

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



РОБОЧА ПРОГРАМА ТА
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи з
дисципліни
"Мікроелектромеханіка"

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми
«Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні
технології мікросистемної радіоелектронної техніки»)
усіх форм навчання

Робоча програма та методичні вказівки до самостійної, контрольної та індивідуальної роботи з дисципліни "Мікроелектромеханіка" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітні програми «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Огренич Є.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 42 с.

Укладачі : Огренич Євген Вікторович, канд. техн. наук, ст. викл.
 Поспеева Ірина Євгенівна, ст.викладач,

Рецензент: Пирожок Андрій Володимирович, канд. техн. наук,
 доцент

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, д.т.н., доцент,
зав. каф. ІТЕЗ

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 01.02.19 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
протокол № 7 від 21.03.19 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ	6
1.1 Мета вивчення дисципліни.....	6
1.2 Задачі вивчення дисципліни.....	6
1.3 Рекомендації з вивчення дисципліни	6
2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ.....	8
2.1 Програма навчальної дисципліни	8
2.2 Питання для самостійної роботи.....	9
3 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ.....	12
4 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕСМ ПОСТІЙНОГО ДВИГУНА З НЕЗМІННИМ ЗБУДЖЕННЯМ ..	13
4.1 Завдання до роботи	13
4.2 Загальні принципи побудови та розрахунку систем підпорядкованого регулювання.....	14
4.3 Приклад виконання роботи	19
4.3.1 Завдання до роботи та попередні розрахунки.....	19
4.3.2 Розрахунки системи ТП - Д	20
4.3.3 Оптимізований контур струму (модульний оптимум).....	23
4.3.4 Оптимізований контур швидкості	25
4.3.5 Дослідження електроприводу з двоконтурною підлеглою САК швидкості	26
ЛІТЕРАТУРА	36
Додаток А.....	39

ВСТУП

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) - пристрої з інтегрованими в об'ємі або на поверхні твердого тіла електричними і мікромеханічними структурами. Статична або динамічна сукупність цих структур забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і механічного руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, передачі та зберігання інформації.

В рамках даного напрямку створюються мініатюрні чутливі (сенсорні) і виконавчі (атенюаторні) системи, в основі функціонування яких лежить використання класичних принципів механіки, оптики, електротехніки та фізики твердого тіла.

Задачею навчального курсу "Мікроелектромеханіка" є вивчення базових принципів функціонування та конструювання механічних і електромеханічних елементів і пристроїв, принципів роботи, будови, основ теорії, характеристик різних видів електричних машин малої потужності (мікромашини), виконавчих двигунів, інформаційних електричних машин, які отримали найбільше застосування в приладових пристроях і засобах автоматизації в загальнопромислових і спеціальних областях техніки..

Після вивчення дисципліни "Мікроелектромеханіка" студент повинен отримати:

загальні компетентності:

- вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- здатність оцінювати та забезпечувати якість робіт;
- навички використання інформаційних і комунікаційних технологій;
- здатність ясно та чітко описувати результати наукової роботи, вміти оформити виконане дослідження відповідно до нормативних вимог;
- здатність до впровадження отриманих наукових результатів у практичну діяльність підприємств, установ та навчальний процес;
- вільне володіння українською мовою;

фахові компетентності:

- вміння проводити розробку і дослідження методик аналізу, синтезу, оптимізації та прогнозування якості процесів

функціонування мікросистемної радіoeлектронної техніки з мікроелектромеханічними пристроями;

- здатність до моделювання та опису параметрів інтелектуальної мікросистемної радіoeлектронної техніки з мікроелектромеханічними пристроями;

- здатність до застосування сучасних перспективних компонентів та засобів інфокомунікаційних технологій, створення інтелектуальних сервісів обробки інформації, використання прогресивних інфокомунікаційних технологій для аналізу та прийняття рішень, технологій побудови розподілених обчислювальних систем та корпоративних інфокомунікаційних систем.

Вивчення дисципліни базується на знаннях таких дисциплін, що передбачені навчальним планом підготовки бакалаврів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» освітніх програм «Радіoeлектронні апарати та засоби», «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки»: "Фізика", "Вища математика", "Електро- та радіоматеріали", "Фізичні основи електронних апаратів".

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

1.1 Мета вивчення дисципліни

Метою дисципліни є формування у студентів знань, вмінь та навичок, необхідних для розуміння принципу роботи сучасних мікроелектромеханічних систем з метою подальшого проектування і розробки інтелектуальної мікросистемної радіоелектронної техніки з електромеханічними пристроями, а також подальшого становлення і вдосконалення знань майбутніх фахівців у галузі електроніки і телекомунікацій.

1.2 Задачі вивчення дисципліни

Під час вивчення дисципліни перед студентом постають наступні задачі:

- сформуванню уявлення про базові принципи функціонування та конструювання механічних і електромеханічних елементів і пристроїв;
- вивчити принципи роботи, будови, основ теорії, характеристик різних видів електричних машин малої потужності (мікромашини), виконавчих двигунів, інформаційних електричних машин;
- навчитись проектувати і розробляти об'єкти інтелектуальної мікросистемної радіоелектронної техніки з електромеханічними пристроями.

1.3 Рекомендації з вивчення дисципліни

Навчальна робота над дисципліною складається з наступних компонентів: прослуховування лекцій; виконання та захист лабораторних робіт; виконання індивідуальних завдань, самостійне вивчення матеріалу за літературою, що рекомендується.

Вивчення курсу завершується складанням заліку за умови успішного виконання усіх складових курсу.

Самостійне вивчення матеріалу слід проводити згідно з програмою навчальної дисципліни та питаннями до самостійної роботи, що наведені у розділі 2, дотримуючись наступного порядку:

- ознайомлення з темою, що підлягає вивченню за програмою, та добір літератури зі списку, що рекомендується;
- вивчення матеріалу за рекомендованою літературою з конспектуванням основних положень теми;
- виконання контрольного завдання, яке відноситься до теми, що вивчається.

Студенти денної форми навчання виконують індивідуальне завдання.

Студенти заочної форми навчання виконують контрольну роботу.

2 ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ПИТАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

2.1 Програма навчальної дисципліни

Програмою даної дисципліни передбачається вивчення наступних тем.

Змістовий модуль 1. Загальні відомості мікроелектромеханічних систем (МЕМС).

Тема 1. Загальні відомості про МЕМС.

Призначення і склад МЕМС. Призначення окремих елементів ЕМС. Необхідність «розбиття» ЕМС на окремі ланки. Поняття розімкнутої і замкнутої МЕМС. Види і призначення зворотних зв'язків.

Тема 2. Призначення окремих елементів ЕМС

Типи застосовуваних електродвигунів і електромеханічних датчиків швидкості і положення. Підсистеми, що входять до складу МЕМС. Завдання керування ЕМС, моменти і сили опору.

Змістовий модуль 2. Будова, конструкція, основні характеристики електричних мікромашин.

Тема 3. Машини постійного струму

Колекторні машини постійного струму. Принцип дії будова. Електрорушійна сила і електромагнітний момент, реакція якоря. Основні залежності і співвідношення. Регулювання частоти обертання двигунів незалежного і паралельного збудження. Двигуни послідовного збудження. Універсальні колекторні двигуни.

Тема 4. Асинхронні двигуни

Трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Принцип дії. Будова. Електромагнітний момент асинхронного двигуна. Робочі характеристики. Регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів. Однофазні та конденсаторні асинхронні двигуни.

Змістовий модуль 3. Будова, конструкція, основні характеристики електричних виконавчих мікромашин.

Тема 5. Синхронні машини.

