

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій КОВБАСА

(підпис)

« » 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної
установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду»

Виконав: студент VI курсу, групи ЕП-31мп

(шифр групи)

Зарицький Богдан Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник ктн. проф. Печеник М. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри електромеханіки к.т.н. проф. Чумак В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент

Київ – 2024 р.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Назва	Кільк	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	141.3107.000.МД	Пояснювальна записка	93	
3	A1	141.3107.000.МД	Технологічна схема шахтної клітьової підйомної установки	1	
4	A1	141.3107.000.МД	Структурна схеми електромеханічної системи підйому	1	
5	A1	141.3107.000.МД	Розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи	1	
6	A1	141.3107.000.МД	Дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи шахтної підйомної установки	1	
7	A1	141.3107.000.МД	Дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи шахтної підйомної установки	1	
8	A1	141.3107.000.МД	Результати досліджень електромеханічної системи шахтної клітьової підйомної установки	1	

					141.3107.000.МД				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Зарицький Б. В.			«Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду»	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Печеник М. В.					2	102	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-31мп			
Н. Контр.		Печеник М. В.							
Затверд.		Ковбаса С. М.							

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Зарицький Богдан Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду

керівник дисертації професор Печеник М. В.

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

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2024 р. № ____

2. Термін подання студентом дисертації: 01.12.2024

3. Вихідні дані до дисертації: протяжність шахти – 500 м., кількість людей, що працює впродовж зміни – 120, час підйому 30 хв., середня вага однієї людини для кліті 80 кг, прискорення і уповільнення кліті 0.7 м/с^2 , прискорення механічного гальмування 0.1 м/с^2 .

4. Зміст пояснювальної записки: 1 аналітичний огляд режими роботи і особливості конструкцій шахтних підйомних установок; розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи; система керування підйомної

установки; розробка моделі та дослідження режимів роботи із різним завантаженням кліті; розробка стартап проекту.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, презентацій тощо): Технологічна схема шахтної клітьової підйомної установки – А1, Структурна схема електромеханічної системи підйому – А1, Розрахунок і вибір елементів електромеханічної схеми – А1, Дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи ШПУ – А1, Результати досліджень електромеханічної системи шахтної клітьової підйомної установки – А1.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника магістерської дисертації.

7. Дата видачі завдання 02.09.2024

Календарний план виконання магістерської дисертації
студента групи ЕП-31мп
Зарицького Богдана Володимировича
на тему: "Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної
установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду"

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд наукового–технічної літератури	08.09.2024	
2	Розробка вимог для електродвигуна. Вибір системи електропривода	15.09.2024	
3	Розробка постановки задачі дослідження і визначення методів і її реалізації	15.09.2024	
4	Розробка структури електромеханічної системи електроприводу шахтної клітьової підйомної установки (ШПУ)	20.09.2024	
5	Розробка та вибір елементів електромеханічної системи підйомної установки (Вибір електродвигуна, розрахунок параметрів електромагнітної системи параметрів електромагнітного перетворювача)	30.09.2024	
6	Аналіз характеру зміни динамічних навантажень при варіаціях завантаження кліті ШПУ	11.10.2024	
7	Точність позиціонування кабіни ліфта за рахунок коригування параметрів діаграми руху	22.10.2024	
8	Розробка математичної моделі електромеханічної системи ШПУ	29.10.2024	
9	Дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи з використанням програмного апарату «MATLAB» Simulink	19.11.2024	
10	Аналіз отриманих результатів досліджень, формування рекомендацій про їх використання	25.11.2024	
11	Оформлення магістерської дисертації, підготовка презентації і доповіді для захисту	05.12.2024	

Студент



Богдан ЗАРИЦЬКИЙ

Керівник дисертації



Микола ПЕЧЕНИК

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 102 сторінках, вміщує 36 рисунків 14 таблиць, 18 сторінок та 18 рисунків додатків, 6 графічних матеріалів у форматі A1.

Магістерська дисертація присвячена аналізу та моделюванню динаміки руху ліфтової системи з урахуванням змінного завантаження кліті.

