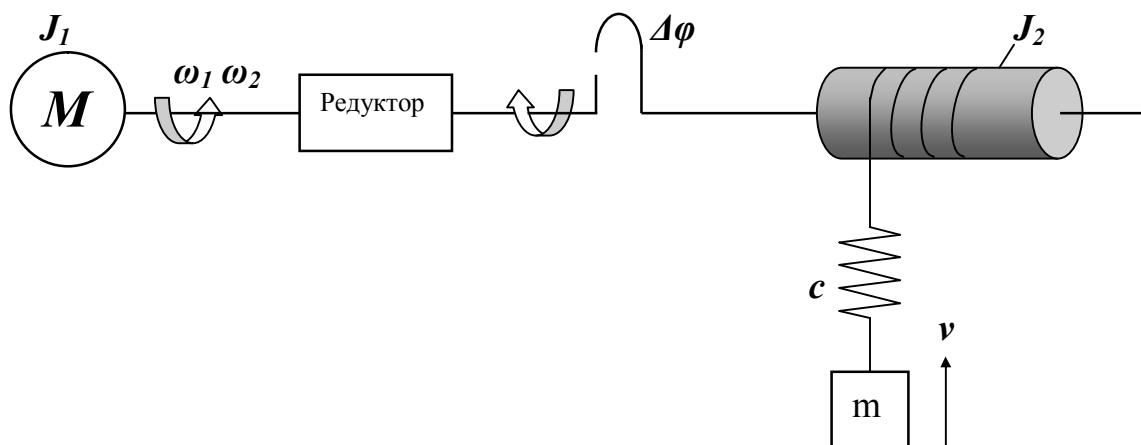


Рисунок 1.13 – Кінематична схема механізму  
(до завдання №9)

## 2 Практичне завдання № 2

### “Аналіз динамічних властивостей елементів ЕМЕМС”

#### 2.1 Короткі теоретичні відомості

Автоматична електромашинна чи електромеханічна система являє собою сукупність окремих елементів, що взаємодіють між собою з певною ціллю. Можна описати систему у цілому, якщо відомі математичні моделі її окремих елементів. В ЕМЕМС у більшій мірі використовуються механічні, електромеханічні та електронні елементи, математичні моделі яких можуть бути отримані у вигляді диференційних рівнянь. Для складення цих диференційних рівнянь треба знати фундаментальні закони відповідних розділів фізики: механіки, електрики, термодинаміки та ін.

Для аналізу динамічних властивостей елементів, що впливають на динамічні властивості системи в цілому, використовується апарат передавальних функцій, які визначаються з початкових диференціальних рівнянь. Як відомо, передавальна функція елемента є відношенням зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної чи збурюючої величини при нульових початкових умовах і відсутності інших діянь на елемент:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (2.1)$$

де  $X(p)$  та  $Y(p)$  – відповідно зображення за Лапласом вхідної та вихідної величин елемента.

Для одержання передавальної функції елемента треба у початковому диференційному рівнянні формально замінити всі операції взяття похідної від вхідної чи вихідної величин на ступеневу функцію від оператора Лапласа  $p$ . При цьому степінь функції дорівнює порядку зображеної похідної.

Маючи вираз передавальної функції, можна проаналізувати реакцію елемента на будь-який вхідний чи збурюючий сигнал, а також отримати часові та частотні характеристики елемента, що більш наочно демонструють його динамічні властивості.

До часових характеристик відносяться перехідна характеристика  $h(t)$  та імпульсна перехідна функція  $k(t)$ .

Частотні характеристики отримують тоді, коли на вхід елемента діє гармонічний сигнал з одиничною амплітудою  $x = \cos(\lambda t)$ . Кожний елемент по різному буде реагувати на це діяння у певному діапазоні частот. На виході елемента при цьому буде спостерігатись вихідний сигнал  $y$ :

$$y = A \cos(\lambda t + \varphi). \quad (2.2)$$

Амплітуда  $A$  та фаза  $\varphi$  цих коливань залежать від частоти вхідного сигналу  $\lambda$ . Залежності  $A(\lambda)$  та  $\varphi(\lambda)$  називають відповідно амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) та фазо-частотною характеристикою (ФЧХ). При аналізі та синтезі автоматичних систем широко використовуються так звані логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ), яку розраховують за формулою:

$$L(\lambda) = 20 \cdot \lg A(\lambda), [\text{дБ}], \quad (2.3)$$

та логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ). При побудові обох частотних характеристик по вісі абсцис відкладається частота у логарифмічному масштабі, хоча відмічаються абсолютні її значення.

Отримати АЧХ, ФЧХ та ЛАЧХ можна з передавальної функції шляхом формальної заміни оператора Лапласа  $p$  на комплексну частоту  $j\lambda$ :

$$W(j\lambda) = \text{Re}[W(j\lambda)] + j \cdot \text{Im}[W(j\lambda)] = A(\lambda) \cdot e^{j\varphi(\lambda)}, \quad (2.4)$$

де  $\text{Re}[W(j\lambda)]$  – дійсна частина комплексної частотної передавальної функції  $W(j\lambda)$ ;

$\text{Im}[W(j\lambda)]$  – уявна частина комплексної частотної передавальної функції  $W(j\lambda)$ .

Таким чином, АЧХ елемента являє собою модуль комплексної частотної передавальної функції  $W(j\lambda)$ :

$$A(\lambda) = \text{mod}W(j\lambda) = \sqrt{\{\text{Re}[W(j\lambda)]\}^2 + \{\text{Im}[W(j\lambda)]\}^2}, \quad (2.5)$$

а ФЧХ – це аргумент цієї частотної передавальної функції:

$$\varphi(\lambda) = \arg W(j\lambda) = \arctg \frac{\text{Im}[W(j\lambda)]}{\text{Re}[W(j\lambda)]}, \quad (2.6)$$

Дуже поширене при аналізі динамічних властивостей елементів автоматичних систем використання ще однієї частотної характеристики так званої амплітудно-фазо-частотної характеристики (АФЧХ), або годографа. Вона являє собою геометричне місце кінців вектора  $W(j\lambda)$  на комплексній площині при зміні частоти від нуля до нескінченності. Будувати АФЧХ можна або шляхом відкладення при різних частотах модуль-амплітуди  $A(\lambda)$  під кутом  $\varphi(\lambda)$  у полярній системі координат, або

дійсної та уявної частин комплексної частотної передавальної функції  $W(j\lambda)$  на відповідних вісях в ортогональній системі координат.

## 2.2 Методика виконання практичних завдань

Розглянемо методику на основі конкретного прикладу виконання типового практичного завдання.

Нехай необхідно побудувати АФЧХ та ЛАЧХ електромеханічного перетворювача кута повороту вала в електричний сигнал, що створений на базі тахогенератора. Якщо не враховувати запізнення вихідного сигналу, що викликається дією вихідного фільтра низьких частот у реальних перетворювачах, то рівняння цього перетворювача буде мати вигляд:

$$U(t) = k_{ТГ} \cdot \omega(t), \quad (2.7)$$

де  $U(t)$  – вихідна напруга тахогенератора;

$\omega(t)$  – швидкість обертання його вала;

$k_{ТГ}$  – коефіцієнт передачі тахогенератора.

Швидкість обертання вала  $\omega(t)$  залежить від кута повороту таким чином:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (2.8)$$

Остаточний вигляд рівняння (2.7) з врахуванням (2.8) буде

$$U(t) = k_{ТГ} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (2.9)$$

Знайдемо передавальну функцію тахогенератора в режимі перетворювача кута повороту, замінюючи операцію взяття похідної на степеневу функцію від оператора Лапласа  $p$ , а реальні змінні величини  $U(t)$  та  $\varphi(t)$  на їх зображення  $U(p)$  та  $\varphi(p)$ :

$$U(p) = k_{ТГ} \cdot \varphi(p) \cdot p. \quad (2.10)$$

Тоді передавальна функція буде:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\varphi(p)} = k_{TG} \cdot p. \quad (2.11)$$

Комплексна частотна передавальна функція  $W(j\lambda)$  тахогенератора відповідно буде:

$$W(j\lambda) = j \cdot k_{TG} \cdot \lambda, \quad (2.12)$$

де  $\text{Re}[W(j\lambda)] = 0$ ;  $\text{Im}[W(j\lambda)] = k_{TG} \lambda$ .

Побудуємо АФЧХ тахогенератора в ортогональній системі координат (рисунок 2.1), змінюючи частоту  $\lambda$  від нуля до нескінченності. Вона має вигляд прямої лінії, що збігається з уявною віссю.

Тепер можна знайти вираз для ЛАЧХ, використовуючи залежності (2.3) та (2.4):

$$L(\lambda) = 20 \lg A(\lambda) = 20 \lg \sqrt{(k_{TG} \cdot \lambda)^2} = 20 \lg(k_{TG} \cdot \lambda) = 20 \lg k_{TG} + 20 \lg \lambda \quad (2.13)$$

Таким чином, ЛАЧХ тахогенератора є сума двох складових: прямої, що проходить паралельно до осі абсцис на відстані  $20 \lg k_{TG}$  (див. рисунок 2.2, лінія 1), та прямої, що проходить так, що її ордината при зміні частоти в 10 разів (на одну декаду) зростає на 20 дБ (лінія 2 на рисунку 2.2). У цьому випадку кажуть, що нахил прямої дорівнює 20 дБ/дек. Додаючи першу та другу лінії, отримуємо пряму з нахилом 20 дБ/дек, що проходить через точку з координатами  $\lambda=1$  та  $L(\lambda)=20 \lg k_{TG}$ .

Частота  $\lambda_3$ , в якій ЛАЧХ перетинає вісь абсцис, називається частотою зрізу. Це така частота, при якій амплітуда сигналів на вході та виході елемента дорівнюють одна одній, а  $A(\lambda_3) = 1$ . Тоді маємо:

$$20 \lg A(\lambda_3) = 20 \lg(k_{TG}) + 20 \lg(\lambda_3) = 0; \lambda_3 = \frac{1}{k_{TG}}. \quad (2.14)$$

### 2.3 Практичні завдання

1) Побудуйте АЧХ та ФЧХ для елемента з передавальною функцією:

$$W(p) = k \cdot p, \quad \text{де } k = 5.$$

2) Побудуйте АФЧХ та ЛАЧХ для елемента, що має передавальну функцію:

$$W(p) = k \cdot p^2, \quad \text{де } k = 10.$$

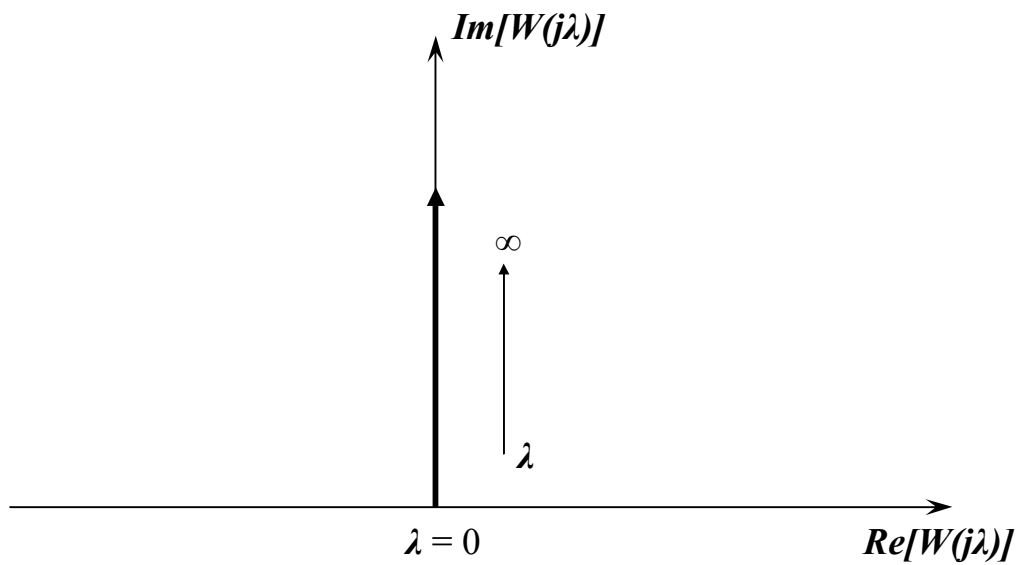


Рисунок 2.1 – Амплітудно-фазо-частотна характеристика електромеханічного перетворювача

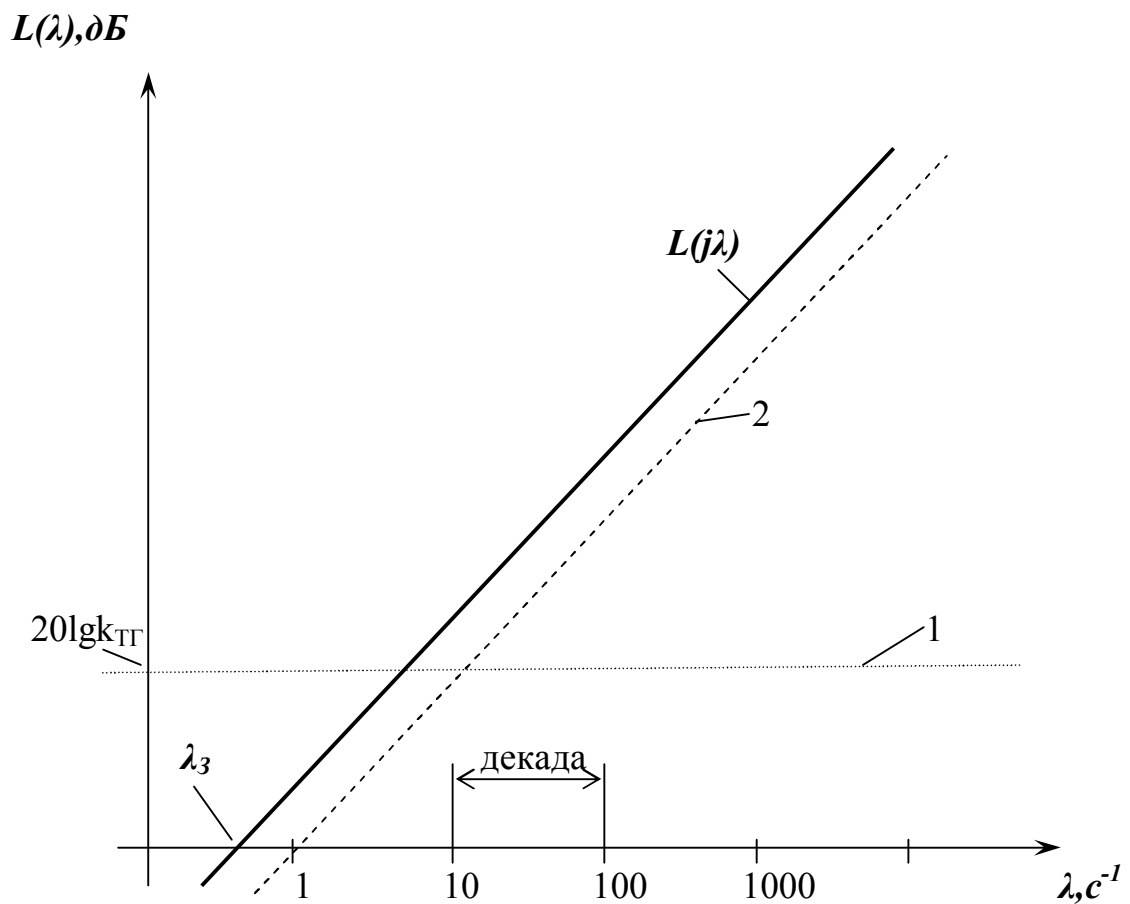


Рисунок 2.2 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика електромеханічного перетворювача

3) Побудуйте ЛАЧХ для елемента, що має таку передавальну функцію:

$$W(p) = \frac{k}{p^3}, \quad \text{де } k = 1000.$$

4) Знайдіть передавальну функцію редуктора, що перетворює частоту обертання вхідного вала  $\omega_1(t)$  в кут повороту вихідного вала  $\varphi_2(t)$ , якщо передавальне число редуктора дорівнює  $i = 10$ . Побудуйте ЛАЧХ цього елемента та визначте частоту зрізу.

5) Знайдіть вираз передавальної функції для коректуючого елемента, схема якого зображена на рисунку 2.3, якщо вхідна напруга  $U_1$ , а вихідна –  $U_2$ .

6) Знайдіть передавальну функцію для електричного коректуючого елемента, схема якого зображена на рисунку 2.4, якщо вхідна напруга  $U_1$ , а вихідна –  $U_2$ .

7) Знайдіть передавальну функцію для електричного коректуючого елемента, схема якого зображена на рисунку 2.5, якщо вхідна напруга  $U_1$ , а вихідна –  $U_2$ .

8) Побудуйте АФЧХ та ЛАЧХ реального тахогенератора, що являє собою диференціувальний елемент зі спізненням. Його передавальна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{k \cdot p}{1 + T \cdot p}, \quad \text{де } k = 1000; T = 2 \text{ с.}$$

9) Побудуйте ЛАЧХ, АФЧХ та ФЧХ для елемента з передавальною функцією:

$$W(p) = k \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad \text{де } k=1; T_1=0,1 \text{ с}; T_2=0,5 \text{ с.}$$

10) Побудуйте АФЧХ та ЛАЧХ електродвигуна, що перетворює момент обертання  $M(t)$  в кут повороту вала  $\varphi(t)$ , якщо момент опору  $M_0$  можна не враховувати, а момент інерції ротора електродвигуна дорівнює  $J=0,1 \text{ кг м}^2$ .

