

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання електромеханічних процесів в електроприводах
систем автоматизації
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ -21-2

Артем ШЕВЧЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Юрій РОМАШОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

_____ (підпис)


Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Шевченко Артем Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"18" червня 2025 р.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Artem Shevchenko', with a long horizontal line extending to the right.

Артем ШЕВЧЕНКО

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
 Кафедра _____ КІТАР
 Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 Тип програми _____ Освітньо-професійна
 Освітня програма _____ Системна інженерія
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

"18" червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Шевченко Артему Дмитровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи _____ Моделювання електромеханічних процесів в електроприводах систем автоматизації
- Затверджена наказом по університету від _____ 19.05.2025 р. №391 Ст
- 2 Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 24.06.2025
- 3 Вихідні дані до роботи: Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU тактова частота _____ 2.50GHz, NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB), Intel(R) UHD Graphics (128 MB).
- 4 Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
- 4.1 Вступ;
- 4.2 Загальні відомості про атомні електростанції;
- 4.3 Керування процесами на атомних електростанціях;
- 4.4 Електроприводи систем автоматизації;
- 4.5 Теоретичні основи моделювання електромеханічних процесів автоматизації на АЕС;
- 4.6 Комп'ютерне моделювання процесів в електроприводах з двигунами постійного струму;
- 4.7 Висновки;
- 4.8 Перелік посилань.

5 Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) 12 с. формату А4

6 Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальні відомості про атомні електростанції	20.12.2024	Виконано
2	Керування процесами на атомних електростанціях	15.01.2025	Виконано
3	Електроприводи систем автоматизації	01.03.2025	Виконано
4	Теоретичні основи моделювання електромеханічних процесів автоматизації на АЕС	10.04.2025	Виконано
5	Комп'ютерне моделювання процесів в електроприводах з двигунами постійного струму	24.05.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	17.06.2025	Виконано

Дата видачі завдання 14.11.2024

Студент

(підпис)

Шевченко А. Д.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

проф. Ромашов Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 94 с., 38 рис., 2 дод., 16 джерел.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, АЕС, МОДЕЛЮВАННЯ, СИСТЕМА, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

Об'єктом роботи є математична модель електропривода систем автоматизації атомних електростанцій.

Предмет роботи – математичне та комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів в електроприводах з двигунами постійного струму.

Мета роботи – підвищення точності та надійності керування електроприводами шляхом побудови моделі на основі лагранжевого формалізму та її реалізації в середовищі Scilab/Xcos.

У роботі побудовано математичну модель електропривода, що враховує як електричну, так і механічну частини системи, а також динаміку взаємодії з блоками керування. Реалізована симуляційна модель дозволяє проводити чисельні експерименти та верифікацію результатів.

У першому розділі подано загальну характеристику АЕС, розглянуто місце атомної енергетики в енергосистемі та графіки енергоспоживання.

У другому розділі проаналізовано структуру систем керування АЕС, зокрема основні підсистеми та принципи ієрархії.

У третьому розділі наведено класифікацію електроприводів, схеми їх керування та технічні вимоги для умов АЕС.

У четвертому розділі розкрито теоретичні основи моделювання, побудовано рівняння Лагранжа, узагальнено сили та втрати.

У п'ятому розділі реалізовано комп'ютерну модель у Scilab/Xcos, проведено симуляцію, інтерпретовано результати та виконано удосконалення моделі.

ABSTRACT

Explanatory note: 94 pages, 38 figures, 2 appendices, 16 sources.

ELECTRIC DRIVE, NPP, MODELING, SYSTEM, DC MOTOR.

The object of the research is electric drives in the automation systems of nuclear power plants (NPPs).

The subject of the research is mathematical and computer modeling of electromechanical processes in electric drives with direct current (DC) motors. The aim of the work is to improve the accuracy and reliability of electric drive control by developing a model based on the Lagrangian formalism and implementing it in the Scilab/Xcos environment.

The study presents a mathematical model of an electric drive that accounts for both the electrical and mechanical subsystems, as well as the dynamic interaction with control units. The implemented simulation model enables numerical experiments and validation of the results.

The first chapter provides a general overview of nuclear power plants, their role in the power grid, and energy consumption graphs.

The second chapter analyzes the structure of NPP control systems, including key subsystems and hierarchical principles.

The third chapter presents the classification of electric drives, control schemes, and technical requirements for operation in NPP conditions.

The fourth chapter outlines the theoretical foundations of modeling, including the construction of Lagrangian equations and the generalization of forces and losses.

The fifth chapter presents the implementation of the computer model in Scilab/Xcos, simulation results, analysis, and model refinement.

ЗМІСТ

1 Керування процесами на атомних електростанціях	12
1.1 Вступ до систем керування АЕС	12
1.2 Основні підсистеми керування АЕС	13
1.3 Ієрархічна структура систем керування.....	15
2 Електроприводи систем автоматизації.....	17
2.1. Класифікація та використання електроприводів на АЕС	17
2.2. Схеми керування електроприводами на АЕС	19
2.3. Вимоги до електроприводів на АЕС	21
2.4 Узагальнена математична модель енергоспоживання електроприводів атомних електростанцій.....	23
3 Теоретичні основи моделювання електромеханічних процесів автоматизації на АЕС.....	26
3.1 Схематизація електроприводу та загальний підхід до моделювання процесів.....	26
3.2 Потенціальна та кінетична енергії.....	28
3.3 Дисипативні сили, функція Релея та узагальнені сили	31
3.4 Узагальнені сили	32
3.5 Механічна частина електропривода систем автоматизації АЕС.....	33
3.6 Моделювання електричної частини електропривода систем автоматизації АЕС.....	36
3.7 Моделювання електромеханічних процесів в електроприводах.....	39
4. Комп'ютерне моделювання процесів в електроприводах з двигунами постійного струму	42
4.1 Математична модель процесів в електроприводах постійного струму.....	42
4.2 Математичні основи комп'ютерного моделювання та реалізація блоків Scilab/Xcos.....	46
4.2.1 Концепція побудови моделі	47
4.2.2 Створення вектора стану	48
4.2.3 Розподіл компонентів вектора	49
4.2.4 Реалізація електричного контуру	50

4.2.5 Реалізація механічного контуру.....	51
4.2.6 Додавання системи управління.....	52
4.2.7 Замикання системи через інтегратор	52
4.2.8 Виведення та збереження результатів.....	54
4.2.9 Налаштування параметрів та верифікація	56
4.3 Релізація матимотичної моделі	57
4.3.1 Пояснення роботи математичної схеми електропривода	58
4.3.2 Програмування графічного інтерфейсу результатів дослідження	59
4.3.3 Результати комп'ютерного моделювання	62
4.4 Удосконалення математичної моделі електроприводу	65
4.4.1 Структурні зміни у модифікованій моделі	66
4.4.2 Програмна реалізація виведення результатів модифікованої моделі	67
4.4.3 Результати удосконаленої моделі	70
4.5 Охорона праці	74
4.6 Дослідження основних законів управління в системах з двигуном постійного струму	76
Висновки	80
Перелік джерел посилання	82
Додаток А Абробація наукових результатів дослідження.....	85
Додаток Б Демонстраційний матеріал	93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС – атомна електростанція;

ВВЕР – водо-водяний енергетичний реактор;

ЕРС – електрорушійна сила;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МАГАТЕ – Міжнародне агентство з атомної енергії;

ПЛК – програмований логічний контролер;

СУЗ – система управління захистом;

CP-1 – Chicago Pile-1;

ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity;

IEC – International Electrotechnical Commission;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ВСТУП

У сучасних умовах надійне функціонування енергетичних систем є основою сталого розвитку, а атомна енергетика залишається ключовим джерелом генерації електроенергії в багатьох країнах світу, зокрема й в Україні. Ефективність роботи атомних електростанцій (АЕС) значною мірою визначається рівнем автоматизації технологічних процесів, серед яких важливу роль відіграють електроприводи – як основні виконавчі механізми в системах управління.

Електроприводи в системах автоматизації АЕС забезпечують точне регулювання положення, сили або швидкості елементів реакторного обладнання, парогенераторів, насосних агрегатів тощо. Вони повинні працювати з високою точністю, стабільністю та стійкістю до зовнішніх впливів – у тому числі температурних, радіаційних і механічних. Саме тому проектування, моделювання та тестування електроприводів у цій галузі вимагає комплексного підходу.

Одним із викликів є необхідність поєднання електричних та механічних аспектів функціонування електропривода в єдину модель, яка дозволяє проводити верифікацію та оптимізацію керуючих алгоритмів до їхнього практичного застосування. Математичне моделювання дає змогу імітувати роботу привода в перехідних і сталих режимах, досліджувати реакцію на збурення, виявляти недоліки системи керування без ризику для реального обладнання.

Сучасні стимуляційні середовища, такі як Scilab/Xcos, дозволяють створювати точні моделі електроприводів, будувати структуру сигналів, здійснювати чисельне інтегрування рівнянь стану та візуалізувати результати. Такий підхід сприяє підвищенню надійності інженерних рішень, зменшенню витрат на фізичне тестування та розширенню можливостей цифрової трансформації енергетики.

Мета роботи – підвищення точності, надійності та ефективності керування електроприводами систем автоматизації атомних електростанцій шляхом побудови комплексної математичної моделі на основі лагранжевого підходу, що дозволяє

відобразити взаємодію електричних і механічних підсистем, та реалізації цієї моделі у середовищі комп'ютерного моделювання Scilab/Xcos з подальшим її тестуванням, аналізом та удосконаленням.

Об'єктом роботи є математична модель електропривода систем автоматизації атомних електростанцій.

Предмет роботи – математичне та комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів в електроприводах з двигунами постійного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати архітектуру систем автоматизованого керування на АЕС, виділити функціональні блоки та технологічні особливості;
- проаналізувати типи електроприводів, їх класифікацію, принципи побудови схем та вимоги до експлуатації в умовах АЕС;
- побудувати математичну модель електропривода на основі лагранжевої механіки з урахуванням кінетичної, потенціальної енергії, дисипативних втрат і зворотних зв'язків;
- реалізувати побудовану модель у середовищі Scilab/Xcos, створити структурну симуляційну схему, провести тестування та аналіз динаміки;
- оцінити працездатність системи, запропонувати варіанти удосконалення та підвищення точності моделювання.

Кваліфікаційна робота виконана згідно з вимогами ДСТУ 3008:2015 [1], з урахуванням методичних рекомендацій щодо оформлення кваліфікаційних бакалаврських робіт [2] та відповідних положень кафедри [3].

Результати роботи узгоджуються з цілями сталого розвитку ООН, зокрема з ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме пунктом 9.4, що стосується впровадження високотехнологічних рішень у виробничі та енергетичні процеси.

За матеріалами дослідження підготовлено тези доповіді до наукової публікації у фаховому технічному журналі [4].

1 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

1.1 Вступ до систем керування АЕС

Сучасні атомні електростанції обладнані складними багаторівневими системами керування, які забезпечують безпечну та ефективну роботу всіх технологічних процесів. Управління АЕС ґрунтується на принципі глибокої ешелонізації заходів безпеки, де кожен рівень захисту має незалежні системи контролю та керування. Це дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та оперативно реагувати на будь-які відхилення від нормального режиму роботи.

Основу системи керування складає централізований диспетчерський пункт, де оперативний персонал здійснює моніторинг усіх ключових параметрів станції. Сучасні АЕС обладнані цифровими системами керування на базі мікропроцесорної техніки, які забезпечують високу точність вимірювань та швидкість реакції. Ці системи постійно аналізують тисячі параметрів, включаючи потужність реактора, тиск у першому контурі, температуру теплоносія, рівень випромінювання та інші критично важливі показники.

Особливістю керування АЕС є наявність кількох незалежних систем безпеки, які автоматично активуються при виявленні нештатних ситуацій. До них належать системи аварійного охолодження активної зони, системи швидкого заглушення реактора, а також фільтро-вентиляційні установки для локалізації можливих викидів радіоактивних речовин. Всі ці системи працюють за принципом "відмови в безпеку", коли будь-яка несправність призводить до переходу у більш безпечний стан.

Сучасні тенденції в розвитку систем керування АЕС включають впровадження штучного інтелекту для прогнозування стану обладнання, використання цифрових двійників для моделювання різних режимів роботи, а також інтеграцію зовнішніх систем моніторингу навколишнього середовища. Це

дозволяє не лише підвищити безпеку, а й оптимізувати економічні показники роботи станції.

Важливим аспектом є підготовка оперативного персоналу, який проходить спеціальне навчання на повномасштабних тренажерах, що точно імітують роботу реальної АЕС. Такі тренажери дозволяють відпрацьовувати дії як у нормальних режимах роботи, так і при різних аварійних ситуаціях, що є ключовим фактором підтримки високого рівня професійної готовності персоналу.

1.2 Основні підсистеми керування АЕС

Сучасна атомна електростанція – це складний технологічний комплекс, робота якого забезпечується цілою низкою взаємопов'язаних підсистем керування. Кожна з цих підсистем відіграє визначену роль у підтримці безпечної та ефективної роботи станції, контролюючи окремі технологічні процеси та забезпечуючи їхню взаємодію.

Реакторна підсистема керування є серцем АЕС і відповідає за контроль ядерної реакції. Вона включає системи регулювання потужності, які за допомогою керуючих стрижнів підтримують оптимальний рівень поділу ядер у активній зоні. Сучасні реактори обладнані автоматизованими системами, які постійно моніторять нейтронний потік, температуру та тиск у активній зоні, оперативно вносячи корективи у роботу реактора. У разі виникнення нештатної ситуації система аварійного захисту автоматично вводить у активну зону всі поглинаючі стрижні, зупиняючи ланцюгову реакцію за лічені секунди.

Теплоенергетична підсистема контролює перенесення теплової енергії від реактора до турбогенераторів. Вона включає системи регулювання тиску та температури теплоносія (води або газу) у першому контурі, а також моніторинг стану парогенераторів. Особлива увага приділяється підтримці стабільних параметрів теплоносія, оскільки будь-які значні відхилення можуть призвести до порушення теплового балансу реактора. Підсистема також відповідає за роботу

систем аварійного охолодження, які автоматично активуються при зниженні рівня теплоносія або інших аварійних ситуаціях.

Турбогенераторна підсистема забезпечує перетворення теплової енергії на електричну. Вона контролює роботу парових турбін, генераторів та допоміжного обладнання, регулюючи частоту обертання, тиск пари та інші критичні параметри. Сучасні системи керування турбінами дозволяють плавно змінювати потужність генерації, адаптуючись до змін у енергосистемі. У разі відключення від мережі турбогенераторна підсистема забезпечує безпечний зупин агрегатів із мінімальними динамічними навантаженнями.

Система електропостачання є ключовою для функціонування всієї АЕС, оскільки забезпечує живлення систем керування та безпеки. Вона включає кілька незалежних джерел: зовнішню електромережу, резервні дизель-генератори та акумуляторні батареї. Особливістю цієї підсистеми є висока надійність – навіть при повній втраті зовнішнього живлення АЕС здатна підтримувати критичні системи в робочому стані протягом тривалого часу.

Радіаційний контроль – це комплексна підсистема, яка займається моніторингом рівня радіації у різних частинах станції та навколишньому середовищі. Вона включає сотні датчиків, розміщених у реакторному відділенні, турбінному залі, по периметру станції та в санітарно-захисній зоні. Дані з цих датчиків у реальному часі передаються до центрального пульта керування, де аналізуються спеціалізованим програмним забезпеченням. У разі перевищення допустимих рівнів система автоматично активує попереджувальні сигнали та, за необхідності, ініціює заходи з захисту персоналу та населення.

Інформаційно-обчислювальна підсистема інтегрує всі інші системи керування, забезпечуючи операторам повну інформацію про стан станції. Сучасні АЕС використовують розподілені комп'ютерні системи з резервуванням критично важливих компонентів. Ці системи не лише відображають поточні параметри, але й виконують прогностичні розрахунки, моделюють різні режими роботи та надають операторам рекомендації з оптимального керування.

Крім технічних підсистем, важливу роль відіграє організаційна система керування, яка включає чіткі процедури дій персоналу у різних режимах роботи, систему підготовки та підвищення кваліфікації операторів, а також механізми взаємодії з регулюючими органами та місцевою владою

Усі ці підсистеми працюють як єдиний механізм, забезпечуючи безпеку, надійність та ефективність роботи атомної електростанції. Їхня взаємодія регламентована міжнародними стандартами та постійно вдосконалюється з урахуванням досвіду експлуатації та нових технологічних розробок.

1.3 Ієрархічна структура систем керування

Сучасні системи керування атомними електростанціями мають чітку багаторівневу ієрархічну структуру, яка забезпечує ефективне управління всіма технологічними процесами при максимальному рівні безпеки. Ця структура розроблена з урахуванням принципу поділу функціональних обов'язків і поступового агрегування інформації від первинних датчиків до центрального пульта керування.

На нижньому рівні ієрархії розташовані локальні системи контролю та автоматичного регулювання, які безпосередньо взаємодіють з технологічним обладнанням. Ці системи включають тисячі датчиків тиску, температури, рівня, витрати та інших параметрів, а також виконавчі механізми – регулюючі клапани, приводи керуючих стрижнів, перемикачі тощо. Вони працюють в автоматичному режимі, підтримуючи задані параметри в межах невеликих ділянок технологічного процесу без безпосередньої участі оператора.

Наступний рівень – групові системи керування, які об'єднують кілька пов'язаних між собою локальних систем. Наприклад, існує окрема групова система керування реактором, яка інтегрує дані від усіх датчиків активної зони і керує положенням керуючих стрижнів. Аналогічні групові системи є для турбогенераторного відділення, системи охолодження, електропостачання тощо.

Ці системи забезпечують узгоджену роботу всього обладнання в межах свого технологічного комплексу.

Центральний пульт керування є вершиною ієрархії, де збирається і аналізується інформація від усіх групових систем. Оперативний персонал на цьому рівні отримує агреговані дані про стан всієї станції в цілому і приймає стратегічні рішення щодо її роботи. Сучасні пульти керування обладнані інтелектуальними системами підтримки прийняття рішень, які аналізують інформацію і надають операторам рекомендації щодо оптимальних режимів роботи.

