

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Інститут інженерії та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та електромеханіки

ДИПЛОМНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему

МОДЕЛЬ КЕРОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОБУТОВОЇ ЦЕНТРИФУГИ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНОСТІ В МЕХАНІЧНІЙ ПЕРЕДАЧІ

Виконав студент гр. БЕМ-17
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
Мальцев Д. А.

Науковий керівник доц. Біла Т.Я.

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

Київ 2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Інститут інженерії та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та електромеханіки

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІЕМ

_____ проф. Злотенко Б.М.

“ _____ ” _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мальцеву Денису Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної бакалаврської роботи **Модель керованого електропривода побутової центрифуги з урахуванням пружності в механічній передачі**

Науковий керівник роботи Біла Тетяна Яківна,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

к.т.н., доцент

затвержені наказом вищого навчального закладу від 15.03.2021 № 75-уч.

2. Строк подання студентом роботи 1 червня 2021 року

3. Вихідні дані до дипломної бакалаврської роботи: технічне завдання, навчально-методична та науково-технічна література.

4. Зміст дипломної бакалаврської роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Провести аналітичний огляд за темою дипломної роботи. 2. Скласти математичні та структурні моделі електропривода центрифуги з використанням різних підходів.

3. Розрахувати параметри центрифуги, моделей, обрати електродвигун. 4. Виконати комп'ютерне моделювання роботи системи, отримати динамічні характеристики.

5. Дата видачі завдання 10.03.2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної бакалаврської роботи (проєкту)	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	01.02.2021	
2	Розділ 1. Аналітичний огляд за темою дипломної роботи.	15.02.2021	
3	Розділ 2. Моделі електропривода побутової центрифуги.	10.03.2021	
4	Розділ 3. Розрахункова частина.	05.04.2021	
5	Розділ 4. Комп'ютерне моделювання електропривода центрифуги.	25.04.2021	
6	Висновки	20.05.2021	
7	Оформлення дипломної бакалаврської роботи (проєкту) (чистовий варіант)	30.05.2021	
8	Здача дипломної бакалаврської роботи (проєкту) на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	10.06.2021	
9	Перевірка дипломної бакалаврської роботи (проєкту) на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	14.06.2021	
10	Подання дипломної бакалаврської роботи (проєкту) на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	17.06.2021	

Студент

_____ Мальцев Д. А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник роботи

_____ Біла Т. Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент

_____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мальцев Д. А. Модель керованого електропривода побутової центрифуги з урахуванням пружності в механічній передачі. – Рукопис.

Дипломна робота бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньою програмою «Електромеханіка». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021 рік.

Робота присвячена розробленню моделей електропривода побутової центрифуги та дослідженню їх динамічних характеристик.

В першому розділі представлено огляд конструкцій побутових машин для віджимання вологи, принцип їх дії, а також типові структури систем керування.

Другий розділ присвячений розробленню математичних та структурних моделей з використанням різних підходів.

В третьому розділі виконано розрахунки ротора центрифуги, обрано електродвигун, розраховано параметри моделей, синтезовані регулятори струму та швидкості.

В четвертому розділі представлені результати комп'ютерного моделювання керованого електропривода побутової центрифуги, визначені динамічні характеристики в перехідних процесах.

Пояснювальна записка виконана в текстовому редакторі Microsoft Word. В роботі використано програму Matlab&Simulink.

Ключові слова: вологість, момент інерції, система керування, електродвигун, навантаження, швидкість обертання.

SUMMARY

Maltsev D. A. Modeling controlled electric drive of the household centrifuge according to elasticity in mechanical transmission. - Manuscript.

Thesis of the bachelor in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics, educational program "Electromechanics". - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2021.

The work is devoted to the development of models of electric centrifuge drive and the study of their dynamic characteristics.

The first section presents an overview of the designs of household machines for squeezing moisture, the principle of their work, as well as typical structures of control systems.

The second section is devoted to the development of mathematical and structural models using different approaches.

In the third section, the calculations of the centrifuge rotor are performed, the electric motor is selected, the parameters of the models are calculated, current and speed controllers are synthesized.

The fourth section presents the results of computer modeling of the controlled electric drive of a household centrifuge, the dynamic characteristics in transients are determined.

The explanatory note is made in a text editor Microsoft Word. The program Matlab & Simulink is used in the work.

Keywords: humidity, a moment of inertia, control system, electric motor, load, speed, controller.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	10
1.1. Процес віджимання вологи центрифугуванням	10
1.2. Огляд сучасного побутового обладнання для віджимання вологи	13
1.3. Електропривод та режими його роботи	17
1.4. Схеми систем автоматичного керування ЕП	21
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОБУТОВОЇ ЦЕНТРИФУГИ	27
2.1. Кінематична та розрахункова схеми	27
2.2. Одномасова модель механічної частини	28
2.3. Модель двомасової системи механічної частини електропривода центрифуги	29
2.4. Модель двомасової системи з врахуванням в'язкого тертя	31
2.5. Загальні показники двомасової системи	34
2.6. Модель універсального колекторного двигуна	35
2.7. Модель керованого електропривода побутової центрифуги	37
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	43
3.1. Розрахунок геометричних розмірів ротора центрифуги	43
3.2. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна центрифуги	44
3.3. Розрахунок параметрів моделі електродвигуна	47
3.4. Розрахунок параметрів моделей одномасової та двомасової систем механічної частини ЕП – Ц	48
3.5. Розрахунок параметрів моделі керованого електропривода центрифуги	49
3.6. Електрична схема керованого електропривода центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат	51

РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ	53
4.1. Комп'ютерне моделювання одномасової системи ЕП-Ц	53
4.2. Комп'ютерне моделювання двомасової системи ЕП - Ц з врахування пружного зв'язку	58
4.3. Комп'ютерне моделювання системи ЕП - Ц з керованим випрямлячем і врахуванням пружності	62
4.4. Комп'ютерне моделювання системи ЕП - Ц з підпорядкованим регулюванням координат	65
4.5. Порівняння результатів комп'ютерного моделювання на розроблених моделях системи ЕП – Ц	70
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Найбільш трудомісткими процесами в побуті є процеси по обробці виробів з тканин [12]. Сюди відносяться прання, віджимання вологи, сушіння та прасування. З метою зменшення часу та енерговитрат на сушіння в даний час велика увага приділяється вдосконаленню обладнання для механічного видалення вологи.

Для механічного видалення вологи використовуються центрифуги, які можуть бути або окремими пристроями, або вбудованими окремим блоком в пральні машини, або суміщеними з пральним барабаном.

В центрифугах процес віджимання здійснюється в полі дії відцентрових сил, які виникають внаслідок обертання ротора (барабана) центрифуги з великою швидкістю, що створюється електроприводом.

В сучасних умовах підвищення техніко-економічних показників керованих електроприводів побутової техніки, зокрема центрифуг, має велике значення. У цьому напрямку суттєвий інтерес викликають питання раціонального керування електроприводами. Дослідження показують, що існують певні закономірності змінювання напруги, потоку, струму, швидкості обертання та інших величин, що забезпечують оптимальне протікання електромеханічних процесів. Найбільш раціональне керування дозволяє підвищити ефективність машин і механізмів або знизити втрати енергії, нагрівання та потужність електродвигунів при збереженні попередньої продуктивності. Раціональне керування забезпечується відповідною, спеціально для цього синтезованою та налаштованою системою автоматичного керування, стійкою до змінювання зовнішніх впливів [17].

Найбільш сучасним способом дослідження систем електропривод – виконавчий механізм, в тому числі і керованих, є моделювання на основі математичних та комп'ютерних моделей. Використання комп'ютерних технологій під час проектування значно скорочує час, що витрачається на синтез

та аналіз створюваних об'єктів [3]. Тому обрана тема дипломної роботи є актуальною.

Мета роботи - розробити моделі електропривода побутової центрифуги та дослідити їх динамічні характеристики задля створення системи керування, що стабілізує швидкість обертання ротора в умовах змінювання моменту опору навантаження.

Для досягнення поставленої мети в роботі були вирішені такі **задачі**:

- проведено аналітичний огляд конструкцій машин для віджимання вологи центрифугуванням та систем керування електроприводом;
- складено моделі системи електропривод–центрифуга з використанням різних підходів та розраховано їх параметри, обрано електродвигун;
- розроблено модель та розраховано параметри системи керування електроприводом центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат;
- виконано комп'ютерне моделювання створених моделей, визначено параметри перехідних процесів.

Об'єкт дослідження – моделі електропривода побутової центрифуги з урахуванням пружності в механічній передачі.

Предмет дослідження - процес моделювання роботи приводу центрифуги в умовах змінювання керуючих та збурюючих впливів.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети застосовувались основні положення електромеханіки, теорії електропривода та автоматичного керування, а також метод комп'ютерного моделювання.

Інформаційна база досліджень – навчально-методична та науково-технічна література, відкриті джерела мережі Internet.

Структура та обсяг роботи. Дипломна робота бакалавра складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Основний текст роботи викладений на 74 сторінках, містить 39 рисунків, 1 таблицю, список джерел з 24 найменувань.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

1.1. Процес віджимання вологи центрифугуванням

В побутових машинах для обробки тканинних виробів віджимання вологи є найбільш складною технологічною операцією, що визначає конструкцію машини. Досліджено, що, 1 кг сухої тканини всмоктує 2...2,5 кг води, тобто вологість тканини складає 200...250%. Під час процесів віджимання і сушіння ступінь вологості тканини необхідно довести до 17...20 %. При сушінні в сушильних машинах на випаровування 1 кг вологи витрачається близько 1,5 кВт-год електроенергії та 30...40 хвилин часу. Для віджимання 1 кг вологи в центрифугі з початковою вологістю 200 % витрачається менше 1 хвилини часу і не більш 0,2 кВт-год електроенергії [12]. Звідси стає очевидним необхідність максимального видалення вологи в процесі віджимання.

Для видалення вологи з виробів в сучасних побутових машинах використовують відцентрове віджимання - центрифугування. Віджимання рідини з виробів в полі дії відцентрових сил проводиться в центрифугах або робочих барабанах пральних машин.

Центрифуга (рис. 1.1) складається з перфорованого барабана (ротора) 2 і нерухомого бака 1.



Рис. 1.1. Схема процесу центрифугування

Вироби 3, які віджимаються, завантажуються через отвір у роторі. Під час обертання ротора та виникнення поля відцентрових сил на матеріал виробів 3 і рідину діє відцентрова сила, під впливом якої рідина відокремлюється від виробів і відводиться через перфоровану стінку ротора центрифуги.

Тиск на рідину в результаті дії відцентрових сил від даного моменту часу до кінця віджимання виражається залежністю [16]:

$$p_p = \frac{F_{вц}}{S} = \frac{\omega^2 m_p \cdot R_{сер}}{2\pi \cdot R_{сер} \cdot H} = \frac{\omega^2 m_c}{2\pi \cdot H} \cdot (\varphi - \varphi_k) \quad (1.1)$$

де $F_{вц}$ - відцентрова сила, яка діє на рідину;

S - площа поверхні шару виробів;

ω - кутова швидкість обертання ротора;

m_p - маса вологи, яка видаляється за період, що розглядається;

$R_{сер}$ - середній радіус центра ваги маси виробів;

H - глибина (висота) ротора;

φ - вологість виробів в даний період часу;

φ_k - мінімальна вологість виробів, яку можна отримати відцентровим віджиманням за даних умов.

Основним параметром, від якого залежить кінцева вологість матеріалу, є фактор відокремлення Φ , який у даному випадку дорівнює:

$$\Phi = \omega^2 \frac{R_{сер}}{g} \quad (1.2)$$

За допомогою центрифугування вологість білизни на операції віджимання в автоматичних пральних машинах знижується до 50...65 %, у напівавтоматичних та самостійно функціонуючих центрифугах – до 50 %.

Процес центрифугування можна розділити на два етапи. На першому етапі видаляється волога, що знаходиться в основних переплетеннях тканини, а також в проміжках між волокнами. Процес відокремлення рідини в цей період подібний процесу фільтрування через пористу перегородку.

В другий період віджимання в пори тканини, які звільнились від рідини, попадає повітря, і тиск тканини на рідину стає рівним нулю. В цей період видалення вологи проходить за рахунок осаджування її під дією гідростатичного тиску відцентрового віджимання. При цьому волога, яка міститься в капілярному просторі, перетікає з тканини до обичайки ротора (барабана) центрифуги. Як наслідок, матеріал, розташований ближче до обичайки, має більш високу вологість (60...75%) ніж біля осі обертання (30...35%).

Після першого етапу центрифугування вологість тканини складає 110...120%, після другого – 55...65% (рис. 1.2).

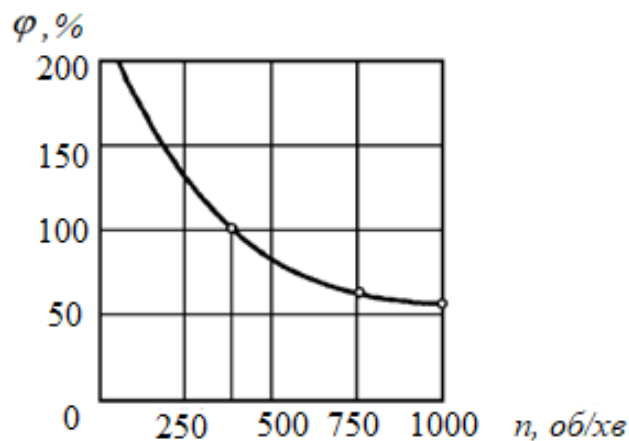


Рис. 1.2. Залежність залишкової вологості від частоти обертання барабана центрифуги з горизонтальною віссю

Експериментально доведено, що найбільш інтенсивне видалення вологи відбувається за перші 5...6 хвилин, а в подальшому вологість практично залишається незмінною (рис. 1.3).

З графіків (рис. 1.2 та 1.3) видно, що для досягнення залишкової вологості 110...120% частота обертання барабана повинна бути 350...400 об/хв, а для досягнення 55... 65 % необхідно збільшити частоту обертання до 1000 об/хв. Для того, щоб досягнути такої частоти обертання барабана і забезпечити стійкість машини, необхідно збільшити масу машини до 100...120 кг [17].

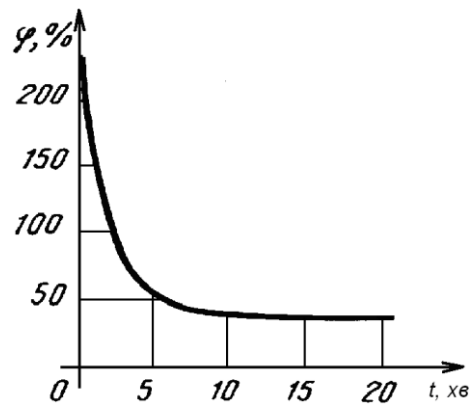


Рис. 1.3. Змінювання вологості матеріалу під час віджимання

Це спричинене тим, що маса вологої тканини розподіляється всередині барабана нерівномірно і при великих частотах обертання виникає велика відцентрова сила, компенсувати яку можна, створивши лише додаткову масу.

Автоматична пральна машина барабанного типу, що розрахована на 4...5 кг сухої білизни, має масу 70...80 кг. Отже, для забезпечення стійкості необхідно на 30...40 кг збільшити масу машини. Але і при цьому одержують частоту лише 350...400 об/хв. Для підвищення частоти до 800...1000 об/хв необхідно застосовувати м'яку систему підвіски, що може бути виконана за застосування пружин і фрикціонів, пружинно-фрикційних гідравлічних амортизаторів, тощо. Такі системи значно ускладнюють конструкцію машини і підвищують її вартість.

В більшості сучасних пральних машин за використання різних заходів кількість обертів при віджиманні знаходиться в межах 400...1600 об/хв [14]. Кількість обертів при віджиманні може бути встановлене користувачем залежно від типу тканини виробів.

1.2. Огляд сучасного побутового обладнання для віджимання вологи

Для віджимання вологи в побуті використовують окремо функціонуючі та вбудовані центрифуги, що входять до складу напіваавтоматичних пральних машин, а також автоматичні пральні машини.

Моделі центрифуг окремого функціонального призначення працюють зі швидкістю обертання ротора від 1200 до 2800 об/хв, мають потужність від 100

до 350 Вт. Ці варіанти обладнання живляться від звичайної мережі в 220 V, мають циліндричну або прямокутну форму [19].

На рис. 1.4 приведений зовнішній вигляд центрифуг фірми Koh-I-Noor (Аргентина) та AEG (Німеччина).



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд центрифуг окремого функціонування:

а) Koh-I-Noor; б) AEG

Центрифуга аргентинського виробництва (рис. 1.4, а) вважається еталонною на сучасному ринку. Має окремий режим для делікатних матеріалів. За швидкістю віджимання техніка під цим брендом найбільш вражаюча: розвиває до 2800 об/хв. Моделі мають верхнє завантаження, бак з нержавіючої сталі. Місткий внутрішній простір дозволяє завантажити до 6,2 кг білизни.

Німецький бренд AEG спеціалізується на більш серйозному обладнанні - кліматичному, опалювальному, але є в його арсеналі і центрифуги для віджимання білизни (рис. 1.4, б). Для них характерна наявність корпусу з антивібраційною прошарком, шумоізоляцією. У моделі передбачена педаль для екстреної зупинки обертання барабана з нержавіючої сталі. Частота обертання

становить також до 2800 об/хв., ємність внутрішнього відсіку розрахована на 5 кг.

Перевагами центрифуг окремого функціонального призначення являються компактні габарити, мобільність, зручність в зберіганні, простота обслуговування, висока ступінь віджимання. Їх можна взяти з собою на дачу, встановлювати в різних частинах ванної кімнати.

Вбудовані варіанти центрифуг об'єднані з пральною машиною. За конструкцією такі машини відносять до двобакових, за ступенем автоматизації – до напівавтоматичних.

Напівавтоматичні пральні машини широко поширені в сільській місцевості, де в будинках немає водопроводу. Подібною побутовою технікою також користуються мешканці малогабаритних квартир. Як показує статистика, такі пристрої ламаються набагато рідше, ніж автомати, що пояснюється простою конструкцією моделей [21].

Зовнішній вигляд двобакової пральної машини (з центрифугою) приведений на рис. 1.5, а. Машина бренду Evgo розрахована на 4 кг білизни, має потужність до 540 Вт, обладнана зливним насосом та реверсивним приводом.

До дуже поширених варіантів напівавтомата відноситься двобакова машина Сатурн (рис. 1.5, б). Відрізняється граничною економічністю. Немає необхідності в стаціонарній установці. Існує безліч моделей, що мають різну місткість і габарити.

Напівавтоматичні машини з центрифугою мають тільки вертикальне завантаження, обмежену кількість режимів роботи. Вони більш зручні безпосередньо під час використання порівняно з окремими центрифугами, тому що забезпечують більш швидкий перехід між операціями, але сама така конструкція займає досить багато місця. Після включення пральної машини потрібно залишатися вдома, щоб в потрібний час долити води, перекласти білизну в центрифугу.



а)



б)

Рис. 1.5. Зовнішній вигляд двобакових напівавтоматичних пральних машин: а) Evgo; б) Сатурн:

1 – корпус; 2 – відділення для прання; 3 – відділення центрифуги; 4 – панель керування.

В автоматичних пральних машинах прання та віджимання виконуються одним робочим механізмом: перфорованим обертальним барабаном, який розташований в нерухомому баці.

На рис. 1.6. приведений зовнішній вигляд типової автоматичної пральної машини. Це малогабаритна машина відноситься до категорії вузьких. Класичний дизайн не набридає і добре вписується в різні варіанти інтер'єру ванної кімнати. Пральна машина Indesit має можливість відкласти час запуску. Розрахована на завантаження до 5 кг.