Загальні відомості про синхронні машини й генератори. Принцип дії. Рівняння напруги синхронного генератора. Характеристики. Синхронні двигуни з електромагнітним збудженням. Синхронні двигуни з постійними магнітами. Тихохідні багатополюсні синхронні двигуни. Тихохідні однофазні синхронні двигуни. Тихохідні конденсаторні синхронні двигуни. Синхронні реактивні двигуни.

Тема 6. Крокові двигуни

Виконавчі крокові двигуни. Основні поняття. Крокові двигуни з пасивним ротором. Крокові двигуни з активним ротором. Індукторні крокові двигуни. Основні параметри і режими роботи.

Змістовий модуль 4. Динаміка складних електромеханічних систем

Тема 7. Двомасова МЕМС

Процеси в механічних системах з пружними деформаціями. Диференційні рівняння. Математична модель.

Тема 8. Синтез МЕМС

Системи керування основних координат МЕМС. Налагодження регуляторів підпорядкованої МЕМС.

2.2 Питання для самостійної роботи

- 1 Акселерометри. Принципи дії та конструкції
- 2 Вісьові акселерометри
- 3 Маятникові акселерометри
- 4 Датчики тиску. Чуттєві елементи мікродатчиків тиску
- 5 Базові конструкції мікродатчиків тиску
- 6 Гіроскопи. Особливості конструкцій мікрогіроскопів
- 7 Мікрогіроскопи LL-типу
- 8 Мікрогіроскопи LR-типу
- 9 Мікрогіроскопи RR-типу
- 10 Камертонні та хвильові мікрогіроскопи
- 11 Матеріали, що застосовуються при виготовленні елементів МЕМС
- 12 Технологічні методи створення тонких плівок. Епітаксія

- 13 Технологічні методи створення тонких плівок. Дифузія
- 14 Технологічні методи створення тонких плівок. Іонна імплантація
- 15 Методи літографії: фотолітографія, електронно-променева літографія, рентгенівська літографія
- 16 Методи травлення
- 17 Методи створення мікроструктур
- 18 Пружні елементи мікроакселерометрів
- 19 Пружні елементи мікрогіроскопів
- 20 Вплив розтягуючих сил на жорсткість пружних елементів.
- 21 Мембрани мікродатчиків тиску
- 22 Прямі ємнісні перетворювачі
- 23 Прямі перетворювачі на МДП-транзисторах
- 24 Тензорезисторні перетворювачі деформацій
- 25 Перетворювачі деформацій на поверхнево-акустичних хвилях (ПАХ)
- 26 Оборнені електростатичні перетворювачі
- 27 Оборнені магнітоелектричні перетворювачі
- 28 Оборнені електромагнітні перетворювачі
- 29 Електронні засоби обробки сигналів МЕМС
- 30 Рівняння руху чуттєвих елементів (ЧЕ) мікроакселерометрів
- 31 Передавальні функції ЧЕ мікроакселерометрів
- 32 Рівняння руху ЧЕ датчиків тиску
- 33 Передавальні функції ЧЕ датчиків тиску
- 34 Газове демпфування ЧЕ мікроакселерометрів та датчиків тиску
- 35 Рівняння руху мікрогіроскопів
- 36 Демпфування ЧЕ мікрогіроскопів
- 37 Динаміка руху гармонійних осциляторів
- 38 Динаміка ЧЕ маятникових мікроакселерометрів
- 39 Динаміка ЧЕ мікродатчиків тиску
- 40 Динаміка ЧЕ мікрогіроскопів
- 41 Мікроакселерометри прямого перетворення

- 42 Мікроакселерометри компенсаційного перетворення
- 43 Корекція частотних перетворень мікроакселерометрів
- 44 Похибки вимірювання мікроакселерометрами
- 45 Мікродатчики тиску прямого перетворення
- 46 Формування вихідних сигналів мікрогіроскопів
- 47 Пряме перетворення у мікрогіроскопах
- 48 Компенсаційне перетворення у мікрогіроскопах
- 49 Залежність вимірювальних властивостей мікрогіроскопів від конструктивних параметрів та зовнішніх впливів
- 50 Шум у мікромеханічних системах

Під час самостійної підготовки слід користуватися вказаною літературою [1-4], [5] та даними методичними вказівками. Крім того, допускається користуватися будь-якою доступною навчальною і технічною літературою.

3 ЗАВДАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ ТА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

Студенти денної форми навчання в процесі самостійного вивчення дисципліни виконують індивідуальну роботу.

Студенти заочної форми навчання в процесі самостійного вивчення дисципліни виконують контрольну роботу за завданням, що наведене у індивідуальній роботі.

При виконанні індивідуальної роботи рекомендується користуватися вказаною літературою [1-4], [5] та даними методичними вказівками. Крім того, допускається користуватися будь-якою доступною навчальною і технічною літературою.

4 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕСМ ПОСТІЙНОГО ДВИГУНА З НЕЗМІННИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Мета роботи: провести дослідження системи автоматичного керування швидкості ЕСМ постійного двигуна з незмінним збудженням за допомогою комп'ютерного моделювання у середовищі Simulink пакету MATLAB.

4.1 Завдання до роботи

4.1.1 Розрахувати за паспортним даним параметри (у відповідності до свого варіанту):

- системи Тиристорний Перетворювач - Двигун (ТП-Д);
- коефіцієнтів зворотних зв'язків (ЗЗ) за струмом та швидкістю двигуна;
- задавача інтенсивності і обмежувача струму.

4.1.2 Розрахувати параметри регулятора струму (РС) налагодженого на модульний оптимум (МО) та регулятора швидкості (РШ) налагодженого і на МО і на симетричний оптимум (СО).

4.1.3 Створити в середовищі Simulink пакету MATLAB моделі для дослідження контурів струму та швидкості відповідно до рис. 4.3, 4.5. Дослідити динамічні характеристики цих контурів (рис. 4.4).

4.1.4 Створити в середовищі Simulink пакету MATLAB модель для дослідження електропривода з двоконтурною підлеглою САК швидкості відповідно до рисунка 4.6.

4.1.5 Дослідити динамічні характеристики моделей (рисунок 4.7– 4.24).

4.1.6 Записати похибки електропривода після закінчення перехідного процесу.

4.1.7 Оформити результати роботи у вигляді звіту з індивідуальної (або контрольної) роботи.

При виконанні роботи керуватися прикладом, що наведений у підрозділі 4.3.

Варіанти завдань та паспортні дані електродвигунів постійного струму серії 2П наведені у табл. А1 додатку А.

4.2 Загальні принципи побудови та розрахунку систем підпорядкованого регулювання

Системи підпорядкованого регулювання характеризуються каскадним (послідовним) ввімкненням регуляторів, кількість яких співпадає з кількістю координат, які регулюються, наприклад, таких як струм та напруга якоря, швидкість двигуна, положення валу приводного механізму та інші. Узагальнена структура схеми системи, яка побудована по такому принципу, наведена на рисунку 4.1.

На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому та діючому значенням вихідної координати даного контуру, а вихідна напруга регулятора є сигналом завдання для наступного контуру. Вперше таку систему запропонувала фірма “Siemens” на базі елементів “трансідін”.

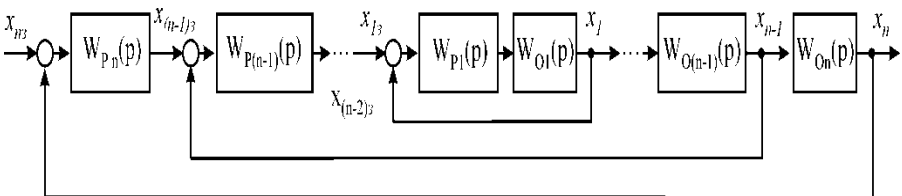


Рисунок 4.1 - Узагальнена структура системи підпорядкованого регулювання

В розглянутих системах контур регулювання кожного параметра (координати) має, як правило, тільки одну “велику” сталу часу, яку повинен компенсувати регулятор, що значно полегшує синтез систем та дозволяє використовувати однотипні елементи регулювання.