11) Запишіть передавальну функцію коректуючого елемента, що зображений на рисунку 2.6, та визначте, при яких умовах цей елемент стає



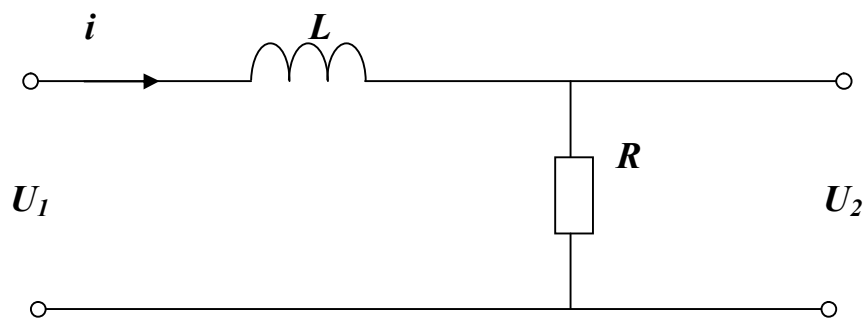


Рисунок 2.3 – Схема корректирующего элемента (до задания №5)

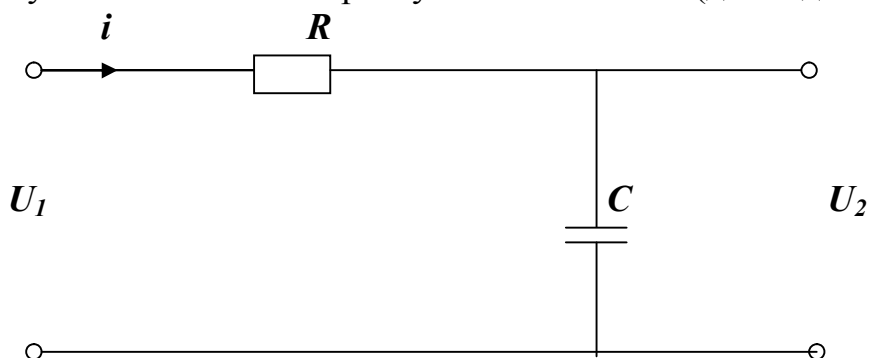


Рисунок 2.4 – Схема корректирующего элемента (до задания №6)

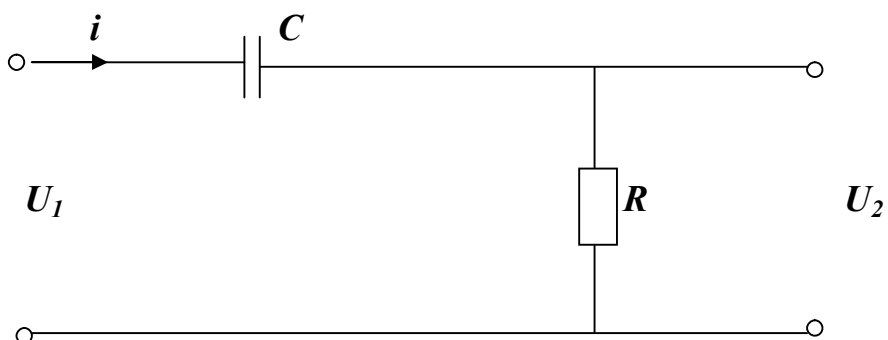


Рисунок 2.5 – Схема корректирующего элемента (до задания №7)

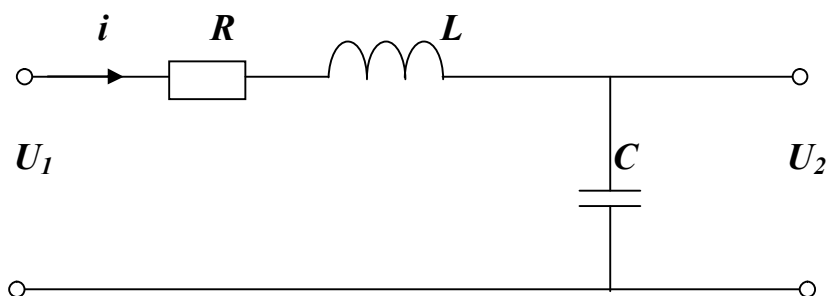


Рисунок 2.6 – Схема корректирующего элемента (до задания №11)

коливальним, аперіодичним чи консервативним, якщо вхідна напруга  $U_1$ , а вихідна –  $U_2$ .

12) Виконайте попереднє завдання, якщо вихідною напругою буде напруга на індуктивності  $L$ . Визначте характер цього елемента.

13) Виконайте завдання №11, якщо вихідною напругою є напруга на активному опорі  $R$ .

14) Побудуйте ЛАЧХ та ФЧХ коливального елемента з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + T\xi p + 1}, \text{ де } k=1; T=0,05 \text{ с,}$$

а  $\xi$  отримує значення а) 0,05; б) 0,1; в) 1,0.

15) Побудуйте ЛАЧХ та ФЧХ електромеханічного елемента, що має таку передавальну функцію:

$$W(p) = k \frac{1 + T_2 p}{p^2 (T_1 p + 1)}, \text{ де } k=100; T_1=0,1 \text{ с; } T_2=0,5 \text{ с.}$$

### **3 Практичне заняття № 3**

#### **“Основи ідентифікації ЕМЕМС”**

##### 3.1 Короткі теоретичні відомості

Ідентифікація ЕМЕМС проводиться при аналізі динаміки роботи усієї системи або окремих її елементів та ділянок. Вона може досягати різних цілей, які залежать від початкових даних та загальної мети аналізу. Так, якщо відома схема чи конструкція елемента, а також принцип його дії, то в результаті ідентифікації можна отримати структурну схему даного елемента та загальний вираз усіх передавальних функцій його складових. Вже за отриманою структурною схемою є можливість виконувати попередній аналіз взаємодій тих фізичних процесів, що відбуваються в елементі, та їх вплив на формування вихідного сигналу. Наприклад, на схемі наочно зображені місця діяння зовнішніх вхідних та збурюючих величин, що дає змогу оцінити ступінь їх впливу на вихідну величину, а потім перейти до суттєвого спрощення структурної схеми для подальшого її математичного моделювання та дослідження. В свою чергу, якщо відомі додаткові початкові дані, наприклад, параметри елементів схеми чи експериментальні перехідні характеристики, ідентифікацію можна проводити далі. Результатом її може бути або структурна схема елемента з вказаними остаточними виразами передавальних функцій її складових (всі параметри передавальної функції знайдені), або повністю визначена передавальна функція елемента для заданої вхідної чи вихідної величин.

Маючи таку передавальну функцію елемента, або ділянки ЕМЕМС, так само як і усієї системи в цілому, можна (як було показано на попередньому практичному занятті) всебічно дослідити динаміку його поведінки при різних вхідних та збурюючих величинах за допомогою часових та частотних характеристик.

##### 3.2 Методика виконання практичних завдань

Методику виконання завдань даного практичного заняття розглянемо на прикладі ідентифікації довільного динамічного елемента ЕМЕМС, кінцевою ціллю якої будемо вважати розробку структурної схеми елемента та отримання загальних виразів передавальних функцій його складових.

Нехай динаміка фізичних процесів, що відбуваються у цьому елементі, описується такою системою рівнянь:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) + b \cdot z(t) - c \cdot x(t) = 0;$$

$$z(t) = y(t - \tau).$$
(3.1)

Вхідною величиною будемо вважати  $x(t)$ , вихідною –  $y(t)$ , а збурюючою –  $z(t)$ . Використовуючи перетворення Лапласа, отримаємо вираз даної системи рівнянь в операторній формі:

$$a_2 y(p) p^2 + a_1 y(p) p + y(p) + b z(p) - c x(p) = 0;$$

$$z(p) = y(p) e^{-p\tau}.$$
(3.2)

Математичну залежність  $y(p)$  від  $x(p)$  можна отримати з першого рівняння, якщо в нього підставити друге:

$$a_2 y(p) p^2 + a_1 y(p) p + y(p) + b y(p) e^{-p\tau} - c x(p) = 0.$$
(3.3)

Розділимо вхідну та вихідну величини:

$$y(p) \cdot (a_2 p^2 + a_1 p + b e^{-p\tau} + 1) = c x(p).$$
(3.4)

Знайдемо вихідну величину:

$$y(p) = \left( \frac{c}{a_2 p^2 + a_1 p + b e^{-p\tau} + 1} \right) \cdot x(p).$$
(3.5)

Дріб у дужках є передавальною функцією даного елемента для  $y(p)$  від  $x(p)$ . Графічний вираз рівняння (3.5) являє собою структурну схему елемента, що зображена на рисунку 3.1. На цьому можна було вважати, що ідентифікація елемента закінчена, але отриманий результат має суттєві недоліки. По-перше, в структурній схемі зовсім загублена збурююча величина  $z(p)$  та, як наслідок, місце її діяння. Це ускладнює правильне розуміння принципу дії елемента та не дозволяє провести всебічний аналіз його роботи при різних умовах та співвідношеннях параметрів. По-друге, за даною схемою важко оцінити реакцію на вхідний сигнал  $x(p)$ , бо передавальна функція не є відомою типовою функцією.

Тому необхідно шукати інших шляхів ідентифікації цього елемента. Спробуємо, наприклад, перенести всі діяння у першому рівнянні системи (3.2) в праву частину:

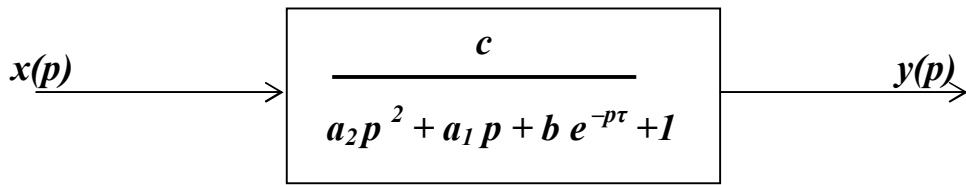


Рисунок 3.1 – Структурна схема елемента згідно з рівнянням (3.5)

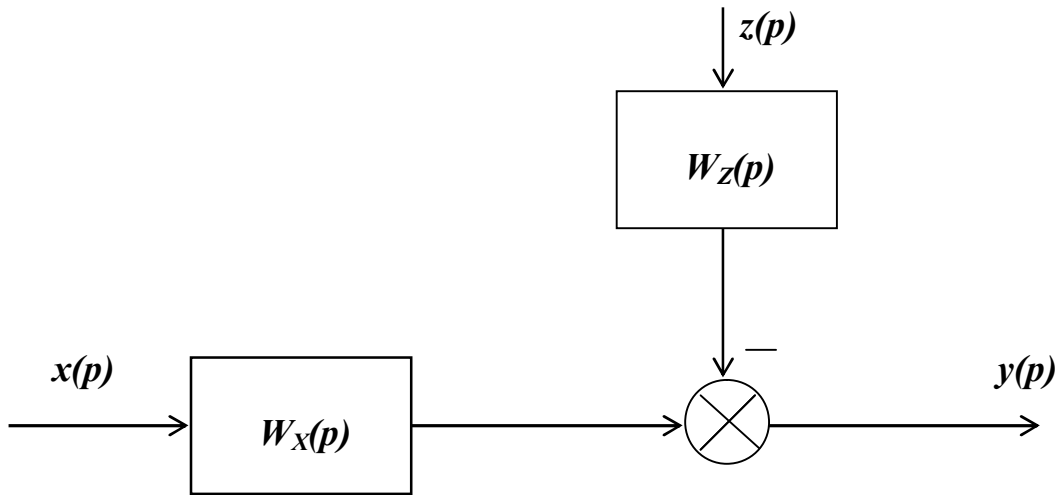


Рисунок 3.2 – Структурна схема елемента згідно з рівнянням (3.8)

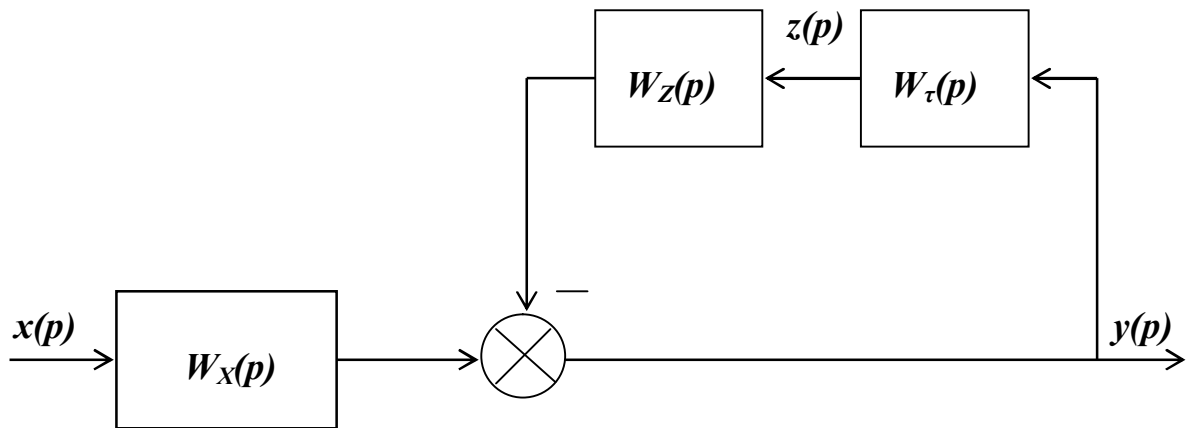


Рисунок 3.3 – Структурна схема елемента згідно з рівняннями (3.8) та (3.9)

$$y(p)(a_2p^2 + a_1p + 1) = c \cdot x(p) - b \cdot z(p). \quad (3.6)$$

Звідси знайдемо вираз для  $y(p)$  :

$$y(p) = \left( \frac{c}{a_2p^2 + a_1p + 1} \right) \cdot x(p) - \left( \frac{b}{a_2p^2 + a_1p + 1} \right) \cdot z(p), \quad (3.7)$$

де  $\frac{c}{a_2p^2 + a_1p + 1} = W_x(p)$  – передавальна функція елемента за вхідним діянням  $x(p)$  ;

$\frac{b}{a_2p^2 + a_1p + 1} = W_z(p)$  – передавальна функція елемента за збурюючим діянням  $z(p)$ .

Після введення цих позначень передавальних функцій отримаємо такий вигляд першого рівняння системи (3.2):

$$y(p) = W_x(p) \cdot x(p) - W_z(p) \cdot z(p). \quad (3.8)$$

Графічне зображення цього рівняння у вигляді структурної схеми приведене на рисунку 3.2. Тепер можна побудувати її графічним зображенням другого рівняння системи. Для цього з'єднаємо збурюючу  $z(p)$  та вихідну  $y(p)$  величини за допомогою елемента затримки з передавальною функцією

$$W_\tau(p) = e^{-p\tau}. \quad (3.9)$$

Кінцевий вигляд структурної схеми елемента, що отримана розглянутим шляхом ідентифікації, приведений на рисунку 3.3. Ця схема вже більш реально відбиває фізичні процеси, що мають місце у даному елементі. Однак таку структурну схему дуже важко змоделювати на ЕОМ чи ЕОМ, бо зворотний зв'язок через  $W_\tau(p)$  по суті замкнений сам на себе. Тому необхідно якось перебудувати цю структурну схему, наприклад, шляхом перенесення виходу зворотного зв'язку на вхід структурної схеми елемента. Для цього слід повернутися до рівняння (3.6) та винести в ньому коефіцієнт в правій частині за дужки:

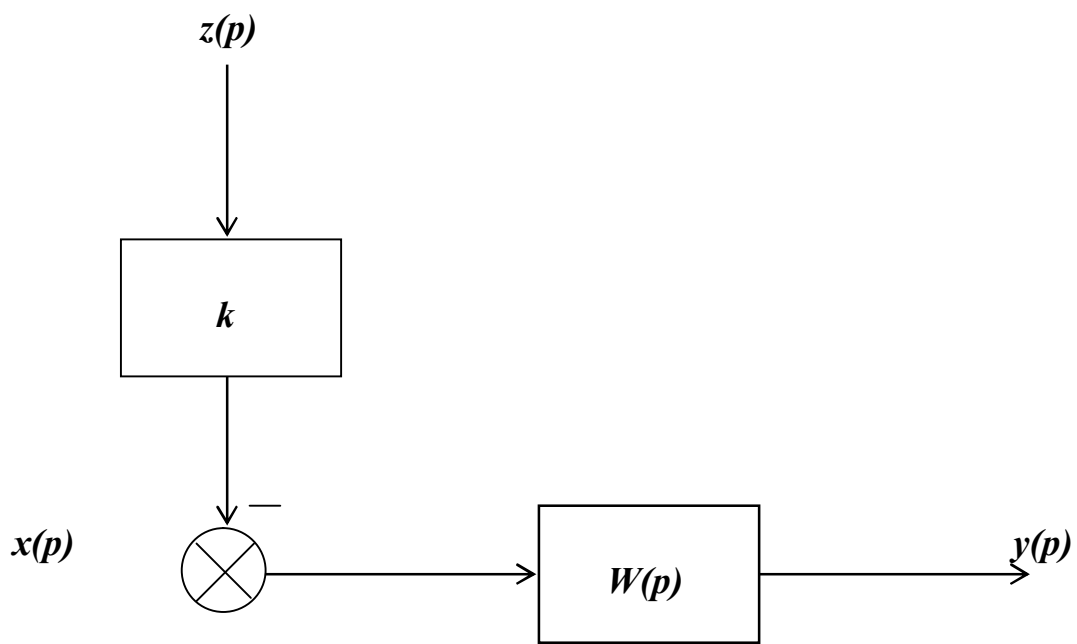


Рисунок 3.4 – Структурна схема елемента згідно рівняння (3.11)

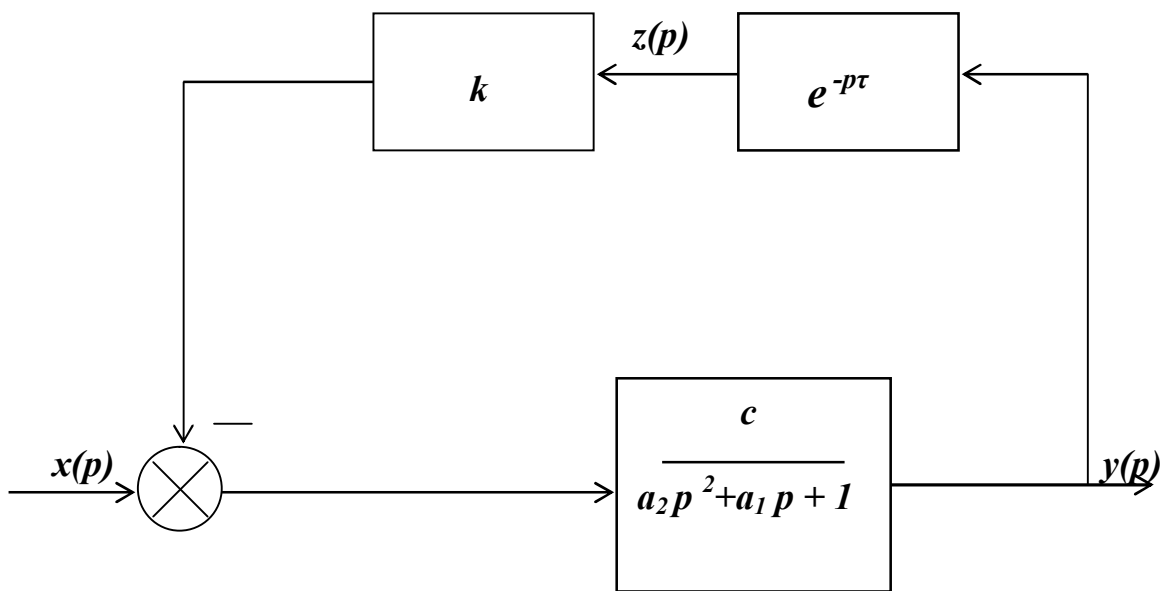


Рисунок 3.5 – Кінцевий вигляд структурної схеми елемента

$$y(p) \cdot (a_2 p^2 + a_1 p + 1) = c \cdot \left( x(p) - \frac{b}{c} \cdot z(p) \right) \quad (3.10)$$

Позначимо відношення  $b/c$  через коефіцієнт  $k$  та знайдемо з (3.10) вираз для  $y(p)$ :

$$y(p) = \frac{c}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \cdot (x(p) - k \cdot z(p)). \quad (3.11)$$

Як бачимо, вихідну величину  $y(p)$  можна знайти, якщо на вхід елемента з типовою передавальною функцією  $W(p) = c/(a_2 p^2 + a_1 p + 1)$  подати результат порівняння величин  $x(p)$  та  $kz(p)$ . Це означає, що порівнювальний елемент у структурній схемі треба поставити на вході (див. рисунок 3.4).