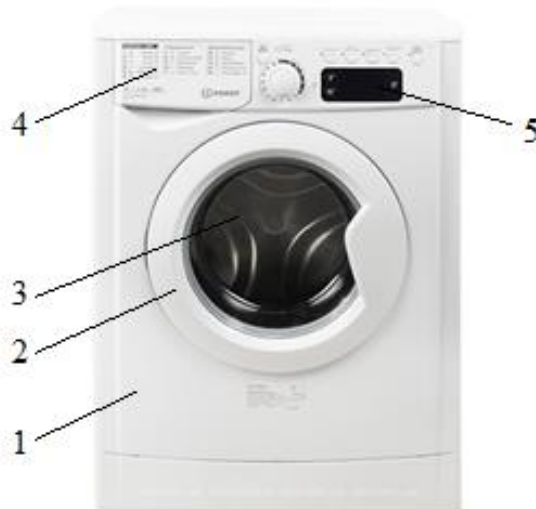


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд автоматичної пральної машини Indesit E2SE:

1 – корпус; 2 – кришка люка; 3 – перфорований барабан; 4 – панель керування; 5 - дисплей LED

До переваг можна віднести: керована швидкість віджимання від 400 до 1000 об/хв; рівень шуму під час віджимання до 70 дБ. Використовується універсальний колекторний двигун з пасовою передачею.

Автоматичні машини не потребують втручання користувача протягом всього циклу роботи.

1.3. Електропривод та режими його роботи

Для електроприводу (ЕП) ротора центрифуги або барабана пральної машини можуть застосовуватися як колекторні, так і асинхронні двигуни. Для машин з асинхронним двигуном характерне ступінчасте регулювання швидкості, а для машин з колекторним двигуном – плавне [8].

На рис. 1.7 приведена схема електропривода пральної машини з вбудованою центрифугою.

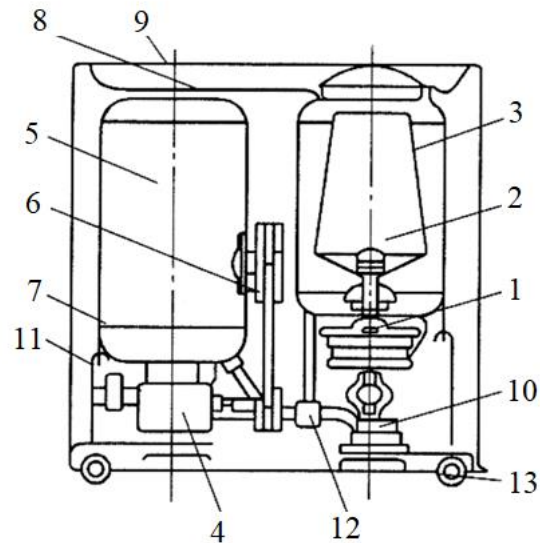


Рис. 1.7. Схема ЕП та конструкція напівавтоматичної машини з вбудованою центрифугою:

1 – електродвигун центрифуги; 2 – ротор; 3 – бак центрифуги; 4 – електродвигун активатора; 5 – пральний бак; 6 – активатор; 7 – корпус; 8 – верхня панель; 9 – кришка машини; 10 – насос; 11 – тяга; 12 – клапан; 13 – ролики

В машині використовується прямий привод центрифуги та окремий привод через пасову передачу для активатора пральної частини. В деяких моделях напівавтоматичних машин використовується один електродвигун і для ротора центрифуги, і для активатора.

В автоматичних пральних машинах основним завданням електродвигуна являється забезпечення обертання барабана в основних режимах роботи (при пранні, віджиманні, сушінні). В режимі віджимання команду на двигун формує командоапарат і через реле рівня подає її на двигун (рис. 1.8). Останній починає обертати барабан, розганяючи його до номінальної (або заданої користувачем) швидкості.



Рис. 1.8. Структурна схема системи віджимання в автоматичній пральній машині

При накопиченні в баці певної кількості відтиснутої води спрацьовує реле керування помпою віджимання. Помпа починає зливання відтиснутої води в каналізацію. Після закінчення заданого програмою часу віджимання командоапарат відмикає двигун обертання бака та помпу.

Обертання робочому барабану від двигуна може передаватися за допомогою пасової передачі. На рис. 1.8 показана конструкція електроприводу автоматичної пральної машини.

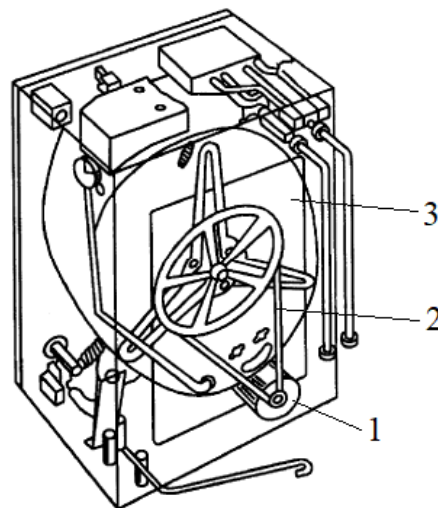


Рис. 1.9. Схема конструкції електропривода в автоматичній пральній машині:

1 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3 – барабан

Завантажена мокрою білизною центрифуга має великий момент інерції. Час розганяння до усталеної швидкості залежить від об'єму центрифуги і складає кілька десятків секунд. Тому потужність двигуна витрачається в основному на розгін. Отже, привод повинен мати високий пусковий момент для зменшення втрат під час перехідного режиму. Окрім цього система повинна забезпечувати плавний характер пуску.

В пральних машинах використовують різні способи виходу на режим віджимання з заданою частотою [17]. До таких способів відноситься, наприклад, переривчасте віджимання. Переривчасте віджимання - це спосіб, що складається з декількох простих фаз віджимання, що перериваються в часі для забезпечення рівномірного розподілення маси тканини вздовж периметру барабана. Аналіз закордонних автоматичних барабанних машин показав, що способи виходу на максимальну частоту обертання можна класифікувати наступним чином (рис. 1.10):

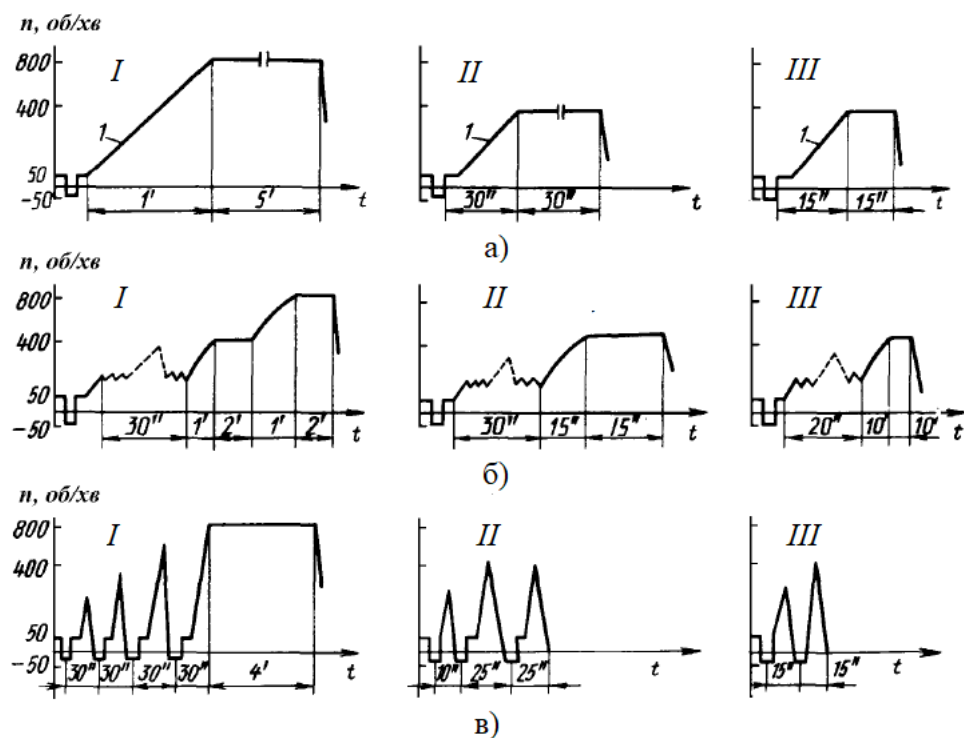


Рис. 1.10. Способи виходу барабана на максимальну швидкість обертання:

а – лінійний, б – східчастий, в – переривчастий; I – бавовна, льон; II – синтетика; III – шерсть

Лінійне віджимання (рис. 1.10, а) в різних машин відрізняється тільки крутизною лінії 1; східчасте віджимання (рис. 1.10, б), за яким застосовують різну кількість ступенів і рівнів швидкості; переривчасте віджимання (рис. 1.10, в), за яким застосовують різну кількість переривань та їх рівнів.

Кожна з цих груп має свої модифікації для бавовняної тканини, синтетичної і, у деяких випадках, навіть для вовни. Крім того, в деяких машинах для кращої розкладки тканини в барабані віджимання починається за повністю зливою води.

У деяких машинах з однобічним обертанням барабана і за частоти його обертання, що відповідає частоті обертання при пранні, роблять злив води, а потім в цьому ж напрямку починають віджимання.

У сучасних пральних машинах з електронною пам'яттю записують кілька програм віджимання від простої до складної. У деяких типах машин вбудовують датчик вібрацій. При перевищенні амплітуди вібрації бака допустимої величини, спрацьовує датчик і дає сигнал на зупинку віджимання з наступним переходом на іншу програму. Таким чином, виконується перебір усіх наявних програм, поки не відбудеться рівномірне розкладання й віджимання. Якщо перебір усіх закладених програм не забезпечує виходу на задану частоту віджимання, у бак заливається вода і здійснюється нова спроба провести розкладання. Якщо і це не дає результату, то на індикаторі подається сигнал оператору про необхідність зробити розкладку тканини вручну.

1.4. Схеми систем автоматичного керування ЕП

В загальному випадку до операцій, які підлягають автоматизації, відносять [20]:

- запуск в роботу;
- зупинення в довільному або фіксованому положенні;
- гальмування;
- реверсування;

- регулювання швидкості;
- захист від ненормальних та аварійних режимів роботи;
- реалізація необхідної послідовності операцій;
- сигналізація про стан окремих елементів системи;
- синхронізація обертання декількох механізмів, тощо.

Дія електропривода розпочинається з моменту подання початкового електричного сигналу в систему керування. В автоматизованому електроприводі початковий імпульс подається або рукою (вмикання кнопки), або від механізму, а подальші процеси протікають автоматично за дії системи керування.

Автоматизований електропривод в загальному випадку містить:

- один або декілька двигунів;
- механічну передачу (окрім систем прямого приводу);
- засоби керування;
- засоби блокування;
- засоби захисту та сигналізації.

Відповідно до цього повна електрична схема електропривода поділяється на головну або силову частину, коло керування, коло блокування, захисту та сигналізації.

Системи автоматичного керування (САК) – це такі системи, які забезпечують відтворення необхідного закону змінювання основних параметрів об'єкта керування, що характеризують його роботу. Автоматичне керування будується за принципом замкнутої та розімкненої схем. Системи із замкненими колами, з різноманітними зворотними зв'язками, знаходять все більше застосування.

Задача керування рухом електропривода для виконання технологічного процесу машини визначає необхідність регулювання змінних електромеханічної системи, які в просторі станів є її фазовими координатами. В електроприводі основними координатами являються струм (момент), швидкість та положення. В замкнених системах забезпечується автоматичне регулювання цих координат.

З теорії автоматичного керування відома класифікація САК за принципами їх побудови (принципами регулювання) [23]:

- за збуренням;
- за відхиленням (компенсаційний тип);
- комбінована.

Функціональні схеми САК приведені на рис. 1.11

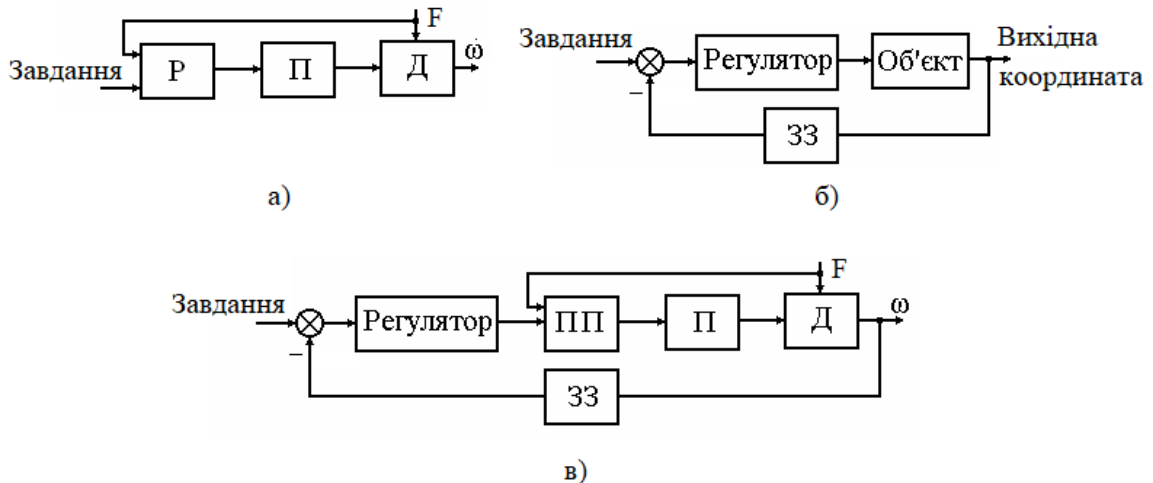


Рис. 1.11. Функціональні схеми, які реалізують принципи регулювання:
а) за збуренням; б) за відхиленням; в) комбінований

Принцип регулювання за збуренням (рис. 1.11, а) – це такий принцип регулювання, коли негативна дія збурюючої величини (F) на регульовану координату (ω) ліквідується шляхом введення керуючого впливу на вхід двигуна D через регулятор P та перетворювач Π таким чином, що він компенсує цю збурюючу величину.

Принцип регулювання за відхиленням (рис. 1.11, б) - такий принцип, коли в системі існує від'ємний зворотний зв'язок (ЗЗ) за регульованою координатою. На вході регулятора порівнюється завдання на регульовану координату та її фактичне значення.

Функціональна схема САК, яка побудована за використання комбінованого принципу регулювання, показана (рис. 1.11, в) та додатково містить проміжний підсилювач ПП. Дана схема поєднує два принципи, які розглянуті вище, у тому чи іншому співвідношенні.

На основі розглянутих вище принципів побудови САК можна сформувати узагальнену САК для керування електрообутовими машинами і приладами (рис. 1.12).

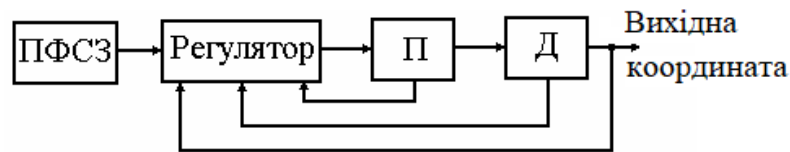


Рис. 1.12. Узагальнена схема керування електрообутовими машинами і приладами:

ПФСЗ – пристрій формування сигналу завдання

ПФСЗ призначений для формування завдання для САК, яка повинна забезпечити потрібну поведінку вихідної координати, тобто відпрацювання технологічної програми. Таким ПФСЗ може бути:

- потенціометр;
- механічний командоконтролер;
- програмний контролер.

Регулятор – це один або декілька корегувальних пристроїв, на входи яких подається сигнал неузгодження між сигналами завдання та сигналом зворотного зв'язку від об'єкта регулювання. Він формує бажану форму перехідного процесу проміжних і вхідної координат. Найбільш поширеними є пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор), нечіткий регулятор (Fuzzy-регулятор).

П - перетворювач, призначений для регулювання швидкості приводного двигуна відповідно до сигналу завдання з регулятора задля забезпечення необхідної швидкості валу двигуна.

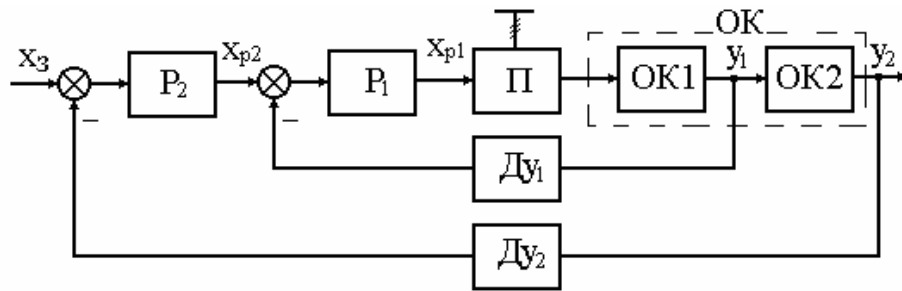
Системи автоматичного керування будуються за двома основними параметрами:

- за використання декількох регуляторів, кількість яких дорівнює кількості регульованих координат. Регулятори при цьому вмикаються послідовно і такі

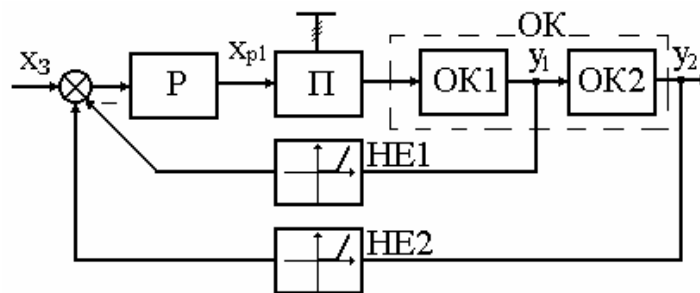
системи ще називають системами з підпорядкованим регулюванням параметрів (СПР);

- за використання одного регулятора для регулювання декількох координат (їх ще називають системами паралельного регулювання).

На рис. 1.13 представлені схеми систем регулювання.



а)



б)

Рис. 1.13. Функціональні схеми систем:

а) підпорядкованого регулювання; б) паралельного регулювання

Характерними особливостями побудови системи підпорядкованого регулювання (рис. 1.13, а) є [6]:

- кількість регуляторів дорівнює кількості регульованих координат об'єкта керування (ОК);
- регулятори вмикаються послідовно;
- вихідний сигнал зовнішнього регулятора P_2 є сигналом завдання на вході внутрішнього регулятора, тобто внутрішній контур регулювання координати y_1 є підпорядкованим зовнішньому контуру регулювання координати y_2 .

Основною перевагою системи з одним регулятором порівняно з СПР є вища швидкодія. Але основна перевага СПР – це простота налаштування, тобто незалежність налагодження координат.

В системах паралельного регулювання (рис. 1.13, б) сигнал завдання (X_3) подається на вхід регулятора, який керує перетворювачем П, що в свою чергу керує об'єктом керування (ОК). В такій схемі контролюються дві координати y_1 і y_2 (наприклад, струм I та швидкість ω), якщо ОК є двигун.

Регулятор у такому випадку має компромісне налаштування, а щоб зменшити вплив координат однієї на іншу в зворотній зв'язок можуть вмикати нелінійні ланки НЕ, тобто реалізують затримані зворотні зв'язки.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОБУТОВОЇ ЦЕНТРИФУГИ

2.1. Кінематична та розрахункова схеми

Електропривод (ЕП) і виконавчий механізм (ВМ) становлять єдину електромеханічну систему (ЕМС), рух якої підлягає загальним законам механіки та електротехніки, а також відповідає вимогам керування режимами роботи технологічної машини [4]. Виконавчим механізмом центрифуги являється перфорований барабан, що обертається з заданою швидкістю.

В якості об'єкта моделювання розглянемо механічну частину ЕМС, що включає в себе всі пов'язані рухомі маси: двигуна, передавального та виконавчого механізмів. Безпосереднє уявлення про рухомі маси та механічні зв'язки між ними дає кінематична схема електроприводу.

Кінематична схема електропривода центрифуги (на основі пральної машини) представлена на рис. 2.1 та складається з електродвигуна Д, клинопасової передачі та барабана центрифуги Ц.