Важливим перевагами цієї структури є також можливість простими засобами здійснити обмеження будь-якої з координат системи. Для цього достатньо обмежити на відповідному рівні завдання на цю координату.

Кожен контур системи регулювання, може бути структурно розділений на два елемента – регулятор та об’єкт регулювання (рисунк 4.2). Об’єкт регулювання містить в собі вихідну ланку цього контуру, тобто об’єкт, та замкнутий контур регулювання, який є внутрішнім по відношенню до цього контуру.

На практиці побудови замкнутих автоматичних систем керування електроприводами широкого використання набули стандартні налагодження контурів регулювання. Розглянемо контур (рисунок 4.2), який має об'єкт регулювання з передавальною функцією $W_o(p)$, ланку з малою сталою часу $K_\mu / (T_\mu p + 1)$ та регулятор $W_p(p)$. Вплив збурення $\Delta z(p)$ діє на вхід об'єкта регулювання через ланку з коефіцієнтом K_Z .

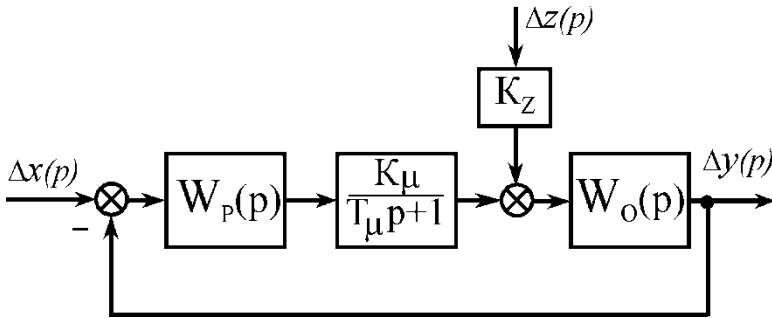


Рисунок 4.2 – Структура контуру, який оптимізується

Маючи на увазі, що корекція контуру буде здійснюватися за рахунок надання деяких динамічних властивостей регулятора, віднесемо до частини системи, яка не змінюється, об'єкт та ланку з малою сталою часу T_μ . Тоді передавальна функція скоригованої розімкненої системи буде:

$$W(p) = W_p(p)W_H(p), \quad (4.1)$$

де передавальна функція частини системи, яка не змінюється:

$$W_H(p) = \frac{K_\mu}{T_\mu p + 1} W_o(p). \quad (4.2)$$

Приймемо, наприклад, що:

$$W_o(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1}. \quad (4.3)$$

Використовуючи пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор з теоретично нескінченно великим коефіцієнтом підсилення в статиці $W_p(p) = \beta_p(\tau_p + 1)/(\tau_p p)$, можна записати:

$$W(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p} \cdot \frac{K_\mu}{T_\mu p + 1} \cdot \frac{K_o}{T_o p + 1}, \quad (4.4)$$

де β_p – динамічний коефіцієнт підсилення регулятора; τ_p – постійна часу регулятора, яку ще називають часом ізодрому.

Якщо вибрати:

$$\tau_p = T_o; \quad \beta_p = \frac{T_o}{2T_\mu K_o K_\mu}, \quad (4.5)$$

тоді:

$$W(p) = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p} = \frac{1}{2T_\mu (T_\mu p + 1)}. \quad (4.6)$$

Передавальна функція замкнутого контуру за керуючим впливом в відповідності за виразом $W_3(p) = W(p) \cdot [1 + W(p)]^{-1}$ буде:

$$W_3(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (4.7)$$

де $T = \sqrt{2} T_\mu$; $\xi = 1/\sqrt{2} \approx 0,707$.

При керуючому впливі у вигляді сходинок вихідна величина в перший раз досягає значення, яке установається, через $4,7T_\mu$; перерегулювання досягає 4,3 %. Тривалість перехідного процесу не залежить від сталої часу об'єкта T_o і обумовлюється тільки малою постійною часу T_μ . Таке налагодження називається технічним оптимум (оптимум за модулем (ОМ), *Beitrag-optimum*). Найбільш просте роз'яснення терміну ОМ є в тому, що при налагодженні на ОМ прагнуть в широкому діапазоні частот зробити модуль частотної характеристики замкнутого контуру близьким до одиниці.

Реалізація налагодження на ОМ можлива також і при інших передавальних функціях об'єкту.

Якщо $W_o(p) = K_o / (T_o p)$, то повинен примінятися пропорційний регулятор з коефіцієнтом передачі:

$$K_p = \frac{T_o}{2T_\mu K_o K_\mu}. \quad (4.8)$$

При відсутності в контурі великої постійної часу T_O , регулятор повинен бути інтегруючим:

$$W(p) = \beta_p / p \quad (4.9)$$

$$\text{коли } \beta_p = 1 / (2T_\mu K_O K_\mu).$$

Якщо об'єкт містить в собі дві значні постійні часу $T_O > T_{O1}$, тобто:

$$W_O(p) = \frac{K_O}{(T_O p + 1)(T_{O1} p + 1)}, \quad (4.10)$$

Такого ж результату можна досягти, якщо використати пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор з передавальною функцією:

$$W(p) = \beta_p \frac{(\tau_{p1} p + 1)(\tau_{p2} p + 1)}{\tau_{p1}}, \quad (4.11)$$

Розрахувавши β_p у відповідності з формулою (4.11) та коли $\tau_{p1} = T_O$, $\tau_{p2} = T_{O1}$.

Повертаючись до об'єкту у вигляді аперіодичної ланки, запишемо передавальну функцію замкнутого контуру за сигналом збурення:

$$\frac{\Delta y(p)}{\Delta z(p)} = \frac{K_O K_\mu}{T_O p + 1} \cdot \frac{1}{1 + W(p)}. \quad (4.12)$$

Підставивши сюди $W(p)$ з виразу (2.15) для передавальної функції контуру, який налагоджений на ОМ, та помноживши обидві частини на $\alpha_z = T_O / (2T_\mu K_z K_O)$, одержимо:

$$\frac{\Delta y(p)}{\Delta z(p)} \alpha_z = \frac{T_O p}{T_O p + 1} \cdot \frac{T_\mu p + 1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1) + 1}. \quad (4.13)$$

При такому записі стає очевидним, що тривалість та вигляд перехідного процесу за збуренням обумовлюється постійними часу T_O та T_μ . Коли $T_O \rightarrow \infty$ перехідний процес наближається до процесу в

системі налагодженій на ОМ з об'єктом у вигляді інтегруючої ланки та пропорційним регулятором. Тоді вихідна координата з незначним перерегулюванням наближається до статичної помилки:

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right)_{\text{ст}} = \frac{1}{\alpha_z} = \frac{2T_\mu K_\mu K_O}{T_O p}. \quad (4.14)$$

Зменшення статичної помилки (а при безкінечно великому коефіцієнті підсилення підсилювача в статиці – доведення її до нуля) в контурі з об'єктом у вигляді інтегруючої ланки може бути здійснена при використанні ПІ-регулятора. Якщо вибрати β_p за формулою (4.5), але прийнявши $\tau_p = 4T_\mu$, одержимо передавальну функцію розімкненого контуру, налагодженого на симетричний оптимум (СО):

$$W(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p} \cdot \frac{K_\mu}{T_\mu p + 1} \cdot \frac{K_O}{T_O p} = \frac{4T_\mu p + 1}{8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)}. \quad (4.15)$$

Передавальна функція замкнутого контуру за керуванням має вигляд:

$$W_3(p) = \frac{4T_\mu p + 1}{(2T_\mu p + 1)(4T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1)}. \quad (4.16)$$

При керуючому сигналі у вигляді сходінки час першого досягнення вихідною координатою сталого значення в контурі, який налагоджений на СО, складає $3,1T_\mu$, а максимальне перерегулювання досягає 43 %. Зате тривалість перехідного процесу за збуренням, розраховується виразом:

$$\frac{\Delta y(p)}{\Delta z(p)} \alpha_z = \frac{4T_\mu p (T_\mu p + 1)}{8T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1) + 4T_\mu p + 1}, \quad (4.17)$$

та залежить тільки від значення малої постійної часу контуру T_μ і не залежить від параметрів об'єкта.