Враховуючи друге рівняння початкової системи (3.2), отримаємо кінцевий варіант структурної схеми (див. рисунок 3.5), яку при аналізі можна змоделювати на АОМ, використовуючи моделі типових динамічних елементів (коливального, пропорційного та затримки), що зв'язані через від'ємний зворотний зв'язок. Виходячи з цього, цей варіант структурної схеми будемо вважати остаточною результатом проведеної ідентифікації.

### 3.3 Практичні завдання

1) Ідентифікуйте електричний двигун постійного струму, що перетворює управляюче діяння  $U_{\text{Я}}$  (напряга на якорній обмотці) у частоту обертання його вала  $\omega$  при збурюючій дії момента тертя  $M_T$ . Початкова система рівнянь, що описує електромеханічні процеси у двигуні, має вигляд:

$$U_{\text{Я}} = E_{\text{Я}} + R_{\text{Я}} i_{\text{Я}} + L_{\text{Я}} \frac{di_{\text{Я}}}{dt};$$

$$M - M_T = J \frac{d\varpi}{dt};$$

$$E_{\text{Я}} = c_E \cdot \varpi;$$

$$M = c_M \cdot i_{\text{Я}};$$

$$c_E = c_M = c.$$

де  $E_{\text{Я}}$  – електрорушійна сила обмотки якоря;  
 $R_{\text{Я}}$  та  $L_{\text{Я}}$  – відповідно активний опір та індуктивність обмотки якоря;



$i_{\text{я}}$  – струм через обмотку якоря;  
 $M$  – момент обертання;  
 $M_T$  – момент інерції якоря;  
 $c_E$  та  $c_M$  – електромеханічні коефіцієнти двигуна, що мають різні розмірності, але дорівнюють одна одній.

2) Виконайте ідентифікацію електродвигуна постійного струму, що перетворює управляюче діяння  $U_{\text{я}}$  у кут повороту його вала  $\varphi$  при збуджуючій дії момента тертя  $M_T$ . Початкову систему рівнянь беріть з завдання №1, але доповніть її рівнянням

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

3) Спираючись на систему рівнянь із завдання №1, ідентифікуйте електродвигун постійного струму, що перетворює управляюче діяння  $U_{\text{я}}$  у момент обертання  $M$ .

4) Ідентифікуйте електродвигун постійного струму для кута повороту вала  $\varphi$  при дії на вхід збуджуючої величини  $M_T$  (момент тертя) для постійного значення управляючого сигналу  $U_{\text{я}}$ . Система рівнянь та ж сама, що у завданні №2.

5) Побудуйте структурну схему електродвигуна постійного струму. Вхідною величиною слід вважати збуджуюче діяння  $M_T$  (момент тертя), а вихідною – частоту обертання вала  $\omega$  при постійному значенні управляючої величини  $U_{\text{я}}$ . Система рівнянь та ж сама, що у завданні №1.

6) Виконайте попереднє завдання для іншої вихідної величини – момента обертання  $M$ .

7) Електромагнітні процеси, що відбуваються в обмотках генератора незалежного збудження, описуються такою системою рівнянь (без врахування реакції якоря):

$$\begin{aligned}
 U_3 &= R_3 \cdot i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}; \\
 U_{\text{я}} &= e_{\Gamma} - \left( R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \right); \\
 e_{\Gamma} &= c_{\Gamma} \cdot i_3; \\
 i_{\text{я}} &= \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}}},
 \end{aligned}$$

де  $U_3$  – напруга збудження (вхідна величина);

$i_3$  – струм у збуджувальній обмотці;

$R_3, L_3$  – відповідно опір та індуктивність збуджувальної обмотки;

$U_{я}$  – напруга на кінцях якірної обмотки (вихідна величина);

$e_{Г}$  – е.р.с. якірної обмотки;

$R_{я}$  та  $L_{я}$  – відповідно опір та індуктивність якірної обмотки;

$c_{Г}$  – коефіцієнт генератора;

$R_{H}$  – опір навантаження генератора.

Приймаючи струм якоря  $i_{я}$  за збудрюючу величину, а  $U_3$  та  $U_{я}$ , відповідно за вхідну та вихідну величину генератора, виконайте ідентифікацію цього динамічного елемента ЕМЕМС.

8) Розрахункова схема механізму автоматизованого електропривода являє собою двохмасову пружну систему, що зображена на рисунку 3.6. У цій схемі введені такі позначення:

$J_1$  – момент інерції ротора електродвигуна;

$J_2$  – момент інерції навантаження електродвигуна;

$c_K$  – пружність з'єднання вала електродвигуна та навантаження;

$\omega_1, \omega_2$  – відповідно частота обертання вала двигуна і вала навантаження;

$M$  – момент обертання електродвигуна;

$M_O$  – момент опору навантаження;

$M_{II}$  – момент пружних деформацій.

Система рівнянь, що спрощено відбиває динамічні процеси, які відбуваються в такій механічній системі, така:

$$M = J_1 \cdot \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + M_{II};$$

$$M_{II} = J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + M_O;$$

$$M_{II} = c_K \cdot (\varphi_1 - \varphi_2);$$

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt};$$

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt}.$$

Ідентифікуйте цей динамічний елемент електропривода, якщо вхідною величиною є момент двигуна  $M$ , вихідною – частота обертання вала навантаження  $\omega_2$ , а збудрюючою величиною – момент опору  $M_O$ .

9) Ідентифікуйте механічну частину електропривода, що описана у завданні №8, якщо вважати вхідною величиною момент двигуна  $M$ , вихідною – момент пружних деформацій  $M_{II}$ , а збудрюючою – момент  $M_O$ .

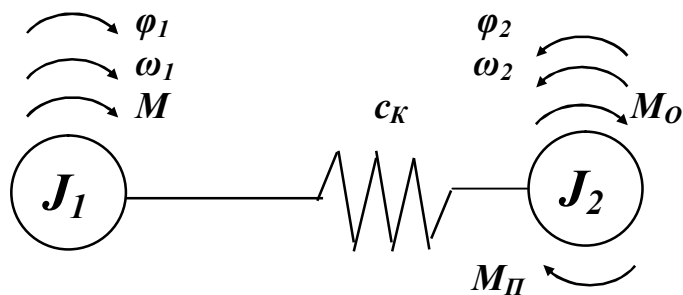


Рисунок 3.6 – Розрахункова схема механізму до завдання №8

10) Знайдіть структурну схему механічної частини електропривода із завдання №8, яка відповідала б реальному впливу момента опору  $M_O$  на величину моменту пружних деформацій  $M_{II}$ .

11) Виконайте завдання №8 для випадку, коли треба виявити вплив моменту двигуна  $M$  на частоту обертання вала двигуна  $\omega_1$  при наявності навантаження та пружних деформацій.

12) Для випадку, коли аналізується процес розбігу вала навантаження  $\omega_1=f(t)$ , нарисуйте відповідну структурну схему та знайдіть передавальні функції її складових.

13) Ідентифікуйте механічну систему електропривода, що описана в завданні №8, для вхідної величини  $\omega_1$  та вихідної  $\omega_2$ , якщо використовується більш точна система рівнянь:

$$M = J_1 \cdot \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + M_{II} + M_{OD} ;$$

$$M_{II} = J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + M_O + M_{OH} ;$$

$$M_{II} = c_\varphi \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + c_\omega (\omega_1 - \omega_2) ;$$

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} ;$$

$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} .$$

$$M_{OD} = c_D \cdot \omega_1 ;$$

$$M_{OH} = c_H \cdot \omega_2 .$$

В ній новими величинами є:

$M_{од}$  – момент швидкісного опору на валу двигуна;

$M_{он}$  – момент швидкісного опору на валу навантаження;

$c_{\varphi}$  – складова пружності передачі між двигуном та навантаженням при крутінні;

$c_{\omega}$  – складова пружності передачі між двигуном та навантаженням при дії дисипативних сил;

$c_d, c_H$  – коефіцієнти пропорційності.

## 4 Практичне заняття №4 “Дослідження динамічних елементів ЕМЕМС”

### 4.1 Короткі теоретичні відомості

Дослідження (аналіз) динамічного елемента ЕМЕМС чи всієї системи в цілому дозволяє всебічно розглянути реакцію цього елемента (системи) на різні вхідні дії, тобто з'ясувати всі його динамічні властивості, що впливають на кількісні та якісні показники реального працюючого елемента (системи) при виконанні покладених на нього функцій.

Як було вже відмічено вище, дослідження (аналіз) проводиться на базі часових або частотних характеристик. Ці характеристики можна отримати, якщо відома передавальна функція елемента (системи), а на його вхід подається один із стандартних сигналів. Передавальну функцію елемента виводять із структурної схеми, що розробляється на етапі його ідентифікації. Для перебудови структурної схеми існують певні правила. Але, якщо структурна схема досить складна і її перебудова утруднюється, то, як правило, дослідник шукає шляхи спрощення цієї схеми. Це спрощення не повинно занадто сильно впливати на характеристики початкової схеми. Наприклад, з метою спрощення можна відкинути деякі другорядні зворотні зв'язки чи збурюючі діяння.

Коли отримана передавальна функція елемента (системи), то можна знайти його реакцію на стандартні сигнали. Так, якщо на вхід подавати одиничний стрибок  $x(t) = 1(t)$ , то на виході елемента (системи) буде формуватись відгук у вигляді перехідної функції  $h(t)$ . В операторній формі одиничний стрибок має зображення:

$$L \{1(t)\} = \frac{1}{p}. \quad (4.1)$$

Тоді зображення перехідної функції буде:

$$L \{h(t)\} = \frac{1}{p} \cdot W(p), \quad (4.2)$$

де  $W(p)$  – передавальна функція елемента (системи).

За зображенням  $L\{h(t)\}$  можна отримати саму часову характеристику  $h(t)$  за допомогою таблиць зворотного перетворення Лапласа. Широко використовуються також числові методи розв'язання диференціальних рівнянь на ЕОМ. На рисунку 4.1 приведені приклади перехідних функцій,

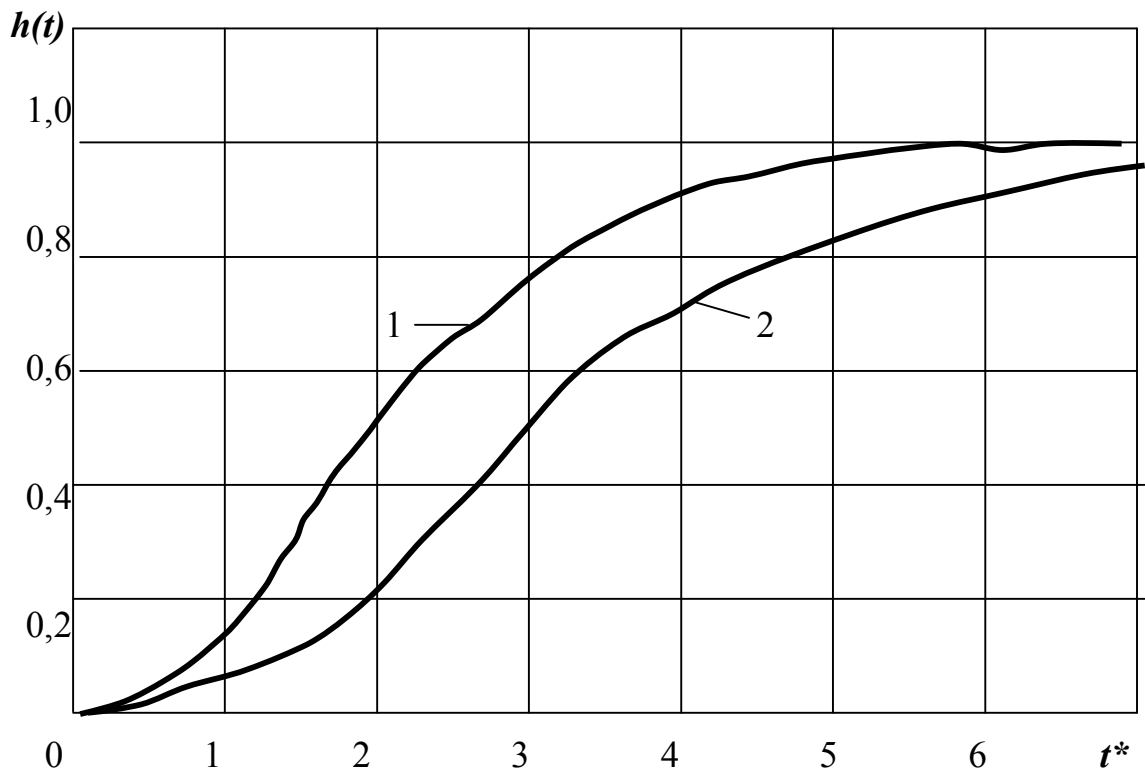


Рисунок 4.1 – Перехідні функції пуску електродвигуна при різних значеннях моменту інерції навантаження

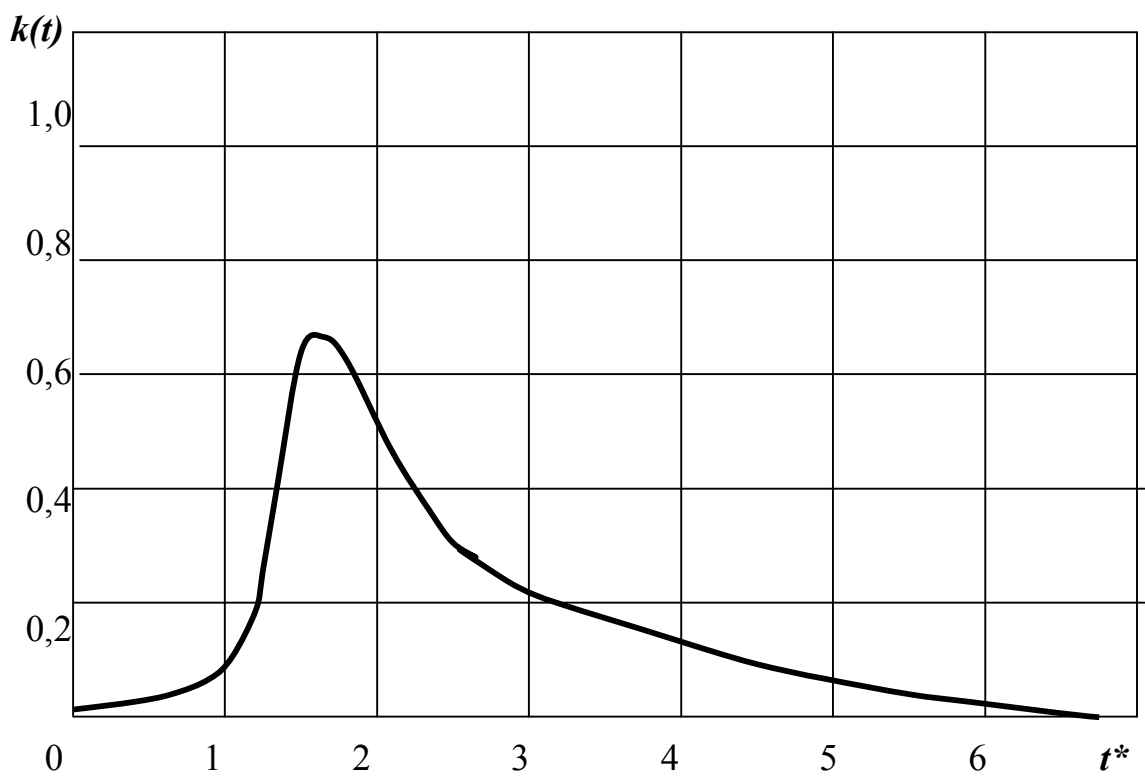


Рисунок 4.2 – Імпульсна перехідна функція електродвигуна

що відповідають пуску електродвигуна при меншому (крива 1) та більшому (крива 2) моментах інерції навантаження, коли на двигун подається стрибком напруга живлення.

Крім одиничного стрибка на вхід елемента (системи) можна подавати інший стандартний сигнал у вигляді одиничної імпульсної функції (дельта-функції)  $\delta(t)$ , яка відповідає таким умовам:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= 0 \quad \text{при } t \neq 0; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot dt &= 1. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Реакція елемента (системи) на цей стандартний сигнал являє собою імпульсну перехідну функцію  $k(t)$ . Зображенням цієї функції за Лапасом є сама передавальна функція елемента (системи):

$$L\{k(t)\} = W(p). \quad (4.4)$$

На рисунку 4.2 зображена імпульсна перехідна функція електродвигуна, яка показує, як буде змінюватись швидкість обертання його вала, якщо через якірну обмотку пропустити імпульс струму.