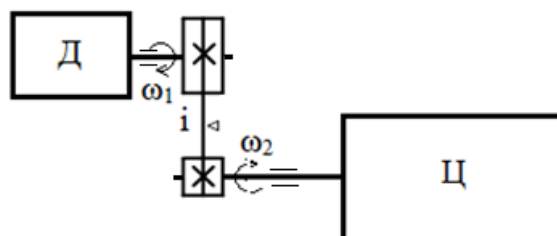


Рис. 2.1. Кінематична схема електропривода центрифуги:

ω_1 - швидкість обертання валу приводного двигуна, i – коефіцієнт пасової передачі, ω_2 - швидкість обертання барабана центрифуги

Структура кінематичної схеми електропривода центрифуги (див. рис. 2.1) відповідає двомасовій системі (рис. 2.2), що складається із зосередженої маси ротора двигуна та механізму, які обертаються та зв'язані між собою пасовою передачею.

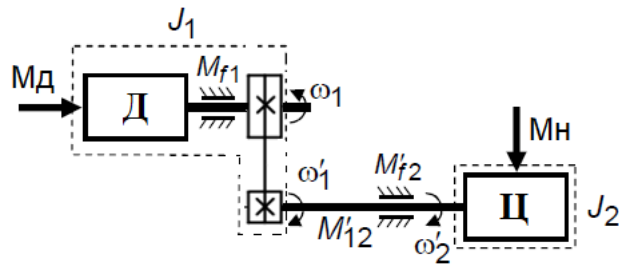


Рис. 2.2. Розрахункова схема механічної частини ЕП - Ц

Електромагнітний момент двигуна M_d є вихідною величиною для електричної частини системи та вхідною - для механічної, тому при розгляді процесів у системі він виділений з усіх діючих на механічну частину зовнішніх моментів. Вважатимемо, що J_1 – момент інерції об'єктів розміщених на первинному валу (ротора двигуна та передачі), J_2 – момент інерції барабана центрифуги (ВМ), M_n - статичний момент навантаження, що створюється робочими органами ВМ. Статичний момент складається з суми моментів корисного навантаження, необхідних для виконання роботи, та суми моментів втрат, в тому числі механічних втрат у двигуні. Зв'язок між двигуном та центрифугою характеризується жорсткістю пасової передачі C_{12} .

В загальному випадку механічна частина електроприводу являє собою систему пов'язаних мас, що рухаються з різними швидкостями обертально або поступально. При навантаженні елементи системи (вали, опори, пасові передачі, зубчасті зачеплення, тощо) деформуються, оскільки механічні зв'язки не є абсолютно жорсткими. При змінюванні навантаження маси мають можливість взаємного переміщення, яке визначається жорсткістю зв'язку.

2.2. Одномасова модель механічної частини

Одномасова модель застосовується найчастіше для синтезу та аналізу електропривода та електромеханічних систем із високою жорсткістю зв'язку або коли жорсткістю зв'язку нехтують. В цьому випадку механічну частину електропривода (рис. 2.2) можна розглядати як одномасову систему (рис. 2.3).

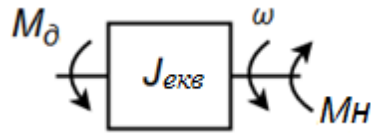


Рис. 2.3. Еквівалентна схема одномасової системи

В цьому випадку здійснюється зведення моменту інерції РМ J_1 до валу двигуна, усі маси замінюються однією еквівалентною з моментом інерції $J_{екв}$, швидкості ЕД та РМ однакові.

Еквівалентний момент інерції в даному випадку розраховується за формулою:

$$J_{екв} = J_1 + \frac{J_2}{i^2} \quad (2.1)$$

де i – передаточне число пасової передачі.

В реальних системах електропривода представлення абсолютно жорстким зв'язок валу двигуна з механізмом є припущенням, яке у деяких випадках неприпустимо [9]. Практично будь-який зв'язок двигуна з виконавчим органом є абсолютно нежорстким, і можливість нехтування явищем пружності іноді пов'язана з тим, що власна частота пружних коливань системи Д-ВМ є досить великою у порівнянні з суттєвими для системи керування електроприводом частотами. Тому підвищення швидкодії електромеханічної системи, яке обумовлене застосуванням тиристорних або транзисторних перетворювачів і високоякісних елементів системи керування, іноді неможливо реалізувати у наслідок суттєвого впливу пружності в механічній передачі.

Тому далі будемо розглядати саме двомасову систему.

2.3. Модель двомасової системи механічної частини електропривода центрифуги

Розрахункова схема двомасової системи ЕП – Ц з врахуванням пружного зв'язку ($M_{пр}$ – момент пружності) представлена на рис. 2.4.

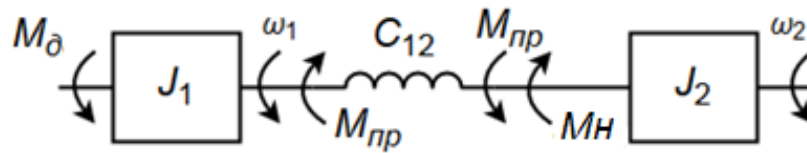


Рис. 2.4. Розрахункова схема двомасової системи з пружним зв'язком

Під час моделювання таких систем можна зробити наступні припущення:

- моменти в системі прикладені до зосереджених мас, що не зазнають деформації;
- пружні зв'язки невагомі та характеризуються постійним жорстким зв'язком, тобто коефіцієнтом пропорційності між моментом та деформацією;
- деформація пружних ланок лінійна та підпорядковується закону Гука;
- хвильовий рух деформації відсутній.

Тоді математична модель механічної частини ЕД – Ц за рис. 2.4 являє собою систему диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} p\omega'_1 &= \left(M_d - \frac{1}{i} M_{12} \right) \frac{1}{J_1 i p} \\ pM_{12} &= \left(\frac{\omega'_1}{i} - \omega_2 \right) \frac{C_{12}}{p} \\ p\omega_2 &= (M_{12} - M_n) \frac{1}{J_2 p} \end{aligned} \right\} (2.2)$$

Структурна схема-модель за рівняннями (2.2) представлена на рис. 2.5.

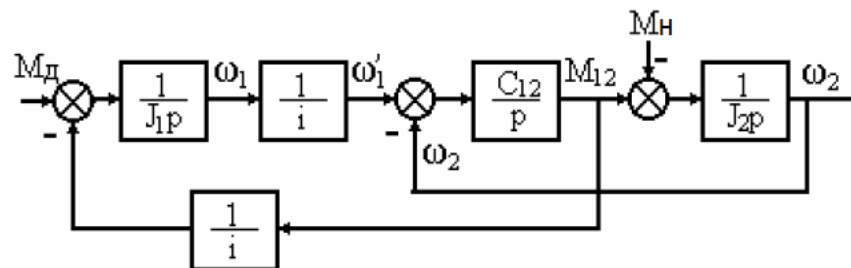


Рис. 2.5. Структурна схема-модель двомасової системи ЕП – Ц з врахуванням пружного зв'язку

2.4. Модель двомасової системи з врахуванням в'язкого тертя

В моделі п.2.3 під впливом прикладених до ротора двигуна та механізму зовнішніх моментів M_d та M_n пружний зв'язок скручений під деяким початковим кутом. Після зникнення зовнішніх моментів в системі виникнуть затухаючі коливання. Якщо двигун вимкнений від мережі живлення, тобто не демпфірує коливання, тоді останні будуть затухати за рахунок сил тертя, на подолання яких витрачається енергія, що запасена пружною системою [3]. Розрахункова схема двомасової пружної системи з врахуванням тертя представлена на рис. 2.6.

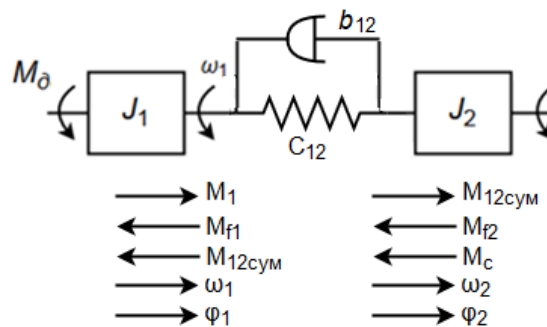


Рис. 2.6. Розрахункова схема двомасової пружної механічної частини
ЕП – Ц з врахуванням в'язкого тертя

Демпфірування коливань здійснюється за рахунок сил внутрішнього тертя в речовині пружного зв'язку, що пропорційні різниці швидкостей першої ω_1 та другої ω_2 мас, а також за рахунок сил зовнішнього в'язкого тертя на першій та другій масах, що в першому наближенні можуть бути прийняті пропорційними швидкостям відповідних мас:

$$M_{f1}(p) = a_1 \cdot \omega_1(p); \quad M_{f2}(p) = a_2' \cdot \omega_2(p),$$

де M_{f1} , M_{f2} - моменти від сил зовнішнього в'язкого тертя на першій та другій масах;

a_1 , a_2' – коефіцієнти зовнішнього в'язкого тертя.

З урахуванням прийнятих припущень механічну систему (рис. 2.6) в операторній формі можна описати наступними виразами:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_d(p) - \frac{1}{i} \{ M'_{12}(p) - b' [\omega'_1(p) - \omega'_2(p)] \} - a_1 \omega_1(p) = J_1 p \omega_1(p) \\ M'_{12}(p) + M_H(p) - b' [\omega'_1(p) - \omega'_2(p)] - a'_2 \omega'_2(p) = J'_2 p \omega'_2(p) \\ M'_{12}(p) = \frac{c'_{12}}{p} [\omega'_1(p) - \omega'_2(p)] \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

де b' – коефіцієнт внутрішнього тертя в пружній передачі;

i – передатне число пасової передачі;

приведення величин, що позначені штрихами:

$$M(p) = M'(p)/i; \quad \omega_2(p) = i \cdot \omega'(p); \quad J_2 = J'_2/i^2; \quad a_2 = a'_2/i^2; \quad C_{12} = c'_{12}/i^2; \quad b = b'/i^2 \quad (2.4)$$

З урахуванням приведених значень параметрів і змінних (2.4) система рівнянь (2.3) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_d(p) - \{ M_{12}(p) - b [\omega_1(p) - \omega_2(p)] \} - a_1 \omega_1(p) = J_1 p \omega_1(p) \\ M_{12}(p) + M_H(p) - b [\omega_1(p) - \omega_2(p)] - a_2 \omega_2(p) = J_2 p \omega_2(p) \\ M_{12}(p) = \frac{C_{12}}{p} [\omega_1(p) - \omega_2(p)] \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Відповідно до системи рівнянь (2.5) на рис. 2.7 побудована структурна схема-модель двомасової пружної системи з врахуванням в'язкого тертя, що являє собою механічну частину електропривода центрифуги, кінематична схема якої зображена на рис. 2.1.

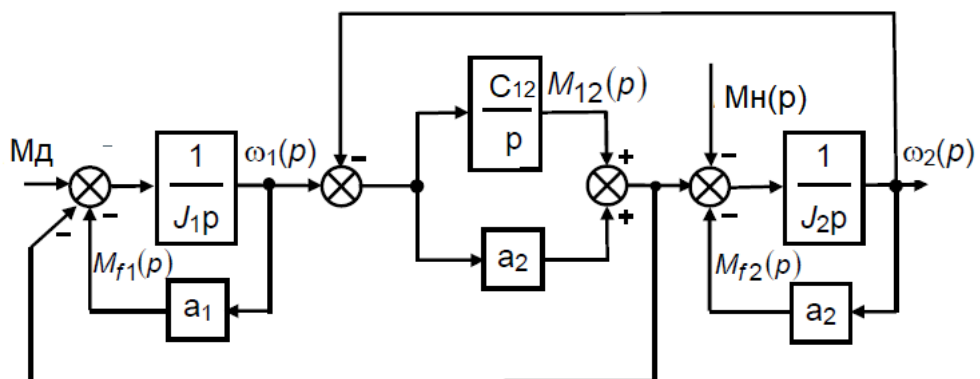


Рис. 2.7. Структурна схема-модель механічної частини електропривода центрифуги (Д - Ц) з врахуванням пружності та в'язкого тертя

В загальному випадку, наявність внутрішніх дисипативних сил в передачі, сухого та в'язкого тертя в опорах, кінематичних похибок та люфтів враховує наступна математична моделі (2.6):

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{д}} - M'_{\text{с1}} - M''_{\text{с1}} - M_{\text{f1}} - M'_{12}(1 + \beta \text{sign}M'_{12}) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M'_{12} - M'_{\text{с2}} - M''_{\text{с2}} - M_{\text{f2}} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

де $M_{12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{\text{кп}} - \Delta\varphi_3/2)$, якщо $|\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{\text{кп}}| > \Delta\varphi_3/2$;

$M_{12} = 0$, якщо $|\varphi_1 - \varphi_2 - \Delta\varphi_{\text{кп}}| < \Delta\varphi_3/2$;

$M'_{12} = M_{12} + b \, dM_{12}/dt$ - пружний момент з урахуванням внутрішнього тертя;

$M'_{\text{с1}}, M'_{\text{с2}}$ - активні постійні моменти навантаження на відповідних валах;

$M''_{\text{с1}}, M''_{\text{с2}}, M_{\text{f1}}, M_{\text{f2}}$ - моменти сухого та в'язкого тертя в опорах, відповідно;

$\Delta\varphi_{\text{кп}}, \Delta\varphi_3$ - величина кінематичної похибки та люфту, відповідно;

J_1, J_2 - моменти інерції двигуна та центрифуги, приведені до валу двигуна;

a_1, a_2 - приведені до валу двигуна коефіцієнти в'язкого тертя в опорах;

C_{12}, b - коефіцієнти жорсткості та внутрішнього в'язкого тертя механічної передачі, що приведені до валу двигуна, відповідно;

β - коефіцієнт пропорційності змінної складової сили тертя.

Узагальнена структурна схема-модель механічної частини електропривода, що складена відповідно до математичної моделі (2.6) приведена на рис. 2.8.

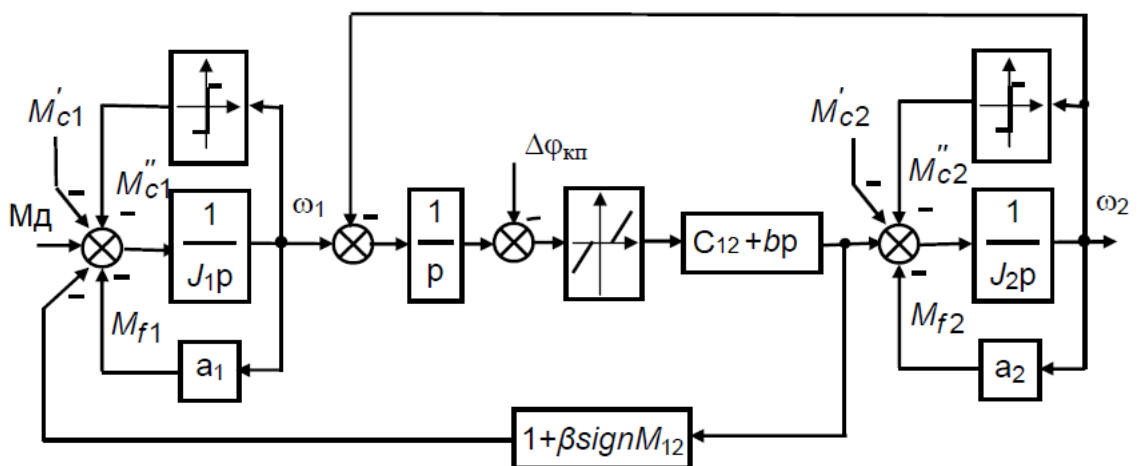


Рис. 2.8. Узагальнена структурна схема-модель механічної частини електропривода центрифуги

2.5. Загальні показники двомасової системи

В електроприводі центрифуги з пружністю в механічній передачі перехідні процеси при запуску універсального електродвигуна постійного струму в значній мірі залежать від величини γ – співвідношення моментів інерції двигуна та Ц (тобто мас, що обертаються):

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} \quad (2.7)$$

Дуже важливим при моделюванні динаміки руху двомасової системи є вибір кроку інтегрування, оскільки від цього залежить обсяг обчислень та точність отриманого результату. Орієнтиром у цьому питанні можуть бути динамічні властивості системи, які визначаються резонансними частотами Ω_{12} :

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} \quad (2.8)$$

Для кожного коливання необхідно розрахувати не менше 25...30 точок, тобто крок інтегрування прийняти таким:

$$h = \left(\frac{1}{25} \dots \frac{1}{30} \right) \frac{2\pi}{\Omega_m}, \quad (2.9)$$

де Ω_m – більша з частот.

За постійним моментом двигуна – $M_d = \text{const}$ (це досить грубе припущення) – двомасова система характеризується наступними показниками:

– середнє прискорення електропривода (ЕРС компенсована):

$$\varepsilon_{\text{сер}} = \frac{I_H \lambda \cdot K\Phi - M_c}{J_1 + J_2}, \quad (2.10)$$

– амплітуда коливань швидкості електродвигуна навколо середнього значення:

$$A_{\omega_1} \approx \frac{\varepsilon_{\text{сер}} J_2}{\Omega_{12} J_1}, \quad (2.11)$$

– амплітуда коливань швидкості механізму (Ц) навколо середнього значення:

$$A_{\omega_2} \approx \frac{\varepsilon_{\text{сеп}}}{\Omega_{12}},$$

– закон зміни швидкості електродвигуна:

$$\omega_1 = \varepsilon_{\text{сеп}} t + \frac{\varepsilon_{\text{сеп}} J_2}{\Omega_{12} J_1} \sin \Omega_{12} t;$$

– закон зміни швидкості механізму:

$$\omega_2 = \varepsilon_{\text{сеп}} t - \frac{\varepsilon_{\text{сеп}}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t;$$

– закон зміни пружного моменту:

$$M_{12} = \varepsilon J_2 (1 - \cos \Omega_{12} t) + M_{\text{н}}.$$

Ступінь коливальності процесу при $M_{\text{д}} = \text{const}$ можна оцінити за допомогою динамічного коефіцієнту:

$$K_{\text{дин}} = \frac{M_{12\text{max}}}{M_{12\text{сеп}}} = \frac{2\varepsilon_{\text{сеп}} J_2 + M_{\text{н}}}{\varepsilon_{\text{сеп}} J_2 + M_{\text{н}}}, \quad (2.12)$$

де $M_{12\text{max}}$ – максимальне значення пружного моменту;

$M_{12\text{сеп}}$ – середнє значення пружного моменту.

2.6. Модель універсального колекторного двигуна

Для моделювання універсального колекторного електродвигуна за умови живлення від мережі постійного струму приймемо наступні припущення:

- керування швидкістю здійснюється за рахунок зміни напруги кола якоря,
- магнітний потік та індуктивність обмотки якоря вважаються постійними.

Початкові рівняння для математичного опису динамічних процесів в двигуні в операторній формі мають вигляд

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = k\Phi\omega_1 + R_{\text{я}}I_{\text{я}} + L_{\text{я}}pI_{\text{я}} \\ M_{\text{д}} = k\Phi I_{\text{я}} \\ J_1 p\omega_1 = M_{\text{д}} - M_{\text{с1}} \end{cases}, \quad (2.13)$$

де Φ – магнітний потік збудження двигуна;

$R_{\text{я}}$ та $L_{\text{я}}$ – активний опір та індуктивність кола якоря;

J_1 – сумарний момент інерції двигуна (якоря) та жорстко зв'язаних з ним елементів;

k – конструктивний коефіцієнт двигуна (електромашинна стала), $k = p_n N / (2\pi a)$;

p_n - число пар полюсів;

N та a – кількість відповідно активних провідників і паралельних витків обмотки якоря.

До змінних системи рівнянь (2.13) відносяться: $U_{\text{я}}$ – напруга, що підведена до двигуна; $I_{\text{я}}$ – струм якоря; ω_1 – кутова швидкість обертання валу двигуна; $M_{\text{д}}$ – електромагнітний момент; $M_{\text{с1}}$ – момент статичного опору на валу двигуна, для багатомасової механічної системи він доповнюється відповідними моментами пружності та демпферування. Зазначимо, входною змінною для двигуна, як об'єкта структурного моделювання, є напруга $U_{\text{я}}$, вихідною - ω_1 , зовнішнім впливом є момент M_H без врахування моментів механічної підсистеми.