Особливістю ієрархічної структури АЕС є наявність паралельної системи безпеки, яка функціонує незалежно від основних систем керування. Вона має власні датчики, канали передачі інформації і виконавчі механізми, що дозволяє їй спрацьовувати навіть у разі виходу з ладу основних систем. Ця система організована за принципом "відмови в безпеку" – будь-яка помилка або відмова призводить до переходу у більш безпечний стан.

Сучасні тенденції розвитку ієрархічних систем керування передбачають:

- подальшу цифровізацію всіх рівнів керування;
- впровадження технологій штучного інтелекту для аналізу даних;
- розвиток систем предиктивного обслуговування;
- покращення інтерфейсів людино-машинної взаємодії.

Така багаторівнева структура дозволяє ефективно розподіляти функції керування між автоматикою і персоналом, забезпечуючи при цьому високий рівень безпеки і надійності роботи атомної електростанції. Кожен рівень має чітко визначені повноваження і межі втручання, що запобігає конфліктам управління і підвищує стійкість системи в цілому.

2 ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Класифікація та використання електроприводів на АЕС

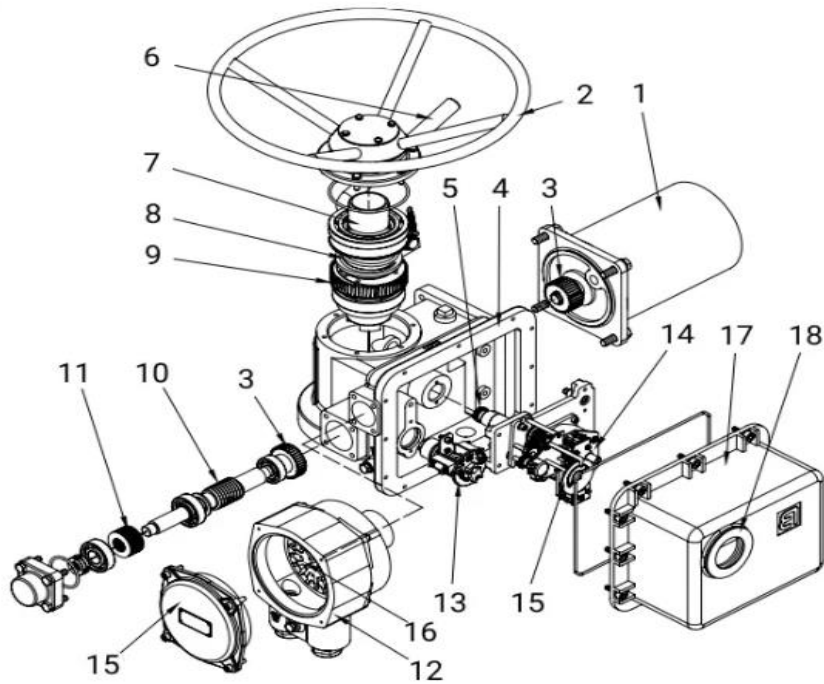
Електроприводи на атомних електростанціях представляють собою складні технічні комплекси, які відіграють вирішальну роль у забезпеченні стабільної та безпечної роботи всіх технологічних систем. Вони забезпечують регулювання та контроль широкого спектра процесів, критично важливих для функціонування ядерного об'єкта. Системи електроприводів використовуються для автоматизованого керування елементами обладнання, такими як клапани, заслінки, приводи насосів, а також різноманітні виконавчі механізми, що забезпечують динамічну стабільність об'єкта в режимах нормальної експлуатації та при аварійних ситуаціях.

Вони класифікуються за різними критеріями, що враховують особливості їх функціонування в умовах ядерного об'єкта, рівень автоматизації, тип електричних машин, способи регулювання швидкості обертання та тип систем керування. Залежно від функціонального призначення, електроприводи можуть бути одно- або багатофункціональними, включати в себе інтелектуальні системи діагностики, а також адаптивні алгоритми керування, що дозволяють оперативно реагувати на зміну технологічних параметрів та підвищувати ефективність енергоспоживання.

За принципом роботи електроприводи поділяються на електромеханічні, гідравлічні та пневматичні. Причому саме електромеханічні системи отримали найбільш широке поширення через свою надійність, точність керування та можливість інтеграції в цифрові системи керування на основі програмованих логічних контролерів. Їхня структурна гнучкість дозволяє реалізувати різноманітні схеми побудови систем автоматизації, враховуючи специфіку об'єкта та вимоги до резервування.

На рисунку (рис. 2.1) зображено конструктивну схему електроприводу, запровадженого в одному з автоматизованих вузлів на АЕС. Представлена схема

демонструє типовий підхід до інтеграції електроприводу в загальну систему керування енергоблоку, що включає сигнальні датчики, модулі аналізу параметрів та кінцеві виконавчі пристрої. У свою чергу, використання сучасних напівпровідникових елементів та цифрових регуляторів дає змогу підвищити швидкодію, зменшити інерційність і збільшити загальну ефективність систем електроприводів.



1 – електродвигун; 2 – маховик ручного дублера; 3 – прямозуба циліндрична шестерня; 4 – корпус; 5 – перехідний вал обмежувача ходу; 6 – важіль перемикачів режимів; 7 – вихідний вал; 8 – пружина напівавтоматичної муфти; 9, 10 – черв'ячна передача; 11 – набір тарілчастих пружин; 12 – корпус клемної коробки; 13 – двостороння муфта обмеження крутного моменту; 14 – обмежувач ходу вихідного валу; 15 – індикатор положення затвора арматури; 16 – клемна колодка; 17 – передня кришка корпусу; 18 – вікно індикатора положення затвора арматури; 19 – кришка клемної коробки.

Рисунок 2.1 – Приклад констукції електроприводу запірної арматури на АЕС

За ступенем важливості електроприводи АЕС поділяються на три основні категорії. До першої категорії належить обладнання систем безпеки, яке має надійне резервування та здатне функціонувати навіть у разі аварійних ситуацій. Це

включає приводи керуючих стрижнів реактора, клапани систем аварійного охолодження та інші критично важливі механізми. Друга категорія охоплює обладнання, необхідне для нормальної експлуатації станції, таке як насоси циркуляційних контурів, вентилятори систем вентиляції тощо. Третя категорія включає допоміжне обладнання, відмова якого не впливає безпосередньо на безпеку станції.

Сучасні електроприводи АЕС характеризуються високим рівнем автоматизації та інтелектуалізації. Вони обладнані системами самодіагностики, що дозволяють виявляти потенційні несправності на ранніх стадіях, та адаптивними системами керування, здатними компенсувати знос механічних частин. Особливу увагу приділяють захисту приводів від впливу радіації, температурних коливань та інших специфічних факторів ядерного об'єкта. Для цього використовують спеціальні матеріали, герметичні корпуси та додаткові системи охолодження.

Відповідно до вимог ядерної безпеки, електроприводи критично важливих систем мають кілька ступенів резервування. Наприклад, приводи керуючих стрижнів зазвичай мають основну електричну систему керування, резервну систему на базі акумуляторів та механічну систему аварійного опускання. Кожна з цих систем працює незалежно від інших, що забезпечує надійність спрацьовування навіть у разі множинних відмов.

Специфікою електроприводів АЕС є їхня довготривала експлуатація без можливості швидкої заміни. Тому при їх проектуванні застосовують принцип проектованої довговічності, який передбачає мінімальний знос протягом усього терміну служби. Це досягається за рахунок використання спеціальних мастильних матеріалів, підшипників з підвищеним ресурсом роботи та інших технічних рішень.

2.2. Схеми керування електроприводами на АЕС

Системи керування електроприводами на АЕС представляють собою складні технічні комплекси, розроблені з урахуванням жорстких вимог ядерної безпеки та

надійності. В архітектурі цих систем можна виділити кілька характерних рівнів, кожен з яких виконує певні функції у загальному ланцюгу управління.

На нижньому рівні знаходяться локальні схеми керування, які безпосередньо взаємодіють з електродвигунами та виконавчими механізмами. Ці схеми включають пускові апарати (контактори, пускачі), релейно-контакторну апаратуру, а також елементи захисту від перевантажень, коротких замикань і фазних перекосів. Особливістю локального рівня є наявність механічних блокіровок і дублюючих систем керування для критично важливих приводів.

Автоматизовані системи регулювання формують середній рівень управління. Вони базуються на програмованих логічних контролерах (ПЛК) і мікропроцесорних пристроях, які забезпечують точне підтримання заданих параметрів роботи. Для приводів зі змінним навантаженням (наприклад, циркуляційних насосів) застосовуються частотні перетворювачі, що дозволяють плавно регулювати швидкість обертання в залежності від технологічних потреб. Сучасні системи регулювання включають алгоритми адаптації до зміни характеристик обладнання в процесі експлуатації.

На верхньому рівні працюють інтегровані системи диспетчеризації, які отримують дані від усіх приводів станції і забезпечують їх узгоджену роботу. Ці системи використовують промислові мережі передачі даних (Profibus, Modbus, Ethernet) для обміну інформацією між різними вузлами. В архітектурі передбачені резервні канали зв'язку на випадок виходу з ладу основної мережі.

Для приводів систем безпеки передбачені спеціальні схеми керування з підвищеною надійністю. Вони включають:

- незалежні джерела живлення (акумуляторні батареї, дизель-генератори);
- фізично розділені канали управління;
- механічні дублюючі системи;
- автоматичні системи самодіагностики.

Сучасні тенденції розвитку передбачають впровадження цифрових подвійників приводного обладнання, які дозволяють моделювати роботу систем у різних режимах і прогнозувати потенційні відмови. Також активно розвиваються

розподілені системи керування, де частина функцій прийняття рішень делегується безпосередньо локальним контролерам.

Важливим аспектом є захист систем керування від кіберзагроз. Для цього застосовують:

- апаратне розділення мереж;
- багаторівневі системи автентифікації;
- шифрування каналів зв'язку;
- системи виявлення вторгнень.

Кожна схема керування проходить ретельні випробування на електромагнітну сумісність і стійкість до впливу радіації, що є обов'язковою вимогою для обладнання АЕС.

2.3. Вимоги до електроприводів на АЕС

Електроприводи, що використовуються на атомних електростанціях, повинні відповідати ряду спеціальних вимог, обумовлених унікальними умовами експлуатації та високими стандартами ядерної безпеки. Ці вимоги охоплюють технічні характеристики, конструктивні особливості та експлуатаційні якості обладнання.

На першому місці серед вимог стоїть надійність і відмовостійкість обладнання. Електроприводи систем безпеки повинні забезпечувати безперебійну роботу навіть у разі аварійних ситуацій, включаючи повну втрату зовнішнього електроживлення. Для цього застосовуються системи автономного живлення та механічні дублюючі пристрої. Коефіцієнт готовності таких приводів повинен перевищувати 0,9999, що відповідає не більше ніж одній відмові на 10 000 годин роботи.

Радіаційна стійкість є ключовою вимогою для обладнання, розташованого в зонах з підвищеним рівнем іонізуючого випромінювання. Матеріали корпусів, ізоляція проводів, складові електронних компонентів повинні зберігати свої властивості протягом усього терміну служби в умовах радіаційного впливу.

Особлива увага приділяється захисту напівпровідникових приладів, найбільш чутливих до радіації.

Точність і швидкодія керування критично важливі для приводів керуючих стрижнів, регулюючих клапанів та інших відповідальних механізмів. Час спрацьовування таких систем не повинен перевищувати декількох мілісекунд, а похибка позиціонування – долей відсотка від повного ходу. Це досягається за рахунок застосування високоякісних датчиків зворотного зв'язку та прецизійних механічних передач.

Термічна стійкість вимагає збереження працездатності приводів у широкому діапазоні температур (від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обладнання зовнішнього розміщення). У разі пожежі критично важливі приводи повинні зберігати функціональність протягом часу, необхідного для ліквідації аварії (зазвичай не менше 1 години).

Вібростійкість і сейсмостійкість є обов'язковими вимогами для всіх приводів, особливо розташованих поблизу реакторного відділення. Обладнання повинне витримувати землетруси до 8 балів за шкалою Ріхтера без втрати працездатності. Для перевірки цієї характеристики проводиться спеціальне сейсмічне тестування на вібростендах.

Електромагнітна сумісність передбачає стійкість до впливу сильних електромагнітних полів, що виникають під час роботи потужного електрообладнання станції. Приводи повинні залишатися нечутливими до електромагнітних перешкод різної природи, включаючи імпульсні завади високої потужності.

Ергономічність обслуговування враховує необхідність мінімізації часу технічного обслуговування та ремонту. Конструкція приводів повинна забезпечувати легкий доступ до основних вузлів, можливість швидкої заміни модулів без спеціального інструменту, наявність зручних інтерфейсів для діагностики.

Кібербезпека сучасних цифрових приводів вимагає реалізації заходів захисту від несанкціонованого доступу та кібератак. Використовуються спеціалізовані

операційні системи реального часу, апаратні модулі шифрування, фізично розділені канали зв'язку.

Енергоефективність також є важливою вимогою, особливо для приводів, що працюють у безперервному режимі. Застосування частотного регулювання, енергозберігаючих режимів роботи, високоефективних електродвигунів дозволяє значно знизити енергоспоживання без шкоди для продуктивності.

Стандартизація і уніфікація компонентів спрощують процес технічного обслуговування та постачання запасних частин. Використання модульної архітектури дозволяє швидко адаптувати приводи під конкретні завдання без значних конструктивних змін.

Довговічність обладнання повинна відповідати терміну служби АЕС від 40 років до 60 років з можливістю подовження ресурсу після модернізації. Для цього застосовуються матеріали з підвищеною корозійною стійкістю, системи активного захисту від старіння, прогностичні системи моніторингу стану.

Всі ці вимоги регламентуються міжнародними стандартами (МАГАТЕ, IEEE, IEC) та національними нормативними документами, що постійно оновлюються з урахуванням нових технологічних розробок і оперативного досвіду експлуатації АЕС.

2.4 Узагальнена математична модель енергоспоживання електроприводів атомних електростанцій

Сучасні атомні електростанції (АЕС) потребують високоефективних систем автоматизації, зокрема електричних приводів, які забезпечують регулювання роботи насосів, засувки, систем вентиляції та інших критичних механізмів. В умовах підвищених вимог до безпеки та енергоефективності АЕС традиційні моделі приводів, орієнтовані лише на стабільність, є недостатніми.

Зважаючи на глобальний тренд декарбонізації та підвищення ККД ядерної енергетики, розробка точних математичних моделей електроприводів для АЕС стає ключовим завданням. Такі моделі мають враховувати:

- вплив радіаційного опромінення на параметри електродвигунів;
- необхідність підвищеної надійності та резервування;
- оптимізацію енергоспоживання при роботі в різних режимах (штатних, аварійних, пускових).

Розглядається привод з двигуном постійного або змінного струму, що працює в умовах АЕС. Основними узагальненими координатами є:

- електричний заряд у обмотці ротора q_e ;
- кут повороту вихідного вала φ , пов'язаний із механічним навантаженням (наприклад, регулюючим клапаном).

Використання електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа другого роду призводить до системи двох диференціальних рівнянь другого порядку. Однак електричний заряд q_e можна виключити з цих рівнянь, і після відповідних перетворень вони набувають відповідного вигляду (2.1-2.3) з відповідними початковими умовами.

Електрична частина:

$$L_e \frac{dI}{dt} = -R_e I - B_e \frac{d\varphi_e}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} + U_e(t). \quad (2.1)$$

Механічна частина:

$$\left(J_e \left(\frac{d\varphi_e}{d\varphi} \right)^2 + J_m(\varphi) \right) \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(2J_e \frac{d\varphi_e}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt^2} + \frac{dJ_m}{d\varphi} \right) \frac{d\varphi}{dt} = B_e \left(\frac{d\varphi_e}{d\varphi} \right) \frac{d\varphi_e}{dt} - M \left(t, \varphi, \frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (2.2)$$

$$I(t_0) = I_0, \varphi(t_0) = \varphi_0, \frac{d\varphi}{dt}(t_0) = \omega_0, \quad (2.3)$$

де t – час;

I – електричний струм у обмотці ротора;

L_e , R_e , B_e та J_e – індуктивність, опір обмотки ротора, електромеханічна характеристика електродвигуна та момент інерції його ротора;

$U_e(t)$ – напруга, що подається на електродвигун;

$J_w(\varphi)$ – момент інерції механічних частин привода та навантажень;

$M(t, \varphi, dt d\varphi)$ – узагальнений механічний момент, що представляє навантаження відносно осі обертання вихідного вала привода;

t_0 – заданий початковий момент часу;

I_0, φ_0, ω_0 – задані значення струму, кута повороту та швидкості обертання на початковий момент часу $t = t_0$.

Для оцінки спожитої електроенергії математична модель доповнюється наступним диференціальним рівнянням з відповідною початковою умовою:

$$\frac{dE}{dt} = I(t)U_e, E(t_e) = E_e, \quad (2.4)$$

де $E(t_0) = E_0$ – спожита електроенергія до моменту часу t , а E_0 – спожита електроенергія до початкового моменту часу $t = t_0$.

Математична модель дозволяє представити залежність між напругою $U_e(t)$, що подається на електродвигун, та споживанням електроенергії $E(t)$ електричним приводом. Енергоефективне автоматизоване керування приводом має ґрунтуватися на виборі напруги $U_e(t)$, і для його реалізації необхідно сформулювати та вирішити відповідну задачу теорії оптимального керування на основі розробленої математичної моделі.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ НА АЕС

3.1 Схематизація електроприводу та загальний підхід до моделювання процесів

Електропривід – це динамічна система, яка забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух із можливістю точного керування параметрами цього руху (швидкістю, моментом, положенням, прискоренням тощо). Він є ключовим елементом автоматизованих технологічних процесів, зокрема в атомній енергетиці.

У загальному випадку електропривід можна представити схематичною системою (рис. 3.1), що складається з:

- електродвигуна постійного та змінного струму – перетворює електрику в механічний рух;
- силової передачі (механічної) – передає момент від двигуна до навантаження (редуктори, вали тощо);
- виконавчого механізму – виконує корисну роботу (наприклад, насос або заслінка).