Третім поширеним стандартним сигналом, що подається при дослідженні (аналізі) на вхід динамічного елемента (системи), є гармонічний сигнал з частотою  $\lambda$  та одиничною амплітудою:

$$x(t) = \cos(\lambda t). \quad (4.5)$$

У цьому випадку динамічний елемент описується частотною передавальною функцією  $W(j\lambda)$ , яка отримується з початкової передавальної функції шляхом формальної заміни оператора  $p$  на комплексну частоту  $j\lambda$ . Маючи  $W(j\lambda)$ , можна побудувати різні частотні характеристики елемента (системи): АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ (див. практичне заняття № 2).

Часові характеристики (перехідна та імпульсна функції) однозначно визначають усі динамічні властивості даного елемента (системи). Наприклад, якщо відома перехідна функція (див. рисунок 4.3), то при її дослідженні (аналізі) можна отримати такі динамічні показники:

- перерегулювання  $\sigma$ , що розраховується за формулою:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{yc}}{y_{yc}} \cdot 100\%; \quad (4.6)$$

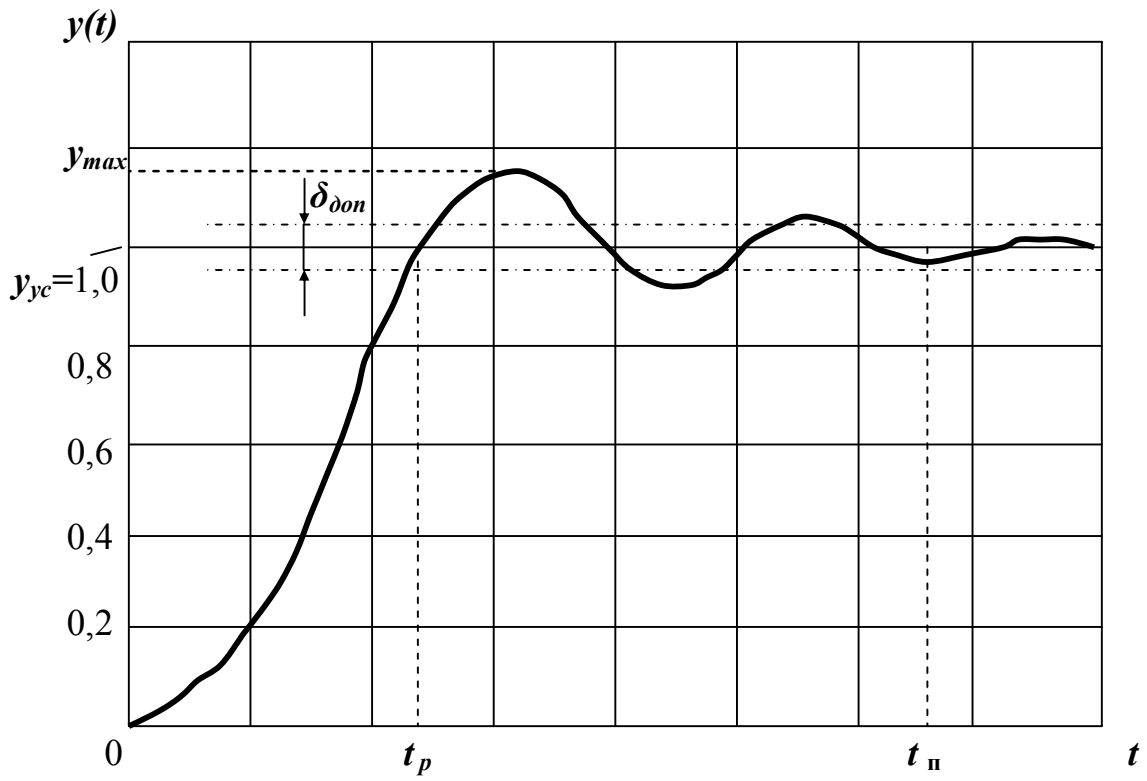


Рисунок 4.3 – Приклад перехідної функції елемента ЕМЕМС

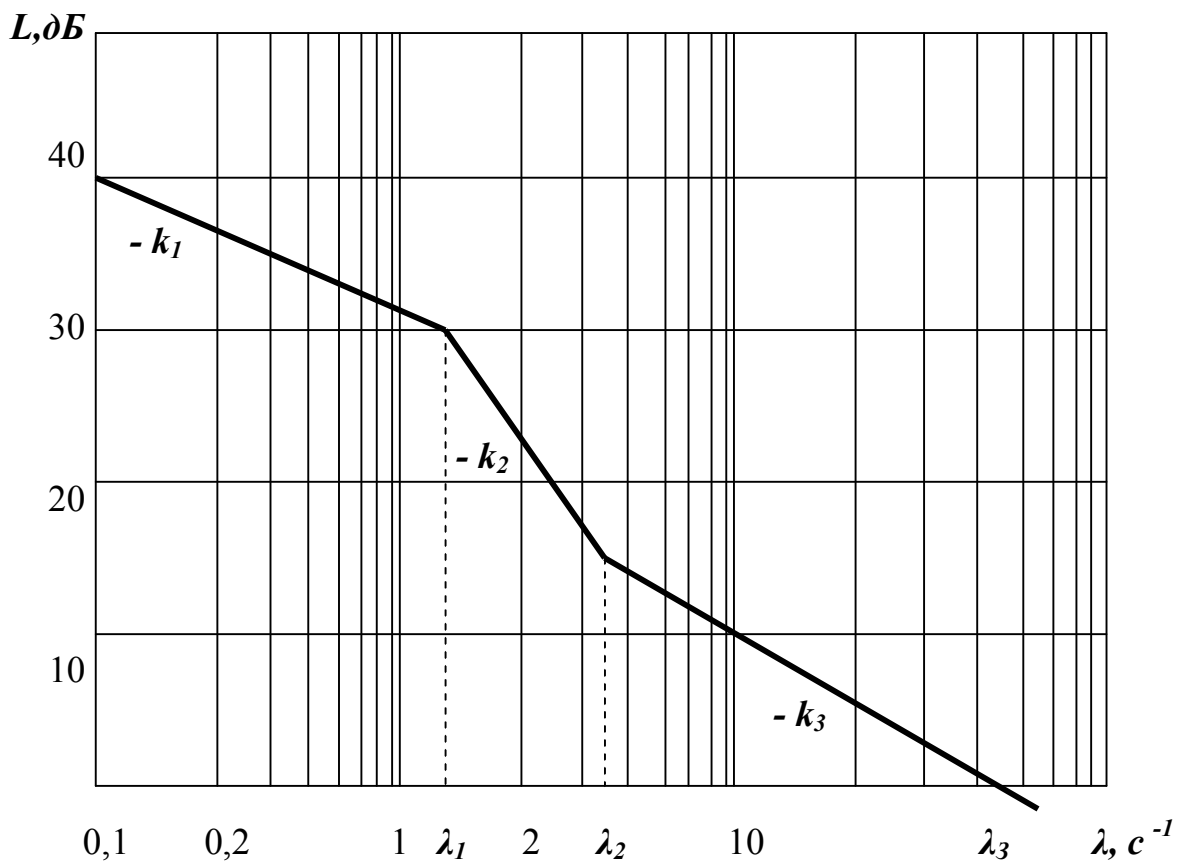


Рисунок 4.4 – Приклад ЛАЧХ елемента ЕМЕМС



- час перехідного процесу  $t_{п}$ , а також час розбігу  $t_{р}$  ( якщо допустима похибка  $\delta_{дон}$  не задана, то  $t_{п}$  визначається за моментом, коли перехідна функція  $y(t)$  буде відрізняться від сталого значення  $y_{ст}$  не більш ніж на 5%);

- кількість коливань  $n$  за час перехідного процесу.

За перехідною функцією ЕМЕМС, що автоматично слідує за вхідним задавальним сигналом, також можна оцінити динамічну та статичну похибки системи.

При дослідженні (аналізі) динамічних елементів (систем) дуже важливим моментом є з'ясування ступеня впливу тих чи інших переметрів реальних елементів (систем) або коефіцієнтів їх передавальних функцій на відповідні динамічні показники. Це робиться шляхом поступових змін цих параметрів (коефіцієнтів) у потрібних межах та реєстрації перехідних функцій, які потім аналізуються. Крім цього підходу використовується інший, що передбачає обчислення так званої функції чутливості, яка визначається таким чином:

$$S_{\alpha} = \frac{\partial y(t, \alpha)}{\partial \alpha} = \frac{y(t, \alpha_0 + \Delta\alpha) - y(t, \alpha_0)}{\Delta\alpha} \quad | \Delta\alpha \rightarrow 0, \quad (4.7)$$

де  $\alpha_0$  – початкове значення параметра  $\alpha$ , вплив якого досліджується;

$\Delta\alpha$  – зміна параметра  $\alpha$ .

Функція чутливості використовується при розробці ЕМЕМС як міра зміни вигляду перехідних процесів у системі при варіації її параметрів.

Вона може розраховуватись шляхом інтегрування розширеної системи диференціальних рівнянь, що описують дану систему.

Отримання конкретного виду перехідної чи імпульсної функції найчастіше пов'язане зі складністю розв'язання диференціальних рівнянь великого степеня. Тому для попередньої оцінки динамічних властивостей елемента (системи) аналізують частотні характеристики.

На рисунку 4.4 зображена вигадана ЛАЧХ елемента ЕМЕМС. За цією характеристикою можна отримати такі динамічні показники:

- частота зрізу  $\lambda_3$ , для якої  $L(\lambda_3) = 0$ ;
- приблизний час перехідного процесу:

$$t_{п} \approx B \cdot \pi / \lambda_3, \quad (4.8)$$

де  $B$  – коефіцієнт, що визначається за діаграмою Солодовникова і залежить від перерегулювання  $\sigma$ ;

- нахил характеристики на різних частотних ділянках:  $-k_1$ ,  $-k_2$ ,  $-k_3$  [дБ/дек];
- частоти сполучення  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ .

Крім того, якщо ЛАЧХ чи АЧХ має екстремальне збільшення коефіцієнта передачі на певній резонансній частоті  $\lambda_p$  (див. рисунок 4.5), то це означає, що при перехідному процесі будуть спостерігатися затухаючі коливання. Динамічний показник, що описує це явище, називається показником коливальності:

$$M = \frac{A(\lambda_p)}{A(0)}, \quad (4.9)$$

де  $A(\lambda_p)$  та  $A(0)$  – коефіцієнти передачі елемента (системи) відповідно на частоті  $\lambda_p$  та  $\lambda = 0$ .

Чим більше значення  $M$ , тим меншу стійкість має цей елемент чи система. Наприклад, якщо на частоті  $\lambda_p$  коефіцієнт передачі зростає до нескінченності, то в елементі (системі) виникають незатухаючі коливання (елемент збуджується).

Дуже важливо також проаналізувати поведінку елемента (системи) на різних частотних ділянках. Це проводиться за допомогою таких динамічних показників, як нахили  $k_i$  частотних характеристик. На рисунку 4.6 приведений приклад такої ЛАЧХ. Видно, що на низьких частотах нахил ЛАЧХ має від'ємний знак, тобто елемент веде себе як інтегруючий динамічний елемент. На середніх частотах нахил характеристики дорівнює нулю. Це означає, що він відповідає пропорційному динамічному елементу. На високих частотах нахил ЛАЧХ стає додатним, що відповідає диференціовальному динамічному елементу. Якщо об'єднати всі ці результати аналізу, то цей елемент можна віднести до ПД-елемента.

При дослідженні (аналізі) динамічних елементів (систем) за частотними характеристиками з'ясовується ступінь впливу різних параметрів чи коефіцієнтів на вид частотної характеристики. Так, наприклад, для коливальних елементів досліджується вплив коефіцієнта демпфування  $\xi$  на частоту резонансу  $\lambda_p$  та на показник коливальності  $M$ .

Зміна різних сталих часу, що входять до складу передавальних функцій, теж веде до суттєвої зміни частотної характеристики.

За частотними характеристиками ЕМЕМС також оцінюється запас стійкості ЕМЕМС по амплітуді та фазі (див. п.5.1), і якщо його недостатньо, то підбирають відповідні значення коефіцієнтів передавальних функцій.

## 4.2 Методика виконання практичних завдань

Всі завдання, що виконуються на цьому практичному занятті, зв'язані з дослідженням (аналізом) часових та частотних характеристик

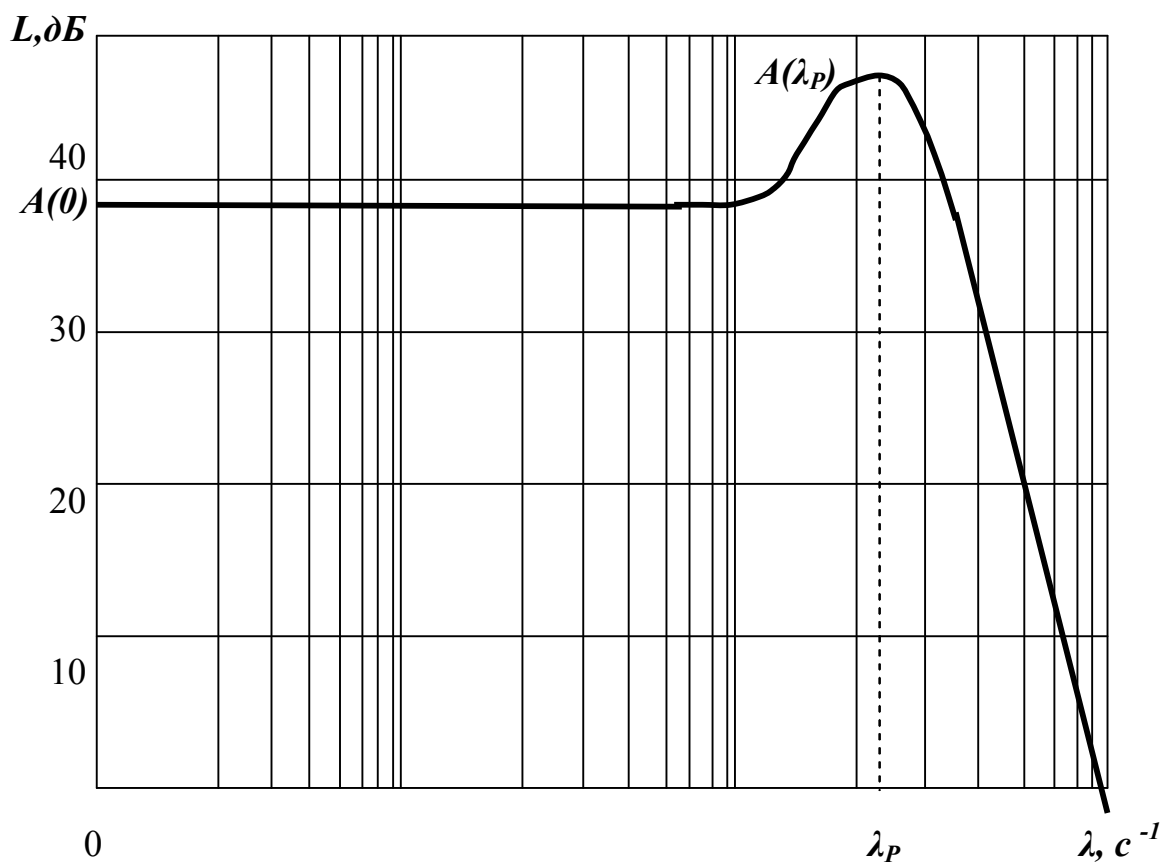


Рисунок 4.5 – Приклад ЛАЧХ елемента ЕМЕМС коливального типу

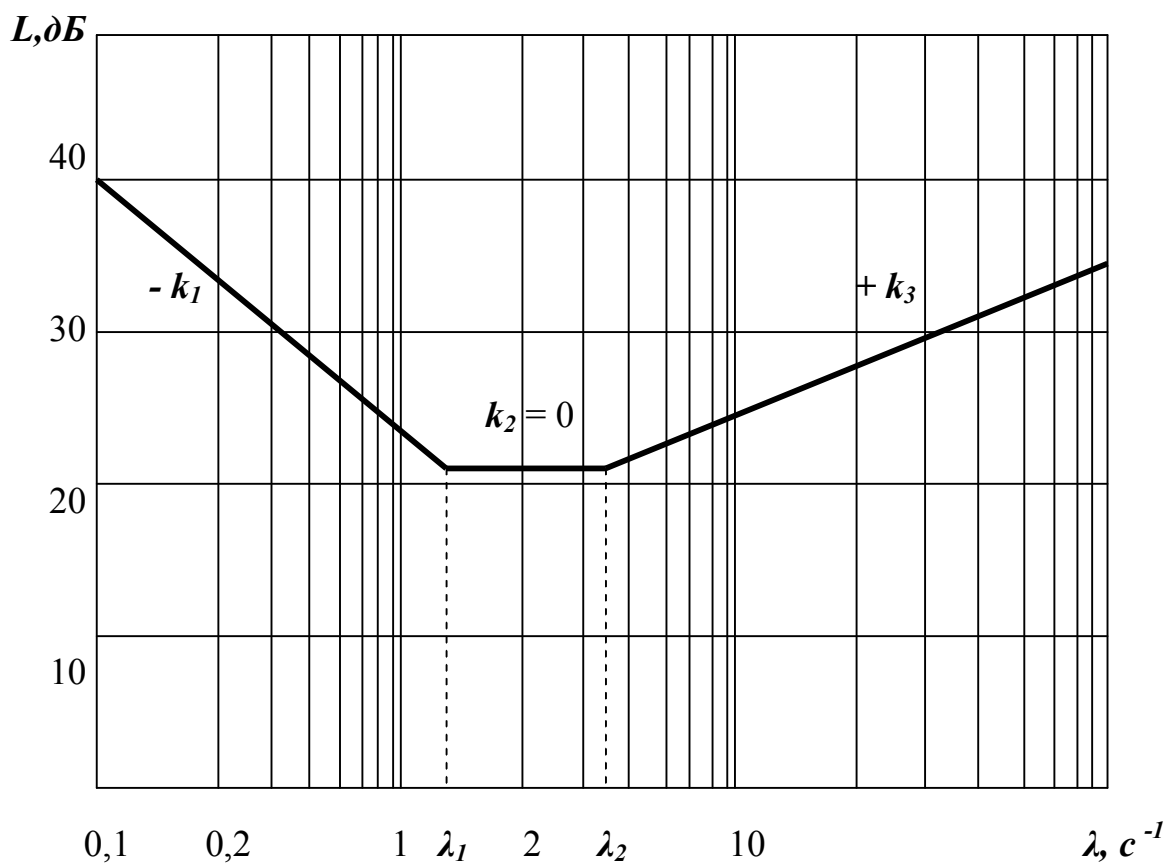


Рисунок 4.6 – ЛАЧХ ПД-елемента ЕМЕМС

реальних динамічних елементів ЕМЕМС. Розрахунки та графічні зображення цих характеристик проводяться засобами обчислювальної техніки на базі відповідного програмного забезпечення.