4.3 Приклад виконання роботи

4.3.1 Завдання до роботи та попередні розрахунки

Розрахувати параметри двигуна ДПС НЗ і системи ТП-Д типу 2ПН112L за наведеними паспортними даними:

- тип: 2ПН112L;
- номінальна потужність, $P_{\text{ном}} = 2.2 \text{ кВт}$;
- номінальна напруга, $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$;
- номінальний струм двигуна, $I_{\text{ном}} = 13.3 \text{ А}$;
- номінальна швидкість обертання, $n_{\text{ном}} = 1500/4000 \text{ об/хв}$;
- максимальна швидкість обертання, $n_{\text{макс}} = 4000 \text{ об/хв}$;
- номінальний ККД, $\eta_{\text{ном}} = 0.75 \text{ відн.од}$;
- опір якоря, $R_{\text{я}} = 0.968 \text{ Ом}$;
- опір додаткових полюсів, $R_{\text{доб}} = 0.848 \text{ Ом}$;
- індуктивність якоря, $L_{\text{я}} = 14 \text{ мГн}$;
- момент інерції двигуна, $J_{\text{дв}} = 0.018 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Номінальна кутова швидкість двигуна, с^{-1} :

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}; \quad (4.18)$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157.08 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальний момент двигуна, Н·м:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}; \quad (4.19)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{2200}{157.08} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Що цілком улаштовує для нашого випадку.

$$C\Phi = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}}; \quad (4.20)$$

$$C\Phi = \frac{220 - 13.3 \cdot 2.25}{157.08} = 1.21 \text{ В}\cdot\text{с}.$$

4.3.2 Розрахунки системи ТП - Д

Усі розрахунки системи ТП-Д зведені в таблиці 4.1 – 4.3.

Таблиця 4.1 - Розрахунок параметрів силового трансформатора

Найменування параметра	Розрахункова формула	Розраховані параметри
1	2	3
Схема з'єднання трансформатора	—	Y/Y
Схема перетворювач	—	трифазна мостова
Номінальна напруга живильної мережі, У	U_c	220
Номінальна напруга двигуна, В	U_d	220
Номінальний струм двигуна, А	I_d	13.3
Коефіцієнт схеми по напрузі	k_u	0.755
Теоретичне значення ЕРС вторинної обмотки, В	$E_2 = k_u U_d$	166.1
Коефіцієнт запасу по напрузі, що враховує зниження напруги мережі	k_U	1.1
Коефіцієнт запасу, що враховує неповне відкриття клапанів при максимальному керуючому сигналі	k_α	1.1
Коефіцієнт запасу, що враховує спадання напруги в обмотках трансформатора, клапанах і комутаційні провали напруги	k_R	1.05
Напруги вторинної обмотки, В	$U_2 = k_U k_\alpha k_R E_2$	205.0 приймаємо: 208
Коефіцієнт схеми за струмом вторинної обмотки	k_{r2}	0.815
Теоретичне значення струму вторинної обмотки, А	$I_2 = k_{r2} I_d$	10.84
Коефіцієнт, що враховує розбіжність форми струму від прямокутної	k_i	1.1

Продовження табл. 4.1

1	2	3
Струм вторинної обмотки, А	$I'_2 = k_i I_2$	11.92
Коефіцієнт схеми за струмом первинної обмотки	k_{r1}	1.11
Коефіцієнт трансформації	$k_{rp} = U_1/U_2$	1.0577
Струм первинної обмотки, А	$I_1 = k_{r1} I_d / k_{rp}$	13.96
Струм первинної обмотки, А	$I'_1 = k_i I_1$	15.36
Коефіцієнт схеми за потужністю	k_m	1.065
Теоретичне значення типової потужності трансформатора ідеального випрямляча, з навантаженням за противо-ЕРС, кВ·А	$S_T = k_m U_d I_d \cdot 10^{-3}$	3.12
Розрахункова типова потужність трансформатора, кВ·А	$S_p = k_U k_\alpha k_i S_T$	4.15
Тип трансформатора	—	ТТ-6

Таблиця 4.2 – Вибір тиристорів

Найменування параметра	Розрахункова формула	Розраховані параметри
Коефіцієнт схеми за струмом вентиля	$k_{т.в}$	0.333
Середнє значення струму вентиля, А	$I_{в} = k_{т.в} I_d$	4.43
Коефіцієнт схеми за максимальною напругою вентиля	$k_{н.в}$	1.065
Максимальна величина зворотної напруги, що прикладається до вентилю, В	$U_{в.пнх} = k_{н.в} k_U k_\alpha k_R U_d$	297.7
Тип тиристора	—	ТЛ100/8

Таблиця 4.3 - Розрахунок індуктивності обмежуючих реакторів і параметрів кола якоря

Найменування параметра	Розрахункова формула	Розраховані параметри
1	2	3
Коефіцієнт обмеження зрівняльного струму	$k_{yp} = I_{yp} / I_d$	0.3
Зрівняльний струм, A	$I_{yp} = k_{yp} I_d$	4.0
Розрахунковий коефіцієнт схеми	k_y	0.18
Індуктивність двох реакторів, $Гн$	$L_y = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2\pi f \cdot I_{yp}} k_y$	0.042
Індуктивність одного реактора, $Гн$	$L'_y = 0.5 L_y$	0.021
Опір реактора, $Ом$	R_y	2
Опір обмоток якоря і додаткових полюсів, $Ом$	$1.2(R_{я} + R_{д.п.})$	2.18
Активна складова напруги короткого замикання трансформатора, $в.о.$	u_a	0.03
Активний опір трансформатора, приведений до ланцюга випрямляча струму, $Ом$	$R_r = u_a U_2 / I'_2$	0.52
Індуктивна складова напруги короткого замикання трансформатора, $в.о.$	u_L	0.095
Індуктивний опір трансформатора, приведений до ланцюга випрямляча струму, $Ом$	$x_r = u_L U_2 / I'_2$	1.66
Опір, внесене за рахунок перекриття анодних струмів, $Ом$	$R_{\Pi} = m x_r / 2\pi$	0.79
Опір щіткового контакту, $Ом$	$R_{\Pi\Pi} = 2 / I_d$	0.15
Розрахунковий опір якірного ланцюга, $Ом$	$R_p = 1.2(R_{я} + R_{д.п.}) + R_r + R_{\Pi} + R_{\Pi\Pi} + R_y$	4.36