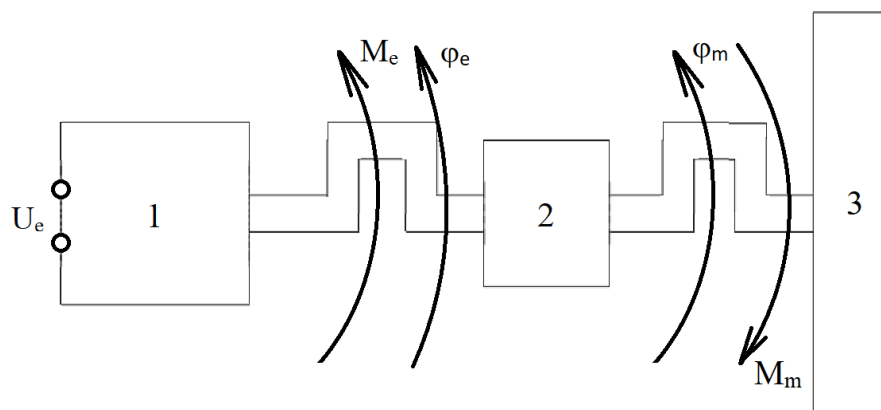


Рисунок 3.1 – Схема електропривіду (1 – електродвигун; 2 – силова передача; 3 – виконавчий механізм)

У такій системі можна виділити такі фундаментальні параметри, як:

φ_e – кут повороту ротора електродвигуна;

M_e – електромагнітний момент, що створюється електродвигуном;

φ_m – кут повороту рухомої ланки виконавчого механізму;

M_m – момент опору, що створюється виконавчим механізмом;

U_e – напруга живлення електродвигуна.

Електродвигун належить до електричної частини, а силова передача та виконавчий механізм – до механічної.

Модель механічної частини описує динаміку рухомих елементів системи, таких як вали, шестерні та інші компоненти силової передачі. Модель електричної частини враховує електромагнітні процеси в двигуні, зокрема генерування моменту та взаємодію з електричною мережею. Найцікавішою є модель електромеханічних ефектів, яка демонструє, як електричні явища впливають на механічний рух і навпаки.

Для побудови цих моделей використовується апарат аналітичної механіки, зокрема рівняння Лагранжа другого роду. Ці рівняння дозволяють врахувати всі сили, що діють на систему, включаючи корисне навантаження, тертя та інерцію. У роботі показано стандартну форму (3.1).

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dq_k} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{dq_k} = \frac{dR}{dq_k} + Q_k; k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.1)$$

де k – кількість ступенів вільності системи;

q_k – узагальнені координати;

L – функція Лагранжа;

R – дисипативна функція Релея;

Q_k – узагальнені сили.

Її можна поділити на декілька умовних частин:

- модель механічної частини;
- модель електромеханічних ефектів;
- модель електричної частини.

Кількість ступенів вільності – це кількість незалежних параметрів (лінійних переміщень, кутів повороту, електричних зарядів тощо), які однозначно визначають стан механічної або електромеханічної.

Узагальнені координати – незалежні параметри (лінійні переміщення, кути повороту, електричні заряди тощо), що повністю визначають стан системи.

Функція Лагранжа – різниця між кінетичною та потенціальною енергіями системи:

$$L = T - \Pi, \quad (3.2)$$

де T – сумарна кінетична енергія;

Π – сумарна потенціальна енергія.

3.2 Потенціальна та кінетична енергії

У межах загального підходу до опису енергетичних процесів у фізичних системах доцільно розглянути як кінетичну, так і потенціальну енергію. Кінетична енергія є формою енергії, пов'язаною з рухом тіла, і визначається його масою та швидкістю.

Кінетична енергія – це енергія руху, яка визначається масою тіла (або моментом інерції для обертального руху) та його швидкістю. Вона виражається формулою:

$$T = \frac{mv^2}{2}, \quad (3.3)$$

де m – маса тіла;

v – лінійна швидкість.

У випадку обертального руху замість маси використовується момент інерції, а лінійну швидкість замінює кутова швидкість, внаслідок чого кінетична енергія приймає вигляд:

$$T = \frac{j\omega^2}{2}, \quad (3.4)$$

де j – момент інерції;

ω – кутова швидкість.

Аналогічно до механічних процесів, у електричних колах існує форма енергії, яка залежить від інерційного елемента електричної природи – індуктивності, і пов'язаної з ним змінної – сили струму. Таким чином, кінетична енергія електромагнітної системи, що зберігається в магнітному полі, задається співвідношенням:

$$T = \frac{1}{2}LI^2, \quad (3.5)$$

де L – індуктивність;

I – сила струму.

Потенціальна енергія (Π) – це енергія взаємодії або положення тіла в силовому полі (гравітаційному, пружному, електромагнітному тощо), яка залежить від конфігурації системи, а не від її руху.

Найбільш інтуїтивно зрозумілою є потенціальна енергія сили тяжіння, яка залежить від висоти тіла над прийнятим рівнем відліку (рис. 3.2).

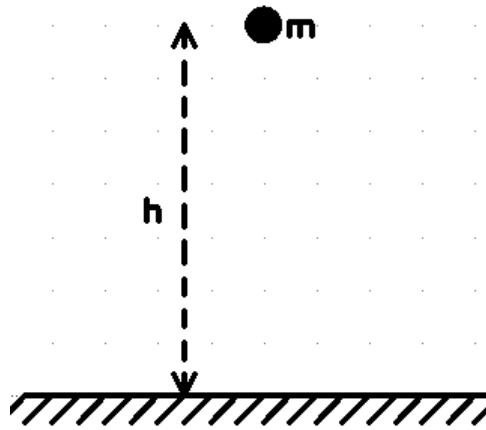


Рисунок 3.2 – Приклад кінетична енергії через силу тяжіння

Сили тяжіння зумовлена взаємодією тіла з гравітаційним полем Землі та залежить від його положення (висоти) відносно обраного рівня відліку. Вона визначається формулою:

$$\Pi = mgh, \quad (3.6)$$

де m – маса тіла;

g – прискорення вільного падіння;

h – висота тіла над рівнем відліку.

Іншим прикладом потенціальної енергії є енергія деформованої пружини, яка виникає внаслідок накопичення енергії при зміні її довжини. Така енергія зберігається в системі до моменту розвантаження і визначається виразом.

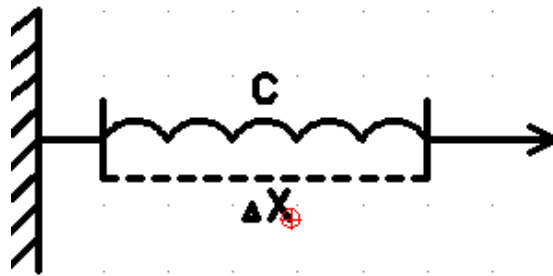


Рисунок 3.3 – Приклад потенціальної енергії через сили пружності

$$\Pi = \frac{1}{2} c \Delta x^2, \quad (3.7)$$

де Δx – зміна довжини пружини;
 c – жорсткість пружини.

3.3 Дисипативні сили, функція Релея та узагальнені сили

У рамках опису енергетичних процесів у фізичних системах необхідно враховувати не лише зберезувальні енергії (кінетичну та потенціальну), але й втрати, спричинені дією дисипативних сил.

Дисипативні сили – це сили, які зменшують механічну енергію системи через її розсіювання (наприклад, у вигляді тепла). Вони завжди спрямовані протилежно до напрямку руху та описуються дисипативною функцією Релея у формалізмі Лагранжа.

Функція Релея представляє собою потужність дисипативних сил, які зменшують енергію системи.

$$R = \frac{1}{2} b v^2 = \frac{1}{2} b \omega^2, \quad (3.8)$$

де v – швидкість;
 ω – кутова швидкість;
 b – параметр вязкого трення.

Для електричних процесів функція Релея описує дисипативні втрати (джоулеві втрати, магнітне гістерезис, вихрові струми) у електромеханічних системах. У формалізмі Лагранжа вона враховується через узагальнені координати, пов'язані з електричними параметрами:

$$R = \frac{1}{2} R_a I^2, \quad (3.9)$$

де R_a – активний опір обмотки;
 I – сила струму.

3.4 Узагальнені сили

Узагальнені сили є ключовим поняттям у формалізмі Лагранжа, що забезпечує універсальну методологію опису динаміки систем з довільною кількістю ступенів вільності. У класичній механіці ці сили відповідають за зміну узагальнених координат, що, своєю чергою, дозволяє моделювати фізичні процеси в координатах, адаптованих до конкретної задачі. На відміну від звичайних сил Ньютона, узагальнені сили можуть враховувати вплив не лише механічних, а й електромагнітних, гідродинамічних та інших полів, включаючи дисипативні ефекти, які відіграють вирішальну роль у електромеханічних і термодинамічних системах.

Зміна стану системи подається як варіації узагальнених координат:

$$\delta q_1, \delta q_2, \dots, \delta q_n. \quad (3.10)$$

При зміні стану системи сили, що діють на неї, характеризуються віртуальною роботою:

$$\delta A = Q_1 \delta q_1 + Q_2 \delta q_2 + \dots + Q_n \delta q_n, \quad (3.11)$$

де величини Q_1, Q_2, \dots, Q_n – множники варіацій узагальнених координат у вираженні віртуальної роботи δA називаються узагальненими силами.

Коефіцієнти при варіаціях узагальнених координат у виразі для віртуальної роботи δA називаються узагальненими силами. Віртуальна робота – це робота на віртуальних переміщеннях, тобто нескінченно малих змінах стану системи.

3.5 Механічна частина електропривода систем автоматизації АЕС

У більшості випадків механічна частина зводиться до простої машини – механічної системи з одним ступенем вільності. Оскільки рухомий елемент – це ротор електродвигуна, що обертається, то в загальному випадку узагальнену координату можна вибрати у вигляді

$$q = \varphi_e. \quad (3.12)$$

Тоді:

$$\varphi_m = \varphi_m(q). \quad (3.13)$$

Виходячи з цього, функція Лагранжа буде мати такий вигляд:

$$L = \frac{1}{2}j(\varphi_e)\dot{\varphi}_e^2 - \Pi(\varphi_e). \quad (3.14)$$

Використовуючи умову узагальненої координати (3.12), функція (3.14) приймає вигляд:

$$L = \frac{1}{2}j(q)\dot{q}^2 - \Pi(q), \quad (3.15)$$

де $j(q_e)$ – узагальнений момент інерції машини відносно осі обертання ротора електродвигуна;

$\Pi(q)$ – потенційна енергія.

Узагальнена функція Релея в формулі (3.16) поєднує попередні підходи, абстрагуючись від природи втрат і подаючи їх через узагальнену координату q та її похідну \dot{q} :

$$R = \frac{1}{2} b(q) \dot{q}^2, \quad (3.16)$$

де $b(q)$ – узагальнений параметр в'язкого тертя.

Вихідне рівняння віртуальної роботи:

$$\delta A = M_e \delta q - M_m \delta \varphi_m. \quad (3.17)$$

Вводимо тотожність між узагальненою координатою q та кутом повороту φ_e :

$$q = \varphi_e \rightarrow \delta q = \delta \varphi_e. \quad (3.18)$$

Кут навантаження φ_m залежить від q , тому його варіація виражається через похідну:

$$\varphi_m = \varphi_m(q) \rightarrow \delta \varphi_m = \frac{d\varphi_m}{dq} \delta q. \quad (3.19)$$

Зробимо підстановку та винесемо множник:

$$\delta A = M_e \delta q - M_m \frac{d\varphi_m}{dq} \delta q, \quad (3.20)$$

$$\delta A = (M_e - M_m \frac{d\varphi_m}{dq}) \delta q. \quad (3.21)$$

Виразим узагальнену силу:

$$Q = M_e - M_m \frac{d\varphi_m}{dq}. \quad (3.22)$$

Використовуємо вихідне рівняння Лагранжа 2 роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} - \frac{dL}{dq} = -\frac{dR}{d\dot{q}} + Q, \quad (3.23)$$

$$\frac{dL}{d\dot{q}} = \frac{d}{d\dot{q}} \left(\frac{1}{2} j(q) \dot{q}^2 - \Pi(q) \right) = \frac{1}{2} j(q) 2\dot{q} = j(q) \dot{q}. \quad (3.24)$$

Робимо обчислення складових рівняння:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} = \frac{d}{dt} (j(q) \dot{q}) = \frac{dj}{dq} \dot{q}^2 + j(q) \ddot{q}. \quad (3.25)$$

Використовуємо загальне правило похідної добутку двох функцій:

$$(UV)' = U'V + V'U, \quad (3.26)$$

$$V = \dot{q}; U = j(q), \quad (3.27)$$

$$\frac{dL}{dq} = \frac{d}{dq} = \frac{1}{2} \frac{dj}{dq} \dot{q}^2 - \frac{d\Pi}{dq}. \quad (3.28)$$

Похідна функції Релея:

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{q}} = \frac{d}{d\dot{q}} \left(\frac{1}{2} b(q) \dot{q}^2 \right) = \frac{1}{2} b(q) 2\dot{q} = b(q) \dot{q}. \quad (3.29)$$

У ході проведення деяких обчислень, отримуємо майже кінцевий вид рівняння:

$$\frac{dj}{dq} \dot{q}^2 + j(q) \ddot{q} - \frac{1}{2} \frac{dj}{dq} \dot{q}^2 + \frac{d\Pi}{dq} = -b(q) \dot{q} + M_e - M_m \frac{d\varphi_m}{dq}. \quad (3.30)$$

$$j(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \frac{dj}{dq} \dot{q}^2 = -b(q) \dot{q} + M_e - \left(M_m \frac{d\varphi_m}{dq} + \frac{d\Pi}{dq} \right) - \text{диференційне рівняння}$$

руху механічної частини електроприводу, який використовується в системі СУЗ на АЕС.

M_e відображає електромагнітний момент на роторі електродвигуна, який залежить від типу електродвигуна, який в загальному випадку залежить від сили струму в обмотці ротора та від частоти обертання:

$$M_e = M_e(I, \omega), \quad (3.31)$$

де I – сила струму в обмотці ротора;

ω – кутова швидкість ротора.

В електроприводах систем автоматизації, яким потрібна точність та швидкість, часто застосовуються електродвигуни постійного струму. Саме такі двигуни використовуються на АЕС. Типовою формулою електромагнітного моменту для таких двигунів є:

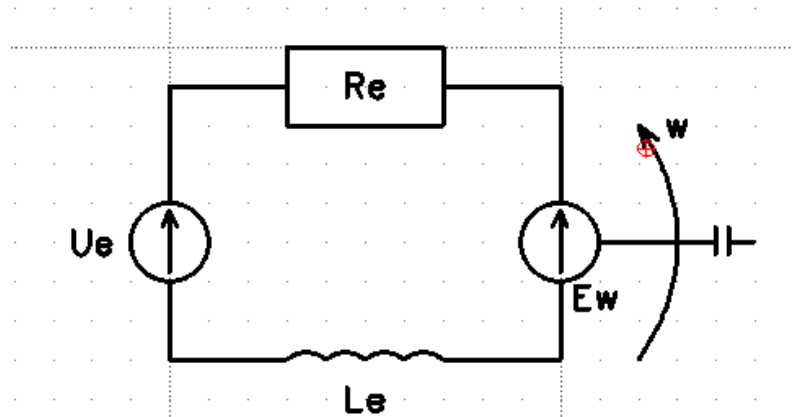
$$M_e = B_e I, \quad (3.32)$$

де B_e – електромеханічна характеристика двигуна.

3.6 Моделювання електричної частини електропривода систем автоматизації АЕС

Електродвигун постійного струму є системою з одним ступенем свободи, де електромеханічна енергія перетворюється за рахунок взаємодії магнітного поля та струму, що протікає в обмотці ротора. Розглянемо типову електричну схему

найбільш поширеного двигуна постійного струму (рис. 3.4), який використовується в багатьох електромеханічних системах на АЕС, здебільшого у СУЗ.



L_e – індуктивність обмотки ротора; U_e – напруга живлення; R_e – опір обмотки ротора; E_ω – напруга самоіндукції

Рисунок 3.4 – Еквівалентна схема двигуна постійного струму

Згідно з законом електромагнітної індукції, наведена ЕРС прямо пропорційна кутовій швидкості ротора:

$$E_\omega = B_e \omega. \quad (3.33)$$

Оберемо електричний заряд як узагальнену координату:

$$q = \int I(t) dt. \quad (3.34)$$

Через це можна подати модель двигуна в лагранжевій формі, де узагальнена швидкість \dot{q} відповідає струму, а узагальнена сила – напрузі на обмотці:

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} L_e \dot{q}^2; R = \frac{1}{2} R_e \dot{q}^2; \delta a = U_e \delta q - E_\omega \delta q = (U_e - B_e \omega) \delta q; \\ Q = U_e - B_e \omega. \end{cases} \quad (3.35)$$

Рівняння Лагранжа другого роду з урахуванням дисипативної сили:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} - \frac{dL}{dq} = -\frac{dR}{d\dot{q}} + Q. \quad (3.36)$$

Обчислення часткової похідної функції Лагранжа по узагальненій швидкості.

Цей вираз характеризує електромагнітний імпульс у системі

$$\frac{dL}{d\dot{q}} = \frac{d}{d\dot{q}} \left(\frac{1}{2} L_e \dot{q}^2 \right) = \frac{1}{2} L_e 2\dot{q} = L_e \dot{q}. \quad (3.37)$$

Повна похідна електромагнітного імпульсу по часу:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}} = \frac{d}{dt} (L_e \dot{q}) = L_e \ddot{q}. \quad (3.38)$$

Обчислюється часткова похідна функції Релея по \dot{q} :

$$\frac{dR}{d\dot{q}} = \frac{d}{d\dot{q}} \left(\frac{1}{2} R_e \dot{q}^2 \right) = R_e \dot{q}. \quad (3.39)$$

Після підстановки всіх виразів до рівняння Лагранжа отримуємо остаточну форму рівняння руху системи. Воно описує зміну струму під впливом джерела, опору і ЕРС:

$$L_e \ddot{q} = -R_e \dot{q} + U_e - B_e \omega. \quad (3.40)$$

Для переходу до фізичних змінних узагальнена швидкість ототожнюється зі струмом. Це дає змогу переписати рівняння у звичній електротехнічній формі.

$$\dot{q} = I. \quad (3.41)$$

$L_e \frac{dI}{dt} = -R_e I + U_e - B_e \omega$ – диференціальне рівняння математичної моделі електричних процесів в двигуні постійного струму.