Початковими даними для кожного практичного завдання завжди буде передавальна функція динамічного елемента ЕМЕМС. Для її введення в ЕОМ необхідно привести її до такого вигляду:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0}, \quad (4.10)$$

де  $m$  та  $n$  – порядок відповідно числівника та знаменника передавальної функції ( $n \geq m$ ).

Отримані числові значення коефіцієнтів  $b_i$  та  $a_i$  вводяться у такому порядку: спочатку коефіцієнти числівника в міру зменшення їх степеня, а потім – коефіцієнти знаменника і теж у мірі зменшення їх степеня.

Значення коефіцієнтів початкових передавальних функцій, що наведені в практичних завданнях, залежать від варіанта завдання. Всі варіанти конкретного практичного завдання виводяться на монітор ПЕОМ. Варіант вибирається викладачем. Спілкування студента з ПЕОМ ведеться у діалоговому режимі. Програмне забезпечення практичних занять містить у собі такі основні частини:

- LAXTF – підпрограма розрахунку ЛАЧХ за передавальною функцією, що задана користувачем;
- PP – підпрограма розрахунку перехідної функції елемента за його передавальною функцією;
- DIFEQ – підпрограма моделювання елемента з плавними нелінійностями за математичним описом, що заданий користувачем;
- SENSIT – підпрограма визначення функції чутливості перехідних характеристик динамічного елемента.

Процес введення початкових даних та виклик необхідних підпрограм реалізований у вигляді відповідей користувача на питання програми, що виводяться на екран монітора. Головною формою виводу результатів моделювання є таблична (підпрограма TAB1). Крім неї, може бути застосована графічна форма виводу результатів (підпрограма GRT1).

### 4.3 Практичні завдання

1) Знайти частотні та часові характеристики пропорційно-інтегрувального коректуючого елемента (ІІ-елемент) та провести за ними дослідження його динамічних властивостей, якщо передавальна функція

має вигляд:

$$W(p) = k \cdot \frac{T \cdot p + 1}{p}.$$

2) Виконайте попереднє завдання для коректуючого елемента, що називається пропорційно-інтегрувально-диференціальним (ПІД-елементом), передавальна функція якого має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{p} \cdot (T_1 p + 1)(T_2 p + 1).$$

3) Виконайте практичне завдання №1 для коливального (періодичного) елемента, що має передавальну функцію:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2T\xi + 1}.$$

Дослідити, як стала часу  $T$  та коефіцієнт демпфування  $\xi$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ) впливають на значення резонансної частоти  $\lambda_p$ :

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{1 - 2\xi^2}{T}}$$

та на показник коливальності  $M$ :

$$M = \frac{A(\lambda_p)}{A(0)},$$

де  $A(\lambda_p) = k / 2\xi\sqrt{1-\xi^2}$ .

4) Провести аналіз за частотними та часовими характеристиками динамічних властивостей аперіодичного (інерційного) елемента другого порядку, який описується такою передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

5) Використовуючи часові та частотні характеристики, провести аналіз динамічних властивостей електродвигуна постійного струму, який для швидкості обертання вала  $\omega$  має таку передавальну функцію по вхідній напрузі якірної обмотки:

$$W_{\omega}(p) = \frac{k_{\text{я}}}{T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1},$$

де  $k_{\text{я}}$  – коефіцієнт посилення двигуна;  
 $T_{\text{я}}$  – стала часу якірної обмотки;  
 $T_{\text{м}}$  – електромеханічна стала часу;

6) Виконайте попереднє завдання, якщо вихідною величиною електродвигуна вважати кут повороту його вала  $\varphi$ :

$$\varphi = \int \omega dt.$$

7) Використовуючи часові та частотні характеристики, провести аналіз динамічних властивостей електродвигуна постійного струму, якщо для швидкості обертання вала  $\omega$  він має таку передавальну функцію по збурюючому діянні  $M_o$  (момент опору):

$$W_M(p) = -\frac{k_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1)}{T_{\text{я}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1}.$$

8) Виконайте попереднє завдання, якщо вихідною величиною електродвигуна є кут повороту його вала  $\varphi$ :

$$\varphi = \int \omega dt.$$

9) Виконайте аналіз динамічних властивостей асинхронного електродвигуна як елемента ЕМЕМС, якщо його передавальна функція для прирощення швидкості обертання  $\Delta\omega$  по прирощенню напруги на статорних обмотках  $\Delta U_S$  має вигляд:

$$W(p) = \frac{T_{\text{д}}^2 p^2 + 2T_{\text{д}} \xi_{\text{д}} p + 1}{(T_{\text{м}} p + 1)(T_{\text{к}}^2 p^2 + 2T_{\text{к}} \xi_{\text{к}} p + 1)},$$

де  $T_M = J/\beta$  – електромеханічна стала часу;  
 $J$  – момент інерції ротора;  
 $\beta$  – твердість механічних характеристик електродвигуна;  
 $T_D$  та  $T_K$  – електромагнітні сталі часу відповідно роторного та статорного електричного кола;  
 $\zeta_D$  та  $\zeta_K$  – відповідні коефіцієнти демпфування.

10) Провести аналіз генератора постійного струму незалежного збудження як елемента ЕМЕМС, якщо його передавальна функція для напруги на якірній обмотці  $U_Y$  за вхідною збуджуючою напругою  $U_3$  має вигляд:

$$W_U(p) = \frac{k_G}{T_3 p + 1},$$

а по збуджуючому діянні  $I_Y$  (струм якірної обмотки):

$$W_I(p) = -R_Y (T_Y p + 1),$$

де  $k_G$  – коефіцієнт посилення генератора по напрузі;  
 $T_3$  та  $T_Y$  – сталі часу відповідно збуджуючої та якірної обмоток;  
 $R_Y$  – опір якірної обмотки.

11) Провести аналіз системи “тиристорний перетворювач-електродвигун постійного струму”, якщо передавальна функція тиристорного перетворювача для вихідної напруги  $U_Y$  по управляючій напрузі  $U_U$  має вигляд:

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

де  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача;  
 $T_{\Pi}$  – стала часу тиристорного перетворювача.

Передавальна функція електродвигуна та ж сама, що у практичному завданні №5.

12) Провести аналіз механічної системи “електричний двигун-механічна передача-навантаження”, якщо вона являє собою двохмасову пружну систему, яка описується такою передавальною функцією для швидкості обертання вала навантаження  $\omega_2$  по моменту обертання електродвигуна  $M$ :

$$W(p) = \frac{k}{(T^2 p^2 + 1) \cdot p},$$

де  $k = 1 / (J_1 + J_2)$  – коефіцієнт посилення;

$J_1, J_2$  – моменти інерції відповідно ротора електро-двигуна та навантаження;

$T = \sqrt{J_1 J_2 / c_K (J_1 + J_2)}$  – стала часу двохмасової системи;

$c_K$  – жорсткість передачі.

13) Виконайте попереднє завдання для швидкості обертання вала електродвигуна  $\omega_I$ , якщо передавальна функція для цієї величини за моментом обертання електродвигуна  $M$  має вигляд:

$$W(p) = k \cdot \frac{T_1^2 p^2 + 1}{(T^2 p^2 + 1) \cdot p},$$

де  $T_1 = \sqrt{J_2 / c_K}$  – стала часу двохмасової системи при  $J_1 = \infty$ .

14) Провести аналіз тахогенератора як елемента ЕМЕМС, якщо для вихідної напруги  $U_{TG}$  він має таку передавальну функцію по швидкості обертання вала  $\omega$ :

$$W(p) = \frac{k_{TG}}{T_\phi p + 1},$$

де  $k_{TG}$  – коефіцієнт підсилення;

$T_\phi$  – стала часу вихідного фільтру.



## **5 Контрольні завдання**

Контрольні завдання призначені для поглибленого опанування методів та способів інженерних розрахунків механотронних систем автоматички та їх окремих елементів та пристроїв .

При виконанні контрольного завдання необхідно приводити в пояснювальній записці весь хід рішення з усіма використаними формулами, а також зробити підстановку числових значень до формул та вказати розмірності результатів обчислень в одиницях СІ. Всі обчислення необхідно доводити до кінця з точністю до одного знака після коми. Завдання повинно бути виконаним точно і акуратно з усіма необхідними поясненнями, а схеми, рисунки та графіки – на нормальних форматах у відповідності до вимог єдиної системи конструкторської документації.

Контрольне завдання оформлюється у вигляді пояснювальної записки на стандартних аркушах формату А4, або в учнівському зошиті. Сторінки, формули та рисунки повинні бути пронумерованими. На сторінках записки необхідно залишити поля шириною 3 см для зауважень рецензента. Записка повинна мати титульний лист, який містить назву університету, факультета та кафедри, номер роботи та її назву, дисципліну, прізвище та ініціали студента, його шифр та домашню адресу. В кінці записки наводиться перелік використаної літератури та ставиться підпис виконавця .

Пояснювальна записка з контрольним завданням здається або надсилається поштою до деканату для рецензування. При переробці контрольного завдання на основі зауважень рецензента необхідно робити виправлення та доповнення так, щоб викладач міг зіставити попереднє та нове рішення. При великому обсязі переробки робляться вставки на окремих аркушах або доповнення у кінці тексту. При повній переробці контрольного завдання новий варіант відсилається до деканату разом з попереднім. Обов'язковою є відповідь на всі питання та зауваження рецензента.

### **Завдання №1**

#### **“Синтез системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа”**

Визначити параметри регуляторів струму та швидкості на операційних підсилювачах для системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа; дослідити розраховану систему на стійкість; оцінити її статичну похибку за управляючим діянням, якщо заданими є:

- схема виконавчого механізму;

- маса рухової каретки та її максимальна швидкість;
- тип виконавчого електродвигуна постійного струму;
- тип силового перетворювача та його параметри;
- тип давача струму та його параметри;
- тип давача швидкості та його параметри.

### 5.1 Методика виконання контрольного завдання

◆ З каталогу підприємства – виробника або з довідників треба визначити наступні технічні дані виконавчого електродвигуна :

- $U_{\text{НОМ}}$  – номінальна напруга якорної обмотки, В;
- $I_{\text{НОМ}}$  – номінальний струм якорної обмотки, А;
- $n_{\text{НОМ}}$  – номінальна частота обертів, об/хв;
- $J_{\text{я}}$  – момент інерції якоря, кг·м<sup>2</sup>;
- $R_{\text{я}}$  – активний опір обмотки якоря, Ом;
- $L_{\text{я}}$  – індуктивність якорної обмотки, Гн;
- $P_{\text{НОМ}}$  – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

\* Дані по індуктивності якорної обмотки в довідниках можуть бути відсутніми.

\*\* Активний опір якорної обмотки в довідниках наводиться для холодної обмотки (температура дорівнює 20°C).

◆ Визначаються розрахункові характеристики електродвигуна .

- активний опір обмотки якоря при її нагріві до робочої температури 75°C :

$$R_{\text{я}}^t = R_{\text{я}} (1 + 0,004 \cdot \Delta t), \quad (5.1)$$

де  $\Delta t = 75^\circ\text{C} - T_x$  – перегрів обмотки якоря, град;

$T_x$  – температура холодної обмотки (20°C) .

- активний опір якорного кола з врахуванням внутрішнього опору силового перетворювача та давача струму :

$$R_{\text{я.ц.}} = 1,25 \cdot R_{\text{я}}^t; \quad (5.2)$$

- єдиний електромагнітний коефіцієнт електродвигуна :

$$c = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{НОМ}}}; \quad (5.3)$$

де  $\omega_{\text{НОМ}} = 2\pi n_{\text{НОМ}}/60$  – номінальна кутова швидкість обертання, рад/с;

- електромагнітна стала часу якорного кола :

$$T_E = T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я.ц}} ; \quad (5.4)$$

де  $L_{\text{я}}$  (при відсутності даних в довідниках) можна оцінити за формулою :

$$L_{\text{я}} = \beta \frac{U_{\text{НОМ}}}{p \omega_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}} , \quad (5.5)$$

де  $\beta = 0,25 \div 0,6$  – емпіричний коефіцієнт ;

$p$  – кількість пар полюсів збудження електродвигуна (для всіх контрольних завдань беремо  $p=1$ ).

- статичний коефіцієнт передачі електродвигуна:

$$k_{\text{я}} = 1/c ; \quad (5.6)$$

- електромеханічна стала часу електродвигуна разом з навантаженням:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} R_{\text{я.ц.}}}{c^2} ; \quad (5.7)$$

де  $J_{\Sigma} = J_{\text{я}} + J_{\text{р}} + J_{\text{к}}$  - загальний приведений момент інерції рухомих мас виконавчого механізму та каретки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$J_{\text{р}} = (0,1 \div 0,15) J_{\text{я}}$  – приведений момент інерції елементів узгоджувального редуктора (враховуються моменти інерції тільки перших зубчатих коліс , що обертаються з великими швидкостями);

$J_{\text{к}} = \rho^2 m$  – приведений момент інерції каретки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\rho = v_{\text{к}} / \omega_{\text{НОМ}}$  – радіус приведення для лінійно рухомої каретки, м/рад .

При наявності інших даних електромеханічну сталу часу можна розрахувати за такою формулою :

$$T_M = J_{\Sigma} \cdot R_{\text{я.ц.}} \cdot I_{\text{НОМ}}^2 \cdot \omega_{\text{НОМ}}^2 / P_{\text{НОМ}}^2 . \quad (5.8)$$

\* Якщо в якості давача швидкості використовується тахогенератор, що з'єднаний безпосередньо з валом електродвигуна, то до  $J_{\Sigma}$  необхідно ще додати момент інерції якоря тахогенератора  $J_{\text{ТГ}}$ .

◆ Вибирається структурна схема системи регулювання та визначаються передавальні функції її блоків.

\* Найбільшого розповсюдження набула схема підпорядкованого регулювання (рис.5.1). Структурна схема електродвигуна постійного струму на ній наведена в спрощеному вигляді (без врахування внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС та статичного моменту опору механізму координатографа).

Передавальні функції блоків незмінної частини системи підпорядкованого регулювання на рис.5.1. визначаються за такими формулами:

- електричної частини виконавчого електродвигуна:

$$W_{Я}(p) = \frac{I_{Я}(p)}{U_{Я}(p)} = \frac{1}{1+T_{E}p}, \quad (5.9)$$

- механічної частини виконавчого електродвигуна:

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega_{д}(p)}{I_{Я}(p)} = \frac{k_{Я}(p)}{T_{M}p}; \quad (5.10)$$

- виконавчого механізму:

$$W_{ВМ}(p) = \frac{v_{к}(p)}{\omega_{д}(p)} = \rho; \quad (5.11)$$

- мостового тиристорного перетворювача (силового перетворювача):

$$W_{П}(p) = \frac{U_{Я}(p)}{U_{У}(p)} = \frac{k_{П}}{1+T_{П}p}, \quad (5.12)$$

де  $k_{П}$  – статичний коефіцієнт передачі перетворювача;

$T_{П}$  – стала часу перетворювача;

- давача струму (вимірювальний опір та операційний підсилювач) :

$$W_{ДС}(p) = \frac{U_{I}(p)}{I_{Я}(p)} = k_{ДС}; \quad (5.13)$$

- давача швидкості обертання (тахогенератор з фільтруючою ємністю на виході):

$$W_{ДШ}(p) = \frac{U_{\omega}(p)}{\omega_{д}(p)} = \frac{k_{ДШ}(p)}{1+T_{ДШ}(p)}, \quad (5.14)$$

де  $k_{ДШ}$  – статичний коефіцієнт передачі тахогенератора, В/рад/с;

$T_{ДС}$  – стала часу тахогенератора.