Продовження табл. 4.3

1	2	3
Індуктивність трансформатора, приведена до контуру двигуна, H	$L_r = \frac{x_r}{2\pi f}$	0.0053
Індуктивність якоря, H	L_y	0.014
Розрахункова індуктивність якірного ланцюга, H	$L_p = L_y + L_r + L_y$	0.04
Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга, c	$T_p = \frac{L_p}{R_p}$	0.009
МОМЕНТ інерції двигуна, $kg \cdot m^2$	$J_{дв}$	0.018
Жорсткість механічної характеристики двигуна, $H \cdot m \cdot c$	$\beta_{дв} = (C\Phi)^2 / R_{\mathfrak{A}}$	0.33
Механічна постійна часу двигуна, c	$T_{M1} = \frac{J_{дв} \cdot R_{\mathfrak{A}}}{(C\Phi)^2}$	0.054
Частота власних коливань двигуна, c^{-1}	$\omega_{0дв} = 1 / \sqrt{T_{M1} \cdot T_{\mathfrak{A}}}$	45.45
Співвідношення постійних часу двигуна	$m = T_{M1} / T_{\mathfrak{A}}$	6

4.3.3 Оптимізований контур струму (модульний оптимум)

В першому допущенні знайдемо коефіцієнт $K_{дс}$ за струмом $K_{дс}$:

$$K_{дс} = \frac{U_{з\max}}{I_{ном}} \quad (4.21)$$

де $U_{з\max}$ - максимальна напруга завдання, $U_{з\max} = 10B$.

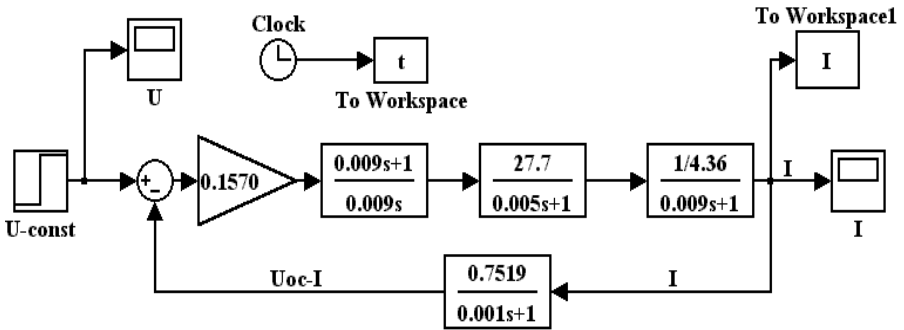


Рисунок 4.3 - Модель для моделювання оптимізованого контуру струму

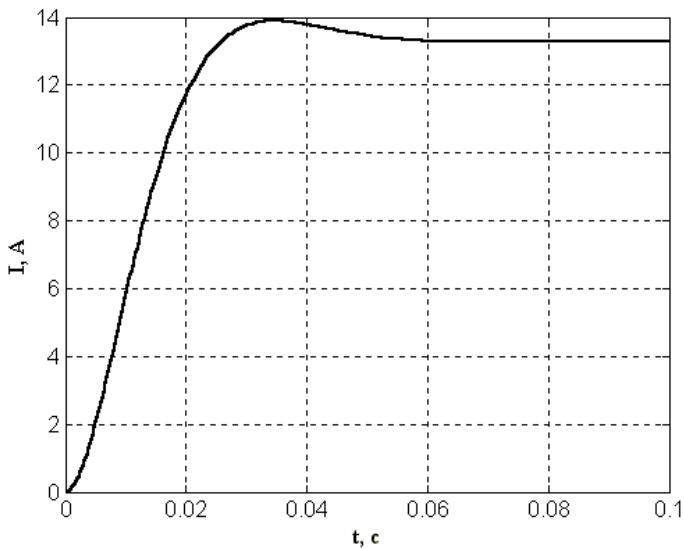


Рисунок 4.4 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру струму

4.3.5 Дослідження електроприводу з двоконтурною підлеглою САК швидкості

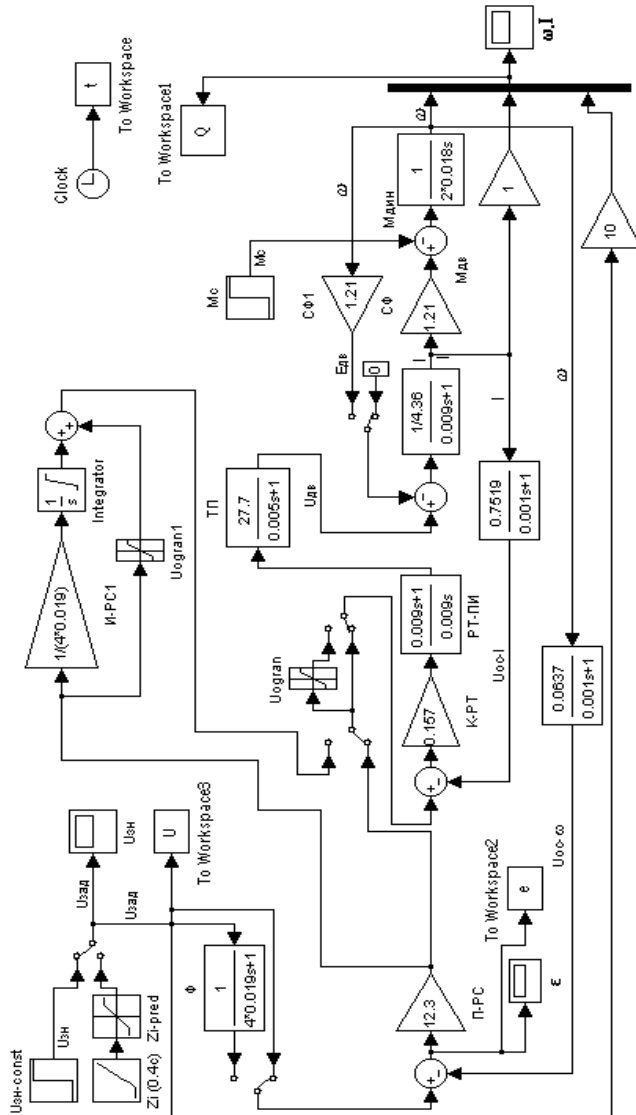


Рисунок 4.6 - Модель електроприводу з двоконтурною підлеглою САК швидкості

Схема моделі для дослідження наведена на рис. 4.6.

Характеристики параметрів та режимів роботи системи ТП - Д наведені на рис. 4.7 - 4.24.

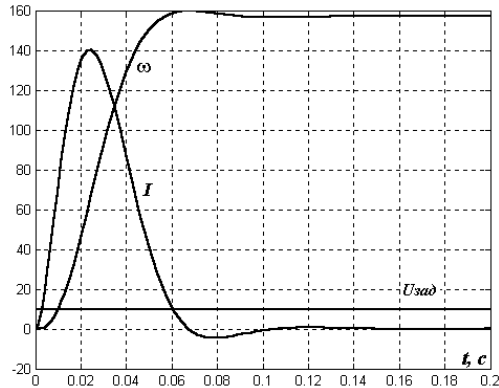


Рисунок 4.7 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості без урахування впливу ЕРС двигуна (РШ-МО, Х.Х.)

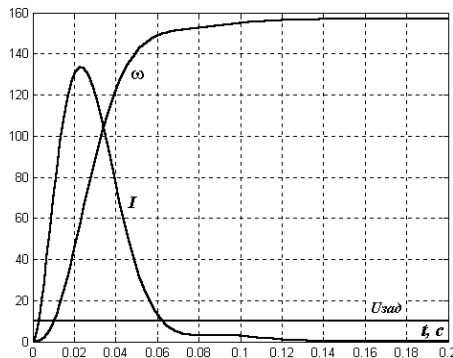


Рисунок 4.8 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості з урахуванням впливу ЕРС двигуна (РШ-МО, Х.Х.)