3.7 Моделювання електромеханічних процесів в електроприводах

Моделювання електромеханічних процесів в електроприводах систем автоматизації АЕС зводиться до інтегрування системи диференціальних рівнянь, що представляють механічні та електричні процеси з урахуванням початкових умов. У моделі механічної частини ключову роль відіграє момент інерції ротора, який може залежати від положення системи, що дозволяє врахувати змінну структуру навантаження.

Математична модель механічної частини:

$$J(q) \frac{d\ddot{q}}{dt^2} + \frac{1}{2} \frac{dJ}{dq} \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 = -b(q) \frac{dJ}{dq} + M_e \left(I, \frac{dq}{dt} \right) - \left(M_m \frac{d\varphi_m}{dq} + \frac{d\Pi}{dq} \right). \quad (3.42)$$

Рівняння (3.42) є узагальненим рівнянням руху механічної частини у лагранжевій формі. У його правій частині враховуються сили дисипації, подані через функцію Релея, та зовнішні електромагнітні моменти, приведені до узагальненої координати. Похідні по координаті описують зміну електромагнітної взаємодії в залежності від положення ротора:

$$b_0 U_e = 0, \quad (3.43)$$

$$q(t_0) = \varphi_0. \quad (3.44)$$

Умови (3.43, 3.44) задають нульові або фіксовані значення величин у початковий момент часу. Рівність 3.43 використовується для виключення сторонніх джерел тертя або електричних збурень у момент запуску. Величина 3.44

задає початкове положення системи, яке співвідноситься з електричним або механічним кутом.

$$\frac{dq}{dt}(t = t_0) = \omega_0. \quad (3.45)$$

У рівнянні (3.45) встановлюється початкове значення швидкості обертання ротора в момент часу, що забезпечує однозначність розв'язку задачі Коші. Зокрема, це дозволяє провести чисельне інтегрування системи рівнянь з точним врахуванням динамічного стану привода на старті.

Для електричної частини система включає рівняння моменту, поданого в (3.46), де електромагнітний момент прямо пропорційний добутку сталої зворотного зв'язку на струм в обмотці якоря. Це забезпечує зв'язок між струмом та механічною реакцією ротора.

$$M_e \left(I, \frac{dq}{dt} \right) = B_e I. \quad (3.46)$$

Рівняння (3.47) є рівнянням струму в обмотці двигуна постійного струму. Воно включає індуктивну складову, активні втрати та ЕРС, що залежить від швидкості. Його розв'язок дозволяє визначити часову еволюцію струму в обмотці за заданих початкових умов.

$$L_e \frac{dI}{dt} = -R_e I - B_e \frac{dq}{dt} + U_e, \quad (3.47)$$

$$I(t_0) = I_0, \quad (3.48)$$

$$\frac{dI}{dt}(t = t_0) = \dot{I}_0. \quad (3.48)$$

Рівняння задають початкові умови для струму та його похідної. Їх наявність є обов'язковою для забезпечення коректного запуску чисельного моделювання, оскільки дозволяє уникнути незвичайностей при розв'язанні системи.

4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

4.1 Математична модель процесів в електроприводах постійного струму

Комп'ютерне моделювання є потужним інструментом для дослідження та аналізу динамічних процесів в електроприводах. Воно дозволяє значно скоротити час та витрати на розробку, оптимізацію та налагодження систем керування електроприводами порівняно з натурними експериментами.

Для проведення комп'ютерного моделювання процесів в електроприводах постійного струму було обрано програмне середовище Scilab/Xcos. Scilab – це вільно поширюване програмне забезпечення для чисельних обчислень, яке надає потужне обчислювальне середовище для інженерних та наукових застосувань.

Основними перевагами Scilab/Xcos для моделювання електроприводів є безкоштовність та відкритий вихідний код, що робить його доступним для навчальних та дослідницьких цілей. Наявність спеціалізованого графічного середовища Xcos для блочного моделювання динамічних систем дозволяє ефективно створювати складні моделі. Широкий набір вбудованих математичних функцій та бібліотек забезпечує розв'язання диференціальних рівнянь різної складності. Зручні засоби візуалізації результатів моделювання у вигляді графіків та діаграм спрощують аналіз отриманих даних. Можливість створення власних функцій та блоків дозволяє розширювати функціональність системи. Важливою перевагою є також сумісність з форматами даних MATLAB/Simulink.

Середовище Xcos дозволяє створювати моделі електроприводів у вигляді структурних схем з використанням стандартних блоків інтеграторів, суматорів, підсилювачів та інших елементів. Це забезпечує наочність моделі та відповідність математичному опису системи.

У даному розділі розглядається побудова математичної моделі електропривода постійного струму, її реалізація в середовищі Scilab/Xcos та дослідження перехідних процесів при запуску електропривода.

Електроприводи з двигунами постійного струму залишаються важливим класом електромеханічних систем завдяки простоті регулювання швидкості, високому пусковому моменту та лінійності характеристик. Особливо важливими ці переваги стають у системах точного позиціонування, робототехніці та верстатобудуванні. Для ефективного проектування систем керування необхідно мати адекватну математичну модель, яка враховує основні фізичні процеси електромеханічного перетворення енергії.

Розглянемо електропривод постійного струму з незалежним збудженням, в якому магнітний потік збудження створюється окремою обмоткою і підтримується постійним. Це забезпечує лінійність характеристик та спрощує математичний опис. Для побудови математичної моделі приймемо наступні припущення, які не вносять суттєвих похибок для більшості практичних застосувань:

$$J = \text{const}, \quad (4.1)$$

$$b = \text{const}, \quad (4.2)$$

$$\frac{d\varphi_m}{dq} = \frac{1}{k}, \quad (4.3)$$

де $k = \text{const}$ – передатне число механічного редуктора;

J – момент інерції системи приведений до валу двигуна;

b – коефіцієнт в'язкого тертя.

Математична модель базується на фундаментальних законах фізики. Механічна частина описується другим законом Ньютона для обертального руху, а електрична – законами Кірхгофа та електромагнітної індукції. З урахуванням

прийнятих допущень математична модель електропривода описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} J \frac{d^2 q}{dt^2} = -b \frac{dq}{dt} + B_e I - M_m \frac{1}{k}, \\ L_e \frac{dI}{dt} = -R_e I - B_e \frac{dq}{dt} + U_e. \end{cases} \quad (4.4)$$

Початковими умовами до системи є:

$$q(t_0) = \varphi_0, \quad (4.5)$$

$$\frac{dq}{dt}(t_0) = \omega_0, \quad (4.6)$$

$$I(t_0) = I_0. \quad (4.7)$$

Перша частина рівняння (4.4) відображає динамічний баланс моментів на валу двигуна. Ліва частина представляє момент інерції, помножений на кутове прискорення. У правій частині перший доданок $-b \frac{dq}{dt}$ описує момент в'язкого тертя, пропорційний швидкості і спрямований проти руху. Другий доданок $B_e I$ – це електромагнітний момент двигуна, який є рушійною силою системи і пропорційний струму якоря. Третій доданок $M_m \frac{1}{k}$ враховує приведений до валу двигуна момент навантаження.

Друга – описує електричні процеси в колі якоря згідно з другим законом Кірхгофа. Тут R_e – активний опір кола якоря, L_e – індуктивність обмотки якоря, $B_e \frac{dq}{dt}$ – проти ЕРС, яка виникає при обертанні якоря в магнітному полі, U_e – напруга живлення, що є керуючим впливом системи.

В електроприводах найбільший практичний інтерес представляє кутова швидкість як основна регульована величина. Кут повороту є інтегралом від

швидкості, тому його легко визначити за відомим законом зміни швидкості. Враховано кінематичне співвідношення:

$$\omega = \frac{dq}{dt}, \quad (4.8)$$

$$q(t_0) = \varphi_0. \quad (4.9)$$

Тоді математичну модель можна записати в більш зручному для комп'ютерного моделювання вигляді системи рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega + B_e I - M_m \frac{1}{k}, \omega(t_0) = \omega_0, \\ L_e \frac{dI}{dt} = -R_e I - B_e \omega + U_e, I(t_0) = I_0. \end{cases} \quad (4.10)$$

Отримана математична модель обов'язково розглядається разом з рівнянням (4.8) та відповідною початковою умовою (4.9). Ця система повністю описує динамічні процеси в електроприводі постійного струму. Рівняння визначають кінематичний зв'язок між кутом повороту та кутовою швидкістю, а також описує механічні процеси з урахуванням інерційності, тертя та навантаження. Також характеризує електромагнітні процеси в колі якоря.

Важливо відзначити, що отримана модель є лінійною, оскільки всі параметри вважаються постійними. Це дозволяє використовувати потужний апарат теорії лінійних систем для аналізу та синтезу регуляторів. У реальних системах можуть проявлятися нелінійні ефекти, але для багатьох практичних задач лінійна модель забезпечує достатню точність.

4.2 Математичні основи комп'ютерного моделювання та реалізація блоків Scilab/Xcos

Комп'ютерне моделювання процесів в електроприводі постійного струму зводиться до чисельного інтегрування диференціальних рівнянь (4.11) математичної моделі.

Чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь потребує запису такої системи в канонічній формі рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \omega = \frac{dq}{dt}, \varphi(t_0) = \varphi_0, \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{b}{J}\omega + \frac{B_e}{J}I - M_m \frac{1}{Jk}, \omega(t_0) = \omega_0, \\ \frac{dI}{dt} = -\frac{R_e}{L_e}I - \frac{B_e}{L_e}\omega + \frac{1}{L_e}U_e, I(t_0) = I_0, \end{cases} \quad (4.11)$$

де $\varphi = q$ – кут повороту ротора електродвигуна.

Система представляє собою математичну модель електропривода постійного струму в формі, зручній для чисельного інтегрування. Перше рівняння встановлює кінематичний зв'язок між кутом повороту та кутовою швидкістю. Друге рівняння описує динаміку механічної частини з урахуванням моменту інерції, коефіцієнта тертя, електромагнітного моменту та моменту навантаження. Третє рівняння характеризує електромагнітні процеси в колі якоря.

Для комп'ютерного моделювання така модель має дуже зручну форму. Ця система диференціальних рівнянь першого порядку може бути ефективно розв'язана стандартними чисельними методами, реалізованими в середовищі Scilab/Xcos.

При виконанні досліджень приймаємо такі параметри:

$J = 0,25$ кг·м² – момент інерції приведений до валу двигуна;

$b = 0,005$ Н·м·с – коефіцієнт в'язкого тертя;

$M_m = 0,05$ Н·м – момент навантаження на валу;

$k = 100$ – передатне число редуктора;

$R_e = 0,22 \text{ Ом}$ – опір кола якоря;

$L_e = 1,5 \text{ мГн}$ – індуктивність кола якоря;

$B_e = 0,122 \text{ Н}\cdot\text{м/А}$ – конструктивна постійна двигуна.

Ці параметри відповідають типовому малопотужному двигуну постійного струму і забезпечують адекватність моделювання реальних процесів.

4.2.1 Концепція побудови моделі

При створенні моделі електродвигуна постійного струму було прийнято рішення використовувати блочно-орієнтований підхід моделювання в середовищі Scilab/Xcos. Такий підхід дозволяє представити кожен математичний елемент системи диференціальних рівнянь у вигляді окремого функціонального блоку з чітко визначеними входами та виходами. Основна концептуальна ідея полягала в декомпозиції складної математичної моделі електромеханічної системи на логічно зв'язані компоненти, що забезпечує модульність, гнучкість налаштування параметрів та зручність аналізу результатів моделювання.

Блочна структура моделі відображає фізичну природу електродвигуна, де можна виділити окремі підсистеми: електричну (контур якоря), механічну (ротор з навантаженням) та систему управління (регулятор). Кожна підсистема має власні параметри та характеристики, але всі вони взаємодіють між собою через електромагнітні та електромеханічні зв'язки. Такий підхід особливо важливий для систем критичного призначення, якими є електроприводи систем управління та захисту реакторів АЕС, оскільки дозволяє проводити окремий аналіз кожної підсистеми та їх взаємного впливу.

Вибір середовища Xcos обумовлений його можливостями візуального програмування та наявністю спеціалізованих блоків для моделювання електромеханічних систем. Графічне представлення моделі значно спрощує розуміння взаємозв'язків між компонентами та полегшує процес налагодження і верифікації моделі.

4.2.2 Створення вектора стану

Центральною ідеєю архітектури моделі стало об'єднання всіх похідних змінних стану в один векторний сигнал за допомогою блоку MUX. Цей методологічний підхід дозволив кардинально упорядкувати структуру моделі, забезпечити правильне передавання інформації між компонентами та створити основу для стабільного розв'язання системи диференціальних рівнянь.

Векторне представлення змінних стану є фундаментальним принципом сучасної теорії управління та широко використовується при моделюванні динамічних систем. У контексті електродвигуна постійного струму вектор стану формується з трьох ключових компонентів:

$$x = \left[\frac{df}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \frac{di}{dt} \right], \quad (4.12)$$

де $\frac{df}{dt}$ – похідна частоти;

$\frac{d\omega}{dt}$ – похідна частоти;

$\frac{di}{dt}$ – похідна струму.

Використання блоку MUX (рис. 4.1) для формування векторного сигналу забезпечує синхронне передавання всіх компонентів вектора стану до інтегратора, що критично важливо для точності обчислень. Блок MUX в Xcos дозволяє об'єднувати декілька скалярних сигналів в один векторний, зберігаючи при цьому інформацію про кожен компонент та їх взаємний зв'язок у часі.

Векторний підхід має декілька суттєвих переваг порівняно з використанням окремих скалярних сигналів. По-перше, він забезпечує консистентність даних – всі компоненти вектора стану обчислюються та передаються одночасно, що виключає можливість десинхронізації. По-друге, такий підхід спрощує структуру моделі та зменшує кількість з'єднань між блоками. По-третє, векторне представлення полегшує масштабування моделі – додавання нових змінних стану потребує лише розширення вектора без перебудови всієї структури.

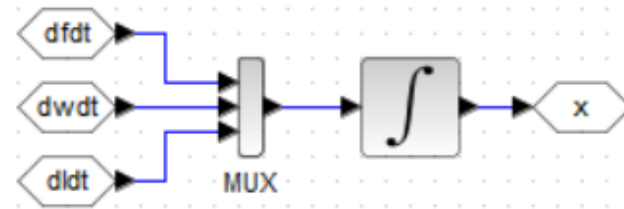


Рисунок 4.1 – Блок MUX для об'єднання похідних змінних стану

Такий підхід особливо важливий для складних електромеханічних систем, якими є електроприводи систем управління АЕС, оскільки дозволяє уникнути алгебраїчних петель та забезпечує стабільне обчислення навіть при швидких перехідних процесах. Векторна структура також створює можливості для подальшого розвитку моделі, наприклад, для врахування температурних ефектів, нелінійностей магнітного кола або додаткових механічних ступенів свободи.

4.2.3 Розподіл компонентів вектора

Для подальшої обробки об'єднаний вектор стану потребує декомпозиції на окремі скалярні компоненти, що реалізується за допомогою трьох спеціалізованих блоків EXTRACT (рис. 4.2). Ця операція є зворотною до попереднього етапу об'єднання та забезпечує доступ до індивідуальних змінних стану для їх використання в обчислювальних блоках електричного та механічного контурів.

Блоки EXTRACT в середовищі Xcos виконують функцію селекторів, які дозволяють витягувати конкретні елементи з векторного сигналу за їх індексами. Перший блок EXTRACT налаштовано на витягування частоти f , другий – на витягування кутової швидкості ω , третій – на витягування струму I . Така послідовність відповідає структурі вектора стану, сформованого на попередньому етапі.

Архітектурне рішення щодо використання окремих блоків EXTRACT для кожної змінної стану обумовлено необхідністю забезпечення гнучкості та модульності моделі. Кожна змінна стану використовується в різних частинах моделі з різною інтенсивністю – струм якоря потрібен для обчислення електромагнітного моменту та падіння напруги на активному опорі, кутова

швидкість використовується для розрахунку протиелектрорушійної сили та моменту тертя, а частота обертання може застосовуватися в системі управління та для виведення результатів.

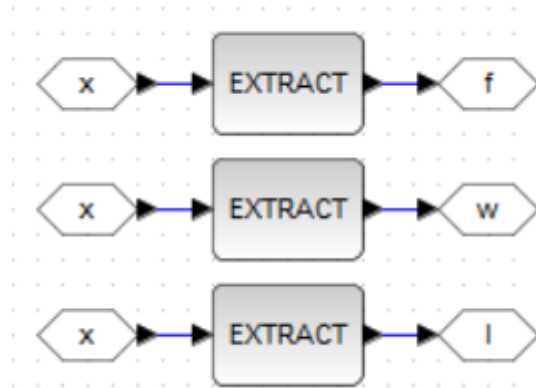


Рисунок 4.2 – Блоки EXTRACT для витягування окремих змінних стану

Кожен блок EXTRACT налаштовано на витягування конкретного елемента з вектора, що дозволяє використовувати ці значення в обчислювальних блоках. Це рішення забезпечує гнучкість моделі та можливість легкого додавання нових змінних стану.

4.2.4 Реалізація електричного контуру

Суматор (рис. 4.3) налаштовано таким чином, що на його позитивний вхід подається напруга живлення U_e , яка є джерелом енергії для електродвигуна. На негативні входи суматора подаються два компоненти, які зменшують ефективну напругу, прикладену до індуктивної складової контуру: падіння напруги на активному опорі через блок R_e/L_e та проти ЕРС через блок B_e/L_e .