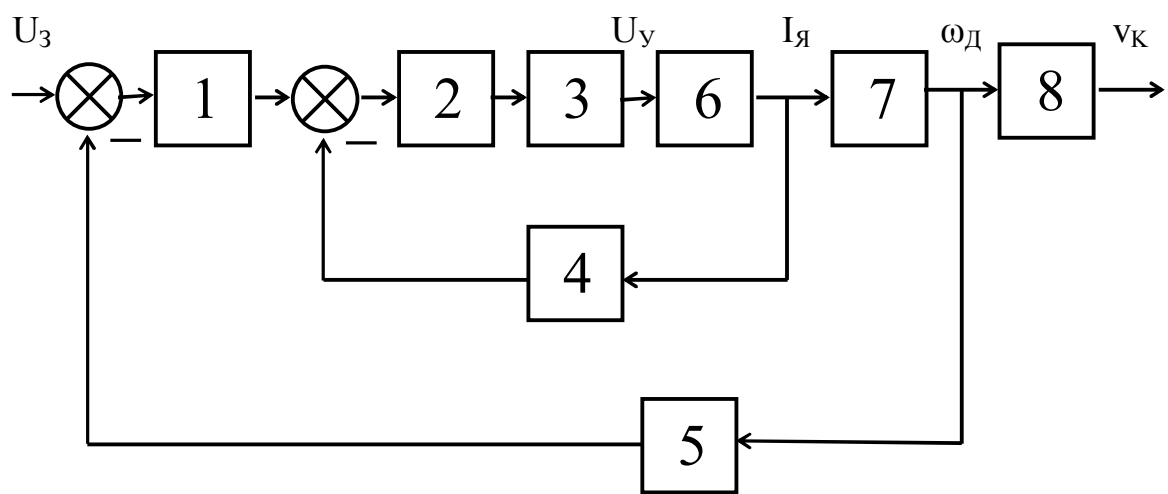


Рис.5.1 - Структурна схема підпорядкованого регулювання системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа (1 – регулятор швидкості ; 2 – регулятор струму ; 3 -силовий перетворювач ; 4 – давач струму ; 5 – давач швидкості ;6 – електрична частина електродвигуна ; 7 – механічна частина електродвигуна ; 8 – виконавчий механізм )

◆ Визначаються параметри регулятора струму:

- записується передавальна функція незмінної частини контура регулювання струму:

$$W_{HC}(p) = W_{II}(p) \cdot W_{Я}(p) = \frac{k_{II}}{(1+T_{II}p)(1+T_E p)}; \quad (5.15)$$

- для компенсації найбільшої сталої часу  $T_E$  цієї незмінної частини контура передавальна функція регулятора струму (бажана передавальна функція) повинна мати такий вигляд (ПІ – регулятор):

$$W_{PC}(p) = \frac{(1+T_E p)}{T_{PC} p}; \quad (5.16)$$

- тоді передавальна функція розімкнутого контура регулювання струму буде мати такий вигляд :

$$W_{C,PO3}(p) = W_{PC}(p) \cdot W_{HC}(p) = \frac{k_{II}}{T_{PC} p (1+T_{II} p)}; \quad (5.17)$$

- передавальна функція замкненого контура регулювання струму (при замиканні зворотного зв'язку через давач струму) буде мати такий вигляд:

$$W_C(p) = \frac{W_{C,PO3}(p)}{1+W_{C,PO3}(p)W_{ДС}(p)} = \frac{1}{k_{ДС}} \cdot \frac{1}{1+T_{PC} p (1+T_{II} p) / k_{II} k_{ДС}}; \quad (5.18)$$

- виконується настроювання регулятора струму на оптимум за модулем, що передбачає висунення такої умови:

$$\frac{T_{PC}}{k_{II} k_{ДС}} = 2T_{II}, \quad (5.19)$$

звідки визначається потрібна стала часу регулятора струму:

$$T_{PC} = 2T_{II} k_{II} k_{ДС}; \quad (5.20)$$

- записується загальна передавальна функція контура регулювання струму при оптимальному настроюванні регулятора струму:

$$W_{КС}(p) = \frac{1}{k_{ДТ}} \cdot \frac{1}{1+2T_{II} p (1+T_{II} p)} \approx \frac{1}{k_{ДС}} \cdot \frac{1}{1+2T_{II} p}. \quad (5.21)$$

◆ Визначаються параметри регулятора швидкості руху каретки координатографа:

- передавальна функція незмінної частини контура регулювання швидкості має такий вигляд:

$$W_{НШ}(p) = W_{КС}(p)W_{\omega}(p) = \frac{1}{k_{ДС}} \cdot \frac{1}{1+2T_{П}p} \cdot \frac{k_{Я}}{T_{М}p}; \quad (5.22)$$

- для компенсації найбільшої сталої часу  $T_{М}$  цієї незмінної частини передавальна функція регулятора швидкості (бажана передавальна функція) повинна мати такий вигляд ( $\Pi$  – регулятор):

$$W_{РШ}(p) = \frac{T_{М}}{T_{РШ}}; \quad (5.23)$$

- тоді передавальна функція розімкнутого контура регулювання швидкості буде мати такий вигляд:

$$W_{Ш.РОЗ}(p) = W_{РШ}(p) \cdot W_{НШ}(p) = \frac{k_{Я}}{k_{ДС}T_{РШ}(1+2T_{П}p)}; \quad (5.24)$$

- при замиканні зворотного зв'язку через тахогенератор передавальна функція замкненого контура регулювання швидкості буде мати такий вигляд:

$$W_{Ш}(p) = \frac{W_{Ш.РОЗ}(p)}{1+W_{Ш.РОЗ}(p)W_{ДШ}(p)} = \frac{(1+T_{ДШ}p)/k_{ДШ}}{1+k_{ДС}T_{РШ}p(1+2T_{П}p)(1+T_{ДШ}p)/k_{Я}k_{ДШ}}, \quad (5.25)$$

а при знехтуванні малої сталої часу тахогенератора  $T_{ДШ}$ :

$$W_{Ш}(p) = \frac{1}{k_{ДШ}} \cdot \frac{1}{1+k_{ДС}T_{РШ}p(1+2T_{П}p)/k_{Я}k_{ДШ}}; \quad (5.26)$$

- виконується настроювання регулятора швидкості на оптимум за модулем, що передбачає висунення умови:

$$\frac{k_{ДШ}T_{РШ}}{k_{Я}k_{ДШ}} = 2 \cdot (2T_{П}) = 4T_{П}, \quad (5.27)$$

звідки стала часу регулятора швидкості для оптимального настроювання повинна дорівнювати:

$$T_{РШ} = 4T_{П}k_{Я}k_{ДШ} / k_{ДС}; \quad (5.28)$$

- визначається загальна передавальна функція оптимізованого контура регулювання швидкості:

$$W_{кш}(p) = \frac{1}{k_{дш}} \cdot \frac{1}{1+4T_{п}p(1+2T_{п}p)} \approx \frac{1}{k_{дш}} \cdot \frac{1}{1+4T_{п}p}. \quad (5.29)$$

◆ За отриманими передавальними функціями оптимізованих регуляторів струму та швидкості виконується їх схемна реалізація на основі операційних підсилювачів. Загальний підхід при схемній реалізації аналогових динамічних ланок за їх бажаними передавальними функціями та необхідні розрахункові співвідношення наведені, наприклад, в [5, с. 96-99]. При цьому необхідно визначити схему регуляторів та стандартні номінали всіх елементів, що входять до цих схем.

◆ Розрахована система стабілізації швидкості руху каретки координатографа досліджується на стійкість .

Для цього будуються логарифмічна амплітудно-частотна (ЛАЧХ) та фазо-частотна (ФЧХ) характеристики розімкнутого контура регулювання швидкості при визначених параметрах оптимізованих регуляторів. За цими характеристиками визначаються запаси стійкості за амплітудою  $m$  та за фазою  $\Delta\phi$ . Запас стійкості за амплітудою визначається по значенню ЛАЧХ на частоті, де фаза передавальної функції (ФЧХ) досягає значення мінус  $180^\circ$ . Запас стійкості за фазою визначається з ФЧХ, як відстань ( в градусах) від ФЧХ в точці зрізу (де ЛАЧХ перетинає вісь абсцис) до рівня мінус  $180^\circ$ .

Для нормальної роботи системи стабілізації рекомендуються такі значення запасів стійкості:  $m =$  мінус (8...10) дБ ;  $\Delta\phi = 30...40^\circ$ .

◆ Оцінюється статична похибка системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа.

- статична абсолютна похибка стабілізації швидкості руху каретки координатографа визначається значеннями статичних коефіцієнтів передачі давача швидкості  $k_{дш}$  та розімкнутого контура регулювання швидкості  $k_{ш.роз}$ :

$$\Delta v_K = \frac{v_K}{k_{дш} k_{ш.роз}}, \quad (5.30)$$

де

$$k_{ш.роз} = \frac{1}{4T_{п} k_{дш}}; \quad (5.31)$$

- відносна статична похибка стабілізації швидкості руху каретки координатографа за абсолютним значенням дорівнює :



Таблиця 5.1 - Початкові дані для виконання контрольного завдання № 1

Номер варіан- та	Виконавчий механізм		Електро- двигун	Силовий перетворювач		Давач струму	Давач швидкості (тахо- генератор)
	m , кг	v <sub>к</sub> , м/с	Тип	k <sub>п</sub> , В/В	T <sub>п</sub> , с	k <sub>дс</sub> , В/А	Тип
1	0,1	5	МИ-11	10	0,0033	20	СЛ-121
2	0,2	5	МИ-12	10	0,0067	20	СЛ-161
3	0,3	7	МИ-21	15	0,0045	20	СЛ-221
4	0,4	7	МИ-22	15	0,0015	30	СЛ-261
5	0,5	5	МИ-31	5	0,01	30	ТГ-1
6	0,6	7	СЛ-221	30	0,015	30	ТГ-2
7	0,4	4	СЛ-221А	30	0,015	30	ТГ-3
8	0,5	7	СЛ-261	40	0,005	25	ТГП-1
9	0,4	10	СЛ-261А	25	0,015	20	ТД-101
10	0,2	8	СЛ-281	20	0,001	10	ТД-102
11	0,1	3	СЛ-321	10	0,02	15	ТД-103
12	0,7	2	СЛ-361	18	0,025	20	ТД-103ПМ
13	0,6	1	СЛ-369	25	0,004	30	ТД-201
14	0,5	0,5	СЛ-369А	40	0,003	30	ТД-201ПМ
15	0,4	2	СЛ-369Б	30	0,033	20	ТД-110
16	0,3	4	СЛ-521	20	0,015	15	ТД-121
17	0,2	6	СЛ-521К	15	0,01	20	ТД-263
18	0,5	4	СЛ-569	30	0,006	15	СЛ-121
19	0,6	3	СЛ-569К	20	0,007	10	СЛ-161
20	0,4	2	СЛ-571К	40	0,008	4	СЛ-221
21	0,3	1	СЛ-621	30	0,01	30	СЛ-261
22	0,7	0,5	СЛ-661	10	0,005	30	ТД-103
23	0,2	4	МИ-11	25	0,015	25	ТГ-1
24	0,8	6	МИ-12	40	0,0045	40	ТГ-2
25	0,4	3	СЛ-221	30	0,0067	30	ТД-201
26	0,3	5	СЛ-321	20	0,02	5	ТД-121
27	0,6	7	МИ-21	30	0,004	20	ТГП-1
28	0,5	1	СЛ-521	15	0,012	15	СЛ-261
29	0,2	2,5	СЛ-369Б	10	0,025	20	ТД-263
30	0,7	5	МИ - 31	15	0,0033	30	ТД-103ПМ

$$\delta_K = 4T_{II}. \quad (5.32)$$

## 5.2 Варіанти контрольних завдань

Єдина для всіх варіантів контрольних завдань кінематична схема виконавчого механізму координатографа для однієї просторової координати  $X$  наведена на рис.5.2. Електродвигун ЕД через виконавчий механізм ВМ рухає каретку координатографа  $K$  з максимальною швидкістю уздовж координати  $X$  робочого столу і зупиняє її в потрібних точках з заданою точністю .

Початкові дані для різних варіантів контрольних завдань наведені в таблиці 5.1, де позначені:  $m$  – маса рухомої каретки (в кг),  $v_K$  – максимальна швидкість руху каретки (в м/с),  $k_{II}$  – статичний коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача (в В/В),  $T_{II}$  – стала часу тиристорного перетворювача (в секундах) та  $k_{ДС}$  – статичний коефіцієнт передачі давача струму (в В/А). Технічні дані виконавчих електродвигунів постійного струму наведені в додатку 1 , а технічні дані тахогенераторів, що використовуються в якості давачів швидкості, наведені в додатку 2 .

### Завдання №2

#### “Синтез цифрового регулятора переміщень каретки координатографа”

Синтезувати цифровий регулятор переміщення каретки координатографа з врахуванням передавальної функції підпорядкованого контуру регулювання швидкості, розробити алгоритм та програму роботи мікропроцесора чи однокристальної мікро-ЕОМ , які виконують функцію цифрового регулятора переміщення. Тип мікропроцесора чи однокристальної мікро –ЕОМ вибрати самостійно .

## 5.3 Методика виконання контрольних завдань

Кінематична схема виконавчого механізму координатографа наведена на рис.5.2.

Структурна схема системи стабілізації швидкості руху каретки координатографа , що підпорядкована цифровому контуру регулювання переміщень каретки , наведена на рис.5.1.

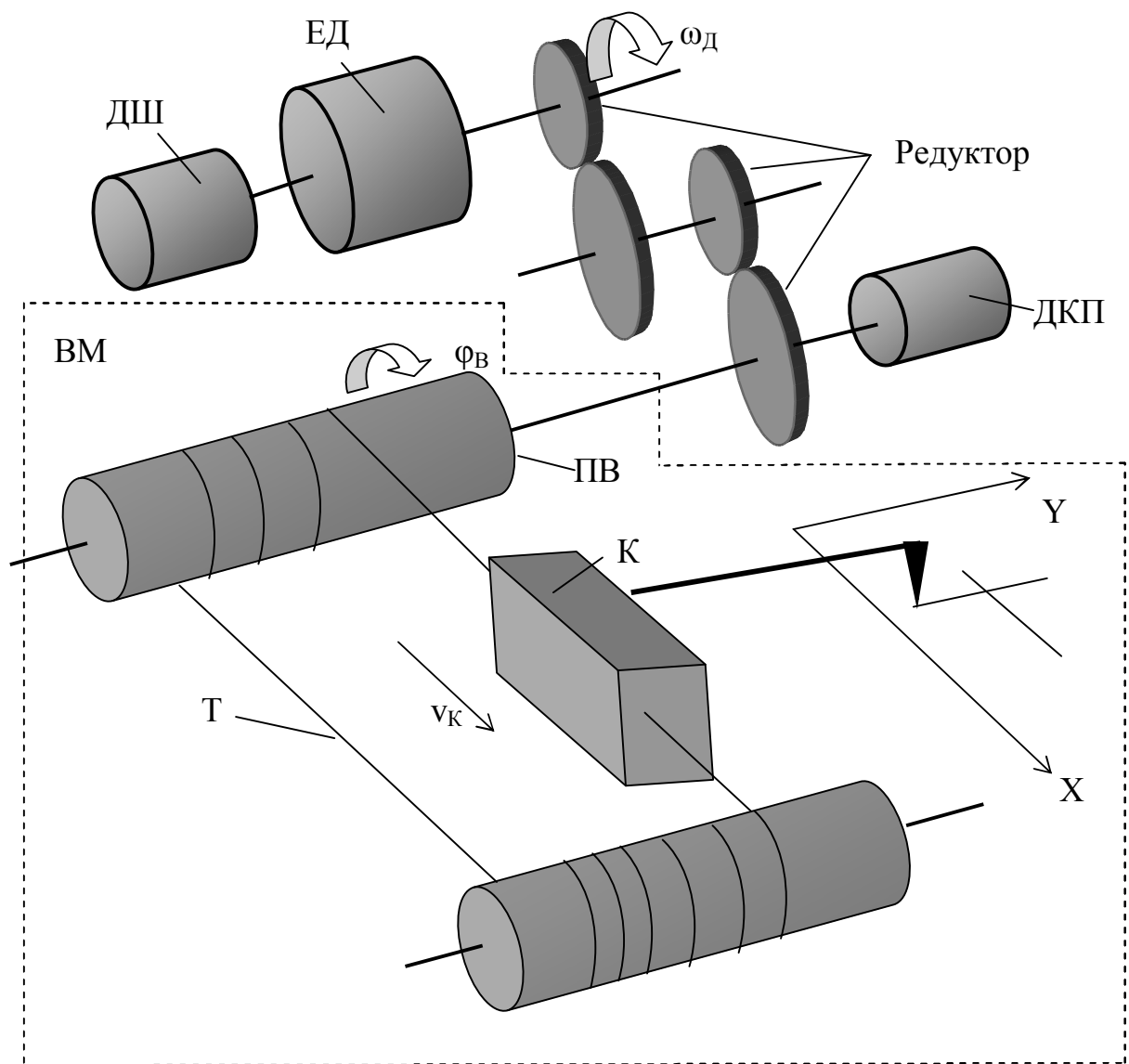


Рис.5.2 - Кінематична схема механізму координатографа (ДШ – давач швидкості , ЕД – виконавчий електродвигун , ДКП - давач кутових переміщень , К – каретка , ВМ – виконавчий механізм; ПВ – приводний валик; Т –приводний трос)

Структурна схема цифрового контура регулювання переміщень каретки координатографа наведена на рис.5.3.

Синтез цифрового регулятора переміщень можна здійснити або частотним способом в  $Z$ -області , або способом простору станів .

При застосуванні першого способу порядок дій такий :

- за передавальною функцією незмінної частини контура переміщень  $W_{НП}(p)$ , що містить в собі передавальну функцію підпорядкованого контура швидкості  $W_{КШ}(p)$ , знаходять бажану безперервну передавальну функцію регулятора переміщень каретки  $W_{РП}(p)$  , яка забезпечує необхідні динамічні властивості (показники якості регулювання) цього контура ;
- за допомогою  $Z$ -перетворення переходять від безперервної передавальної функції регулятора переміщень  $W_{РП}(p)$  до дискретної передавальної функції цифрового регулятора переміщень  $W_{РП}(z)$  ;
- використовуючи одну з форм представлення дискретної передавальної функції  $W_{РП}(z)$  – безпосередню , канонічну або паралельну – будують структурну схему її цифрової реалізації ;
- на основі структурної схеми цифрової реалізації регулятора переміщень складають алгоритм та програму роботи мікропроцесора або мікро-ЕОМ , на основі яких програмно реалізується цифровий регулятор переміщень каретки координатографа .