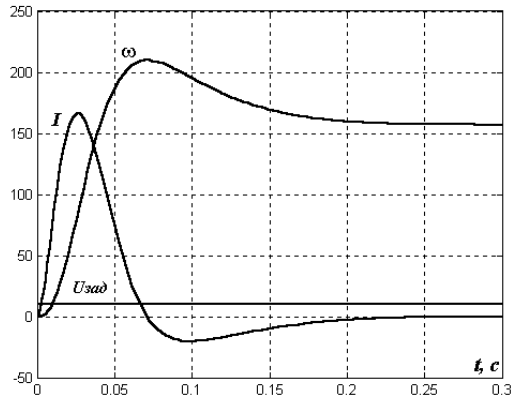


Рисунок 4.9 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості без урахування впливу ЕРС двигуна (РШ-СО, Х.Х.)

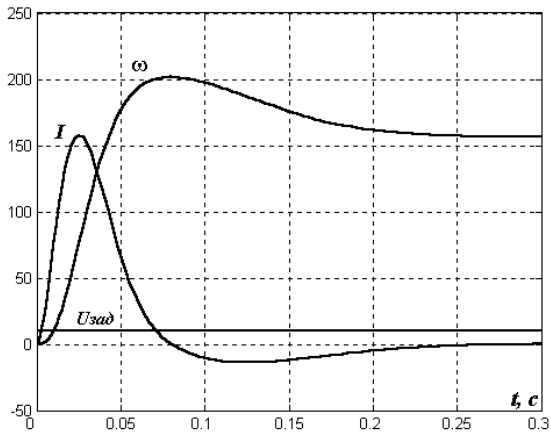


Рисунок 4.10 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості з урахуванням впливу ЕРС двигуна (РШ-СО, Х.Х.)

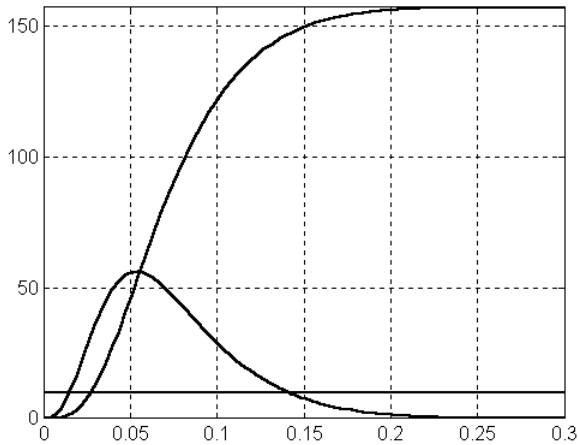


Рисунок 4.11 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості без урахування впливу ЕРС двигуна з фільтром Φ на вході (РШ-СО, Х.Х.)

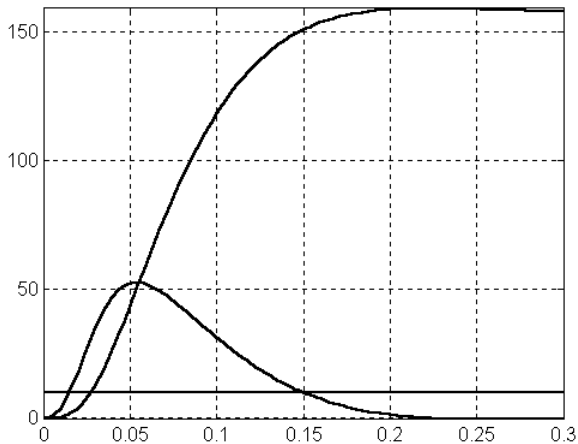


Рисунок 4.12 - Перехідна характеристика оптимізованого контуру швидкості з урахуванням впливу ЕРС двигуна з фільтром Φ на вході (РШ-СО, Х.Х.)

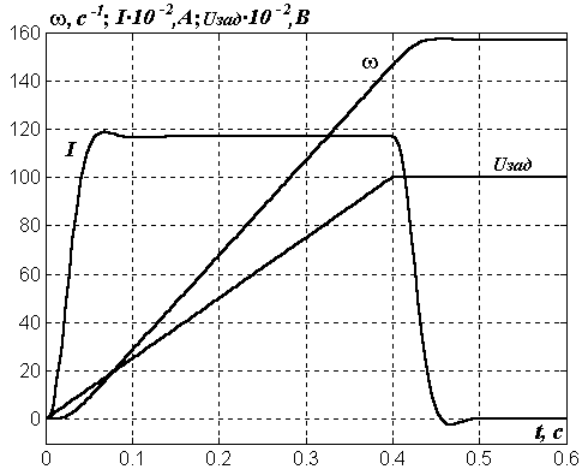
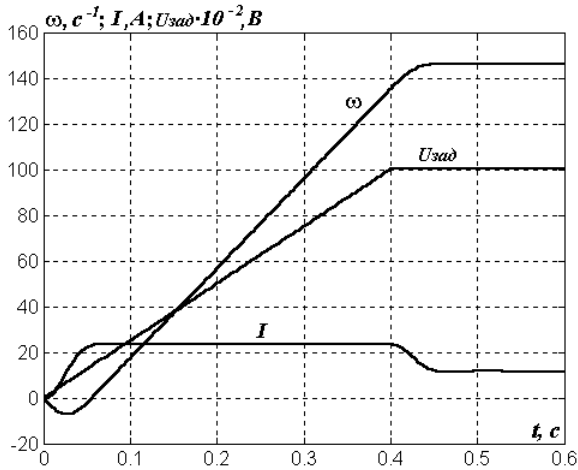


Рисунок 4.13 – Пуск від ЗІ (РШ-МО, Х.Х.)

Рисунок 4.14 – Пуск від ЗІ (РШ-МО, $M_{\text{с}}=M_{\text{ном}}=14 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

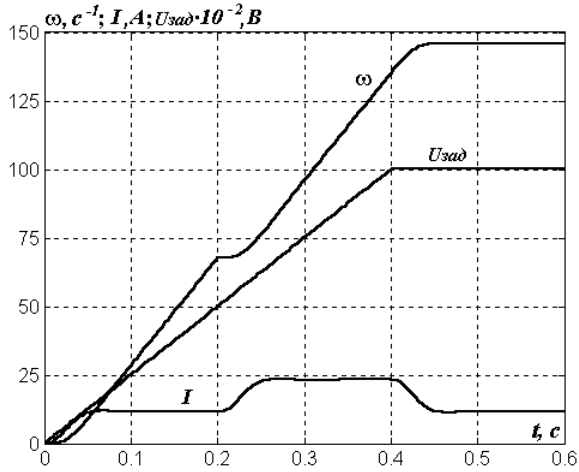


Рисунок 4.15 – Пуск від ЗІ, навантаження під час розгону (РШ-МО, $M_c = M_{ном} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

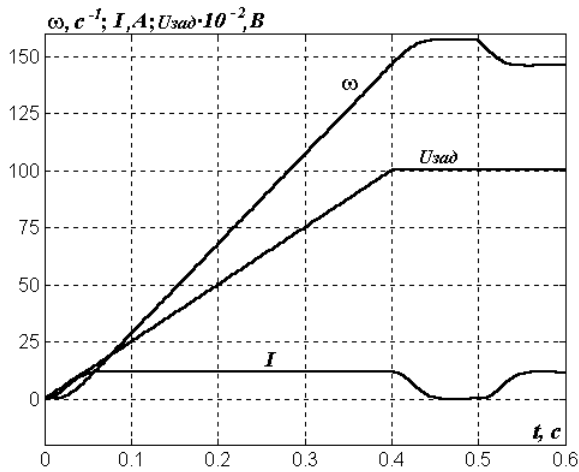


Рисунок 4.16 – Пуск від ЗІ, навантаження після розгону (РШ-МО, $M_c = M_{ном} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