Падіння напруги на активному опорі обмотки якоря розраховується як добуток струму i на опір R_e . У моделі це реалізовано через блок R_e/L_e , який одразу виконує нормування на індуктивність, що дозволяє спростити подальші обчислення та уникнути додаткових операцій ділення.

Проти ЕРС, що виникає внаслідок обертання провідників якоря в магнітному полі, представлена блоком B_e/L_e . Цей блок обчислює добуток кутової швидкості ω

на конструктивний коефіцієнт двигуна B_e (коефіцієнт проти ЕРС), одразу нормований на індуктивність. Проти ЕРС діє назустріч прикладеній напрузі та є основним фактором, що обмежує струм якоря при збільшенні швидкості обертання.

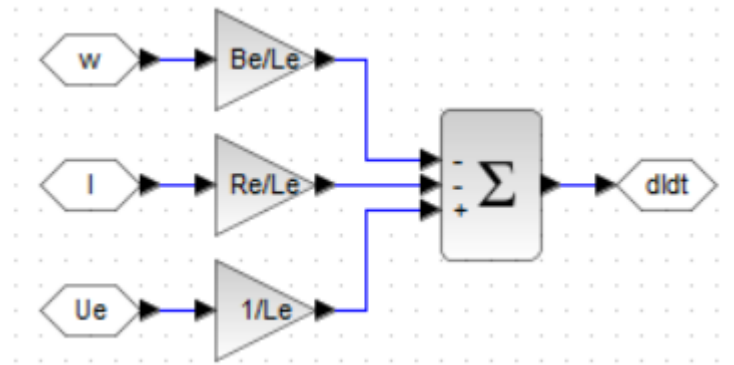


Рисунок 4.3 – Структура суматора для розрахунку електричного рівняння

Використання нормованих коефіцієнтів (поділених на індуктивність) дозволяє одразу отримати значення похідної струму після множення результату суматора на блок $1/L_e$. Така структура точно відображає фізичні процеси в електричному контурі двигуна.

4.2.5 Реалізація механічного контуру

Механічна частина моделі побудована за аналогічним принципом до електричної, але враховує особливості механічних процесів (рис. 4.4). Електромагнітний момент формується через блок B_e/J , який множить струм якоря на конструктивний коефіцієнт двигуна. Момент навантаження M_m подається через блок $1/J$ з негативним знаком, що відображає його опір обертанню. Момент в'язкого тертя реалізовано через зворотний зв'язок по швидкості. Результуючий момент автоматично перетворюється на кутове прискорення завдяки нормуванню на момент інерції.

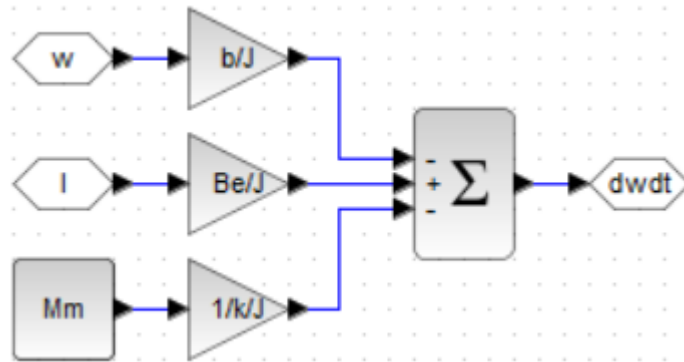


Рисунок 4.4 – Структура суматора для розрахунку механічного рівняння

Особливістю механічного контуру є його інтегруючі властивості – кутова швидкість є інтегралом від кутового прискорення, а кутове переміщення (позиція стержня) є інтегралом від кутової швидкості. Це створює природний ефект згладжування та дозволяє отримати плавний рух навіть при ступінчастих змінах керуючих сигналів.

4.2.6 Додавання системи управління

Для забезпечення автоматичного регулювання до моделі додано пропорційно-інтегральний регулятор, який складається з двох паралельних каналів обробки сигналу похибки. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на відхилення, а інтегральна складова усуває статичну похибку регулювання. Регулятор порівнює задане значення швидкості з фактичним через блок порівняння, формує сигнал похибки та через пропорційну й інтегральну складові створює керуючий вплив на двигун. Така структура регулятора особливо важлива для систем СУЗ, де потрібна висока точність позиціонування.

4.2.7 Замикання системи через інтегратор

Ключовим елементом моделі є інтегратор Пі (рис. 4.5) з блоком зворотного зв'язку, який реалізує розв'язання системи диференціальних рівнянь у часовій області та забезпечує замкнутість математичної моделі електродвигуна. Цей компонент виконує фундаментальну функцію перетворення похідних змінних стану в їх поточні значення через операцію інтегрування.

Принципова особливість інтегратора в Xcos полягає в його здатності обробляти векторні сигнали, зберігаючи структуру та взаємозв'язки між компонентами. Вихід інтегратора U_e представляє вектор поточних значень змінних стану, який через зворотний зв'язок подається назад у блоки EXTRACT. Цей зворотний зв'язок є критично важливим для функціонування всієї моделі, оскільки забезпечує циркуляцію інформації про поточний стан системи.

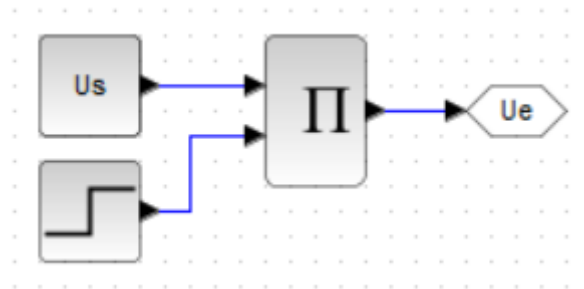


Рисунок 4.5 – Інтегратор з блоком зворотного зв'язку для замикання системи

Блок зворотного зв'язку, показаний у нижній частині схеми, забезпечує передачу проінтегрованих значень назад до входу системи, створюючи замкнутий контур. Ця архітектура дозволяє розірвати алгебраїчні петлі, які неминухо виникають при безпосередньому з'єднанні блоків з взаємними залежностями. Затримка на один крок інтегрування забезпечує стабільність обчислювального процесу та виключає можливість виникнення невизначеностей.

Така архітектура забезпечує стійке розв'язання системи диференціальних рівнянь навіть при складних нелінійних залежностях та швидкозмінних вхідних сигналах. Інтегратор автоматично враховує історію системи та забезпечує безперервність розв'язку в часі, що критично важливо для моделювання перехідних процесів в електромеханічних системах.

Дозволяє моделювати перехідні процеси в реальному часі з урахуванням інерційних властивостей як електричного контуру (через індуктивність), так і механічної системи (через момент інерції). Це особливо важливо для електроприводів систем СУЗ, де точність відтворення динамічних характеристик безпосередньо впливає на ефективність управління реактором та рівень безпеки.

Зворотний зв'язок через інтегратор також забезпечує правильне відображення фізичної природи системи, де майбутній стан завжди залежить від поточного стану та діючих на систему впливів. Така структура дозволяє легко задавати початкові умови моделювання та забезпечує коректну поведінку моделі при зміні параметрів або режимів роботи.

4.2.8 Виведення та збереження результатів

Для аналізу результатів моделювання використано три спеціалізовані блоки To workspace (рис. 4.6), які забезпечують збереження часових залежностей основних параметрів електродвигуна в робочу область Scilab. Ці блоки виконують критично важливу функцію документування та архівування результатів моделювання, що дозволяє проводити подальший детальний аналіз перехідних процесів, побудову графічних залежностей та порівняння отриманих результатів з експериментальними даними або теоретичними розрахунками.

Перший блок To workspace зберігає частоту обертання f у форматі round (f/dt), що забезпечує збереження дискретизованих значень частоти з урахуванням кроку інтегрування. Частота обертання є одним з найважливіших параметрів для аналізу роботи електроприводів СУЗ, оскільки безпосередньо пов'язана зі швидкістю переміщення управляючих стержнів та часом їх спрацювання при аварійних ситуаціях.

Другий блок зберігає кутову швидкість ω у форматі round (ω/dt), що дозволяє отримати точні значення кутового переміщення ротора в часі. Кутова швидкість є фундаментальним параметром механічної підсистеми та характеризує динамічні властивості всього електромеханічного комплексу. Аналіз залежності $\omega(t)$ дозволяє оцінити якість перехідних процесів, наявність коливань та ступінь демпфування системи.

Третій блок фіксує струм якоря i у форматі round (i/dt), що забезпечує моніторинг електричних процесів у двигуні. Струм якоря прямо пропорційний електромагнітному моменту та характеризує енергетичні процеси в системі.

Контроль струму особливо важливий для електроприводів АЕС, оскільки дозволяє виявляти перевантаження, короткі замикання та інші аварійні режими роботи.

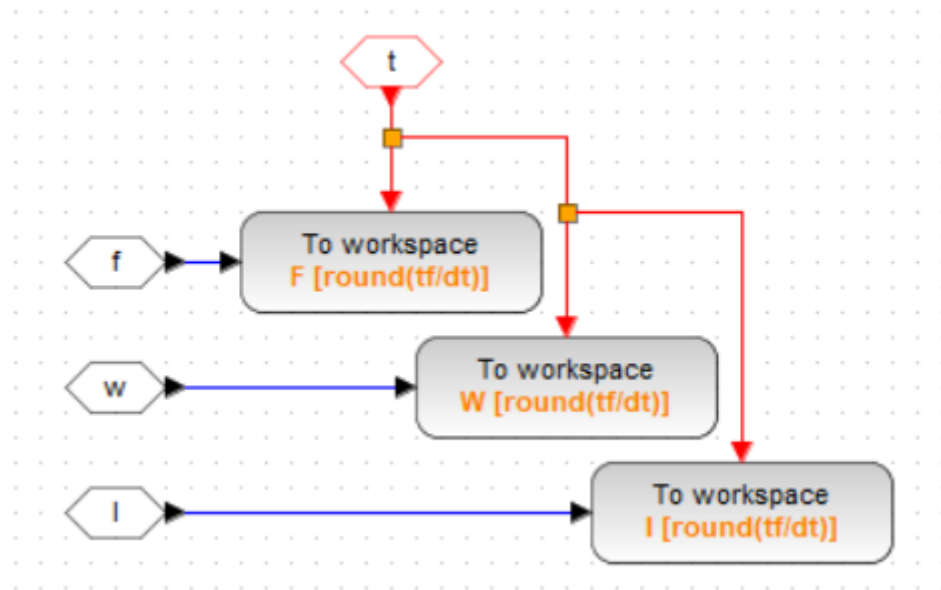


Рисунок 4.6 – Блоки To workspace для збереження результатів моделювання

Використання функції $\text{round}(x/dt)$ в усіх блоках збереження забезпечує синхронізацію записаних даних з кроком інтегрування моделі та попереджає накопичення похибок округлення при тривалому моделюванні. Червоні з'єднувальні лінії на схемі вказують на синхронний характер збереження всіх параметрів, що критично важливо для подальшого аналізу взаємозв'язків між електричними та механічними процесами.

Збереження даних у робочу область Scilab створює широкі можливості для подальшої обробки результатів за допомогою вбудованих функцій математичного аналізу. Це включає обчислення інтегральних показників якості (перерегулювання, час перехідного процесу, коливальність), спектральний аналіз сигналів, побудову фазових портретів та інші види аналізу, необхідні для оптимізації параметрів системи управління.

Особливу цінність збережені дані мають для верифікації моделі шляхом порівняння з експериментальними результатами, отриманими на реальних стендах або промислових установках. Можливість експорту даних у різні формати дозволяє

використовувати їх в інших програмних пакетах для розширеного аналізу або підготовки звітної документації.

Для електроприводів систем СУЗ збережені часові залежності дозволяють проводити аналіз відповідності динамічних характеристик нормативним вимогам, зокрема перевіряти дотримання максимально допустимого часу спрацювання аварійного захисту реактора та точність позиціонування управляючих стержнів у стаціонарних режимах роботи.

4.2.9 Налаштування параметрів та верифікація

Після побудови схеми було проведено детальне налаштування всіх коефіцієнтів відповідно до параметрів реального двигуна для систем СУЗ (рис. 4.7). Блок $1/L_e$ налаштовано як зворотна індуктивність (типово 100 c^{-1}), блок R_e/L_e як відношення опору до індуктивності (близько 1000 c^{-1}), коефіцієнт B_e/L_e як нормований коефіцієнт зв'язку (порядку 10), а блок $1/J$ як зворотний момент інерції ($50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$). Особливу увагу приділено перевірці розмірності всіх сигналів, тестуванню стійкості при різних параметрах навантаження, порівнянню з аналітичними розв'язками для простих випадків та налаштуванню кроку інтегрування для забезпечення необхідної точності моделювання.

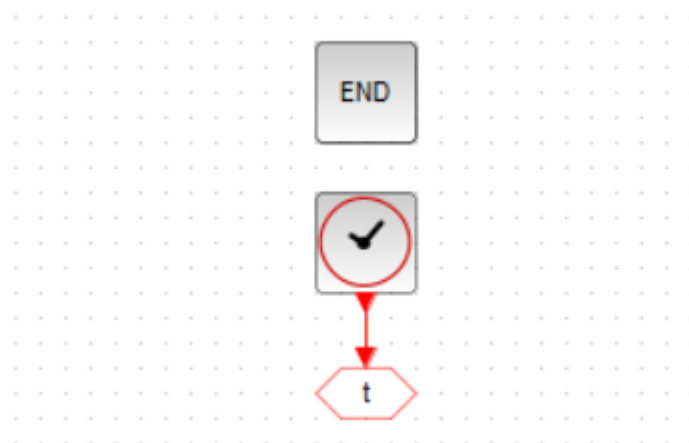


Рисунок 4.7 – Службові блоки синхронізації та завершення моделювання

Така комплексна архітектура моделі забезпечує високу точність відтворення електромеханічних процесів у двигуні постійного струму та повністю адаптована

для моделювання електроприводів систем управління та захисту реакторів атомних електростанцій.

4.3 Релізація математичної моделі

Використовуючи отримані в попередніх пунктах математичні співвідношення та систему диференціальних рівнянь, що описують електромеханічні процеси в електроприводі постійного струму, було створено комп'ютерну модель у середовищі Scilab/Xcos (рис. 4.8).

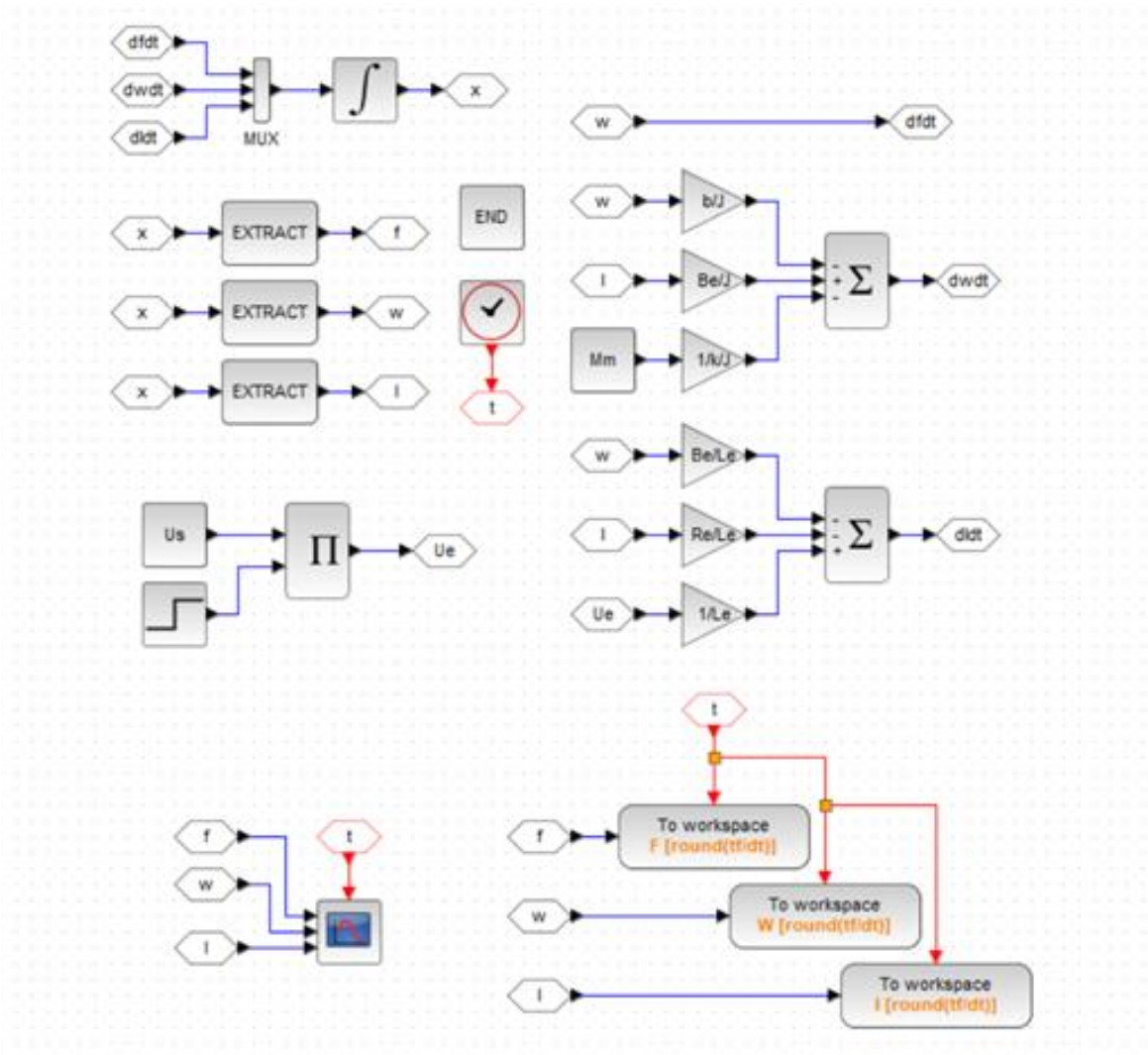


Рисунок 4.8 – Комп'ютерну модель у середовищі Scilab/Xcos

Ця модель відтворює роботу електродвигуна постійного струму від моменту його запуску до усталеного режиму роботи.