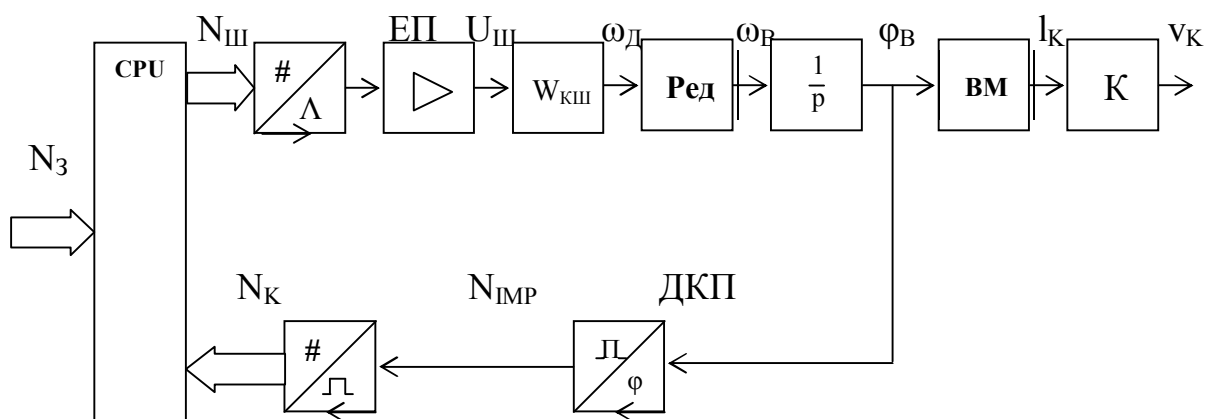


Рис.5.3 - Структурна схема цифрового контура регулювання переміщень каретки координатографа (Ред–редуктор ; ВМ–виконавчий механізм; К–каретка; ЕП–електронний підсилювач; ДКП–давач кутових переміщень)

В загальному вигляді замкнений контур швидкості може бути представленим у вигляді передавальної функції другого порядку

$$W_{кш}(p) = \frac{\omega_{0ш}^2}{p^2 + 2\xi_{ш}\omega_{0ш}p + \omega_{0ш}^2}. \quad (5.33)$$

У цьому виразі власна частота незагасаючих коливань  $\omega_{0ш}$  контура швидкості та коефіцієнт демпфування  $\xi_{ш}$  визначаються структурою та настроюванням контура швидкості.

Для контура швидкості без підпорядкованого контура струму з ПІ-регулятором швидкості маємо:

$$\omega_{0ш} = \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot T_E}; \xi_{ш} = 0,707, \quad (5.34)$$

де  $T_E$  – електромагнітна стала часу якірного кола електродвигуна.

Для контура швидкості без підпорядкованого контура струму з ПІД-регулятором швидкості маємо:

$$\omega_{0ш} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot T_{II}}; \xi_{ш} = 0,707, \quad (5.35)$$

де  $T_{II}$  – стала часу тиристорного перетворювача, що живить електро-двигун.

Для контура швидкості з підпорядкованим контуром струму, в свою чергу, маємо:

$$\omega_{0ш} = \frac{1}{8\sqrt{2} \cdot T_{II}}; \xi_{ш} = 0,707. \quad (5.36)$$

Тоді згідно з рисунком 5.3 безперервна незмінна частина контура регулювання переміщення каретки координатографа, з врахуванням якої треба проводити синтез регулятора переміщень (знаходити його бажану безперервну передавальну функцію  $W_{рп}(p)$ ), буде мати таку передавальну функцію

$$W_{\text{ПП}}(p) = W_{\text{ЕП}}(p) \cdot W_{\text{КШ}}(p) \cdot \frac{i}{p}, \quad (5.37)$$

де  $W_{\text{ЕП}}(p) = k_{\text{ЕП}}/(1+T_{\text{ЕП}} p)$  – передавальна функція електронного підсилювача ЕП, що характеризується коефіцієнтом передачі  $k_{\text{ЕП}}$  та сталою часу  $T_{\text{ЕП}}$ ;

$i$  – передавальне число редуктора Ред.

#### 5.4 Варіанти контрольних завдань

Початкові дані для різних варіантів контрольних завдань наведені в таблиці 5.2, де введені такі позначення  $T_{\text{ЕП}}$  – стала часу електронного підсилювача;  $k_{\text{ЕП}}$  – коефіцієнт передачі електронного підсилювача;  $T_{\text{П}}$  – стала часу тиристорного перетворювача;  $i$  – передавальне число редуктора. Шляхом посилання на відповідні формули (5.34) ÷ (5.36) в таблиці задається структура та спосіб настроювання підпорядкованого контуру швидкості. При цьому тип електродвигуна необхідний тільки при використанні формул (5.34) для розрахунку сталої часу  $T_{\text{Е}}$  за формулами (5.4) та (5.5) цієї методички. Номінальні значення технічних параметрів електродвигунів наведені в додатку 1.

#### Завдання №3

##### **“Розробка апаратної та програмної частин цифрового зворотного зв’язку по переміщенню каретки координатографа”**

Розробити апаратну частину (принципову електричну схему) цифрового зворотного зв’язку, що містить в собі давач кутових переміщень ДКП та перетворювач “імпульси–код”(рисунок 5.3). Ця схема призначена для введення значень поточних переміщень каретки координатографа в мікропроцесорний пристрій CPU (мікропроцесор чи однокристальна мікро-ЕОМ). Розробити алгоритм та програму роботи CPU для розрахунку реального значення лінійних переміщень каретки координатографа по значенню введеного з апаратної частини цифрового коду. Тип мікропроцесора чи однокристальної мікро-ЕОМ, а також схему перетворювача “імпульси – код”, вибрати самостійно.

Таблиця 5.2 - Початкові дані для виконання контрольного завдання № 2

Номер варіанта	Формули для визначення параметрів $W_{кш(р)}$	Електро-двигун	Силовий перетворювач	Редуктор	Електронний підсилювач	
	Номер	Тип	$T_{п,с}$	$i$	$T_{ЕП,с}$	$k_{ЕП}$
1	5.34	МИ-11	0,0033	10	0,0015	2
2	5.35	МИ-12	0,0067	12	0,0012	6
3	5.36	МИ-21	0,0045	30	0,0017	10
4	5.34	МИ-22	0,0015	23	0,002	8
5	5.35	МИ-31	0,01	18	0,001	4
6	5.36	СЛ-221	0,015	6	0,0015	12
7	5.34	СЛ-221А	0,015	14	0,0012	8
8	5.35	СЛ-261	0,005	35	0,0017	4
9	5.36	СЛ-261А	0,015	40	0,002	2
10	5.34	СЛ-281	0,001	22	0,001	6
11	5.35	СЛ-321	0,02	10	0,0015	10
12	5.36	СЛ-361	0,025	12	0,0012	8
13	5.34	СЛ-369	0,004	30	0,0017	12
14	5.35	СЛ-369А	0,003	23	0,002	4
15	5.36	СЛ-369Б	0,033	18	0,001	12
16	5.34	СЛ-521	0,015	6	0,0015	8
17	5.35	СЛ-521К	0,01	14	0,0012	4
18	5.36	СЛ-569	0,006	35	0,0017	2
19	5.34	СЛ-569К	0,007	40	0,002	2
20	5.35	СЛ-571К	0,008	22	0,001	6
21	5.36	СЛ-621	0,01	10	0,0015	10
22	5.34	СЛ-661	0,005	12	0,0012	8
23	5.35	МИ-11	0,015	30	0,0017	4
24	5.36	МИ-12	0,0045	23	0,002	12
25	5.34	СЛ-221	0,0067	18	0,001	8
26	5.35	СЛ-321	0,02	6	0,0015	4
27	5.36	МИ-21	0,004	14	0,0012	8
28	5.34	СЛ-521	0,012	35	0,0017	4
29	5.35	СЛ-369Б	0,025	40	0,002	12
30	5.36	МИ - 31	0,0033	22	0,001	14

## 5.5 Методика виконання контрольного завдання

Цифровий зворотний зв'язок призначений для забезпечення з необхідною точністю цифрового регулятора переміщень інформацією про реальні лінійні переміщення каретки координатографа. Ця інформація використовується цифровим регулятором переміщень для розрахунку управляючого діяння на підпорядкований контур швидкості.

В даному контрольному завданні в колі цифрового зворотного зв'язку в якості давача кутових переміщень використовується високочутливий фотоелектричний імпульсний давач типу ВЕ-178, що має коефіцієнт перетворення  $k_{ДП}=5000$  імпульсів/оборот. Давач ВЕ-178 жорстко з'єднаний з віссю приводного валика виконавчого механізму ВМ (рисунок 5.2). Цей валик має діаметр  $D_B$  і при своєму обертанні через тонкий трос приводить до лінійного руху каретки К. Давач ВЕ-178 перетворює обертальні переміщення валика в вихідні імпульси, кількість яких залежить від кута повороту валика.

Кутові переміщення приводного валика  $\varphi_B$  пов'язані з лінійними переміщеннями каретки  $l_K$  таким чином:

$$\varphi_B = \frac{2\pi l_K}{\pi D_B} = \frac{2l_K}{D_B} [rad]. \quad (5.38)$$

При цьому на виході давача ВЕ-178 сформується  $N_{ИМП}$  імпульсів:

$$N_{ИМП} = k_{ДП} \cdot \varphi_B / 2\pi. \quad (5.39)$$

Цю кількість імпульсів необхідно перетворити в цифровий код потрібної розрядності, виходячи з максимально можливого переміщення каретки по полю координатографа  $L$  та заданої похибки позиціонування каретки в кінцевій точці траєкторії. Тому для визначення розрядності цифрового представлення необхідно розрахувати максимальну кількість імпульсів, що потребують перетворення в код при максимально можливому переміщенні каретки  $L$ , а також врахувати те, що похибка одного переміщення каретки  $\Delta l$  рівна половині значення молодшого розряду цього коду.

Зростання цієї похибки відбувається також в результаті її накопичення в колі зворотного зв'язку (за рахунок просковзування тросу по валику). Це накопичення не компенсується регулятором переміщень, бо давач переміщень реагує саме на переміщення каретки, а не на її положення на полі координатографа. Тому для виключення накопичення цієї похибки на кожному черговому переміщенні каретки можливо або програмно організувати повернення каретки на початок поля та пуск її з



цього вихідного положення при кожному новому переміщенні, або повертати каретку в вихідне (початкове) положення після визначеної кількості виконаних переміщень, або ввести в апаратну частину кілька проміжних шляхових перемикачів, що монтуються уздовж можливих переміщень каретки. В останньому випадку треба в момент прохордження каретки біля того чи іншого шляхового перемикача (перемикач спрацьовує) програмно організувати порівняння реального положення каретки, що визначається розрахунковим шляхом по інформації з давача ВЕ-178, та положення цього шляхового перемикача, що зберігається в пам'яті СРU. Якщо при порівнянні виявлена розбіжність, тобто похибка визначення положення каретки, то необхідно ввести поправку в результат обчислень в програмі цифрового зворотного зв'язку.

### 5.6 Варіанти контрольних завдань

Початкові дані для різних варіантів контрольних завдань наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 Початкові дані для виконання контрольного завдання №3

Номер варіанта	Приводний валик	Каретка	
	$D_B$ , мм	$L$ , мм	$\Delta l$ , мм
1	30	400	0,1
2	40	500	0,3
3	50	600	0,2
4	60	400	0,15
5	50	300	0,25
6	40	450	0,35
7	30	320	0,15
8	20	180	0,1
9	40	380	0,3
10	60	600	0,4
11	35	250	0,2
12	40	300	0,3
13	25	200	0,25
14	60	500	0,15
15	45	450	0,35

При виконанні контрольного завдання необхідно апаратними чи програмними засобами обов'язково виключити процес накопичення похибки визначення положення каретки, що описаний вище.

#### Завдання №4

### “Розробка програми цифрового формувача задаючого діяння на контур регулювання переміщень каретки”

Розробити алгоритм та програму роботи мікропроцесорного пристрою CPU, що входить до складу системи управління переміщеннями каретки координатографа (рисунок 5.3), для формування задаючого діяння на контур регулювання переміщень з метою досягнення максимальної швидкодії координатографа при заданій точності позиціювання каретки в кінцевій точці переміщення.

#### 5.7 Методика виконання контрольного завдання

Вихідний сигнал цифрового регулятора переміщень каретки координатографа, що реалізований програмно, є вхідним задаючим сигналом для контура регулювання швидкості (рисунок 5.3), що реалізований апаратно.

Алгоритм розгону електродвигуна має певні особливості. При необхідності переміщення каретки К (дивись кінематичну схему координатографа на рисунку 5.2) на велику відстань уздовж координати X по полю координатографа на виході регулятора переміщення спочатку виникає значний сигнал завдання  $N_{ш}$  на контур швидкості, що обумовлений великим сигналом розузгодженості на вході цифрового регулятора переміщення. Цей сигнал  $N_{ш}$  може в кілька разів перевищувати завдання, що відповідає номінальній швидкості приводного електродвигуна  $\omega_{ном}$ . Тому програмно необхідно обмежити це завдання на рівні  $N_{шном}$ , що відповідає номінальній швидкості електродвигуна. Це обмеження повинно діяти до тих пір, поки вихідний сигнал регулятора переміщень, що формується згідно з реалізованим законом регулювання, не стане меншим за  $N_{шном}$ . Після цього на контур швидкості вже повинен подаватися сигнал  $N_{ш}$ . За час цих процесів контур швидкості відпрацьовує вхідне завдання і розганяє електродвигун до номінальної швидкості  $\omega_{ном}$ . Процес пуску електродвигуна закінчується і каретка починає рухатись з максимально допустимою швидкістю (номінальною).

Для точної зупинки каретки в заданій точці позиціювання необхідно здійснити гальмування електродвигуна також за певним алгоритмом. При цьому швидкість електродвигуна можна змінювати шляхом програмного формування сигналу  $N_{ш}$ . Якщо цього не робити, то може виникнути така ситуація, коли при підході до заданої точки завдання  $N_{ш}$  з регулятора переміщень знизиться до рівня, що менший за напругу зрушення електродвигуна, і він зупиниться заздалегідь, не дотягнувши до точки

позиціонування каретки. Тому програмно треба підготувати гальмування, а саме, на певній відстані від точки позиціонування знизити завдання по швидкості до  $N_{Ш\text{мін}}$ , що не дасть електродвигуну самостійно зупинитися, а потім на відстані  $N_{ГАЛЬМ}$ , що дорівнює шляху зупинки відключеного електродвигуна за рахунок сил тертя, виконати відключення електродвигуна (встановити  $N_{Ш}=0$ ). Тоді каретка по інерції перейде в задану точку і зупиниться за рахунок сил тертя в механізмі. Величина  $N_{ГАЛЬМ}$  (цифровий код, що відповідає реальному переміщенню) визначається експериментально на діючому зразку електропривода і записується в пам'ять CPU.

При розробці програми цифрового формувача необхідно звернути увагу на випадок, коли каретку необхідно перемістити на невелику відстань. При цьому з самого початку руху завдання з регулятора переміщень не буде перевищувати  $N_{Ш\text{ном}}$ . Тому електродвигун не встигне розігнатися до номінальної швидкості за час пуску. В даному випадку управління контуром швидкості треба здійснювати безпосередньо від регулятора переміщень за сигналом  $N_{Ш}$ . Гальмування електродвигуна ( $N_{Ш}=0$ ) треба здійснити тоді, коли відстань до точки позиціонування стане дорівнювати  $N_{ГАЛЬМ}$ . При цьому швидкість електродвигуна повинна вже бути зниженою програмно до рівня, що відповідає  $N_{Ш\text{мін}}$ .

Можливо застосувати більш складний алгоритм, коли в пам'яті CPU зберігаються значення експериментально визначених шляхів гальмування  $N_{ГАЛЬМі}$  для дискретних значень швидкості електродвигуна  $\omega_i$ . Мікропроцесорний пристрій повинен постійно порівнювати реальну швидкість електродвигуна (обраховується по коду переміщень каретки  $N_K$  як перша різниця), поточну відстань до точки позиціонування  $N_3 - N_K$  та значення шляхів гальмування  $N_{ГАЛЬМі}$ , що зберігаються в пам'яті. Тоді, коли буде виконуватись умова

$$\begin{aligned} N_3 - N_K &\leq N_{ГАЛЬМі} + N_{\Delta\ell}, \\ \omega_D &\leq \omega_{Dі}, \end{aligned} \tag{5.40}$$

де  $N_{\Delta\ell}$  – код заданої похибки позиціонування, необхідно виконати гальмування електродвигуна ( $N_{Ш}=0$ ).

## Завдання №5

### “Розробка системи виведення для цифрового регулятора переміщень каретки”

Розробити принципову схему та програмне забезпечення для виведення управляючого сигналу з цифрового регулятора переміщень, реалізованого програмно в CPU (рисунок 5.3), на підпорядкований контур швидкості з врахуванням технічних характеристик електродвигуна та виконавчого механізму координатографа.

#### 5.8 Методика виконання контрольного завдання

При виведенні вихідного сигналу цифрового регулятора переміщень необхідно програмно забезпечити його обмеження на рівні, що відповідає номінальній швидкості обертання електродвигуна координатографа  $\omega_{\text{НОМ}}$ . Це потрібно для виключення можливих перевантажень силової частини електропривода (тиристорний перетворювач та якірна обмотка електродвигуна) під час пуску.

В такому разі, вихідна напруга  $U_{\text{Ш}}$  системи виведення, що подається на контур швидкості з електронного підсилювача ЕП (див. рисунок 5.3), обмежується також величиною  $U_{\text{Ш макс}}$ . Ця напруга визначається з врахуванням статичного коефіцієнта передачі контура швидкості  $k_{\text{Ш}}$  та номінального значення швидкості обертання електродвигуна  $\omega_{\text{НОМ}}$ . Для забезпечення реверсу електродвигуна система виведення повинна формувати двополярну напругу в діапазоні  $\pm U_{\text{Ш макс}}$ . Виходячи з цього діапазона та потрібної дискретності регулювання швидкості  $\Delta\omega$ , можна визначити необхідну розрядність ЦАП системи виведення та вирішити питання про необхідність використання електронного підсилювача ЕП. Коефіцієнт підсилення ЕП розраховується після того, як вибрана типова схема ЦАП, її напруга живлення та можливий діапазон вихідної напруги схеми. Схема підсилювача повинна забезпечувати реверс електродвигуна, тобто зміну полярності її вихідної напруги. При цьому сигнал на реверс може бути сформованим або шляхом зміни полярності вихідної напруги ЦАП при відповідній зміні вхідного цифрового коду, або за додатковим управляючим сигналом з CPU при незмінній полярності вихідної напруги ЦАП.

Потрібна дискретність регулювання швидкості  $\Delta\omega$  може бути визначеною таким чином. Знехтуємо впливом моменту тертя на роботу

електродвигуна. Тоді зміна швидкості його обертання при гальмуванні завнішнім навантаженням може бути описана експонентою:

$$\omega(t) = \omega_{\text{ПОЧ}} \cdot e^{-t/T_M}, \quad (5.41)$$

де  $\omega_{\text{ПОЧ}}$  – швидкість обертання електродвигуна перед початком гальмування.