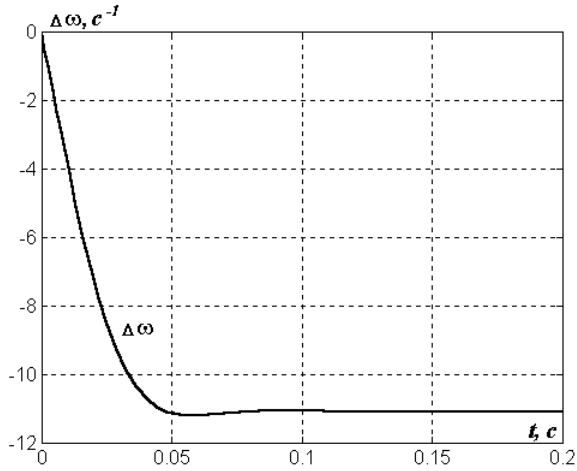


Рисунок 4.17 – Статична похибка (РШ-МО, $M_c=M_{ном}=14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

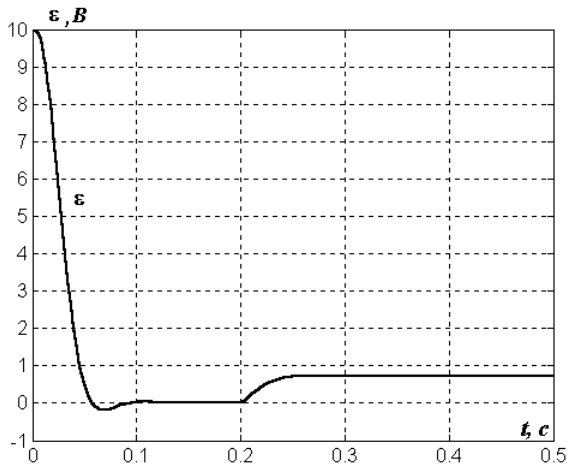


Рисунок 4.18 – Похибка за керуванням (РШ-МО, $M_c=M_{ном}=14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

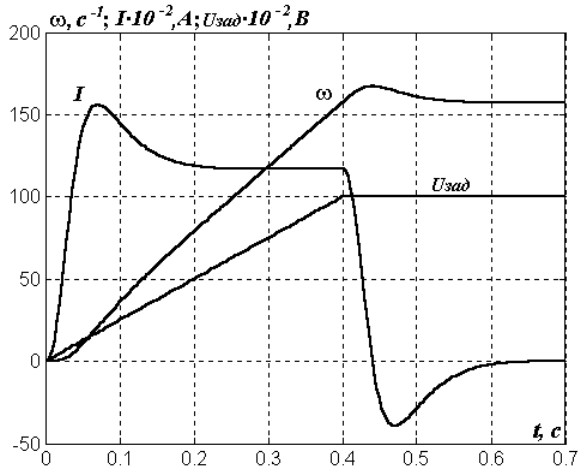
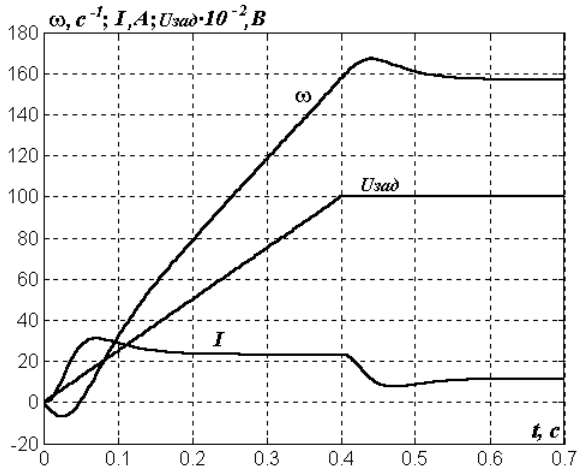


Рисунок 4.19 – Пуск від ЗІ (РШ-СО, Х.Х.)

Рисунок 4.20 – Пуск від ЗІ (РШ-СО, $M_c = M_{ном} = 14$ Н·м)

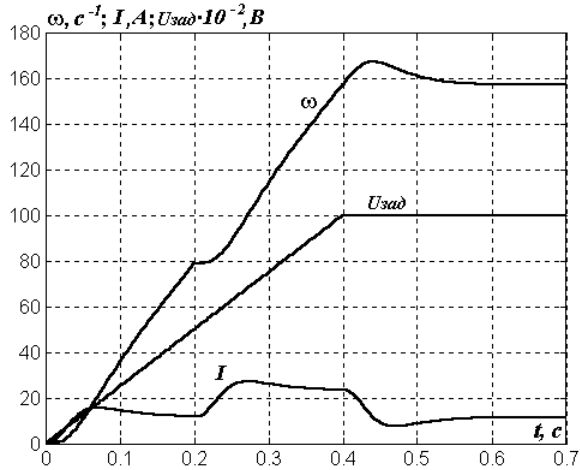


Рисунок 4.21 – Пуск від ЗІ, навантаження під час розгону (РШ-СО, $M_c = M_{ном} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

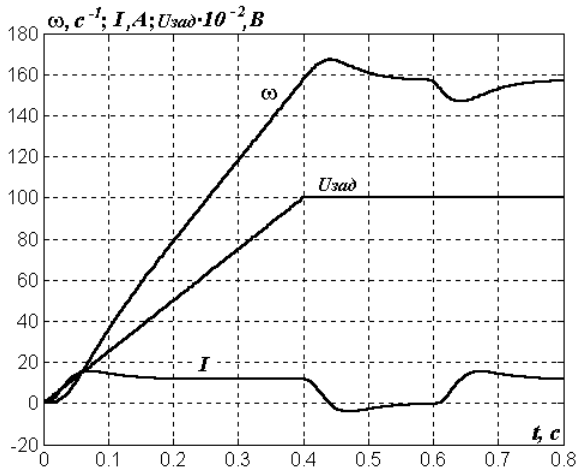


Рисунок 4.22 – Пуск від ЗІ, навантаження після розгону (РШ-СО, $M_c = M_{ном} = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

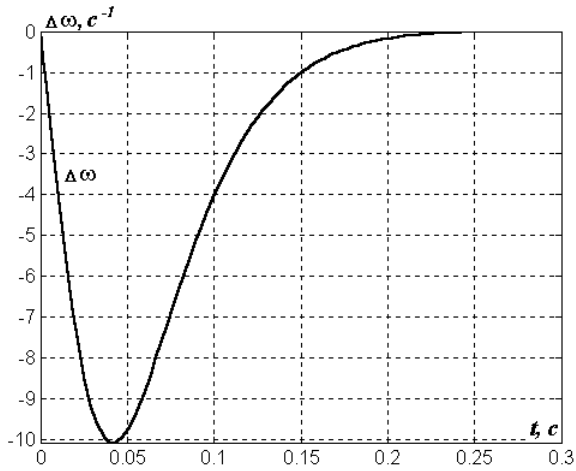


Рисунок 4.23 – Статична похибка (РШ-СО, $M_c=M_{ном}=14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