Виведемо рівняння для структурного опису динамічних процесів в електромеханічній частині ДПС. Позначимо $C_{\text{д}} = k\Phi$, тоді

$$M_{\text{д}} = C_{\text{д}} I_{\text{я}}. \quad (2.14)$$

Знайдемо вираз для визначення $I_{\text{я}}$:

$$\begin{aligned} U_{\text{я}} &= C_{\text{д}} \omega_1 + I_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} p I_{\text{я}}; \\ I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + L_{\text{я}} p) &= U_{\text{я}} - C_{\text{д}} \omega_1; \\ I_{\text{я}}(1 + T_{\text{я}} p) &= (U_{\text{я}} - C_{\text{д}} \omega_1) / R_{\text{я}}; \end{aligned} \quad (2.15)$$

де $T_{\text{я}}$ – електромагнітна постійна часу кола якоря:

$$T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}} \quad (2.16)$$

Напишемо рівняння (2.15) з точки зору формування передаточної функції:

$$I_{\text{я}} = (U_{\text{я}} - C_{\text{д}}\omega_1) \frac{1/R_{\text{я}}}{1+T_{\text{я}}p}, \quad (2.17)$$

Наприкінці, введемо позначення

$$M_I = M_{\text{д}} - M_{\text{н}}. \quad (2.18)$$

Структурна схема-модель електродвигуна представлена на рис. 2.9.

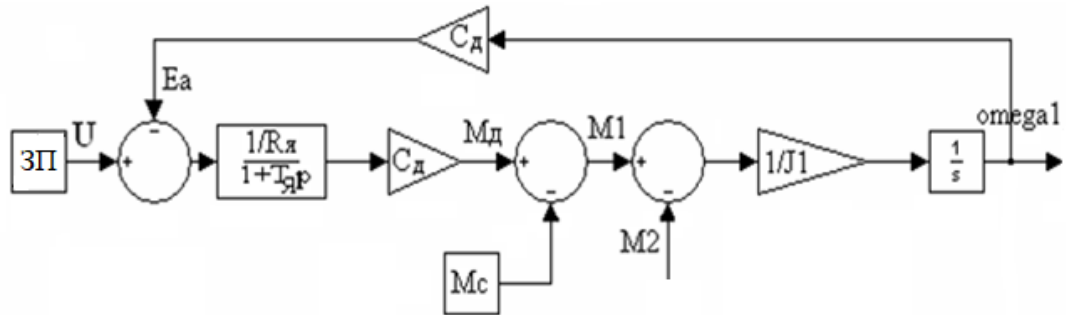


Рис. 2.9. Структурна схема-модель електродвигуна

На рис. 2.9 напруга керування електродвигуном створюється за допомогою задавального пристрою ЗП.

2.7. Модель керованого електропривода побутової центрифуги

Керований електропривод створюємо за структурою підпорядкованого регулювання (див. рис. 1.13, а). Вважаємо, що внутрішній контур регулювання містить регулятор струму $W_{\text{рс}}(p)$ і зворотний зв'язок за струмом із коефіцієнтом передачі $K_{\text{с}}$, а зовнішній – регулятор швидкості $W_{\text{рш}}(p)$ і зворотний зв'язок за швидкістю з коефіцієнтом передачі $K_{\text{ш}}$. Сталими часу датчиків зворотних зв'язків нехтуємо у зв'язку з їх відносно малим значенням. Зворотний зв'язок за ЕРС вважаємо не компенсованим.

Передаточні функції та типи регуляторів для СПР вибираються за умови забезпечення необхідної якості в перехідних процесах. Розглянемо показники якості.

Задля кількісного визначення вимог, що ставляться до регульованого електропривода, та порівняння між собою можливих способів регулювання

використовують узагальнені показники регулювання [20]. До їх числа відносяться точність, діапазон, плавність, динамічні показники якості та економічність регулювання.

Точність регулювання змінної визначається можливими відхиленнями її від заданого значення під впливом факторів, що збурюють.

Діапазон регулювання характеризує границі змінювання середніх значень змінної за даним способом регулювання.

Плавність регулювання характеризує кількість дискретних значень регульованого параметра.

До динамічних показників регульованого електропривода відносять швидкодію, перерегулювання та коливальність. Для їх оцінки зазвичай розглядаються залежності змінювання координати $h(t)$ від часу на виході ЕП за стрибкоподібному змінюванні вхідного сигналу, що задає, (характеристики за керуванням) і за стрибкоподібному змінюванні моменту навантаження (характеристика за збуренням) (рис. 2.10).

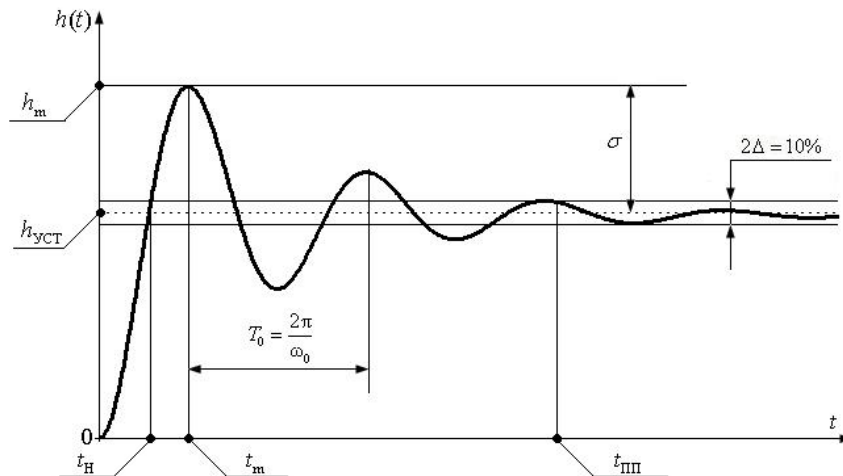


Рис. 2.10. Показники якості регулювання

Швидкодія визначає швидкість реакції електропривода на зміну впливів. Вона характеризується (рис. 2.10):

- 1) тривалістю переходного процесу $t_{пп}$, за якою затухають всі його вільні складові;

- 2) часом першого узгодження (часом регулювання) t_n , за який змінна перший раз досягає усталеного значення $h_{уст}$;
- 3) часом t_m досягнення першого максимуму h_m .

Перерегулювання представляє собою динамічну похибку та характеризується максимальним відхиленням від усталеного значення. Величина перерегулювання розраховується за формулою:

$$\sigma = (h_m - h_{уст}) / h_{уст} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

Коливальність електропривода може характеризуватись періодом коливань $T_0 = 2\pi/\omega_0$ та числом коливань за час перехідного процесу.

Основний метод розрахунку СПР – це компенсація великих сталих часу, електромеханічної системи. Для розрахунку і налаштування контурів регулювання достатньо налаштувати перший внутрішній контур на мінімум перерегулювання та максимальну швидкодію, а усі зовнішні контури налаштовуються по відношенню до внутрішнього контуру. Зазвичай використовують оптимізацію за виразом передаточної функції (ПФ).

В якості бажаних передаточних функцій в системах електроприводу в основному використовуються дві:

- 1) Передаточна функція коливальної ланки, налаштованої на так званий «технічний» оптимум (оптимум по модулю, *Biетrage-optimum*).
- 2) Передаточна функція коливальної ланки, що налаштовується на так званий «симетричний» оптимум.

В першому випадку передаточна функція має вигляд:

$$W_3(p) = \frac{1}{2T_0 p(T_0 p + 1) + 1}, \quad (2.20)$$

де T_0 – мала некомпенсована стала часу оптимізованого контуру, який відповідає налаштуванню замкненого контуру на технічний оптимум;

p – оператор Лапласа.

Передаточна функція розімкненого контуру, оптимізованого за T_0 $W_p(p)$, описується виразом:

$$W_p(p) = \frac{1/K_{зз}}{2T_0 p (T_0 p + 1)} \quad (2.21)$$

де $K_{зз}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за оптимізованою координатою.

Очевидно, що ПФ регулятора $W_{p1}(p)$, який необхідно ввімкнути в контур, можна визначити за виразом

$$W_{p1}(p) = \frac{W_p(p)}{W_{ок}(p)},$$

де $W_{ок}(p)$ - ПФ об'єкта керування ОК1 (рис. 1.13, а).

Ставимо у відповідність знайденій ПФ регулятора типу ПФ.

Налаштування наступного (зовнішнього) контуру за ТО, наприклад швидкості, проводимо за аналогічною методикою відповідно до ПФ (2.21). При цьому об'єктом керування $W'_{ок}(p)$ є ОК2 та оптимізований контур струму:

$$W'_{ок}(p) = W_{ок2}(p)W_3(p).$$

У випадку налаштування за симетричним оптимумом (СО) ПФ оптимізованого розімкненого контуру описується виразом:

$$W_2(p) = \frac{1/K_{зз}(4T_0 p + 1)}{8T_0^2 p^2 (T_0 p + 1)} \quad (2.22)$$

Структурна схема електропривода з підпорядкованим регулюванням координат для центрифуги представлена на рис. 2.12.

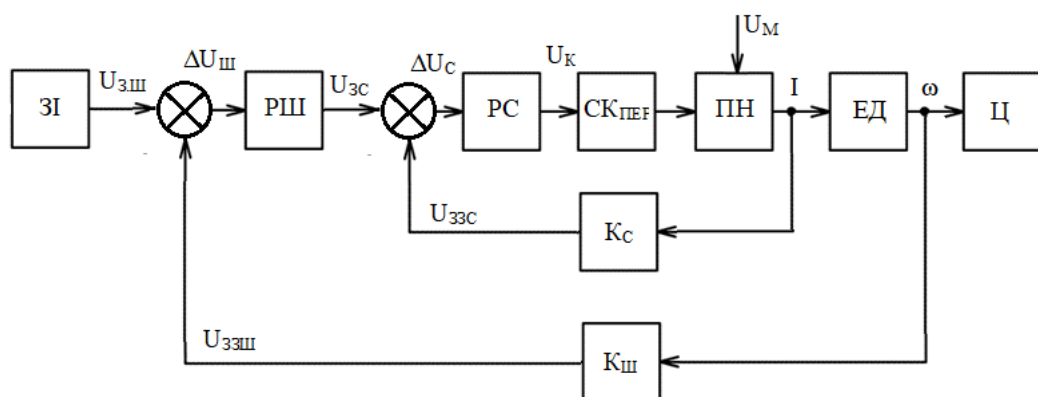


Рис. 2.11. Структурна схема електропривода з підпорядкованим регулюванням координат для центрифуги

В даному електроприводі універсальний колекторний двигун ЕД живиться від тиристорного перетворювача напруги ПН. На валу двигуна встановлено тахогенератор, що виробляє сигнал зворотного зв'язку за швидкістю $U_{ззш} = k\omega$. Сигнал завдання швидкості $U_{зш}$ формується задатчиком інтенсивності ЗІ. Напруга завдання швидкості порівнюється з напругою зворотного зв'язку за швидкістю, і значення різниці $\Delta U_{ш} = U_{зш} - U_{ззш}$ надходить на регулятор швидкості РШ.

Сигнал зворотного зв'язку за струмом $U_{ззс} = k_C \cdot I_a$ надходить від датчика струму, що ввімкнений в коло якоря ЕД. Вихідний сигнал РШ $U_{зс}$ є задавальним для регулятора струму РС. Цей сигнал порівнюється з напругою зворотного зв'язку за струмом, і значення різниці $\Delta U_C = U_{зс} - U_{ззс}$ подається на вхід регулятора струму РС. Вихідний сигнал підсилюється та в якості сигналу керування U_K надходить у систему керування СК_{ПЕР} перетворювачем напруги ПН, що здійснює керування його тиристорами.

Контур струму, який охоплює тиристорний перетворювач і коло якоря електродвигуна, налаштовуємо на технічний оптимум за формулою (2.21). Отримуємо ПІ-регулятор струму з передаточною функцією:

$$W_{PC}(p) = \frac{1 + T_1 p}{T_0 p} = \frac{k_{IC}}{p} + k_{ICS}, \quad (2.23)$$

де k_{IC} , k_{ICS} - коефіцієнти підсилення інтегральної та пропорційної складових регулятора струму.

Контур швидкості, який охоплює контур струму та момент інерції електродвигуна, налаштовуємо на симетричний оптимум за формулою (2.22). Отримуємо ПІ-регулятор швидкості з передаточною функцією:

$$W_{PS}(p) = \frac{1 + T_2 p}{T_0 p} = \frac{k_{IS}}{p} + k_{ISS}, \quad (2.24)$$

де k_{IS} , k_{ISS} - коефіцієнти підсилення інтегральної та пропорційної складових регулятора швидкості.

Для отримання моделі керованого електропривода з урахуванням пружного зв'язку в механічній частині в структурній схемі за рис. 2.12 блоки ЕД та Ц відображуємо з урахуванням моделей за рис. 2.8 та 2.9.

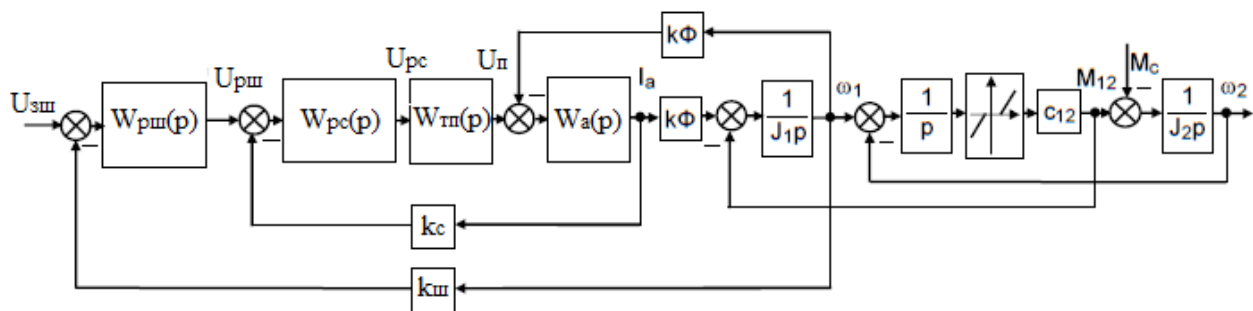


Рис. 2.12. Структурна схема-модель керованого електропривода центрифуги з урахуванням пружного зв'язку та підпорядкованим регулюванням координат

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок геометричних розмірів ротора центрифуги

При розрахунку центрифуги враховуються такі фактори: завантажувальна маса ($m_c = 2$ кг), фактор розділення, що визначає ступінь віджимання ($\Phi = 200$), і дисбаланс у вертикальній площині [10].

Внутрішній діаметр D_e ротора центрифуги можна визначити за емпіричною формулою:

$$\begin{aligned} D_e &= 0,13\sqrt{m_c} - 0,001m_c, \\ D_e &= 0,13 \cdot 1,4 - 0,002 = 0,18 \end{aligned} \quad (\text{м})$$

Зовнішній діаметр D_z ротора центрифуги:

$$\begin{aligned} D_z &= D_e + 2 \cdot \delta, \\ D_z &= 0,18 + 2 \cdot 0,0015 = 0,183 \end{aligned} \quad (\text{м})$$

де δ - товщина обичайки, приймаємо 0,0015 м.

Маса обичайки $m_{об}$ центрифуги:

$$\begin{aligned} m_{об.} &= \rho \cdot V_{об.} (1 - K_n) \\ m_{об.} &= 2,7 \cdot 10^3 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} (1 - 0,25) = 0,43 \end{aligned} \quad (\text{кг})$$

де $V_{об.}$ - об'єм обичайки центрифуги, ($2,1 \cdot 10^{-4} \text{м}^3$);

ρ - густина дюралюмінію, ($2,7 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$);

K_n - коефіцієнт перфорації, приймаємо 0,25.

Маса днища $m_{дн}$ центрифуги:

$$\begin{aligned} m_{дн} &= \rho \cdot V_{дн.}, \\ m_{дн} &= 2,7 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-4} = 0,19 \end{aligned} \quad (\text{кг})$$

де $V_{дн}$ - об'єм днища центрифуги, ($0,7 \cdot 10^{-4} \text{м}^3$).

Маса ротора центрифуги:

$$m_p = m_{об} + m_{он},$$

$$m_p = 0,43 + 0,19 = 0,62 \quad (\text{кг})$$

Висота ротора центрифуги:

$$H = 0,15 \cdot m_c,$$

$$H = 0,15 \cdot 2 = 0,3 \quad (\text{м})$$

Частоту обертання ротора центрифуги знаходимо через фактор розділення, який визначається за формулою (1.2):

$$\omega = \sqrt{\frac{\Phi \cdot g}{R_u}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 9,8}{0,09}} = 147,5 \quad (\text{с}^{-1})$$

де R_u - радіус центрифуги, $D_6/2 = 0,18/2 = 0,09$ м.

3.2. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна центрифуги

У період пуску центрифуги необхідно подолати інерцію ротора і завантаження (маси виробів), а також тертя валу центрифуги в підшипниках та ротора об повітря.

Витрата енергії на подолання інерції ротора E_{ip} :

$$E_{ip} = \frac{m_p \cdot \omega^2}{2},$$

$$E_{ip} = \frac{0,62 \cdot 147,5^2}{2} = 6744 = 6,7 \text{кДж},$$

де m_p - маса ротора центрифуги, кг;

ω - частота обертання ротора центрифуги, с^{-1} .

Витрата енергії на подолання інерції завантаження E_{iz} з урахуванням зміни радіуса кільця завантаження:

$$E_{iz} = \frac{0,375 \cdot m_c \cdot \omega^2}{2},$$

$$E_{iz} = \frac{0,375 \cdot 2 \cdot 147,5^2}{2} = 8200 = 8,2 \text{кДж}.$$

Витрата потужності на подолання інерції N_i :

$$N_i = \frac{E_{ip} + E_{iz}}{\tau_{пуск} \cdot 1000}, \quad (\text{кВт})$$

$$N_i = \frac{6,7 \cdot 10^3 + 8,2 \cdot 10^3}{60 \cdot 1000} = 0,25$$

де $\tau_{пуск}$ - тривалість пуску, приймаємо 60 с.

Витрата потужності N_n на подолання тертя валу в підшипниках:

$$N_n = \frac{M_{mp.n.} \cdot \omega}{1000}, \quad (\text{кВт})$$

де $M_{mp.n.}$ - момент тертя в підшипниках, Н·м.

Момент тертя в підшипниках:

$$M_{mp.n.} = (m_p + m_c) \cdot g \cdot f \cdot r,$$

$$M_{mp.n.} = (0,62 + 2) \cdot 9,8 \cdot 0,001 \cdot 0,02 = 0,5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Н·м})$$

де f - коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання валу ротора під час пуску дорівнює 0,001;

r - радіус валу центрифуги, $r = 0,02$ м.

Таким чином отримуємо:

$$N_n = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 147,5}{1000} = 0,07 \cdot 10^{-3} \quad (\text{кВт}).$$

Потужність $N_{нов}$, що витрачається на подолання тертя ротора центрифуги об повітря, визначається за формулою:

$$N_{нов} = k_e \cdot \rho_n \cdot \omega^2 \cdot \left[D_n^5 \left(1 + \frac{5 \cdot H}{D_n} \right) + D_6^5 \left(1 + \frac{5 \cdot H}{D_6} \right) \right] \quad (\text{кВт})$$

де k_e - експериментальний коефіцієнт, дорівнює $3 \cdot 10^{-3}$;

$\rho_{нов}$ - густина повітря за температурою 20°C дорівнює 1,193 кг/м³;

D_3 - зовнішній діаметр ротора центрифуги, 0,183 м;

D_6 - внутрішній діаметр ротора центрифуги, 0,18 м;

H - висота кільця виробів в роторі, 0,3 м.

$$N_{нов} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,193 \cdot 147,5^2 \cdot \left[0,183^5 \left(1 + \frac{5 \cdot 0,3}{0,183}\right) + 0,183^5 \left(1 + \frac{5 \cdot 0,3}{0,18}\right) \right] = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}$$

Потужність на валу ротора центрифуги:

$$N_p = N_i + N_n + N_{нов},$$

$$N_p = 0,25 + 0,07 \cdot 10^{-3} + 0,29 \cdot 10^{-3} = 0,25036 \text{ (кВт)}$$

Потужність двигуна з урахуванням кінематичної схеми привода:

$$N = \frac{N_p}{\eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{250,36}{0,98 \cdot 0,96} = 265 \text{ (Вт)}$$

де $\eta_1 = 0,98$ – к.к.д. підшипника; $\eta_2 = 0,96$ – к.к.д. клинопасової передачі.