Процес моделювання дозволив отримати комплексну картину поведінки електроприводу при запуску. Загальні результати моделювання представлені у вигляді трьох синхронізованих графіків, які показують динаміку основних параметрів системи протягом 20 секунд роботи.

4.3.1 Пояснення роботи математичної схеми електропривода

Як працює схема:

- блоки суматорів розраховують похідні струму та швидкості;
- інтегратор ІІ перетворює ці похідні в реальні значення струму, швидкості та положення;
- зворотні зв'язки через блоки EXTRACT забезпечують взаємодію між електричною та механічною частинами;
- блоки To workspace зберігають результати для побудови графіків.

По суті, модель показує, як електродвигун "розганяється" і виходить на робочий режим (рис. 4.9).

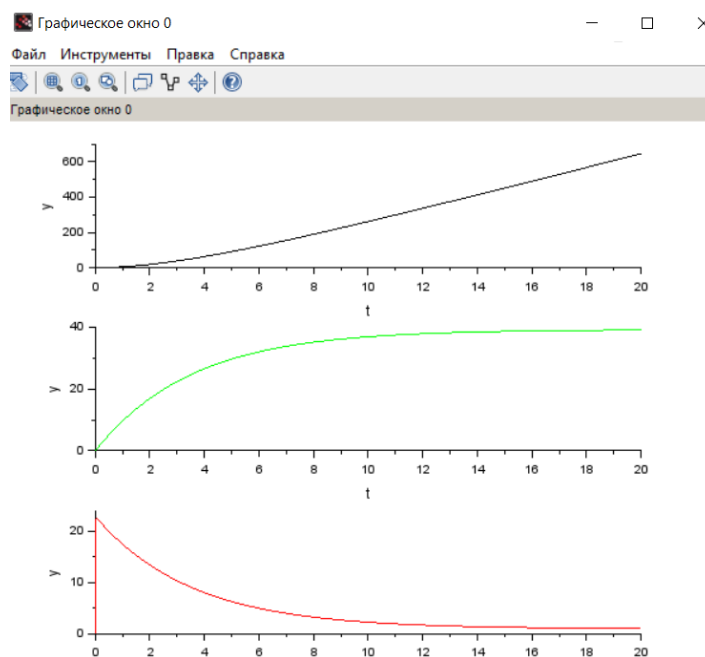


Рисунок 4.9 – Режим роботи математичної моделі

Верхній графік відображає кутове переміщення ротора $\phi(t)$, який демонструє безперервне зростання від нуля до максимального значення близько 600 радіанів. Середній графік показує кутову швидкість $\omega(t)$, яка плавно наростає від нуля до усталеного значення приблизно 37 рад/с за характерною експоненційною кривою. Нижній графік представляє струм якоря $I(t)$, який на початку досягає максимального пускового значення близько 23 А, а потім експоненційно спадає до усталеного рівня 1 А.

4.3.2 Програмування графічного інтерфейсу результатів дослідження

Для більш детальної демонстрації дослідження, напишемо код в симуляції з графіків:

```
clear; clc;
exec('FormatCharts.sce',-1);
loadXcosLibs(); loadScicos(); importXcosDiagram("model1.zcos")
function res=simulation(Us)
    typeof(scs_m);
    scs_m.props.context;
    Context.Us=Us;
    scicos_simulate(scs_m,Context);
    res=[F,W,I]
endfunction
titlex="$t,\mathrm{s}$";
Us=5; res=simulation(Us); f=res(1); w=res(2); I=res(3);
LEGEND=["$U_s="+string(Us)+"\ \mathrm{V}$"];
show_window(1); plot(f.time,f.values,"k:","linewidth",2);
show_window(2); plot(w.time,w.values,"k:","linewidth",2);
show_window(3); plot(I.time,I.values,"k:","linewidth",2);
Us=10; res=simulation(Us); f=res(1); w=res(2); I=res(3);
LEGEND=[LEGEND,"$U_s="+string(Us)+"\ \mathrm{V}$"];
```

```

scf(1); plot(f.time,f.values,"k--","linewidth",2);
scf(2); plot(w.time,w.values,"k--","linewidth",2);
scf(3); plot(I.time,I.values,"k--","linewidth",2);

Us=15; res=simulation(Us); f=res(1); w=res(2); I=res(3);
LEGEND=[LEGEND,"$U_s="+string(Us)+" \mathrm{V}$"];
scf(1); plot(f.time,f.values,"k-","linewidth",2);
title="$\varphi(t)$"; FormatCharts(titlex,titley,"",LEGEND,2);
xsave("modell_r1.scg");
scf(2); plot(w.time,w.values,"k-","linewidth",2);
title="$\omega(t),\mathrm{s}^{-1}$";
FormatCharts(titlex,titley,"",LEGEND,4);
xsave("modell_r2.scg");
scf(3); plot(I.time,I.values,"k-","linewidth",2);
title="$I(t),\mathrm{A}$"; FormatCharts(titlex,titley,"",LEGEND,1);
xsave("modell_r3.scg");

```

Перші три рядки коду виконують підготовку робочого середовища для моделювання. Команда `clear` очищує всі змінні з робочої області Scilab, забезпечуючи "чистий" старт без впливу попередніх обчислень. Команда `clc` очищає командне вікно від попередніх повідомлень та результатів. Функція `exec('FormatCharts.sce', -1)` завантажує зовнішній файл з функціями форматування графіків, де параметр `-1` означає виконання файлу без виведення проміжних повідомлень.

Команди `loadXcosLibs()` та `loadScicos()` завантажують необхідні бібліотеки для роботи з графічним середовищем моделювання Xcos. Функція `importXcosDiagram("modell.xcos")` імпортує створену раніше блочну схему моделі електродвигуна з файлу `modell.xcos` у робочу область програми.

Функція моделювання `simulation` Центральною частиною програми є функція `simulation(Us)`, яка приймає як параметр значення напруги живлення `Us` та виконує

процес моделювання з цим параметром. Рядок `typeof(scs_m)` перевіряє тип завантаженої моделі для забезпечення коректності подальших операцій. Команда `scs_m.props.context` звертається до контексту моделі, де зберігаються змінні параметри.

Критично важливим є рядок `Context. Us=Us`, який встановлює значення напруги живлення в контексті моделі. Це дозволяє передавати різні значення напруги до блочної схеми без необхідності її модифікації. Функція `scicos_simulate(scs_m,Context)` запускає процес чисельного моделювання з встановленими параметрами. Результат виконання функції `res=[F,W,I]` повертає масив з трьома компонентами - частотою F , кутовою швидкістю W та струмом I .

Налаштування параметрів графіків. Рядки 13-14 встановлюють загальні параметри для відображення результатів. Змінна `titlex="t,mathrmst,\mathrm{s}t,mathrms"` визначає підпис осі часу з використанням LaTeX-синтаксису для професійного оформлення математичних символів.

Моделювання при напрузі 5 В Блок рядків 15-19 виконує моделювання для напруги живлення 5 В. Команда `Us=5` встановлює значення напруги, `res=simulation(Us)` викликає функцію моделювання з цим параметром. Результати розподіляються по окремих змінних `f=res(1)`, `w=res(2)`, `I=res(3)` для зручності подальшої роботи.

Рядок `LEGEND=["Us="+string(Us)+"mathrmVU_s="+string(Us)+"\\mathrm{V} Us="+string(Us)+"mathrmV"]` створює текст легенди графіка з автоматичною підстановкою значення напруги. Команда `show_window(1)` відкриває нове графічне вікно з номером 1, а `plot(f.time,f.values,"k:", "linewidth",2)` будує графік частоти з пунктирною чорною лінією товщиною 2 пікселі.

Моделювання при напрузі 10 В Аналогічна структура використовується для моделювання при напрузі 10 В у рядках 21-25. Відмінністю є використання команд `scf(1)`, `scf(2)`, `scf(3)` для активації відповідних графічних вікон та побудови графіків частоти, кутової швидкості та струму. Параметр "k--" у функції `plot` означає пунктирну чорну лінію, що дозволяє візуально розрізнити криві для різних напруг на одному графіку.

Моделювання при напрузі 15 В. Завершальний блок рядків 27-37 виконує моделювання для максимальної напруги 15 В. Особливістю цього блоку є додавання функцій FormatCharts для форматування графіків після побудови всіх кривих. Команди `titley="varphi(t)\varphi(t) varphi(t)",`
`titley="omega(t),\mathrm{s}^{-1}\omega(t),\mathrm{s}^{-1}"` `omega(t),\mathrm{s}^{-1}",`
`titley="I(t),\mathrm{A}I(t),\mathrm{A}"` встановлюють підписи осей ординат для графіків кутового переміщення, кутової швидкості та струму відповідно.

Функції `xsave("modell_r1.scg"),` `xsave("modell_r2.scg"),`
`xsave("modell_r3.scg")` зберігають побудовані графіки у файли формату .scg для подальшого використання та включення до звітної документації. Такий підхід забезпечує можливість відтворення результатів та їх подальшого аналізу без повторного запуску моделювання.

4.3.3 Результати комп'ютерного моделювання

Процес моделювання дозволив отримати комплексну картину поведінки електроприводу при запуску. Загальні результати моделювання представлені у вигляді трьох синхронізованих графіків, які показують динаміку основних параметрів системи протягом 20 секунд роботи. Верхній графік відображає кутове переміщення ротора $\varphi(t)$, який демонструє безперервне зростання від нуля до максимального значення близько 600 радіанів. Середній графік показує кутову швидкість $\omega(t)$, яка плавно наростає від нуля до усталеного значення приблизно 37 рад/с за характерною експоненційною кривою. Нижній графік представляє струм якоря $I(t)$, який на початку досягає максимального пускового значення близько 23 А, а потім експоненційно спадає до усталеного рівня 1 А.

4.3.3.1 Аналіз впливу напруги живлення на кутове переміщення

Дослідження впливу різних рівнів напруги живлення на кутове переміщення $\varphi(t)$ (рис. 4.10) показало пропорційну залежність між напругою та швидкістю накопичення кутового переміщення. При напрузі живлення 5 В за 20 секунд роботи

кутове переміщення досягає приблизно 650 радіанів, при 10 В – близько 1300 радіанів, а при 15 В – понад 1950 радіанів.

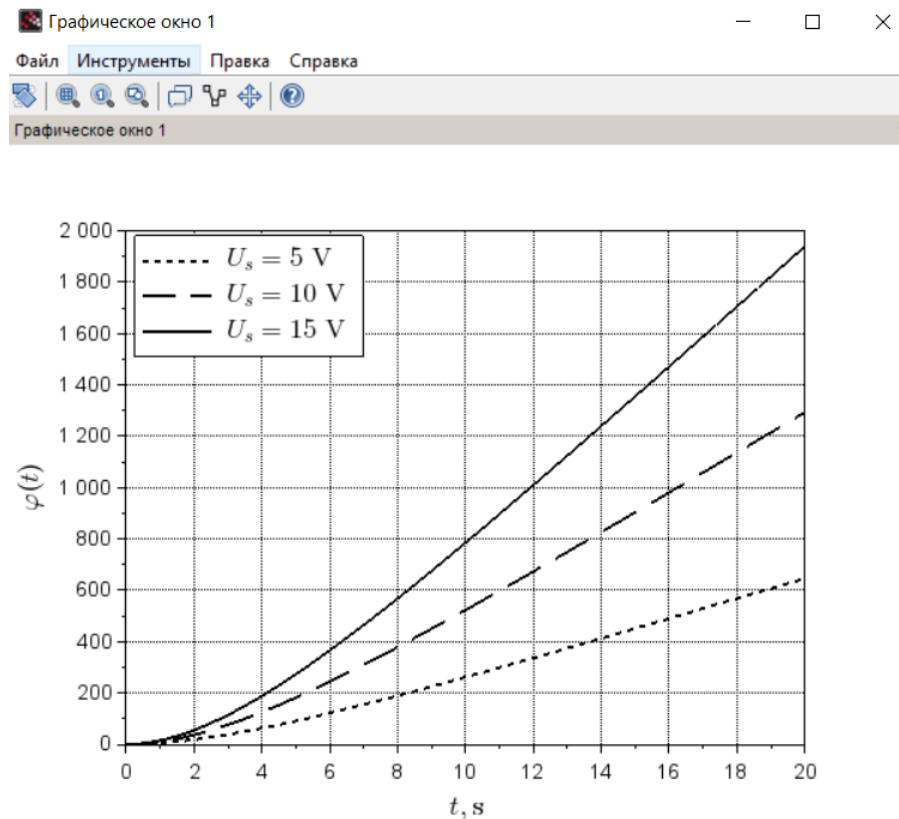


Рисунок 4.10 – Дослідження впливу різних рівнів напруги живлення на кутове переміщення

Всі криві мають схожий експоненційний характер, але відрізняються швидкістю наростання, що підтверджує лінійну залежність усталеної швидкості від прикладеної напруги.

4.3.3.2 Характеристики кутової швидкості при різних напругах

Графіки кутової швидкості $\omega(t)$ (рис. 4.11) демонструють класичні перехідні характеристики першого порядку без перерегулювання та коливань. При напрузі 5 В усталене значення кутової швидкості становить близько 38 рад/с, при 10 В – приблизно 77 рад/с, при 15 В – понад 115 рад/с.

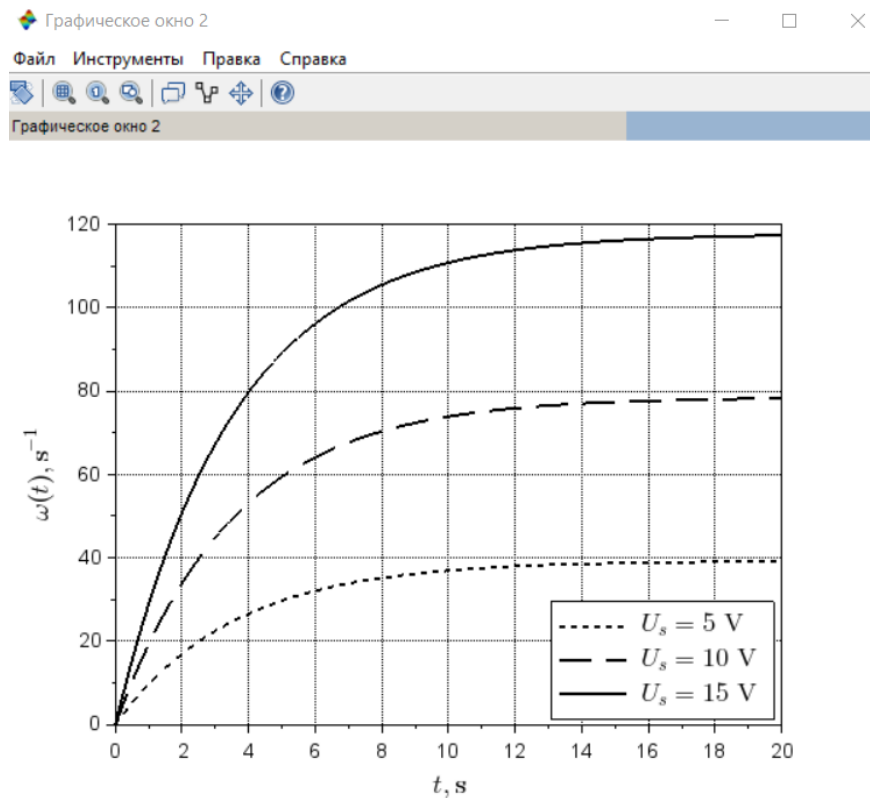


Рисунок 4.11 – Графіки кутової швидкості

Час досягнення 95 % від усталеного значення складає приблизно від 8 секунд до 10 секунд для всіх рівнів напруги, що свідчить про постійність часових характеристик системи незалежно від амплітуди вхідного сигналу.

4.3.3.3 Динаміка струму якоря

Аналіз струмових характеристик $I(t)$ (рис. 4.12) показує типову поведінку пускового процесу електродвигуна постійного струму. При напрузі живлення 5 В максимальний пусковий струм досягає близько 68 А, що відповідає відношенню напруги до активного опору обмотки. Експоненційний спад струму відбувається протягом перших від 8 секунд до 10 секунд, після чого струм стабілізується на рівні від 3 А до 4 А.

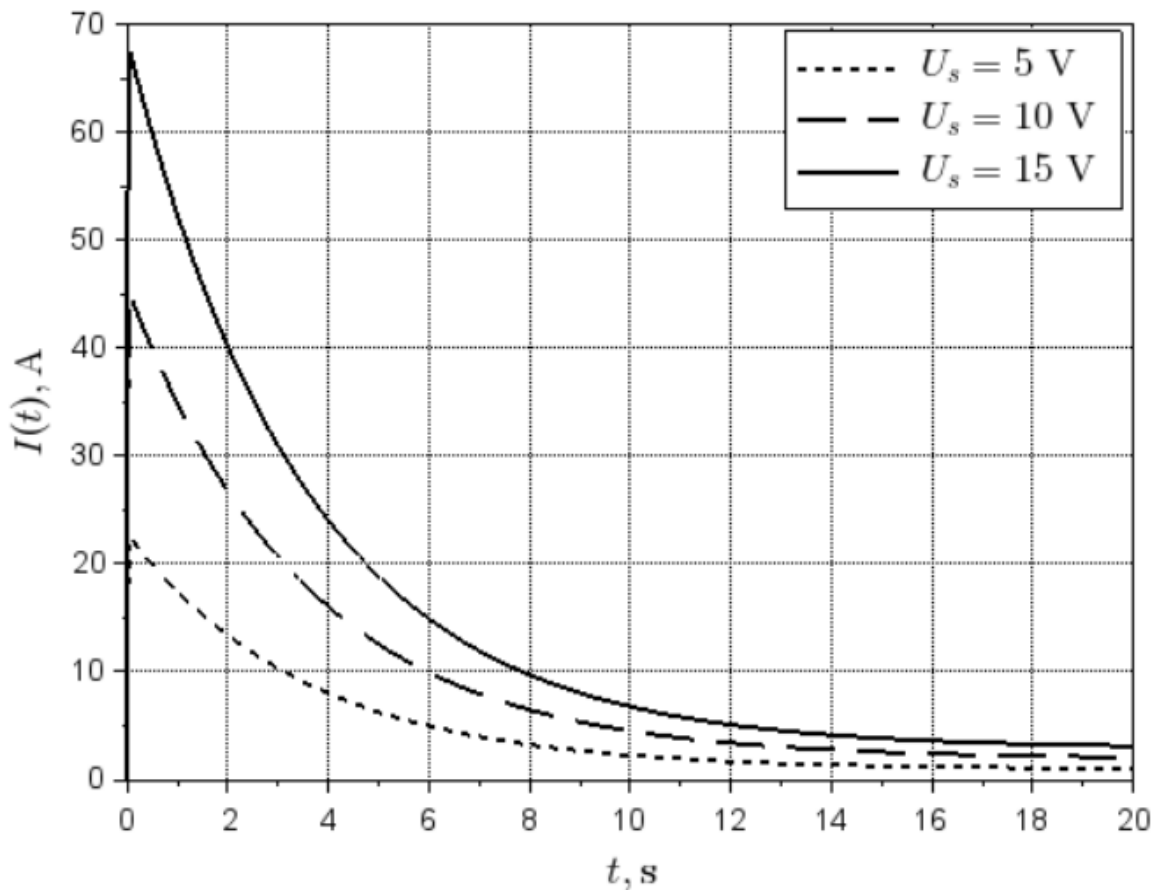


Рисунок 4.12 – Аналіз струмових характеристик

Така динаміка обумовлена зростанням протиЕРС по мірі розгону двигуна, що зменшує ефективну напругу на обмотці якоря та, відповідно, струм через неї.