За час гальмування вал електродвигуна повернеться на кут

$$\varphi_{\text{ГАЛЬМ}} = \int_0^{t_{\text{Г}}} \omega_{\text{ПОЧ}} \cdot e^{-t/T_M} dt = \omega_{\text{ПОЧ}} \cdot T_M \cdot (1 - e^{-t_{\text{Г}}/T_M}). \quad (5.42)$$

Якщо прийняти, що час гальмування  $t_{\text{ГАЛЬМ}} \approx 3T_M$ , де  $T_M$  – електромеханічна стала часу електропривода, то

$$\varphi_{\text{ГАЛЬМ}} = \omega_{\text{ПОЧ}} \cdot T_M (1 - e^{-2}). \quad (5.43)$$

Механізм координатографа характеризується таким параметром як радіус приведення  $\rho$ , що дорівнює відношенню швидкості обертання вала електродвигуна до лінійної швидкості руху каретки (див. рисунок 5.2). Тоді гальмівний шлях каретки координатографа можна визначити так

$$\ell_{\text{ГАЛЬМ}} = \frac{\omega_{\text{ПОЧ}} \cdot T_M (1 - e^{-2})}{\rho}. \quad (5.44)$$

Якщо швидкість обертання електродвигуна перед гальмуванням відрізняється на величину  $\delta\omega$  від розрахункового значення  $\omega_{\text{ПОЧ}}$ , то це приведе до виникнення похибки в зупинці каретки  $\Delta l_{\omega}$ , що викликана неточним значенням швидкості:

$$\Delta l_{\omega} = \frac{\delta\omega \cdot T_M (1 - e^{-2})}{\rho}. \quad (5.45)$$

Ця похибка повинна складати якусь частку від загальної похибки позиціонування каретки  $\Delta l$ , наприклад, половину. Тоді дискретність регулювання швидкості електродвигуна  $\Delta\omega$  повинна бути не більшою за

$$\Delta\omega = \frac{\Delta l \cdot \rho}{2 \cdot T_M (1 - e^{-2})}. \quad (5.46)$$

Тоді загальна кількість градацій швидкості, що буде задаватися вихідним сигналом ЦАП, з врахуванням реверса дорівнює:

$$M = 2 \cdot (\omega_{НОМ} / \Delta\omega). \quad (5.47)$$

Це число визначає кількість можливих градацій вихідної напруги ЦАП, а значить і його розрядність.

## 5.9 Варіанти контрольних завдань

Початкові дані для різних варіантів контрольних завдань наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Початкові дані для виконання контрольного завдання №5

Номер варіанта	Виконавчий механізм	Електро-двигун	Електропривод		Контур швидкості
	$v_K$ , м/с	тип	$T_M$ , с	$\Delta l$ , мм	$k_{ш}$ , рад/с/В
1	0,10	МИ-11	0,03	0,1	40
2	0,20	МИ-12	0,04	0,5	34
3	0,15	МИ-21	0,02	0,3	45
4	0,35	МИ-22	0,05	0,4	26
5	0,24	МИ-31	0,02	0,2	51
6	0,18	СЛ-221	0,04	0,1	37
7	0,50	СЛ-221А	0,06	0,2	22
8	0,42	СЛ-261	0,05	0,2	43
9	0,64	СЛ-261А	0,02	0,1	61
10	0,32	СЛ-281	0,03	0,4	37
11	0,17	СЛ-321	0,04	0,3	45
12	0,43	СЛ-361	0,02	0,4	38
13	0,10	СЛ-369	0,01	0,5	54
14	0,54	СЛ-369А	0,03	0,2	67
15	0,36	СЛ-369Б	0,05	0,1	33

В таблиці введені такі позначення:  $v_K$ —номінальна лінійна швидкість каретки;  $T_M$ —електромеханічна стала часу електропривода;  $\Delta l$ —максимально допустима похибка позиціонування каретки;  $k_{ш}$ —статичний коефіцієнт передачі контура швидкості.

## Завдання №6

### “Розробка програми цифрової компенсації дії неточності механізму координатографа”

Розробити алгоритм та програму роботи CPU (див. рисунок 5.3) для корекції задавального сигналу на цифровий регулятор переміщень, що реалізований програмно, з метою компенсації дії неточності механізму координатографа, яка викликає появу додаткової похибки позиціонування каретки (див. рисунок 5.2).

#### 5.10 Методика виконання контрольного завдання

Похибка позиціонування каретки  $\Delta l$  в значній мірі визначається дією неточності механізму координатографа (рисунок 5.2), що пов'язана з наявністю проміжків в зубчатих зчепленнях редуктора, викривленням форми поверхні приводного валика ПВ, непостійністю товщини приводного тросу Т по його довжині і т.ін.

Вплив частини з вказаних факторів усувається дією зворотного зв'язку по переміщенню, що реалізується за допомогою давача кутових переміщень ДКП. Так проміжки в редукторі механізму практично не будуть впливати на точність робот електропривода координатографа, бо редуктор вмикається в контур регулювання переміщень (ДКП встановлений на вісі приводного валика, що знаходиться після редуктора в кінематичній схемі механізму координатографа).

Що стосується викривлення поверхні приводного валика ПВ та непостійності товщини приводного тросу Т, то ці елементи кінематичної схеми не охоплені зворотним зв'язком по переміщенню і, таким чином, здійснюють значний вплив на точність роботи електропривода координатографа.

Якщо б вказаних факторів не було, то між кутовими переміщеннями приводного валика  $\varphi_B$  та лінійними переміщеннями каретки  $l_K$  була би лінійна залежність:

$$l_R = (R_B + R_T) \cdot \varphi_B, \quad (5.48)$$

де  $R_B$  – радіус приводного валика;  
 $R_T$  – радіус перерізу приводного тросу;  
 $\varphi_B$  – кут повороту приводного валика;  
 $l_K$  – лінійне переміщення каретки, що викликано поворотом приводного валика.

Але при наявності вказаних вище неточностей ця залежність стає суттєво нелінійною:

$$\ell_K = [R_B(\varphi_B) + R_T(\varphi_B)] \cdot \varphi_B. \quad (5.49)$$

Це приводить до виникнення додаткової похибки в позиціюванні каретки, величина якої ще залежить від розташування точки позиціювання на полі координатографа.

Для зменшення цієї додаткової похибки на практиці застосовують статистичні методи, що реалізуються програмно в СРУ. При цьому програма вводить корекцію до вже сформованого задаючого сигналу на цифровий регулятор переміщень, що теж реалізований програмно, використовуючи статистичні дані про значення похибок позиціювання на різних ділянках поля координатографа, що зберігаються в пам'яті СРУ. Скоректований таким чином управляючий сигнал регулятора переміщень потім виводиться до підпорядкованого контуру швидкості і компенсує дію неточності механізму при позиціюванні каретки на певній ділянці поля.

Як правило, програма складається з двох підпрограм: підготовчої та робочої.

Підготовча підпрограма призначена для формування в пам'яті СРУ бази статистичних даних про похибки позиціювання каретки від дії неточності механізму. Ці дані експериментально визначаються при дослідженні зібраного координатографа і вводяться з пульта оператора в пам'ять СРУ. Підготовча програма управляє процесом введення та розташування введених даних в пам'яті.

Для підготовки цих даних все поле координатографа  $L$  уздовж, наприклад, координати  $X$  розбивається на  $M$  довільно розташованих контрольних точок. Потім в кожному з цих точок виконується  $N$  позиціювань каретки при підході зліва та  $N$  позиціювань при підході справа. Похибки позиціювання в кожному досліді визначаються за допомогою високоточного засобу вимірювання і послідовно вводяться в СРУ. Підготовча підпрограма повинна обчислювати середнє значення цих похибок для кожної з  $M$  точок:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{Lj} &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{Li} , \\ \bar{\varepsilon}_{Pj} &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{Pi} , \end{aligned} \quad (5.50)$$

де  $j = 1, 2, \dots, M$ ;



$\bar{\varepsilon}_{Лj}$  – j-та похибка позиціювання при підході зліва;  
 $\bar{\varepsilon}_{Пj}$  – j-та похибка позиціювання при підході справа.

Ці дані для всіх контрольних точок М утворюють базу даних. При роботі підготовчої підпрограми можна також здійснювати додаткову обробку інформації. По-перше, якщо буде виявлено, що  $\bar{\varepsilon}_{Лj} = \bar{\varepsilon}_{Пj}$  для кожної контрольної точки М, то це свідчить про відсутність просковзувань між поверхнею приводного валика та тросом. В цьому разі залишається тільки дія нелінійності механічної передачі. По-друге, якщо ці похибки не дорівнюють одна одній, то визначається їх різниця для кожної точки М:

$$\Delta \varepsilon_j = \bar{\varepsilon}_{Пj} - \bar{\varepsilon}_{Лj} . \quad (5.51)$$

По-третє, для кожної ділянки переміщень каретки між сусідніми контрольними точками j та j+1, де j = 1, 2, ... М, визначається нахил діаграми похибок позиціювання за формулою

$$K[j \rightarrow (j+1)] = \frac{\bar{\varepsilon}_{Пj+1} - \bar{\varepsilon}_{Лj}}{N_{j+1} - N_j}, \quad (5.52)$$

де  $N_j$  та  $N_{j+1}$  – цифрові коди завдання на переміщення каретки в точку j та точку j+1 відповідно.

Ці значення нахилів діаграми похибок позиціювання для всіх ділянок поля координатографа теж зберігаються в пам'яті CPU у вигляді бази даних.

Робоча підпрограма CPU призначена для автоматичного введення корекції до задавального сигналу  $N_3$  на цифровий регулятор переміщень (див. рисунок 5.3) з врахуванням інформації про похибки позиціювання, що викликані неточністю механізму.

Алгоритм введення корекції при наявності просковзування між валиком та тросом ( $\bar{\varepsilon}_{Лj} \neq \bar{\varepsilon}_{Пj}$ ) описується такою формулою:

$$N_3^* = N_3 + K[j \rightarrow (j+1)] \cdot (N_3 - N_j) + \Delta \varepsilon_j \cdot \text{sign} V_K, \quad (5.53)$$

де  $N_3^*$  – скоректований код завдання на переміщення каретки;

$N_K$  – початковий код завдання на переміщення каретки, що сформований якимось зовнішнім пристроєм;

$\text{sign} V_K$  – операція визначення знаку швидкості руху каретки при виконанні заданого переміщення ;

$\Delta \varepsilon_j$  – похибка від просковзування на ділянці поля координатографа, де розташована кінцева точка позиціювання каретки;

$N_j$  – код останньої контрольної точки з  $M$ , яку каретка проходить перед самою своєю зупинкою.

При дії тільки неточності механізму корекція завдання повинна виконуватись за спрощеною формулою:

$$N^*_K = N_3 + K[j \rightarrow (j+1)] \cdot (N_3 - N_j). \quad (5.54)$$

При виконанні контрольного завдання в програму треба вводити формулу (5.53).

### **Завдання №7** **“Розробка програми цифрової компенсації дії нежорсткості механічної передачі”**

Розробити програму роботи CPU (див. рисунок 5.3) по введенню корекції до управляючого сигналу цифрового регулятора переміщень, що теж реалізований програмно, з метою цифрової компенсації дії нежорсткості механічної передачі, яка приводить до виникнення значної додаткової похибки позиціонування каретки координатографа ( рисунок 5.2).

#### 5.11 Методика виконання контрольного завдання

Нежорсткість (пружність) приводного тросу  $T$  (див. рисунок 5.2) робить розрахункову схему механізму координатографа двохмасовою (див. практичне заняття №1). Обидві еквівалентні маси цієї схеми пов'язані еквівалентним пружним елементом з приведеним коефіцієнтом жорсткості  $C_{ПР}$ . До першої маси будуть входити моменти інерції ротора електродвигуна та ротора тахогенератора, а також приведені моменти інерції зубчатих коліс редуктора та приводного валика, а до другої маси – приведений момент інерції каретки. При цьому елементи схеми розраховуються таким чином:

$$\begin{aligned} J_1 &= J_{РД} + J_{РТГ} + J_{РЕДПР} + J_{В.ПР}; \\ J_2 &= m \cdot \rho^2; \\ C_{ПР} &= \rho^2 \cdot C; \\ \rho &= V_K / \omega_D, \end{aligned} \quad (5.55)$$

де  $J_{рД}$ ,  $J_{рТГ}$ ,  $J_{ред.пр}$ ,  $J_{в.пр}$  – моменти інерції ротора електродвигуна, ротора тахогенератора, приведені моменти інерції коліс редуктора та приводного валика відповідно;

$m$  – маса каретки координатографа;

$\rho$  – радіус приведення маси каретки до еквівалентного моменту інерції на валу електродвигуна;

$V_K$  – лінійна швидкість руху каретки;

$\omega_D$  – швидкість обертання вала електродвигуна, що відповідає швидкості  $V_K$ ;

$C$  та  $C_{пр}$  – реальне та приведенне значення коефіцієнта жорсткості тросу.

Вплив нежорсткості (пружності) тросу на роботу електропривода координатографа проявляється в зміні його передавальної функції по швидкості:

$$W_{кш}(p) = W_{ж}(p) \cdot W_{нж}(p) = W_{ж}(p) \cdot \frac{1}{T_0^2 p^2 + 1}, \quad (5.56)$$

де  $W_{ж}(p)$  – передавальна функція контура швидкості при жорсткій механічній передачі;

$W_{нж}(p)$  – складова, що описує вплив нежорсткості механічної передачі.

$T_0 = 1/\omega_0$  – стала часу, що характеризує нежорсткість передачі;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_{пр} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} \quad \text{– власна резонансна частота кутових коливань}$$

обох еквівалентних мас по відношенню одна до одної в перехідних режимах роботи електропривода координатографа.

Компенсація впливу нежорсткості приводного тросу на роботу електропривода полягає в програмній реалізації цифрового фільтру, що діє на виході цифрового регулятора переміщень, і виключає дію складової  $W_{нж}(p)$  на поведінку каретки координатографа в перехідних режимах роботи електропривода. Для цього безперервна передавальна функція цього фільтра повинна бути обернено пропорційною передавальній функції  $W_{нж}(p)$ , тобто

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{W_{нж}(p)}. \quad (5.57)$$

Для реалізації такої передавальної функції цифровими методами необхідно перейти до дискретної передавальної функції  $W_{\phi}(z)$ .

## Література

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Сабинин Ю.А. Электромашинные устройства автоматики. - Л.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Волков Н. И., Миловзоров В. П. Электромашинные устройства автоматики: Учеб. для вузов. – М.: Высш.шк., 1986.
4. Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины. – М.: Высш.шк., 1985.
5. Герасимьяк Р.П. Динамика элементов автоматизированного электропривода.-К.: УМК ВО, 1989.
6. Батоврин А.А и др. Цифровые системы управления электроприводами. - Л.: Энергия, 1971.
7. Цифровые электромеханические системы / В.Г.Каган и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Домрачев В.Г., Смирнов Ю.С. Цифроаналоговые системы позиционирования (Электромеханотронные преобразователи). – М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ/ Э.Л.Тихомиров и др.- М.: Машиностроение, 1990.
- 10.Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами.- М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 11.Герман – Галкин С.Г. и др. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- 12.Павлов В.Б. и др. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока. - К.: Наукова думка, 1987.
- 13.Алексенко А.Г., Коломбет Е.А. Применение прецизионных аналоговых интегральных схем.- М.: Сов.радио, 1980.
- 14.Гутников В.С.Интегральная электроника в измерительных устройствах.- Л.:Энергоатомиздат,1988.

15. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем: Справочник в 2 Т./ Абрайтис В.Б. и др. – М.: Радио и связь, 1988.

16. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. - М.: Энергоатомиздат, 1990.

## Технічні дані виконавчих електродвигунів постійного струму

Тип	Номинальна напруга, В	Номинальний струм якоря, А	Номинальна частота обертання, об/хв	Номинальний момент обертання, Н.см	Момент інерції якоря, кг.см <sup>2</sup>	Опір обмотки якоря, Ом
МИ-11	60	2,87	3000	2,2	0,06	0,46
МИ-12	60	4,57	3000	2,5	0,08	0,23
МИ-21	60	5,60	3000	2,7	0,14	0,284
МИ-22	60	8,20	3000	3,2	0,16	0,195
МИ-31	60	10,3	3000	4,8	0,36	0,204
СЛ-221	110	0,35	3700	3,5	0,14	117,0
СЛ-221А	110	0,35	3600	3,5	0,14	117,0
СЛ-261	110	0,50	3600	6,5	0,20	51,0
СЛ-261А	110	0,42	2500	6,5	0,20	51,0
СЛ-281	24	2,40	5200	5,0	0,20	1,15
СЛ-321	110	0,70	3000	12,5	0,60	15,8
СЛ-361	110	0,85	3000	16,0	0,70	20,5
СЛ-369	110	0,90	3800	15,0	0,70	15,2
СЛ-369А	110	0,10	3600	15,0	0,70	15,2
СЛ-369Б	220	0,4	3800	12,0	0,70	15,2
СЛ-521	110	1,20	3000	25,0	1,7	8,5
СЛ-521К	110	0,50	1000	20,0	1,7	74,0
СЛ-569	110	2,20	3400	47,5	2,7	3,6
СЛ-569К	110	0,80	850	42,0	2,7	40,0
СЛ-571К	24	7,00	2200	42,0	2,7	0,31
СЛ-621	110	2,30	2400	70,0	6,75	3,0
СЛ-661	110	2,90	2400	92,5	9,35	1,75

## Технічні дані тахогенераторів постійного струму

Тип	Момент інерції якоря, кг.см <sup>2</sup>	Коефіцієнт передачі, В/об/с
СЛ-121	0,05	1,1
СЛ-161	0,053	1,2
СЛ-221	0,14	1,5
СЛ-261	0,2	1,5
ТГ-1	0,04	0,42
ТГ-2	0,04	1,27
ТГ-3	0,04	1,0
ТГП-1	0,05	0,42
ТД-101	0,063	1,4
ТД-102	0,063	3,3
ТД-103	0,2	6,6
ТД-103ПМ	0,2	6,0
ТД-201	0,24	7,7
ТД-201ПМ	0,575	14,4
ТД-110	0,07	3,0
ТД-121	0,07	0,72
ТД-263	0,07	1,08