Обираємо універсальний вбудований колекторний двигун з потужністю 270 Вт типу УВ062.

Універсальні колекторні двигуни з цілого ряду властивостей вигідно відрізняються від асинхронних двигунів: вони дозволяють отримувати різні частоти обертання; дають можливість просто, плавно та економічно регулювати частоту обертання в широкому діапазоні, мають порівняно високий ККД, великі пускові моменти [13]. Ці позитивні якості сприяють широкому поширенню колекторних двигунів незважаючи на деякі дуже істотні недоліки в наслідок наявності щітково-колекторного вузла, що знижує надійність і вимагає додаткового догляду.

За своєю будовою ці двигуни майже не відрізняються від колекторних двигунів змінного струму з послідовним збудженням. Для зближення характеристик двигуна на постійному та змінному струмі у обмоток збудження виконуються додаткові виводи: при роботі на постійному струмі включається вся обмотка збудження, а при роботі на змінному струмі - лише частина її.

Універсальні колекторні вбудовані двигуни (УВ) змінного і постійного струму служать для приводу найрізноманітніших механізмів. Двигуни мають мінімальні габарити завдяки використанню пакету активної стали в якості корпусу та відсутності вентилятора.

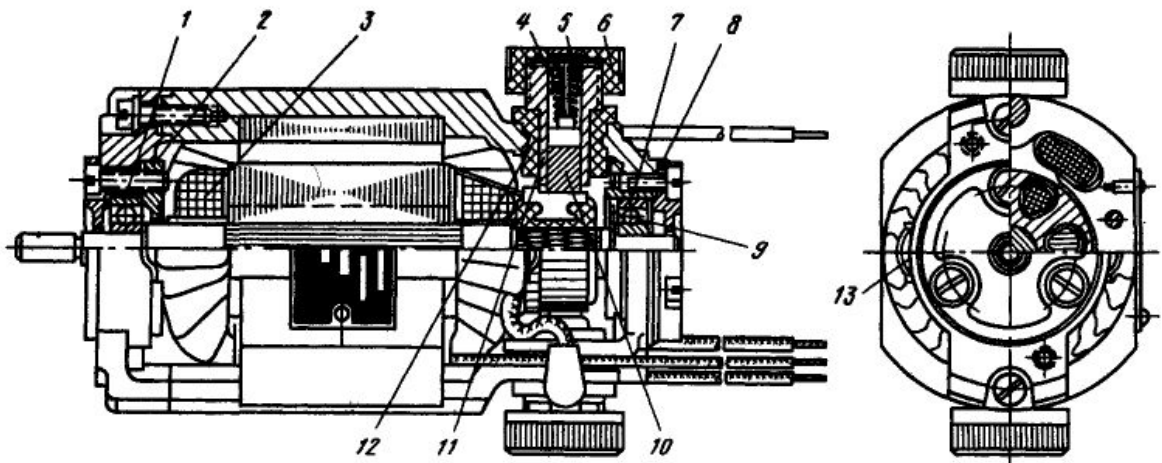


Рис. 3.1. Загальний вигляд двигунів серії УВ:

1 - підшипник з боку вільного кінця валу; 2 - фланець; 3 - обмотка збудження, 4 - пружина; 5 - пластина контактна; 6 - ковпачок пластмасовий; 7 - підшипники з боку колектору; 8 - фланець; 9 - шайба; 10 - щітка, 11 - обойма; 12 - втулка пластмасова; 13 - скоба

3.3. Розрахунок параметрів моделі електродвигуна

Вхідними даними для розрахунку параметрів моделі обраного електродвигуна являються паспортні дані [4]:

- номінальна потужність $P_n = 270$ Вт;
- номінальна напруга при живленні від мережі постійного струму $U_n = 220$ В;
- номінальна кількість обертів за хвилину $n_n = 3600$ об/хв.;
- номінальний струм $I_n = 1,3$ А;
- момент інерції якоря $J_l = 0,00075$ кг·м²;
- активний опір кола якоря $R_a = 27,2$ Ом;
- кількість пар полюсів $p_n = 2$.

Індуктивність якоря L_α двигуна у каталозі відсутня, тоді її приблизне значення знаходимо через номінальні параметри двигуна за формулою Уманського-Лінвілля:

$$L_{\text{я}} = K \frac{30 \cdot U_{\text{н}}}{\pi \cdot p_{\text{п}} \cdot I_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}}}$$

де $K = 0.5$ – для двигунів без компенсаційної обмотки.

$$L_{\text{я}} = 0,5 \frac{30 \cdot 220}{3,14 \cdot 2 \cdot 1,3 \cdot 3600} = 0,112 \text{ (Гн)}$$

Розраховуємо постійну часу кола якоря за формулою (2.16):

$$T_{\alpha} = \frac{0,112}{27,2} = 4,126 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}$$

Номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3600}{30} = 377 \text{ (рад/с)}$$

В усталеному режимі з рівняння (2.13) знаходимо $k\Phi$:

$$k\Phi = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\alpha}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 1,3 \cdot 27,2}{377} = 0,49 \text{ (В/(рад/с))}$$

Передаточна функція кола якоря матиме вигляд:

$$W_{\text{я}}(p) = (U_{\text{зп}} - 0,49 \cdot \omega_1) \frac{1/27,2}{1+0,004126p} \quad (3.1)$$

3.4. Розрахунок параметрів моделей одномасової та двомасової систем механічної частини ЕП – Ц

Для одномасової моделі розраховуємо еквівалентний момент інерції за формулою (2.1), враховуючи передаточне число пасової передачі $i = 4$:

$$J_{\text{екв}} = 0,00075 + \frac{0,159}{16} = 0,01069 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$$

Співвідношення моментів інерції двигуна та Ц (тобто мас, що обертаються) розраховуємо за формулою (2.7):

$$\gamma = \frac{0,00075 + 0,159}{0,00075} = 213.$$

Знаходимо значення приведенного коефіцієнт жорсткості передачі з виразу (2.8):

$$C_{12} = 30^2 \left(\frac{0,00075 \cdot 0,159}{0,00075 + 0,159} \right) = 0,628 \text{ (Н·м/рад)}$$

Крок інтегрування розраховуємо за формулою (2.9):

$$h = \frac{1}{30} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{30} = 0,007.$$

Передаточна функція для одномасової моделі механічної частини матиме вигляд:

$$W_M(p) = \frac{M_d - M_n}{0,01069p} \quad (3.2)$$

Двомасова система моделюється за рис. 2.5 з врахуванням розрахованих параметрів.

3.5. Розрахунок параметрів моделі керованого електропривода центрифуги

Регулювання координат електропривода забезпечується за рахунок зміни напруги живлення у якірному колі [2]. Таку функцію виконує тиристорний перетворювач, що спрощено можна описати аперіодичною ланкою:

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

де $T_{ТП}$ - еквівалентна стала часу тиристорного перетворювача (приймаємо $T_{ТП} = 0,005$);

$K_{ТП}$ – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача:

$$K_{ТП} = \frac{U_H}{10} = \frac{220}{10} = 22.$$

Передаточна функція тиристорного перетворювача матиме вигляд:

$$W_{ТП}(p) = \frac{22}{0,005p + 1} \quad (3.3)$$

Розраховуємо коефіцієнти зворотних зв'язків системи керування .
Коефіцієнт k_c за струмом дорівнює:

$$k_c = \frac{U_{max}}{I_H \cdot \lambda} = \frac{10}{1,3 \cdot 2} = 3,846 \text{ (В/А)}$$

де U_{max} – напруга обмеження регулятора швидкості, приймаємо на рівні 10 В, тому що максимальну напругу в аналогових системах автоматичного керування приймають на рівні насичення операційних підсилювачів [9];

λ – перевантажувальна здатність двигуна за струмом.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $k_{ш}$ становить:

$$k_{ш} = \frac{U_{max}}{\omega_H} = \frac{10}{377} = 0,027 \text{ (В/рад/с)}$$

Розраховуємо значення коефіцієнтів підсилення інтегральної k_{IC} та пропорційної k_{PC} складових регулятора струму РС:

$$k_{PC} = \frac{Ra \cdot Ta}{2 \cdot T_{ТП} \cdot k_{ТП} \cdot k_c} = \frac{27,2 \cdot 0,004126}{2 \cdot 0,005 \cdot 22 \cdot 3,846} = 0,133$$

$$k_{IC} = \frac{Ra}{2 \cdot T_{ТП} \cdot k_{ТП} \cdot k_c} = \frac{27,2}{2 \cdot 0,005 \cdot 22 \cdot 3,846} = 32,145$$

Передаточна функція (2.23) регулятора струму матиме вигляд:

$$W_{PC}(p) = \frac{32,145}{p} + 0,133 \quad (3.4)$$

Розраховуємо значення коефіцієнтів підсилення інтегральної $k_{шш}$ та пропорційної $k_{шшш}$ складових регулятора швидкості РШ:

$$k_{шш} = \frac{J_1 k_c}{4 \cdot T_{ТП} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{ш}} = \frac{0,00075 \cdot 3,846}{4 \cdot 0,005 \cdot 0,49 \cdot 0,027} = 11,102$$

$$k_{шшш} = \frac{J_1 k_c}{32 \cdot T_{ТП}^2 \cdot k_{\Phi} \cdot k_{ш}} = \frac{0,00075 \cdot 3,846}{32 \cdot 0,005^2 \cdot 0,49 \cdot 0,027} = 277,546$$

Передаточна функція (2.24) регулятора швидкості матиме вигляд:

$$W_{PC}(p) = \frac{277,546}{p} + 11,102 \quad (3.5)$$

3.6. Електрична схема керованого електропривода центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат

Електрична схема керованого електропривода центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат розроблена відповідно до структурної схеми-моделі (див. рис. 2.12) і виконаних розрахунків (п. 3.5) та представлена на рис. 3.2.

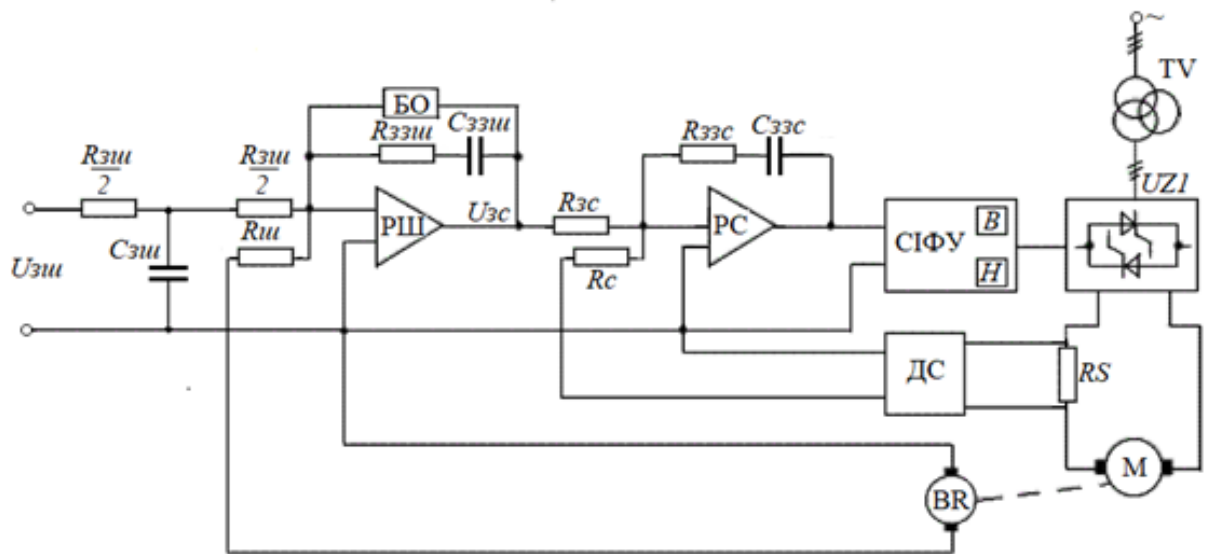


Рис. 3.2. Електрична схема керованого електропривода центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат

В схемі використано наступні умовні позначення елементів:

РШ, РС – регулятори кутової швидкості та струму;

БО – блок обмеження вихідної напруги РШ, а, отже, і струму якірного кола електродвигуна;

TV – живильний трансформатор;

СІФУ – система імпульсно-фазового керування тиристорним перетворювачем $UZ1$ - керованим випрямлячем у силовому колі електродвигуна;

М - електродвигуна;

RS – вимірювальний шунт (елемент датчика струму ДС);

BR – датчик кутової швидкості (тахогенератор постійного струму);

Регулятори швидкості РШ та струму РС виконані на операційних підсилювачах, при цьому РШ налаштовано на симетричний оптимум і має передаточну функцію (3.5), а РС – на технічний оптимум з передаточною функцією (3.4). Блок обмеження вихідної напруги РШ може реалізовуватись на стабілітронах.

РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ

4.1. Комп'ютерне моделювання одномасової системи ЕП-Ц

Комп'ютерна модель одномасової системи ЕП – Ц складається на основі розробленої структурної схеми-моделі електродвигуна (рис. 2.9) з урахуванням еквівалентних перетворень (рис. 2.3) та виразу (2.1).

Комп'ютерні дослідження виконуємо у програмному середовищі MatLab&Simulink [1, 3].

Умови моделювання: за номінальною напругою живлення електродвигуна 220 В момент опору навантаження збільшується в 2 рази в момент часу $t_1 = 8$ с. В момент часу $t_2 = 16$ с напруга живлення зменшується до 110 В. Тривалість моделювання приймаємо рівною 30 с.

Комп'ютерна модель одномасової системи, яка складена з типових блоків програми Simulink, представлена на рис. 4.1.

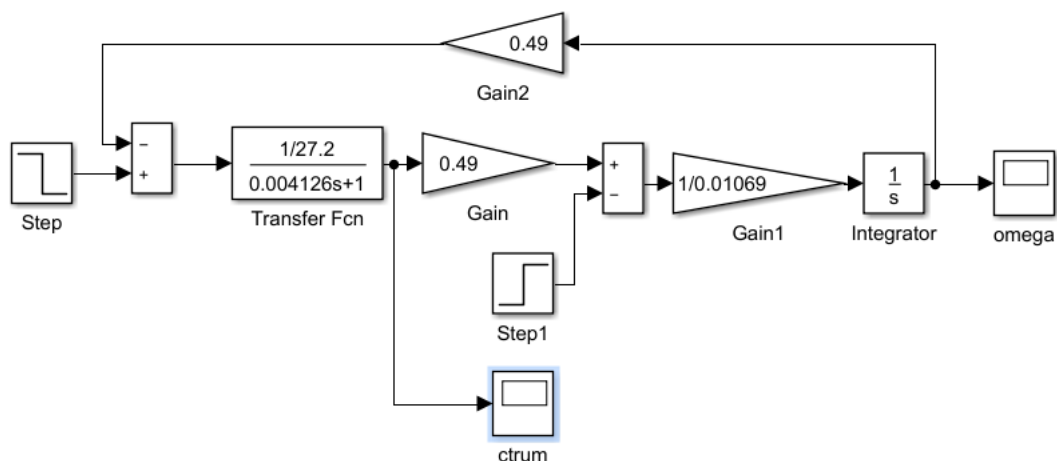


Рис. 4.1. S – модель одномасової системи ЕП – Ц

Дана модель має два вхідні сигнали. Перший задає напругу живлення двигуна U – керуючий вплив за напругою, а другий сигнал – збурюючий вплив за моментом опору навантаження M_n . Вхідні сигнали моделюємо за допомогою

блоків Step і Step1, відповідно. Блок Step генерує сигнал у вигляді ступінчастої функції (стрибокподібний сигнал) із заданими параметрами.

Для моделювання передаточної функції (3.1) кола якоря двигуна використовуємо два блоки: блок суматора, що розташований на вході моделі, та блок Transfer Fcn. Налаштування блоку представлено на рис. 4.2.

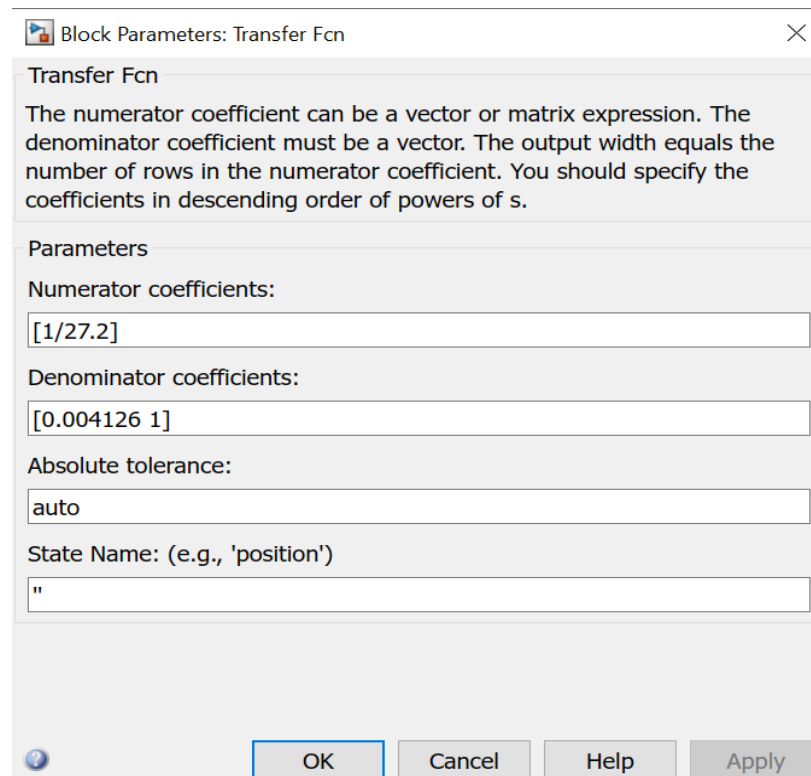


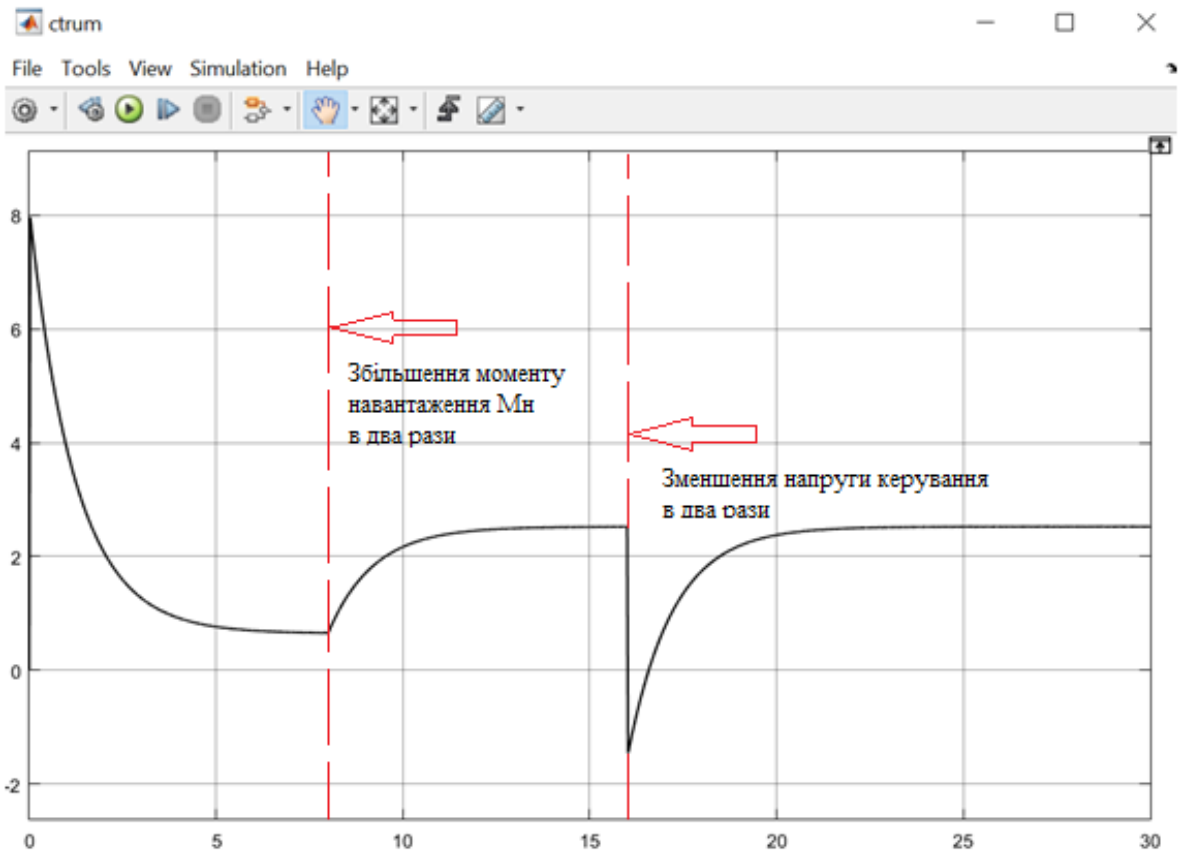
Рис. 4.2. Налаштування блоку Transfer Fcn

Блоки Gain і Gain2 налаштовуємо на розраховане значення коефіцієнта $k\Phi$.