4.4 Удосконалення математичної моделі електроприводу

На основі результатів, отриманих від базової моделі електроприводу постійного струму, було визначено можливості для подальшого удосконалення математичної моделі (рис. 4.13) з метою підвищення точності моделювання та розширення функціональних можливостей системи.

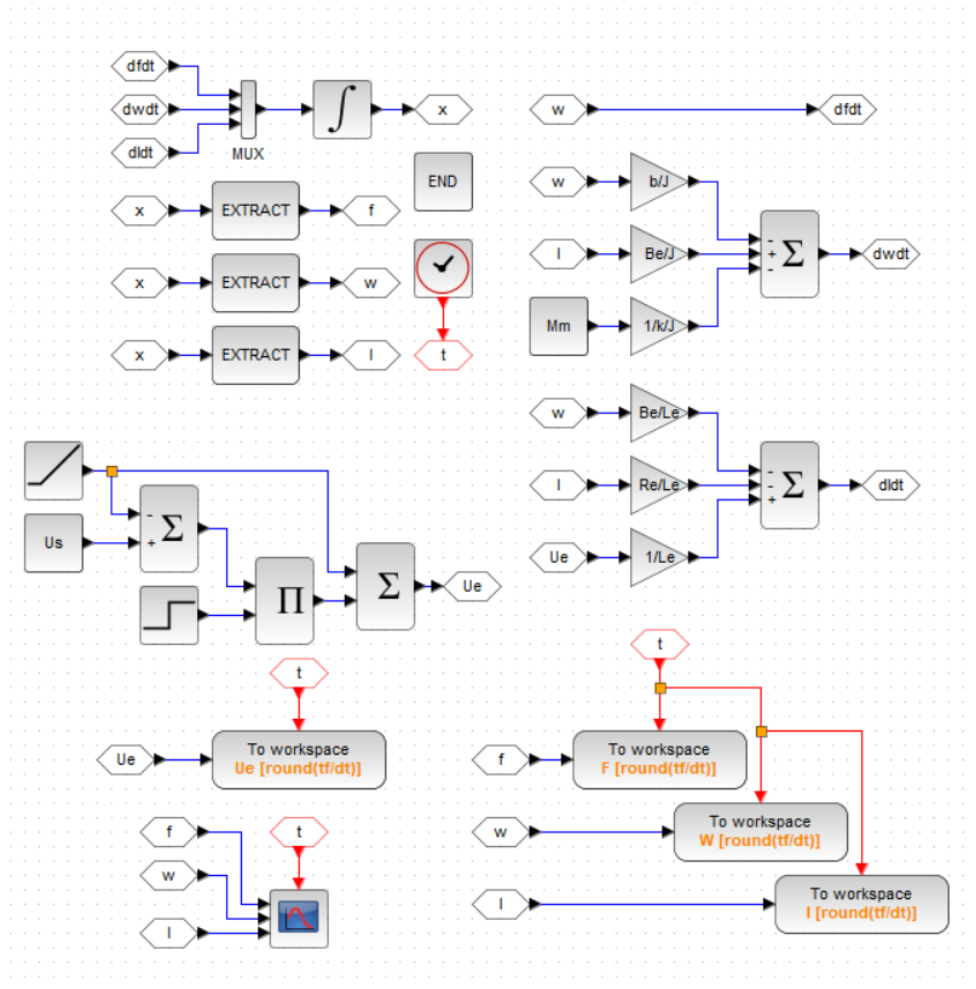


Рисунок 4.13 – Удосконалена математична модель

4.4.1 Структурні зміни у модифікованій моделі

У модифікованій моделі model2 було внесено ключові зміни в архітектуру системи інтегрування (рис. 4.14). Головною відмінністю є ускладнення структури інтегратора шляхом додавання суматора перед блоком інтегрування П. Цей суматор дозволяє комбінувати основний векторний сигнал від блоку MUX з додатковими корекційними сигналами.

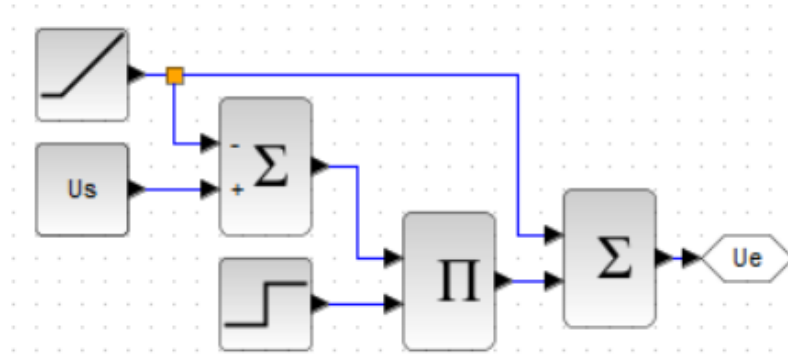


Рисунок 4.14 – Структура інтегратора удосконаленої математичної моделі

Після інтегратора додано ще один суматор, який забезпечує можливість введення додаткових впливів на вихідний сигнал системи. Така структура створює більш гнучку архітектуру для реалізації складних алгоритмів управління та компенсації збурень.

Важливою зміною є модифікація системи збереження результатів (рис. 4.15). Замість збереження струму якоря у модифікованій версії додано збереження напруги U_e , що дозволяє проводити більш детальний аналіз енергетичних процесів та ефективності системи управління.

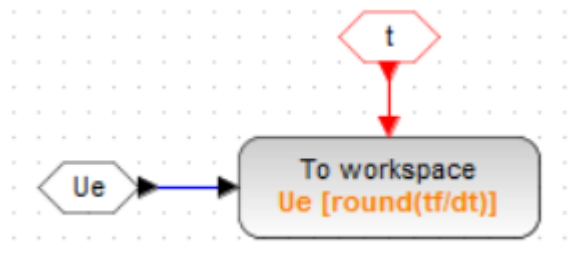


Рисунок 4.15 – Модифікація системи збереження результатів

4.4.2 Програмна реалізація виведення результатів модифікованої моделі

Для реалізації удосконаленої математичної моделі було створено модифікований скрипт `model2.sci`, який включає розширені можливості параметризації та аналізу результатів. Основною відмінністю від базової версії є введення додаткового параметра постійної часу τ та розширення функціональності збереження результатів.

```

clear; clc;
exec('FormatCharts.sce',-1);
loadXcosLibs(); loadScicos(); importXcosDiagram("model2.zcos");

function res=simulation(tau)
    typeof(scs_m);
    scs_m.props.context;
    Context.Us=15; Context.tau=tau;
    scicos_simulate(scs_m,Context);
    res=[F,W,I,Ue]
endfunction

titlex="$t, \mathrm{s}$";
titlec="$U_s=15 \ \mathrm{v}$";

tau=0.001; res=simulation(tau); f=res(1); w=res(2); I=res(3); Ue=res(4);
LEGEND=["$\tau="+string(tau)+" \ \mathrm{s}$"];
show_window(1); plot(f.time,f.values,"k:","linewidth",2);
show_window(2); plot(w.time,w.values,"k:","linewidth",2);
show_window(3); plot(I.time,I.values,"k:","linewidth",2);
show_window(4); plot(Ue.time,Ue.values,"k:","linewidth",2);

tau=7.5; res=simulation(tau); f=res(1); w=res(2); I=res(3); Ue=res(4);
LEGEND=[LEGEND,"$\tau="+string(tau)+" \ \mathrm{s}$"];
scf(1); plot(f.time,f.values,"k--","linewidth",2);
scf(2); plot(w.time,w.values,"k--","linewidth",2);
scf(3); plot(I.time,I.values,"k--","linewidth",2);
scf(4); plot(Ue.time,Ue.values,"k--","linewidth",2);

tau=15; res=simulation(tau); f=res(1); w=res(2); I=res(3); Ue=res(4);

```

```

LEGEND=[LEGEND,"$\tau="+string(tau)+"\ \mathrm{s}$"];
scf(1); plot(f.time,f.values,"k-","linewidth",2);
title="$\varphi(t)$"; FormatCharts(titlex,titley,"",LEGEND,2);
xsave("model2_r1.scg");
scf(2); plot(w.time,w.values,"k-","linewidth",2);
title="$\omega(t),\mathrm{s}^{-1}$";
FormatCharts(titlex,titley,titlec,LEGEND,4);
xsave("model2_r2.scg");
scf(3); plot(I.time,I.values,"k-","linewidth",2);
title="$I(t),\mathrm{A}$"; FormatCharts(titlex,titley,titlec,LEGEND,1);
xsave("model2_r3.scg");
scf(4); plot(Ue.time,Ue.values,"k-","linewidth",2);
title="$U_e(t),\mathrm{V}$"; FormatCharts(titlex,titley,titlec,LEGEND,4);
xsave("model2_r4.scg");

```

У модифікованій версії функція `simulation` отримала додатковий параметр `tau`, що дозволяє досліджувати вплив постійної часу на динамічні характеристики системи. Функція `simulation(tau)` встановлює як напругу живлення, так і постійну часу через команди `Context.Us=Us` та `Context.tau=tau`. Це забезпечує можливість варіювання часових характеристик системи без зміни структури блочної схеми.

Результат виконання функції розширено до чотирьох компонентів `res=[F,W,I,Ue]`, де додано напругу `Ue` для аналізу енергетичних характеристик системи. Така модифікація дозволяє проводити більш детальний аналіз ефективності електромеханічного перетворення енергії.

Ключовою особливістю модифікованого коду є моделювання при двох різних значеннях постійної часу `tau=0,001` с та `tau=15` с. Мале значення постійної часу відповідає системі з високою швидкістю, тоді як велике значення характеризує інерційну систему з повільними перехідними процесами.

Для кожного значення постійної часу виконується повний цикл моделювання з побудовою чотирьох графіків частоти, кутової швидкості, струму та напруги.

Команда `show_window` (4) відкриває додаткове графічне вікно для відображення напругових характеристик, що розширює можливості аналізу результатів.

Модифікований код включає побудову графіків напруги U_e з використанням команди `plot(Ue.time,Ue.values,"k--","linewidth",2)`, що дозволяє аналізувати енергетичні процеси в системі управління. Графіки напруги будуються з пунктирною лінією для візуального розрізнення від інших характеристик.

Система збереження результатів розширена до чотирьох файлів на кожен варіант моделювання, включаючи файли для напругових характеристик. Це забезпечує повну документацію всіх досліджених параметрів та можливість подальшого аналізу енергетичної ефективності системи.

4.4.3 Результати удосконаленої моделі

Моделювання удосконаленої системи було проведено для двох кардинально різних значень постійної часу $\tau = 0,001$ с та $\tau = 7,5$ с при напрузі живлення 15 В. Такий підхід дозволив дослідити вплив інерційності системи на динамічні характеристики електроприводу та визначити оптимальні параметри для різних режимів роботи.

4.4.3.1 Аналіз кутового переміщення при різних постійних часу

Графік кутового переміщення $\varphi(t)$ (рис. 4.16) демонструє кардинальні відмінності у поведінці системи залежно від значення постійної часу. При малій постійній часу $\tau = 0,001$ с спостерігається швидкий наріст кутового переміщення, яке досягає понад 1400 радіанів за 20 секунд моделювання. Крива має характерну лінійну ділянку після короткого перехідного процесу, що свідчить про швидке досягнення усталеної швидкості.

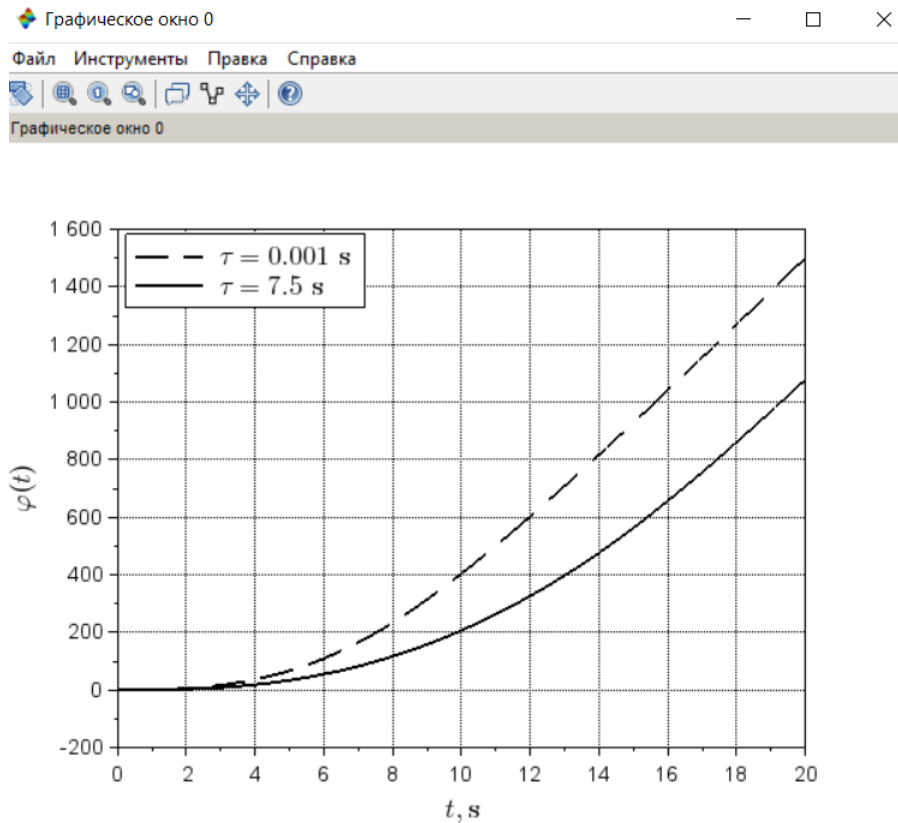


Рисунок 4.16 – Графік кутового переміщення

При великій постійній часу $\tau = 7,5 \text{ s}$ кутове переміщення наростає значно повільніше, досягаючи приблизно 1100 радіанів за той самий період. Характерною особливістю є плавна експоненційна форма кривої без різких переходів, що вказує на більш інерційний характер системи.

4.4.3.2 Динаміка кутової швидкості

Порівняння кутових швидкостей $\omega(t)$ (рис. 4.17) показує найбільш виражені відмінності між системами з різними постійними часу. При $\tau = 0,001 \text{ s}$ кутова швидкість швидко досягає максимального значення близько 115 рад/с протягом перших від 2 секунд до 3 секунд, після чого залишається практично постійною. Така поведінка характерна для систем з мінімальною інерційністю.

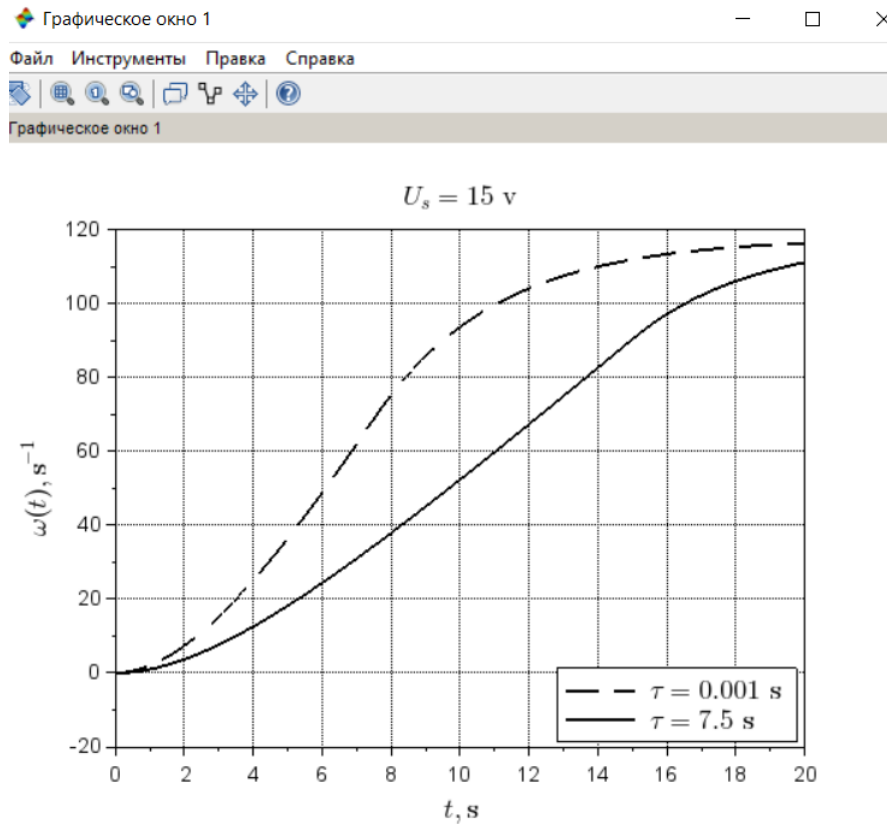


Рисунок 4.17 – Порівняння кутових швидкостей

Система з $\tau = 7,5 \text{ с}$ демонструє класичну експоненційну характеристику з плавним наростанням швидкості до того самого усталеного значення 115 рад/с, але за значно більший час. Перехідний процес триває близько від 15 секунд до 20 секунд, що типово для високоінерційних систем.