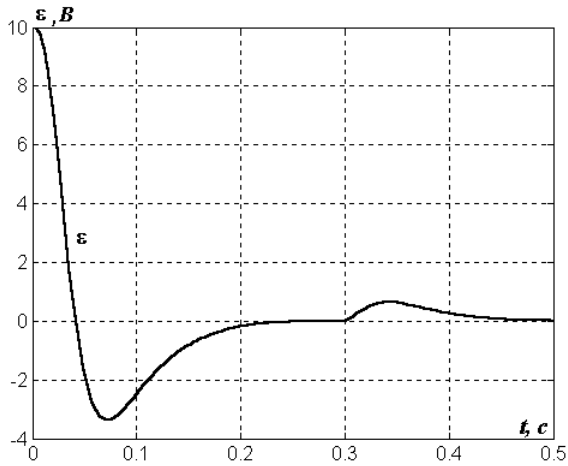


Рисунок 4.24 – Похибка за керуванням (РШ-МО, $M_c=M_{ном}=14 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

ЛІТЕРАТУРА

- 1 ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 ЄСКД. Загальні положення (ГОСТ 2.001-93, IDT)
- 2 ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 Єдина система конструкторської документації. правила виконання електричних схем (ГОСТ 2.702-2011, IDT)
- 3 Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
- 4 Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Учебное пособие. — СПб.: Корона-Век, 2004. — 368 с.
- 5 Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. Перевод с английского Б.И. Копылова. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.
- 6 Акимов Л.В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой/ Л.В. Акимов, В.Т. Долбня, В.Б. Клепиков, А.В. Пирожок / Под общей ред. В.Б. Клепикова. - Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. - 160 с.
- 7 Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.: ил.
- 8 Джонс М. Х. Электроника Техносфера, 2006. -512 с.
- 9 Гультяев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. - СПб.: КОРОНАпринт, 1999. - 288 с.
- 10 Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MATLAB 5.0/5.3. Системы символьной математики. М.: Нолидж, 1999. – 640 с.
- 11 Потемкин В.Г., Рудаков П.М. Система МАТЛАБ 5 для студентов. – 2-е изд., испр. и дополн. – М.: Диалог-МИФИ, 1999 – 448 с.
- 12 Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учеб. для ВУЗов.- М.: Машиностроение, 1990. - 304 с.

13 Справочник по автоматизированному электроприводу /Под ред. В.А. Елисеєва и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 613 с.

14 Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. Ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. ил.

15 Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат. 1983. – 216 с.

16 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия. 1979. – 160 с.

17 Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво НТУ “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с.

18 Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. - СПб.: КОРОНА принт. 2001. – 320 с.

19 Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 560 с.

20 Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния: Монография/ Л.В. Акимов, В.И. Колотило, В.С. Марков; ред. В.Б. Клепикова, Л.В. Акимова - Харьков: ХГПУ, 2000.-93 с.

21 Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. □ М.: Энергия, 1976 □ 615 с.

22 Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

23 Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.

24 Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. - 576 с.

25 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. -С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. - 288 с.

26 Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 560 с.

27 Тиристорный следящий электропривод / А.М. Лебедев, В.А. Найдис и др. - М.: Энергия, 1972. - 127 с.

28 Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристор-ными электроприводами постоянного тока. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 303 с.

Додаток А

Таблиця А.1 - Варіанти завдань та паспортні дані електродвигунів постійного струму серії 2П

Варіант	Тип	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв		ККД, %	Опір обмоток при 15 °С, Ом			Індуктивність якірного кола, мГн	Момент інерції, кг·м ²
				номінальна	максимальна		якоря	додаткових полюсів	збудження		
		P_n	U_n	n_n	n_{max}	η_n	$R_{я}$	$R_{дод}$	R_z	$L_{я}$	$J_{дв}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2ПН90МУХЛ4	0,71	220	2360	3540	70,0	3,99	2,55	470	79	0,004
2	2ПН90ЛУХЛ4	0,55	110	1500	4000	67,5	1,3	0,932	432	33	0,005
3	2ПБ90МУХЛ4	0,55	220	3000	4000	71,0	3,99	2,55	810	82	0,004
4	2ПН100МУХЛ4	2,00	110	3000	4000	78,5	0,201	0,135	265	6,6	0,011
5	2ПН100ЛУХЛ4	1,10	220	1500	4300	74,0	2,2	1,57	295	83	0,012
6	2ПБ100МУХЛ4	0,60	110	1500	4000	72,0	1,083	0,659	595	40	0,011

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	2ПН112МУХЛ4	0,85	220	950	3500	64,0	3,85	3,08	233	44	0,015
8	2ПН112МУХЛ4	1,50	110	1500	4000	70,0	0,42	0,355	181	4,8	0,015
9	2ПН112ЛУХЛ4	2,20	220	1500	4000	75,0	0,968	0,848	168	14	0,018
10	2ПН112ЛУХЛ4	5,3	110	3350	4000	79,5	0,46	0,051	96,3	15	0,018
11	2ПБ112ЛУХЛ4	1,5	220	2240	4000	80,0	0,74	0,74	303	12	0,018
12	2ПН112МУХЛ4	10,5	440	3000	4000	85,0	0,564	0,336	111	11	0,015
13	2ПН132ЛУХЛ4	14,0	220	3150	4000	86,0	0,08	0,066	76	1,8	0,048
14	2ПБ132ЛУХЛ4	1,9	440	1120	2500	78,0	4,05	2,82	216	99	0,048
15	2ПБ132ЛУХЛ4	5,3	220	3000	4000	85,5	0,167	0,124	216	4	0,048
16	2ПБ132МУХЛ4	5,5	440	3000	4000	83,5	0,74	0,486	175	16,7	0,038
17	2ПО132ЛУХЛ4	2,2	110	1000	4000	74,0	0,22	0,196	138	5,2	0,048

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	2ПФ132МУХЛ4	6,0	220	2360	4000	83,5	0,226	0,166	111	1,6	0,038
19	2ПФ132ЛУХЛ4	11,0	440	3150	4000	86,5	0,322	0,27	76	7,1	0,048
20	2ПН160МУХЛ4	3,0	110	750	3000	75,5	0,138	0,135	128	5,04	0,083
21	2ПН160МУХЛ4	18,0	220	3150	4000	87,0	0,037	0,024	53,1	1	0,083
22	2ПН160ЛУХЛ4	4,0	440	750	1850	78,5	2,02	1,8	117	63	0,1
23	2ПБ160МУХЛ4	2,1	110	800	3000	77,0	0,235	0,151	177	7,1	0,083
24	2ПБ160ЛУХЛ4	3,2	220	1060	3000	82,5	0,385	0,364	181	14	0,1
25	2ПО160МУХЛ4	8,0	440	2200	4000	86,5	0,51	0,407	148	16	0,083
26	2ПО160ЛУХЛ4	10,0	220	2360	4000	88,5	0,069	0,049	117	2,5	0,1
27	2ПФ160МУХЛ4	16,0	440	3150	4000	88,0	0,145	0,101	53,1	4	0,083
28	2ПН180МУХЛ4	8,0	220	1060	3000	83,0	0,181	0,122	74,8	6,1	0,2

Продовження табл. А.1

29	2ПО180МУХЛ4	17,0	440	3000	3500	90,0	0,15	0,092	132	5,6	0,2
30	2ПФ180ЛУХЛ4	25,0	220	2120	3500	89,0	0,042	0,03	86	0,81	0,23
31	2ПН200МУХЛ4	60	440	3150	3500	90,5	0,047	0,029	35	1,6	0,25
32	2ПФ200МУХЛ4	22,0	220	1600	3500	87,5	0,047	0,029	46	1,6	0,25
33	2ПФ200МУХЛ4	40,0	440	3000	3500	90,5	0,071	0,041	96	2,5	0,25
34	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	110	750	3300	82,0	0,031	0,02	42	1,2	0,3
35	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	440	800	1850	83,5	0,5	0,264	42	18,6	0,3

Примітка. Двигуни виконані з повною кількістю додаткових полюсів, з висотою осі обертання 90 і 100 мм – двохполюсні, 112 мм – чотириполюсні.