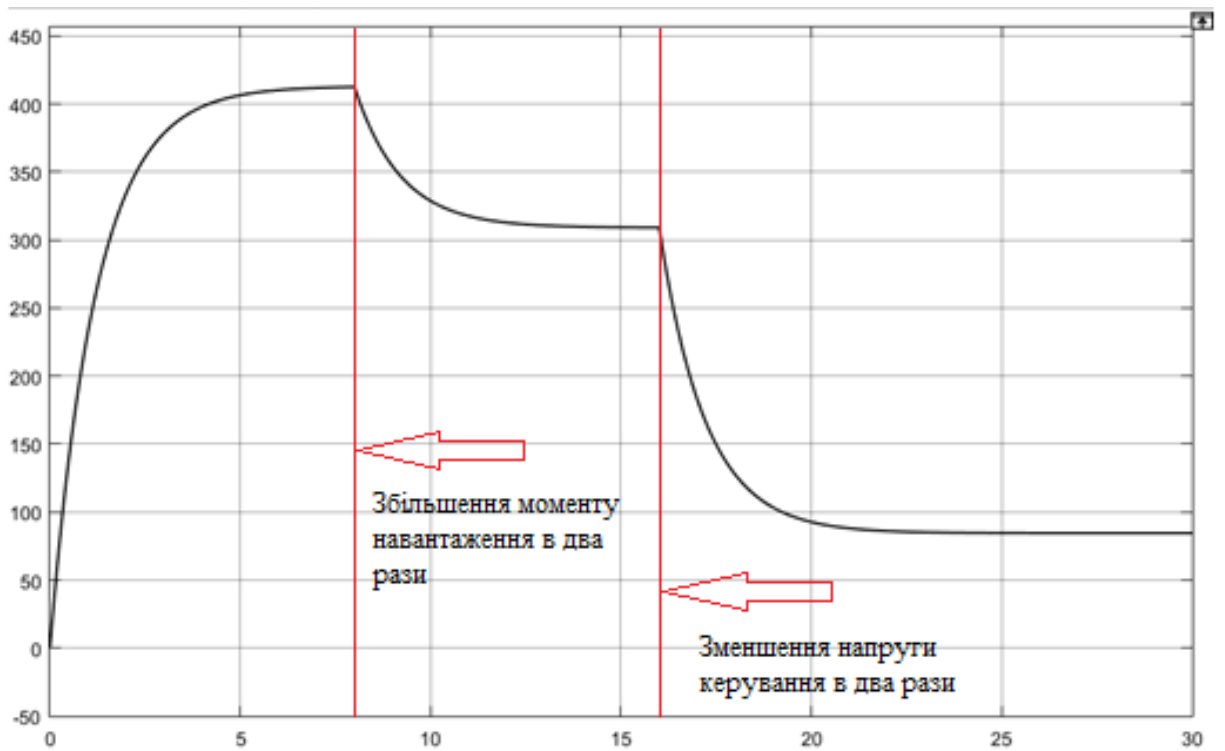
Для моделювання передаточної функції механічної частини одномасової системи (3.2) використовуємо суматор, блок Gain1, який налаштовуємо на значення приведенного моменту інерції $J_{екв}$, та Integrator. На виході блоку Integrator отримуємо кутову швидкість обертання ω одномасової системи.

В якості вихідних сигналів, що підлягають дослідженню, приймаємо кутову швидкість обертання ω та струм кола якоря I_a . Для візуалізації перехідних процесів за цими змінними використовуємо два блоки Scope: omega та strum.

Результати комп'ютерного моделювання представлені на рис. 4.3.



а)



б)

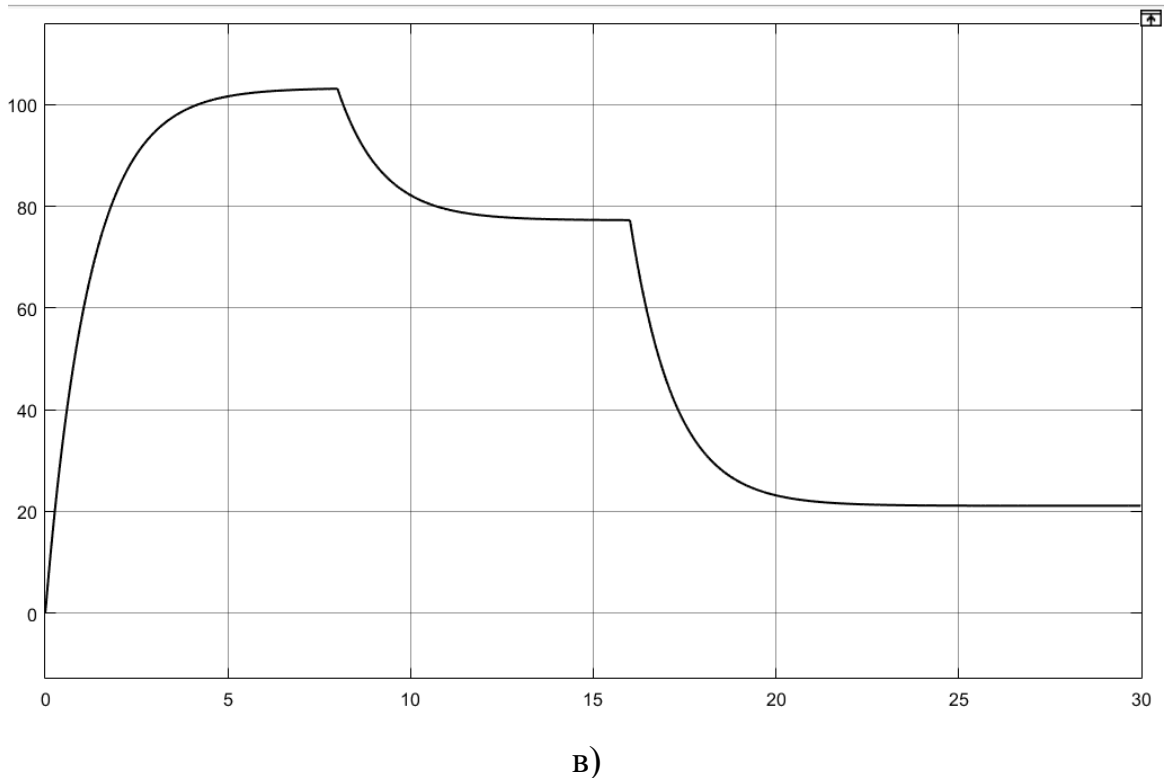


Рис. 4.3. Графіки перехідних процесів в одномасовій системі ЕП – Ц:
 а) струм в колі якоря електродвигуна; б) кутова швидкість обертання валу
 двигуна ω_1 ; в) кутова швидкість обертання центрифуги ω_2 (з врахуванням
 передаточного числа $i = 4$)

Як видно з отриманих графіків, перехідні процеси в одномасовій системі мають аперіодичний характер. Для точного визначення значень вихідних змінних можна скористатись опцією блоку Scope «Вимірювання» - Measurements.

В якості прикладу на рис. 4.4 показані результати використання опції Measurements для графіка струму (4.3. а).

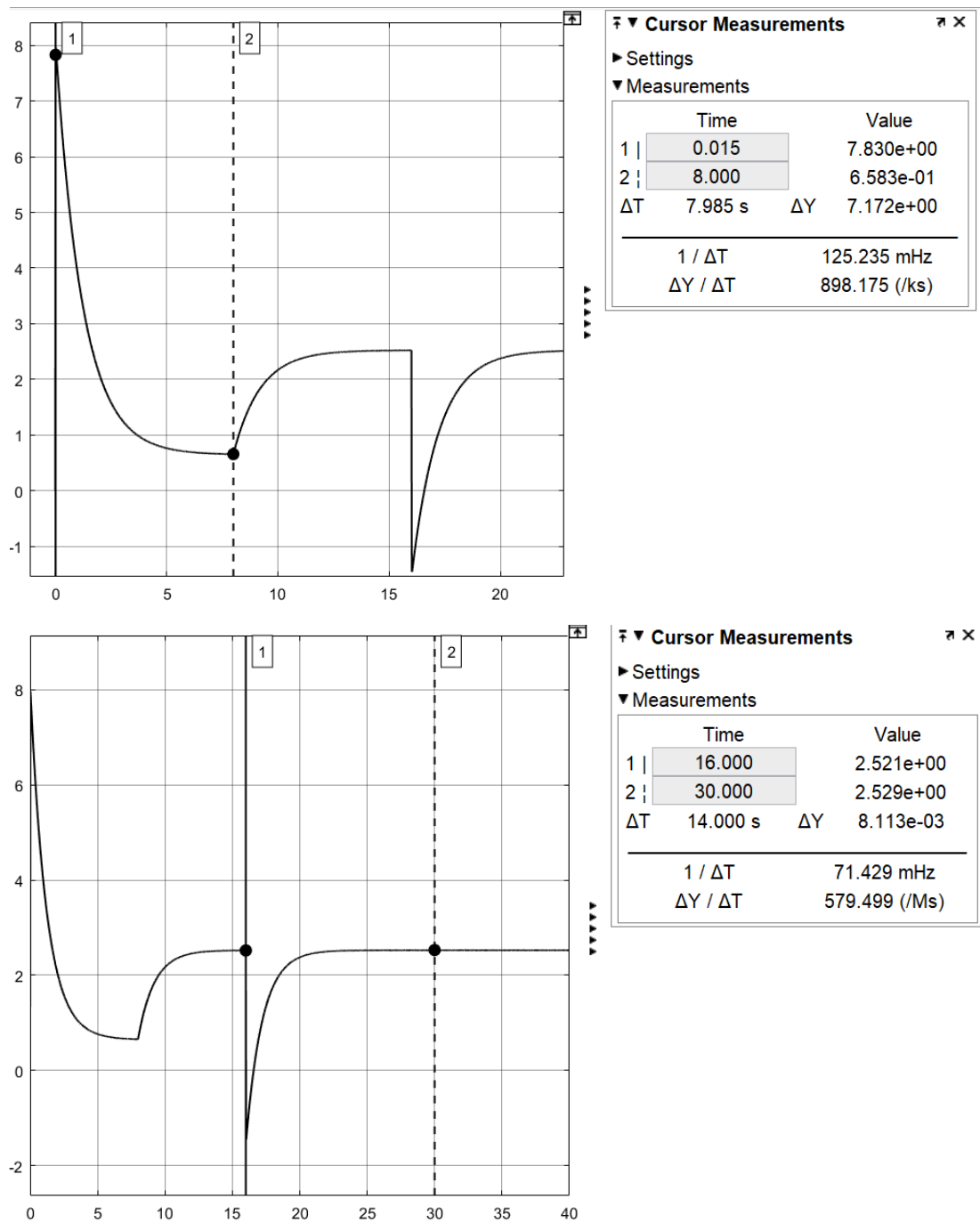


Рис. 4.4. Визначення значень струму під час перехідних процесів

В момент часу $t = 0$ на двигун подається номінальна напруга живлення $U_n = 220$ В при заданому моменті навантаження $M_n = 0,318$ Н·м. В колі якоря виникає пусковий струм, максимальне значення якого при $t_n = 0,015$ с становить $I_{\text{пуск}} = 7,83$ А. Тривалість перехідного процесу за струмом під час пуску становить 6 с, усталене значення $I = 0,66$ А. В момент часу $t_1 = 8$ с момент навантаження

збільшується в два рази, в системі виникає перехідний процес. За час в 4 с струм встановлюється на рівні $I = 2.52$ А, тобто збільшується в 3,8 рази..

В момент часу $t_2 = 16$ с зменшується напруга керування двигуном $U = 110$ В. Струм різко спадає, а через 5 с встановлюється на рівні $I = 2.529$ А. Тривалість перехідного процесу становить 6 с.

Так само за допомогою опції Measurements були проаналізовані графіки за кутовими швидкостями обертання валу двигуна ω_1 та ω_2 для одномасової системи (рис. 4.3, б). Після пуску двигуна за номінальною напругою при незмінному моменті $\omega_1 = 412,4$ рад/с, $\omega_2 = 103$ рад/с. Збільшення моменту в два рази призводить до зменшення $\omega_1 = 309,1$ рад/с, $\omega_2 = 77$ рад/с (на 25%). Зменшення напруги живлення в два рази зменшує швидкість на 62% ($\omega_1 = 84,5$ рад/с, $\omega_2 = 21$ рад/с). Тривалість перехідних процесів за швидкістю та струмом співпадають.

4.2. Комп'ютерне моделювання двомасової системи ЕП - Ц з врахування пружного зв'язку

Комп'ютерна модель двомасової системи ЕП – Ц складається на основі розроблених структурних схем-моделей електродвигуна (рис. 2.9) та механічної частини (рис. 2.5).

Умови моделювання залишилися незмінними.

Комп'ютерна модель двомасової системи представлена на рис. 4.5.

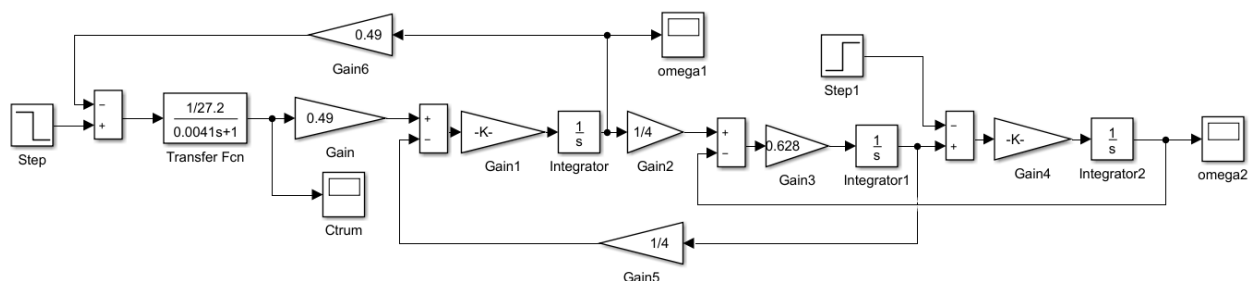


Рис. 4.5. S – модель двомасової системи ЕП – Ц з врахуванням пружності в механічній передачі

На відмінність від моделі рис. 4.1 передаточне число пасової передачі $i = 4$ враховується з елементом моменту інерції ротора центрифуги за допомогою блоків Gain2 та Gain5.

Блок Transfer Fcn, що описує коло якоря, налаштовуємо відповідно до передаточної функції (3.1). Блок Gain3 враховує розраховане в п.3.4 значення приведенного коефіцієнта жорсткості передачі C_{12} , а блок Gain4 - момент інерції ротора центрифуги (рис. 4.6).

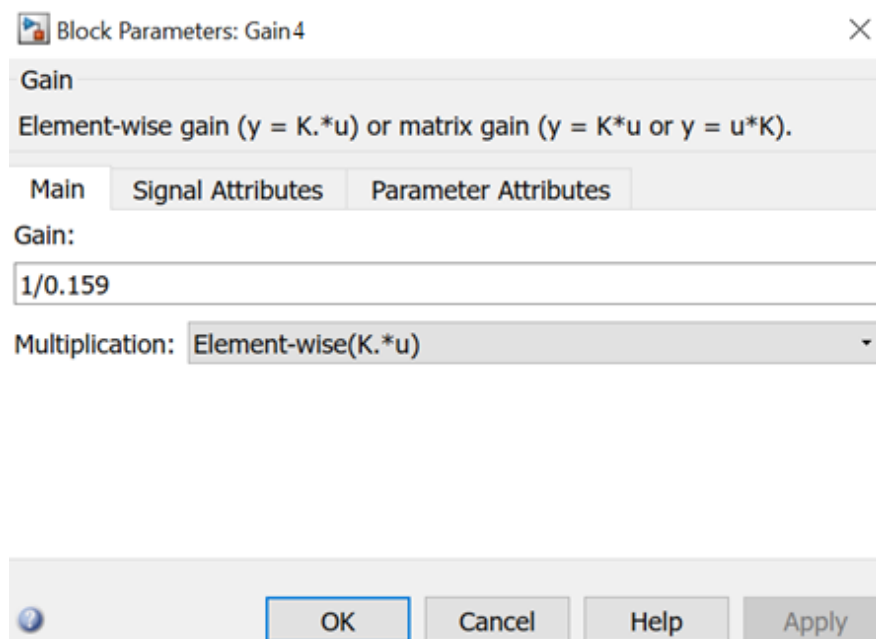


Рис. 4.6. Налаштування блоку завдання моменту інерції центрифуги

В якості вихідних сигналів для дослідження приймаємо струм кола якоря I_a , кутові швидкості обертання валу двигуна ω_1 та ротора центрифуги ω_2 . Для візуалізації перехідних процесів за цими змінними використовуємо три блоки Scope: Strum, omega1 та omega2.

Результати комп'ютерного моделювання представлені на рис. 4.7 та 4.8.