4.4.3.3 Особливості струмових характеристик

Аналіз струму $I(t)$ виявляє цікаву особливість модифікованої системи (рис. 4.18). При малій постійній часу $\tau = 0,001 \text{ с}$ струм має складний характер з максимумом близько 30 А на 8-й секунді, після чого поступово спадає до усталеного значення 4 А. Така поведінка може бути пов'язана з перехідними процесами в модифікованій структурі інтегратора.

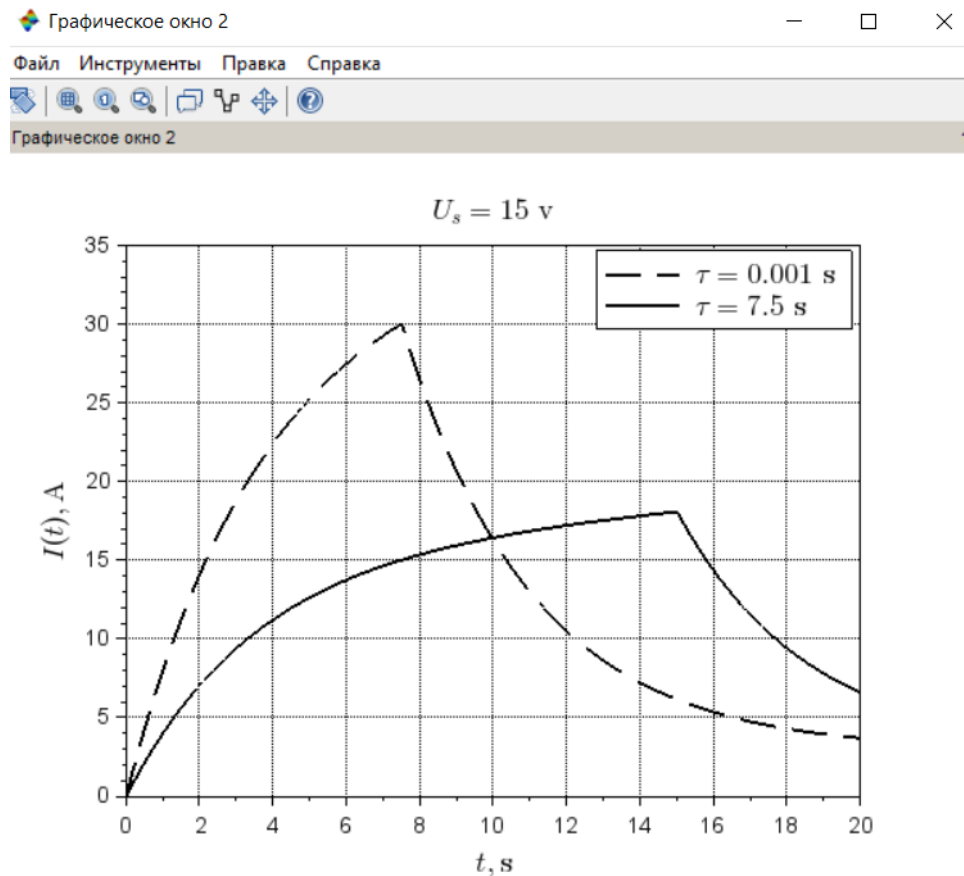


Рисунок 4.18 – Аналіз струму

При великій постійній часу $\tau = 7,5 \text{ с}$ струм демонструє більш передбачувану поведінку з плавним наростанням до максимуму близько 18 А протягом перших 8 секунд, після чого плавно спадає до усталеного рівня. Відсутність різких стрибків струму є перевагою для електрообладнання.

4.4.3.4 Характеристики напруги системи

Введення контролю напруги $U_e(t)$ (рис. 4.19) дозволило отримати нову інформацію про енергетичні процеси в модифікованій системі. При $\tau = 0,001 \text{ с}$ напруга швидко наростає до усталеного значення 15 В протягом перших 8 секунд, демонструючи високу швидкодію системи управління.

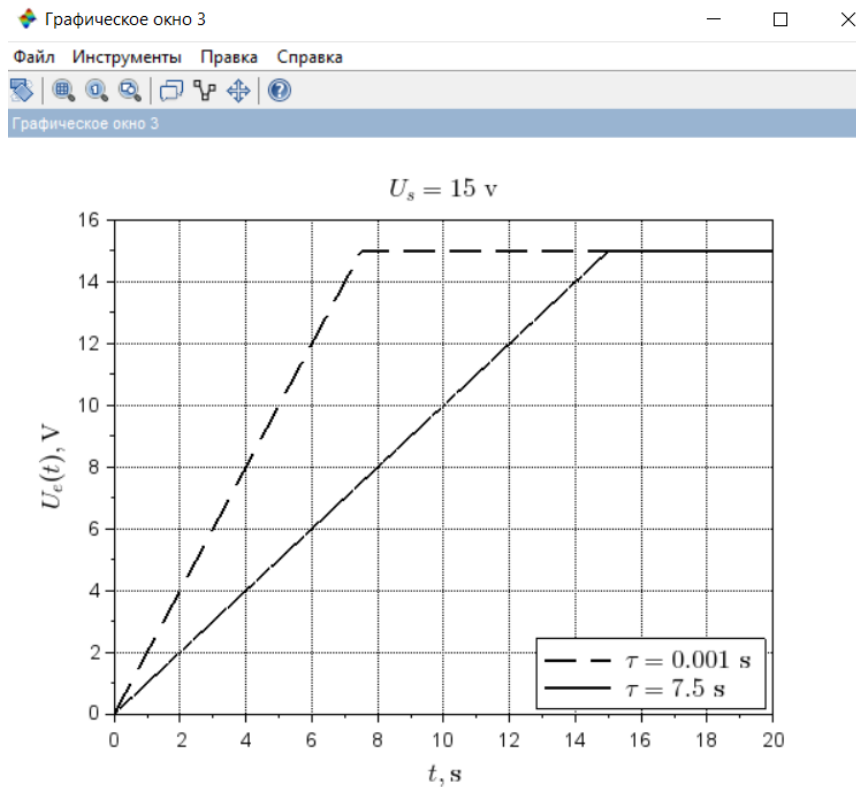


Рисунок 4.19 – Введення контролю напруги

При $\tau = 7,5$ с напруга наростає значно повільніше, досягаючи усталеного значення лише до 15-ї секунди моделювання. Плавний характер зміни напруги свідчить про стабільність роботи системи та відсутність небажаних перехідних процесів.

4.5 Охорона праці

Охорона праці є критично важливим елементом забезпечення безпеки персоналу на атомній електростанції (АЕС), що працює з високорадіоактивними матеріалами та складним енергетичним обладнанням. У контексті експлуатації ядерного реактора особливу увагу слід приділити виявленню потенційних загроз, розробці запобіжних заходів та створенню умов, що мінімізують ризики променевого ураження, теплових опіків, електричного струму та механічних травм.

Під час роботи з реакторними установками персонал може зазнавати дії іонізуючого випромінювання, теплового навантаження, підвищеного тиску, а

також ризику вибухів через порушення герметичності системи охолодження чи аварійні ситуації з паливними елементами. До основних небезпек також належать ураження струмом при роботі з електрообладнанням високої напруги, отруєння парами борної кислоти, перегрів електроніки тощо.

Для забезпечення належних умов праці критично важливо організувати ефективну вентиляцію зон із потенційним накопиченням радіоактивних газів (наприклад, тритію чи криптону). Об'єм повітря, необхідний для видалення забруднень, розраховується за формулою:

$$L = n \cdot V, \quad (4.13)$$

де L – об'єм повітря, що подається, м³/год;

n – рекомендована кратність повітрообміну;

V – об'єм приміщення, м³.

Припустимо, що об'єм реакторного відсіку становить $V = 300$ м³, а рекомендована кратність повітрообміну для зони контролю – $n = 10$ разів на годину. Тоді об'єм повітря, що подається, дорівнює:

$$L = 10 \cdot 300 = 3000 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.14)$$

Крім вентиляції, надзвичайно важливим є питання освітленості приміщень, зокрема операторських та контрольно-диспетчерських пунктів, де виконуються високоточні операції. Розрахунок кількості світильників здійснюється на основі формули:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K}{F}, \quad (4.15)$$

де E – рекомендована освітленість, лк,

S – площа робочої зони, м²;

K – коефіцієнт запасу;

F – світловий потік одного світильника, лм.

Припустимо, що площа зони становить 25 м^2 , рекомендована освітленість – 500 лк , коефіцієнт запасу – $1,5$, а потік світильника – 3000 лм . Тоді кількість світильників:

$$N = \frac{500 \cdot 25 \cdot 1,5}{3000} = 6,25. \quad (4.16)$$

Отже, для забезпечення достатньої освітленості операторської зони необхідно встановити не менше 7 світильників.

Комплексна реалізація заходів з охорони праці в умовах АЕС – ключова умова зниження ймовірності виникнення аварій, травмування персоналу та радіаційних інцидентів. Дотримання норм безпеки, використання засобів індивідуального захисту, постійний моніторинг параметрів навколишнього середовища, вентиляція та освітлення підтверджують необхідність створення комфортного та безпечного робочого простору для забезпечення безперервної, безпечної та продуктивної експлуатації ядерної установки.

4.6 Дослідження основних законів управління в системах з двигуном постійного струму

Законом управління називається функціональна залежність вихідного сигналу пристрою керування від вхідної величини, що визначає динаміку впливу на об'єкт керування без урахування внутрішніх запізнь елементів цього пристрою. У типовій системі автоматичного керування, що містить двигун постійного струму, структура замкненого кола включає в себе негативний зворотний зв'язок, як представлено на рисунку 4.20.

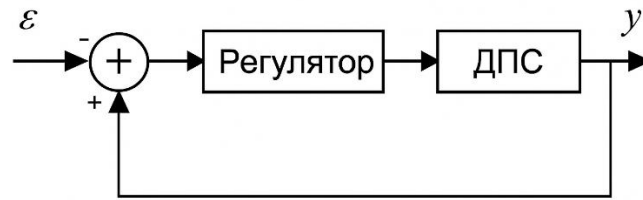


Рисунок 4.20 – Типова схема системи автоматичного керування

Згідно з теорією автоматичного керування, для опису пристроїв управління використовуються передавальні функції, які залежно від характеру впливу поділяються на пропорційні, інтегральні, пропорційно-інтегральні та пропорційно-інтегрально-диференціальні. У загальному випадку ці функції мають вигляд:

$$W_{P(s)} = k, \quad (4.17)$$

$$W_{I(s)} = \frac{k_i}{s}, \quad (4.18)$$

$$W_{PI(s)} = k_p + \frac{k_i}{s}, \quad (4.19)$$

$$W_{PID(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s, \quad (4.20)$$

де k, k_p, k_i, k_d – сталі коефіцієнти, що визначають пропорційну, інтегральну та диференціальну складові відповідно. Пропорційний регулятор дозволяє формувати сигнал, що прямо пропорційний величині похибки. Введення інтегрального компонента підвищує точність, зменшуючи сталу похибку, однак при цьому може знижувати швидкодію. Поєднання цих властивостей у ПІ-регуляторі забезпечує як статичну точність, так і адекватну динамічну поведінку системи.

Передавальна функція об'єкта керування у вигляді двигуна постійного струму описується як система першого або другого порядку. Для початкового аналізу використовується спрощена модель виду:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (4.21)$$

де K – коефіцієнт підсилення;
 T – електромеханічна постійна часу.

Однак для більш точного моделювання необхідно враховувати окремо електричну та механічну інерційність, що приводить до використання моделі другого порядку:

$$W(s) = K_m \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (4.22)$$

де ω_n – власна частота системи;
 ξ – коефіцієнт затухання;
 K_m – коефіцієнт підсилення приводу.

Для систем управління положенням використовується також модель подвоєного інтегратора:

$$W(s) = \frac{1}{ms^2}, \quad (4.23)$$

де m – маса рухомої частини.

При типових значеннях KV у межах від 2000 об/В до 3000 об/В, електрична постійна часу дорівнює 0,01 с, механічна – 0,05 с, маса ротора – 0,9 кг. У таких умовах передавальна функція системи другого порядку набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{2,5}{(0,05s + 1)(0,01s + 1)}. \quad (4.24)$$

Це дозволяє використовувати її у подальшому аналізі стійкості замкненої системи керування.

Характеристичне рівняння такої системи з РІ-регулятором має вигляд:

$$(0,05s + 1)(0,01s + 1)s + 2,5(k_p s + k_i) = 0. \quad (4.25)$$

Розв'язання цього рівняння залежить від конкретного вибору коефіцієнтів регулятора. Для перевірки стійкості застосовується критерій Гурвіца та критерій Найквіста.

При параметрах $m = 1$ кг, $KV = 2500$ об/В, $T = 0,02$ с передавальна функція:

$$W(s) = \frac{2.5}{0,02s + 1}. \quad (4.26)$$

утворює систему зі стійкими полюсами при $s = -50$, що підтверджує динамічну стабільність. Таким чином, математичне моделювання підтверджує доцільність використання РІ-регулятора у системах з двигунами постійного струму.

ВИСНОВКИ

У рамках кваліфікаційної роботи бакалавра було виконано дослідження процесів математичного та комп'ютерного моделювання електроприводів систем автоматизації атомних електростанцій. Основна увага зосереджена на моделюванні електромеханічних процесів у приводах з двигунами постійного струму з використанням сучасного підходу на основі лагранжевого формалізму та реалізації моделі в середовищі Scilab/Xcos.

У першому розділі роботи охарактеризовано роль атомної енергетики в сучасній енергосистемі, наведено статистику виробництва електроенергії АЕС, а також розглянуто їхнє місце у структурі енергопостачання України. Окрему увагу приділено динаміці споживання електроенергії та участі АЕС у забезпеченні базового навантаження.

Другий розділ присвячено системам керування на АЕС, зокрема їх ієрархічній структурі, функціонуванню підсистем та принципам побудови безпечних багаторівневих архітектур. Аналізовано сучасні підходи до автоматизованого контролю і регулювання критичних технологічних процесів.

У третьому розділі розглянуто особливості електроприводів систем автоматизації АЕС: наведено їхню класифікацію, принципи побудови схем керування та вимоги до надійності й радіаційної стійкості. Побудовано узагальнену математичну модель енергоспоживання електроприводів в умовах АЕС.

У четвертому розділі проведено теоретичне моделювання електромеханічної системи на основі рівнянь Лагранжа другого роду з урахуванням кінетичної, потенціальної енергії, дисипативних сил та узагальнених координат. Побудовано диференціальні рівняння, що описують поведінку системи при взаємодії її електричної та механічної частин.

У п'ятому розділі реалізовано математичну модель в середовищі Scilab/Xcos, що дозволило виконати візуальне і чисельне моделювання. Представлено блоки реалізації електричного та механічного контурів, структуру вектора стану, систему

керування та обчислення енергоспоживання. Проведено серію симуляцій, а також виконано верифікацію та вдосконалення моделі.

Унікальність виконаної роботи полягає в поєднанні лагранжевого підходу до побудови математичної моделі електропривода з її практичною реалізацією у середовищі Scilab/Xcos, що дозволяє інтегрувати електричні й механічні процеси в єдину симуляційну систему. Запропонована модель є універсальною з точки зору застосування до різних конфігурацій електроприводів, підтримує параметричну змінність і відображає динаміку енергоспоживання в режимі реального часу. На відміну від типових наближених схем, реалізована система дозволяє враховувати змінну інерцію, дисипативні втрати та вплив зворотного зв'язку без додаткових спрощень. Такий підхід забезпечує точне моделювання процесів, що особливо актуально для задач автоматизації в умовах підвищених вимог до надійності та безпеки, зокрема на об'єктах атомної енергетики.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В.Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.
4. Artem Shevchenko., A generalised mathematical model of electricity consumption for electric drives in smart cities applications/ Artem Shevchenko, Irina Kolupaieva, Yurii Romashov // Sustainable smart cities and communities: business and innovation solutions 2025: Proceedings of I st I International Conference, Kharkiv, April 21, 2025: Theses of Reports. – 2025. – pp. 62-64.
5. Харківський національний університет радіоелектроніки [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://nure.ua/department/kafedra-kompyuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>.
6. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://tapr.nure.ua>.
7. Kolupaieva, I., Nevliudov, I., Romashov, Y., Tiesheva, L., & Vértesy, L. (2024). Intelligent Automated Control in Accordance with Resource Efficiency Criteria toward

Circular Economy Transition. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1089 LNNS, pp. 133–141, https://doi.org/10.1007/978-3-031-67195-1_17.

8. Nevliudov, I., Omarov, M., Romashov, Y., Muradova, V., & Vzhesnievskiy, M. (2023). One approach to find optimal controls for discrete dynamic systems with numerical methods application. *Advanced Mathematical Models and Applications*, 8 (3), pp. 548–564.

9. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.

10. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.

11. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.

12. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors. In *2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (Vol. 1, pp. 247-251). IEEE.

13. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2024). Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. *International Journal of Crowd Science*, 8.

14. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., & Maksymova, S. (2024). Calculation of the Distance to Objects in Collaborative Robots Workspace Using Computer Vision. *Journal of universal science research*, 2(11), 240-255.

15. Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gurin, D., & Alkhalaileh, A. (2024). Data Fusion Research for Collaborative Robots-Manipulators within Industry 5.0. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 1(4), 125-137.

16. Yevsieiev, V., Alkhalaileh, A., Maksymova, S., & Gurin, D. (2024). Research of Existing Methods of Representing a Collaborative Robot-Manipulator Environment within the Framework of Cyber-Physical Production Systems. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 112-120.