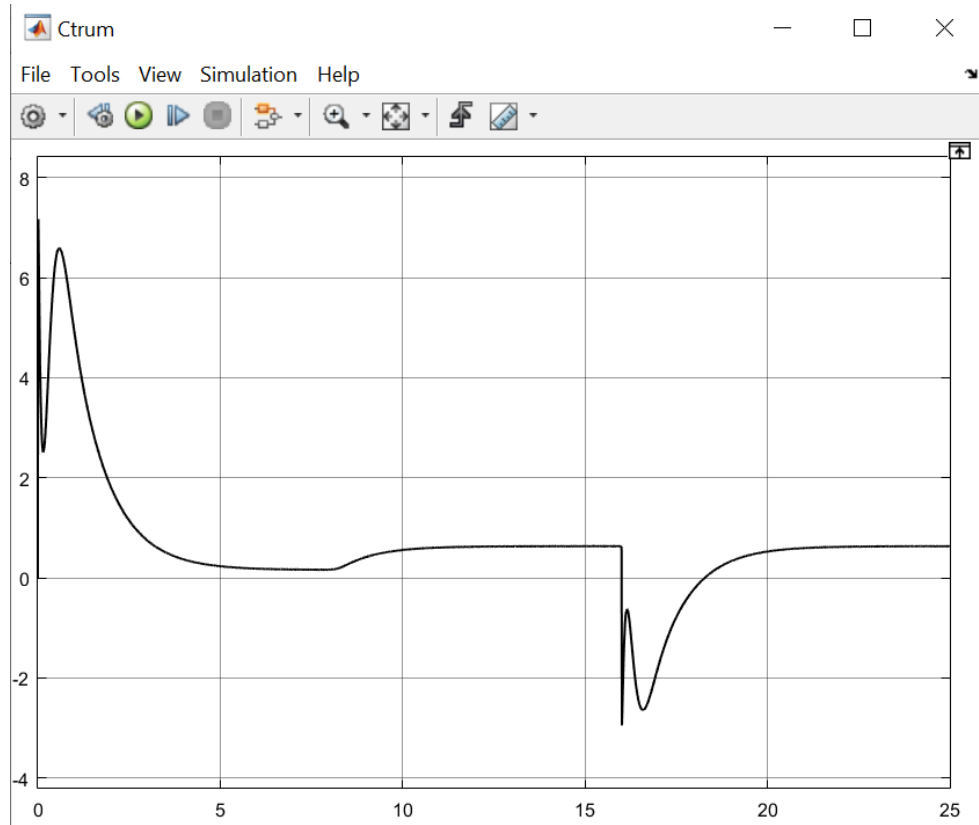
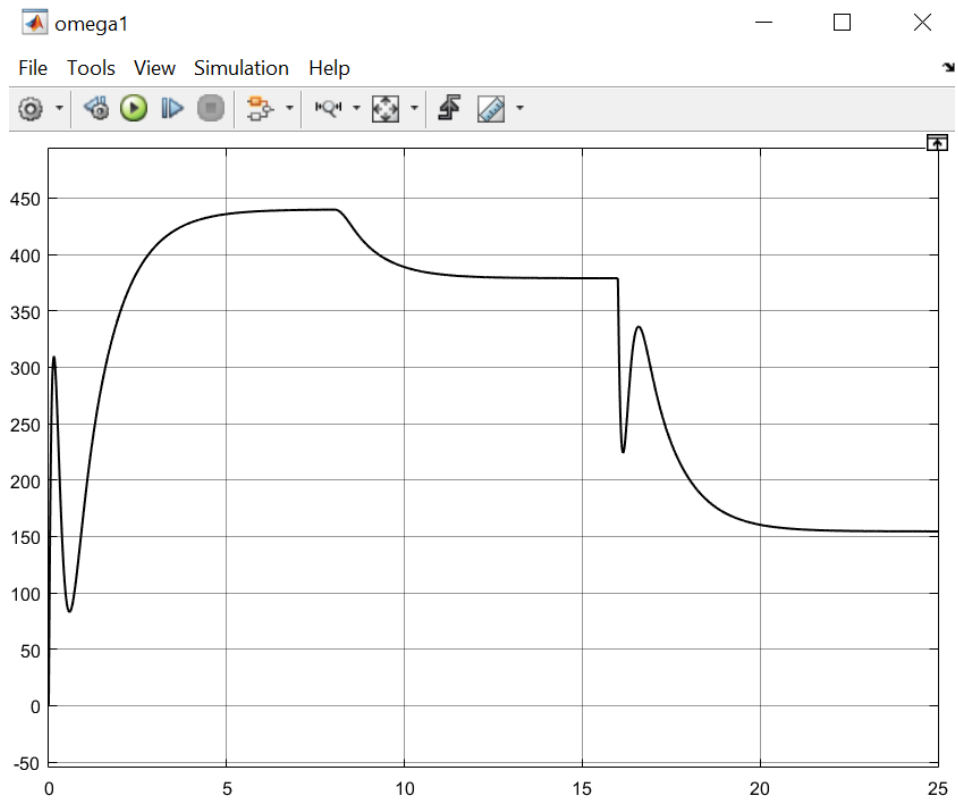
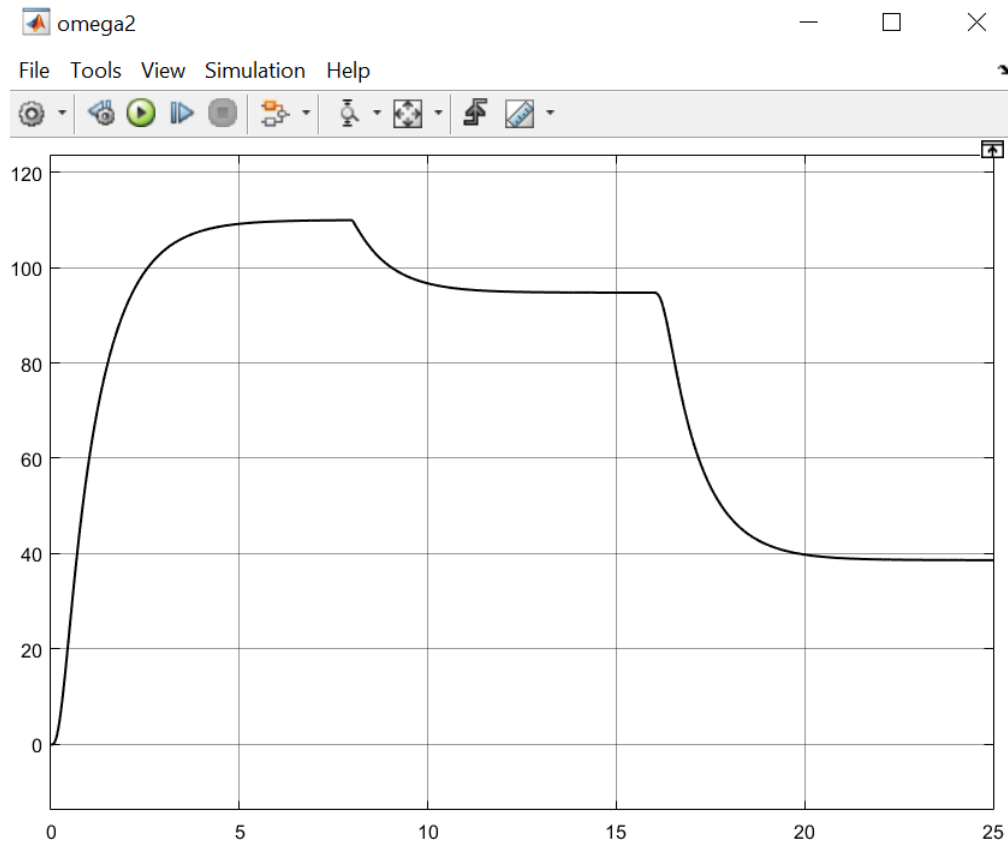


Рис. 4.7. Графік перехідних процесів за струмом в двомасовій системі
ЕП – Ц з врахуванням пружності



a)



б)

Рис. 4.8. Графіки перехідних процесів в двомасовій системі ЕП – Ц з врахуванням пружності за швидкістю:
а) валу двигуна; б) ротора центрифуги

Виконуємо аналіз отриманих результатів. Під час пуску в момент часу $t_{п} = 0,015$ с максимальне значення струму становить $I_{пуск} = 7,168$ А, усталене значення за номінальною напругою $I = 0,167$ А, тривалість перехідного процесу 8 с. Збільшення моменту опору навантаженню в два рази призводить до збільшення струму в чотири рази ($I = 0,63$ А), тривалість перехідного процесу 6 с.

При зменшенні напруги живлення в два рази також виникає перехідний процес тривалістю 8 с, після завершення якого $I = 0,63$ А.

Після пуску двигуна за номінальною напругою при незмінному моменті $\omega_1 = 440$ рад/с, $\omega_2 = 110$ рад/с. Збільшення моменту в два рази призводить до зменшення $\omega_1 = 380$ рад/с, $\omega_2 = 95$ рад/с. Зменшення напруги живлення в два рази - $\omega_1 = 155$ рад/с, $\omega_2 = 43$ рад/с.

Тривалість перехідних процесів за швидкістю та струмом під час пуску та зміненні M_n співпадають, але при зміненні напруги час перехідних процесів за швидкостями зменшився до 6 с.

Зміна моменту опору навантаження суттєво впливає на швидкість обертання – вона зменшується на 15%.

Порівняння результатів для одномасової та двомасової систем показує, що врахування пружності в двомасовій системі призводить до збільшення тривалості перехідних процесів на 33%.

4.3. Комп'ютерне моделювання системи ЕП - Ц з керованим випрямлячем і врахуванням пружності

Попередню модель двомасової системи (див. рис. 4.5) доповнюємо блоком, що моделює тиристорний перетворювач ТП (керований випрямляч у силовому колі електродвигуна) за розрахованою передаточною функцією (3.3). Сигнал керування в цьому випадку створюється задавальним пристроєм ЗП та пропорційний заданій швидкості обертання. Перевіримо здатність такої системи підтримувати швидкість обертання на заданому рівні ($\omega_{завд} = 90$ рад/с) при збільшенні моменту опору навантаження в два рази, а також реакцію системи на зменшення напруги керування.

Умови моделювання: задана швидкість обертання встановлена на рівні 90 рад/с, в момент часу $t_1 = 8$ с M_n збільшується в 2 рази. В момент часу $t_2 = 16$ с напруга завдання зменшується на 30%. Тривалість моделювання приймаємо рівною 25 с.

Комп'ютерна модель системи з ТП та врахуванням пружності в механічній передачі представлена на рис. 4.9.

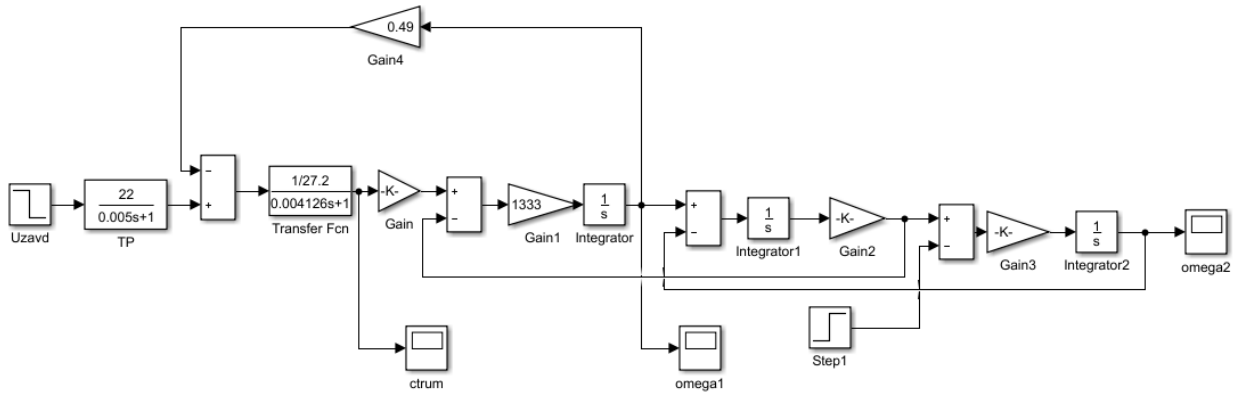
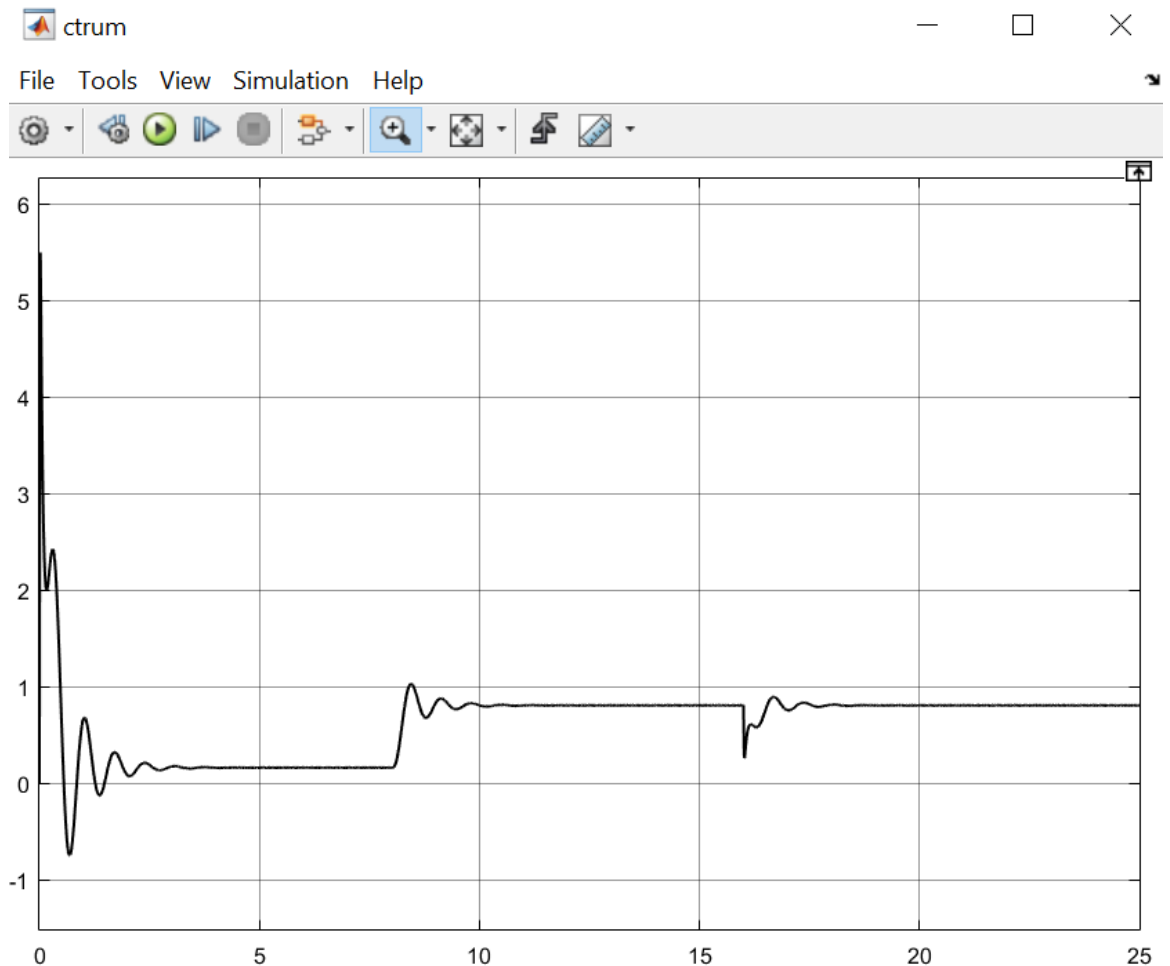
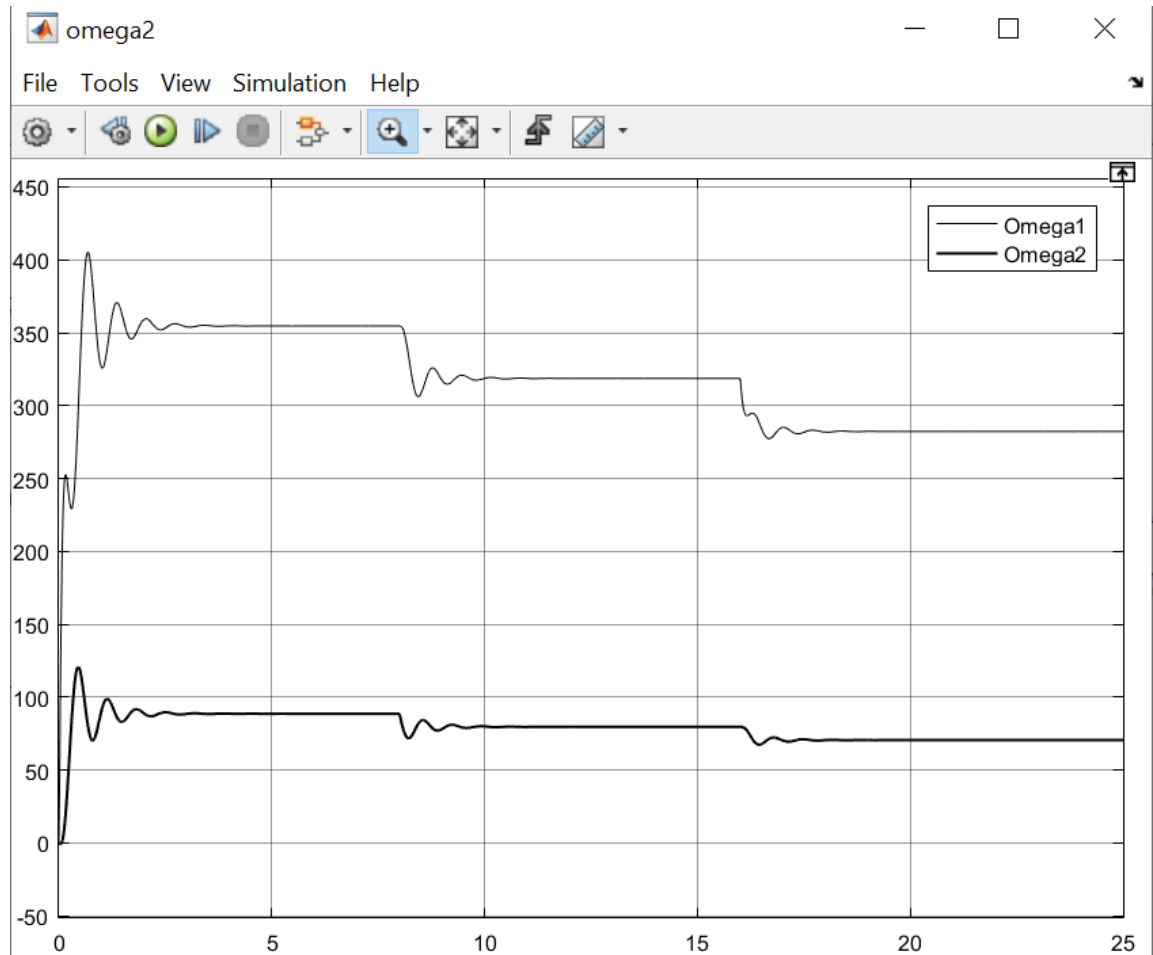


Рис. 4.9. S – модель двомасової системи ЕП – Ц з врахуванням пружності в механічній передачі та тиристорним перетворювачем

Результати моделювання представлені на рис. 4.10.



a)



б)

Рис. 4.10. Графіки перехідних процесів в двомасовій системі ЕП – Ц з ТП та врахуванням пружності:

а) за струмом; б) за кутовими швидкостями

Аналіз отриманих результатів свідчить, що перехідні процеси як за струмом, так і за кутовими швидкостями мають коливальний характер.

Під час пуску в момент часу $t_{\text{п}} = 0,25$ с максимальне значення струму становить $I_{\text{пуск}} = 2,3$ А, усталене значення при $\omega_{\text{завд}} = 90$ рад/с дорівнює $I = 0,165$ А, тривалість перехідного процесу 5 с. Збільшення моменту опору навантаженню в два рази призводить до збільшення струму в п'ять разів $I = 0,81$ А, тривалість перехідного процесу 5 с.

При зменшенні напруги завдання на 30% також виникає перехідний процес тривалістю 3 с, після завершення якого $I = 0,81$ А.

Після пуску двигуна при $t_n = 0,65$ с максимальне значення $\omega_1 = 403$ рад/с, тривалість перехідного процесу становить 5 с, усталене значення $\omega_1 = 355$ рад/с. Швидкість ротору центрифуги приймає максимальне значення $\omega_2 = 118$ рад/с при $t_n = 0,5$ с, тривалість перехідного процесу становить 5 с, усталене значення $\omega_2 = 90$ рад/с. Збільшення моменту в два рази призводить до спадання швидкості до $\omega_1 = 318$ рад/с, $\omega_2 = 80$ рад/с протягом 5 с. Зменшення напруги завдання на 30% викликає зниження швидкості на 12%, тобто $\omega_1 = 282$ рад/с, $\omega_2 = 70$ рад/с протягом 3 с. Тривалість перехідних процесів за швидкістю та струмом співпадають.

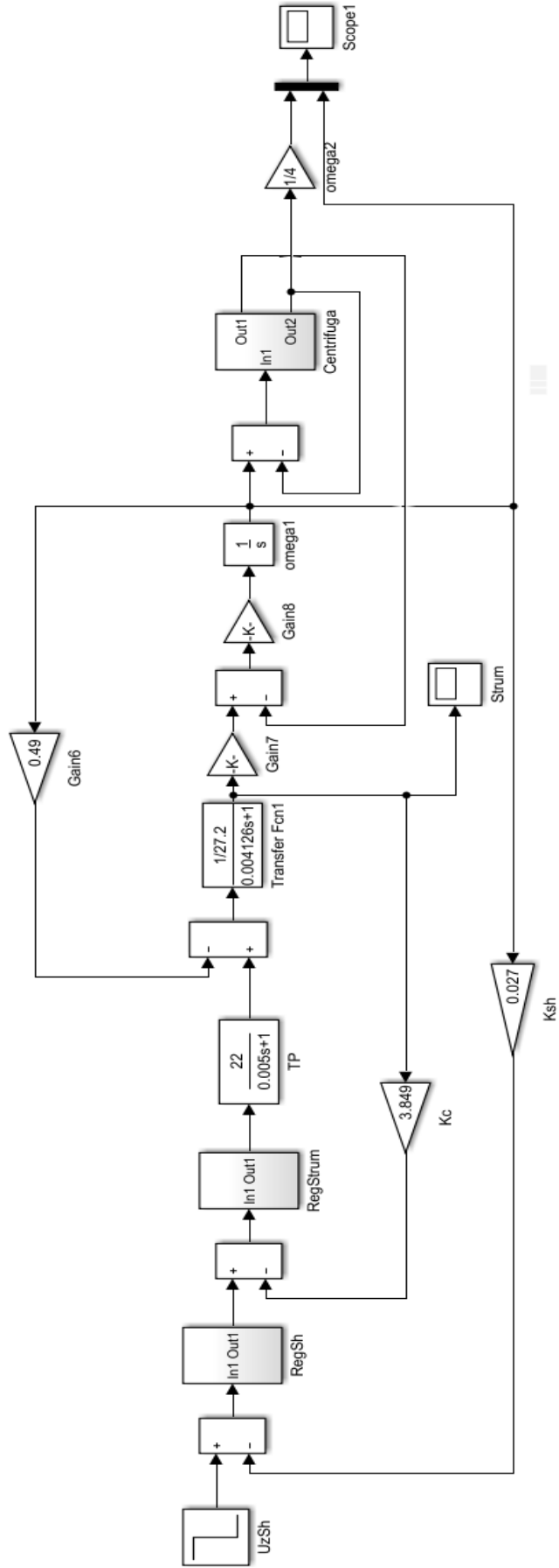
Зміна моменту опору навантаження впливає на швидкість обертання ротора центрифуги, вона зменшується на 11%.

4.4. Комп'ютерне моделювання системи ЕП - Ц з підпорядкованим регулюванням координат

Комп'ютерна модель системи ЕП - Ц з підпорядкованим регулюванням координат складається на основі розробленої структурної схеми-моделі (рис. 2.12).

Умови моделювання залишилися незмінними, вхідний сигнал керування (завдання) змінює своє значення в момент часу $t_1 = 8$ с, збуджуючий сигнал за моментом опору навантаженню – $t_2 = 16$ с.

Комп'ютерна модель системи представлена на рис. 4.11.



a)

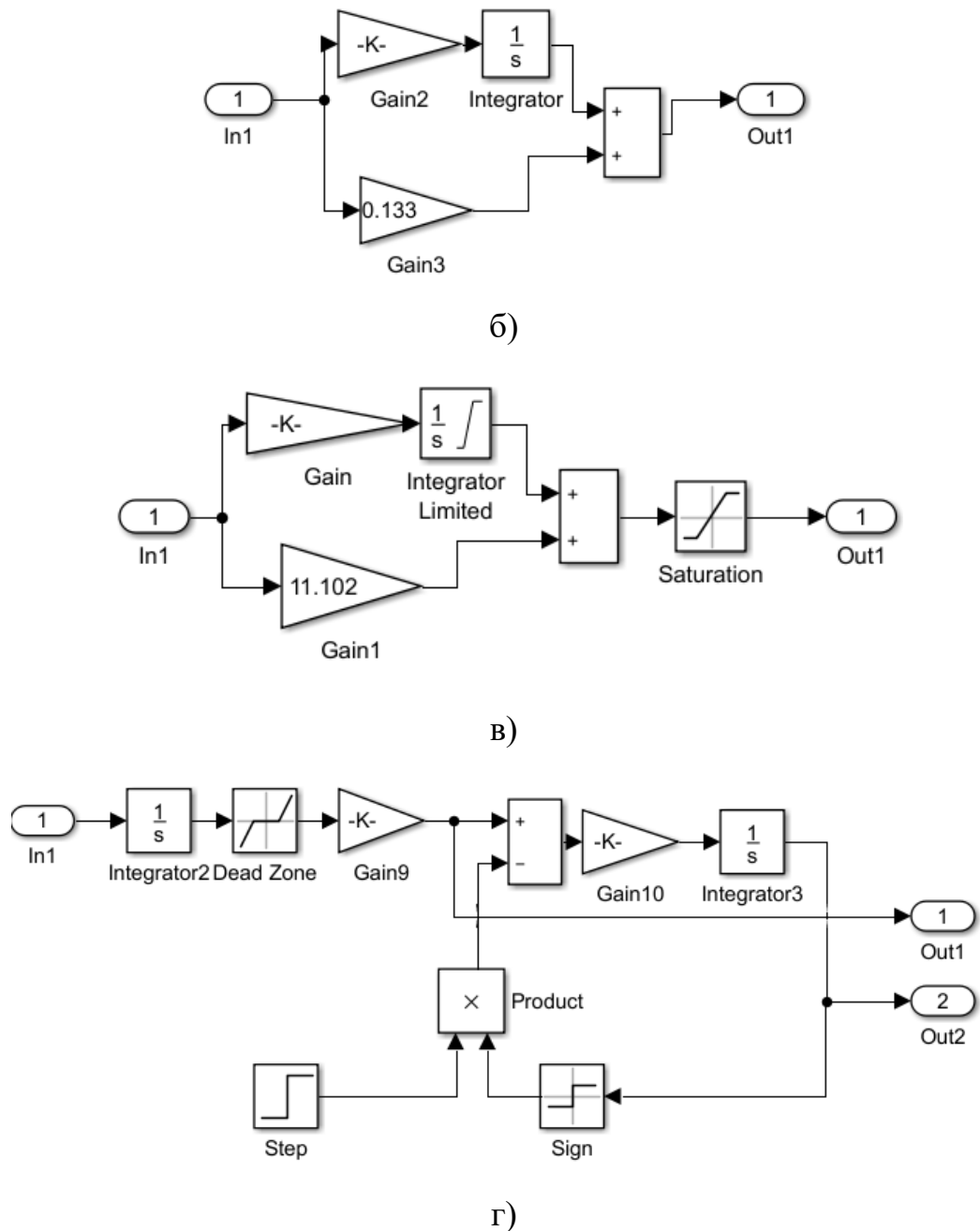


Рис. 4.11. S – модель системи ЕП - Ц з підпорядкованим регулюванням координат:

- а) повна модель; б) підсистема регулятора струму; в) підсистема регулятора швидкості; г) підсистема центрифуги

Блок UzSh генерує сигнал завдання за швидкістю ротора центрифуги ω_2 : початкове значення $U_z = 10$ В, при $t_2 = 16$ с $U_z = 7$ В (зниження на 30%). Вихідними координатами являються струм кола якоря електродвигуна I, кутові

швидкості обертання валу двигуна ω_1 та ротора центрифуги ω_2 – до них від'єднуємо блоки Strum та Scope1, відповідно.

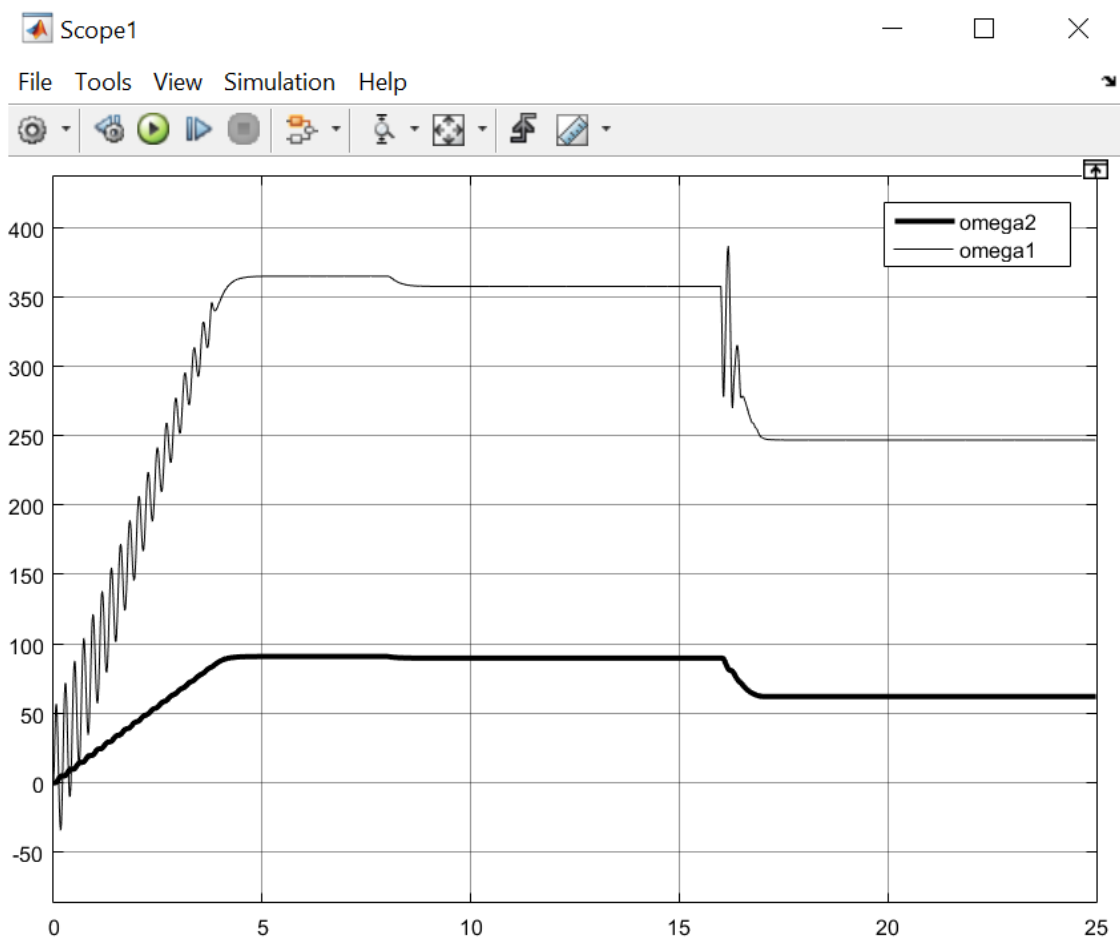
Комп'ютерна модель (рис. 4.11, а) містить три підсистеми.

Підсистема RegStrum (рис. 4.11, б) реалізує ПІ-регулятор контуру струму за виразом (2.23), що налаштований за розрахованими значеннями (3.4).

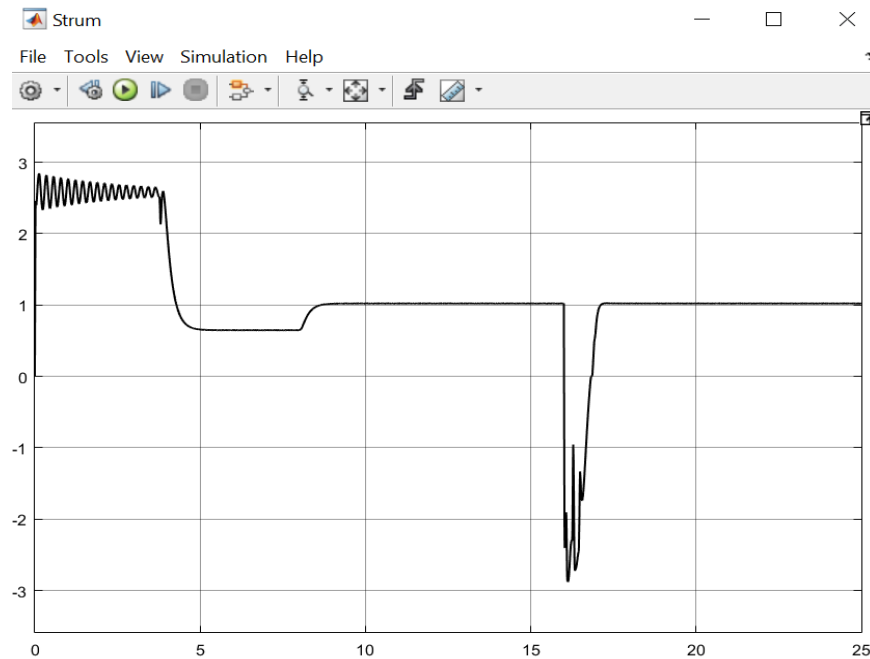
Підсистема RegSh (рис. 4.11, в) реалізує ПІ-регулятор контуру швидкості за виразом (2.24), що налаштований за розрахованими значеннями (3.5). Також тут змодельований блок обмеження вихідної напруги РШ (див. рис. 3.2) за допомогою блоку Saturation.

Підсистема Centrifuga (рис. 4.11, г) являє собою модель інерції ротора центрифуги з врахуванням пружності та люфту механічної передачі зі збурюючим впливом за моментом опору навантаженню.

Результати комп'ютерного моделювання представлені на рис. 4. 12.



a)



б)

Рис. 4.12. Графіки перехідних процесів в системи ЕП - Ц з підпорядкованим регулюванням координат:

а) за кутовими швидкостями; б) за струмом

Аналіз отриманих результатів свідчить, що перехідні процеси за струмом та швидкістю валу двигуна ω_1 мають коливальний характер.

Під час пуску в момент часу $t_{\text{п}} = 0,12$ с максимальне значення струму становить $I_{\text{пуск}} = 2,8$ А, усталене значення при $U_z = 10$ В дорівнює $I = 0,65$ А, тривалість перехідного процесу 4 с (рис. 4.12, б). Збільшення моменту опору навантаженню в два рази призводить до збільшення струму в два рази $I = 1,23$ А, тривалість перехідного процесу 1 с. При зменшенні напруги завдання на 30% відбувається стрімке спадання струму протягом 1 с і знову встановлюється на усталеному рівні $I = 1,23$ А.

Тривалість пуску двигуна становить 4 с (рис. 4.12, а). Усталене значення при $U_z = 10$ В дорівнює $\omega_1 = 365$ рад/с. Швидкість ротору центрифуги за той же час приймає усталене значення $\omega_2 = 90$ рад/с. Збільшення моменту в два рази призводить до невеликого спадання швидкості двигуна (на 2% до $\omega_1 = 318$ рад/с) за час в 1 с, а на швидкість ротору центрифуги не впливає. Зменшення напруги

завдання на 30% викликає зниження швидкості двигуна на 22%, тобто $\omega_1 = 247$ рад/с, а швидкості центрифуги на 31% ($\omega_2 = 62$ рад/с) протягом 1 с. Перерегулювання за ω_1 становить 50%.

Тривалість перехідних процесів за швидкістю та струмом співпадають.

Запропонований керований електропривод центрифуги з підпорядкованим регулюванням координат забезпечує стабілізацію швидкості обертання ротора центрифуги при зміні моменту опору навантаження, що підтверджено комп'ютерним моделюванням.

4.5. Порівняння результатів комп'ютерного моделювання на розроблених моделях системи ЕП – Ц

Результати порівняння динамічних характеристик представлено в таблиці.

Таблиця

Характерні періоди моделювання	Вид моделі системи ЕП - Ц			
	Одномасова	Двомасова з пружністю	З тиристорним перетворювачем	Підпорядковане регулювання
Параметр	Час перехідного процесу (с)			
Пуск	6	8	5	4
Зміна M_H	4	6	5	1
Зміна $U_{завд}$	6	8	3	1
Параметр	Відношення $I_{пуск}/I_{ном}$			
Пуск	6	5,5	1,77	2,15
Параметр	Відпрацювання завдання за ω_2 (%)			
Пуск	91	88	100	100
Зміна M_H	25	14	11	Не змінюється
Зміна* $U_{завд}$	62	22	12	31
*) Для одномасової та двомасової моделей $U_{завд}$ зменшувалось на 50%, для інших – на 30%.				

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі були складені чотири моделі електропривода побутової центрифуги, три з яких враховують пружність в механічній передачі.

Виконано розрахунок параметрів моделей, синтезовано регулятори системи керування з підпорядкованим регулюванням струму та швидкості, обрано електродвигун.

Розроблені комп'ютерні моделі системи ЕП – Ц з використанням засобів програмного середовища MatLab&Simulink.

Проведено комп'ютерне моделювання та досліджені динамічні характеристики електропривода центрифуги в умовах змінювання керуючих та збурюючих впливів.

Встановлено, що система керування підпорядкованого регулювання за розрахованими значеннями забезпечує постійну швидкість обертання ротора центрифуги при зміні моменту опору навантаженню та високу швидкодію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем / Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб, БХВ – Петербург, 2012. – 464 с.
2. Біла Т. Я. Дослідження впливу типу та параметрів регуляторів на роботу системи керування змішувальним комплексом безперервної дії [Текст] / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. - 2009. - № 6 (50). - С. 13-16.
3. Біла Т. Я. Математичне моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко – Київ: КНУТД, 2016. – 400 с.
4. Бурмістенков О. П. Електромеханічні пристрої (теорія і практика) / О.П. Бурмістенков, І. В. Петко., М. Й. Бондаренко, Б. М.Злотенко / Київ: КНУТД, 2017. – 260 с.
5. Виклюк Я. І. Моделювання складних систем : Навчальний посібник / Я. І. Виклюк, Р. М. Камінський, В. В. Пасічник; за ред. В. В. Пасічника. - Львів : Новий Світ - 2000, 2019. – 404 с.
6. Герман–Галкин С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман–Галкин – СПб. : КОРОНА-Век, 2012. – 368 с.
7. Дипломне проектування : методичні вказівки до виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітньої програми «Електромеханіка» / упор.: М. Й. Бондаренко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла. – К. : КНУТД, 2020. – 41 с.
8. Електричні машини та електропривод побутової техніки: підручник / [М. Г. Попович, Л. Ф. Артеменко, О. П. Бурмістенков та ін.]. – Київ: Либідь, 2004. – 352 с.

9. Електромеханіка: дистанційне навчання та віддалені лабораторії: навч. посіб. / М.В. Аніщенко, О.В. Осичев, В.М. Шамардіна та ін. – Х.: «Смугаста типографія», 2016. – 120 с.
10. Електронний посібник з дисципліни: Основи розрахунку та конструювання типових машин – вільний доступ: http://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/електро%20пос%20готовий/
11. Електропобутова техніка: підручник / І. В.Петко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, М. Є. Скиба. – Хмельницький: ХНУ, 2017. – 213 с.
12. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко та інш.; за ред. Ю. М. Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009. - 504 с.
13. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
14. Кращі пральні машини 2021 року – рейтинг ТОП 5 популярних моделей. - вільний доступ: <https://noviydom.com.ua/uk/krashhi-pralni-mashini>
15. Корякин-Черняк С.Л. Стиральные машины от А до Я. - СПб: Наука и Техника, 2002. – 304 с.
16. Лебедев В.С. Расчет и конструирование типовых машин и аппаратов бытового назначения. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 2014. – 327 с.
17. Лозинський А.О., Копчак Б.Л. Системи керування електропобутовими приладами: Навчальний посібник – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – 224 с.
18. Математичне моделювання систем і процесів: Навчальний посібник / Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. / Київ, 2017. – 148 с.
19. Огляд міні пральних машин з віджиманням для дачі - вільний доступ: <https://top-home-ideas.com/36587>

20. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Мацько Б. М. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб./ Під ред. М. Г. Поповича – К.: Либідь, 2013. – 680 с.
21. Пральна машина «Сибір»: ремонт, характеристики машинки з центрифугою і напівавтомат. Інструкція з експлуатації - вільний доступ: <https://uk.rozsavagecoaching.com/1432-washing-machines-siberia-description-of-models-instructions-and-repair>
22. Розробка та дослідження електромеханічних систем та складових електроприводів. Навчальний посібник./ Попович М.Г., Кострицький В.В., Артеменко, Л.Ф., Бурмістенков О.П., Головка О.О., Кіселичник О. І., Островерхів М.Я., Теряєв В.І. – К.:КНУТД, 2011. – 492 с.
23. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учеб. для студ. вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
24. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004 – 328 с.