Робота охоплює аналітичний огляд літератури в галузі підйомних клітей, аналітичні розрахунки основних параметрів руху, таких як максимальна швидкість, час підйому, шлях гальмування, та комп'ютерне моделювання цих процесів у середовищі MATLAB Simulink.

Мета роботи полягає у створенні моделі, яка дозволяє компенсувати похибки позиціонування кліті при різних рівнях завантаження та забезпечує мінімізацію енергетичних витрат системи.

ПІДЙОМНИК, ГЛИБИНА ШАХТИ, ДИНАМІКА РУХУ, МОДЕЛЮВАННЯ В МАТЛАВ, КОЕФІЦІЄНТ НАВАНТАЖЕННЯ, ТОЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, ТОЧНІСТЬ ЗУПИНКИ, ЧАС ПІДЙОМУ, МАКСИМАЛЬНА ШВИДКІСТЬ, ГАЛЬМІВНИЙ ШЛЯХ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АНАЛІТИЧНІ РОЗРАХУНКИ, SIMULINK, КОМПЕНСАЦІЯ ПОМИЛОК, ЗМІННЕ НАВАНТАЖЕННЯ.

					141.3105.000.МД				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Зарицький Б. В.			«Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду»	Літ.	Лист	Листів	
Перевір.		Печеник М. В.					6	102	
Реценз.						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-31мп			
Н. Контр.		Печеник М. В.							
Затв.		Ковбаса С.М.							

SUMMERY

The master's dissertation is 102 pages long, contains 36 figures, 14 tables, 18 pages and 18 figures of appendices, 6 graphic materials in A1 format.

The master's research is devoted to the analysis and modelling of the dynamics of the lift system with regard to the variable load of the cage.

The work includes an analytical review of the literature in the field of lifting cages, analytical calculations of the main motion parameters, such as maximum speed, lifting time, braking distance, and computer modelling of these processes in MATLAB Simulink.

The aim of the work is to create an adaptive model that allows compensating for the errors in the positioning of the stand at different load levels and minimises the energy consumption of the system.

HOIST, MINE DEPTH, MOTION DYNAMICS, MATLAB MODELLING, LOAD FACTOR, ADAPTIVE BRAKING, STOPPING ACCURACY, LIFTING TIME, MAXIMUM SPEED, STOPPING DISTANCE, ENERGY EFFICIENCY, ANALYTICAL CALCULATIONS, SIMULINK, ERROR COMPENSATION, VARIABLE LOAD.

					141.3105.000.МД			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Зарицький Б. В.			«Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду»	Лім.	Лист	Листів
Перевір.		Печеник М. В.					7	106
Реценз.						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-31мн		
Н. Контр.		Печеник М. В.						
Затв.		Ковбаса С.М.						

ЗМІСТ

.....	
ВСТУП	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЖИМИ РОБОТИ І ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК	13
1.1 Загальні відомості	13
1.2 Конструктивні елементи	15
1.3 Режими роботи	18
1.4 Аналітичний огляд науково-технічної літератури	20
1.4.1 Модернізація систем керування електроприводами шахтних підйомних машин електроприводів шахтних підйомних машин [8].....	20
1.4.2 Моделювання зчеплення канатної та гальмівної систем для шахтного підйомника.[9]	22
1.4.3 Експертний контроль системи керування шахтними підйомниками [10].....	22
1.5 Постановка задачі	24
2 ОБЧИСЛЕННЯ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	26
2.1 Розрахунок і підбір компонентів системи	26
2.1.1 Гранично допустима вага кліті	26
2.1.2 Обчислення характеристик троса.....	26
2.1.3 Розрахунок і вибір елементів механічної частини підйомної установки.....	28
2.1.4 Дослідження кінематики вертикального переміщення	28
2.1.5 Аналіз динаміки підйомного механізму	31

2.2 Рівняння динаміки для урівноваженої підйомної установки	31
2.3 Дослідження параметрів руху при варіації рівня завантаження підйомного сосуду.....	34
2.4 Обчислення параметрів електродвигуна [15]	49
2.4.1 Обчислення елементів заміщення для конструкції Т-подібній формі.....	49
3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ	55
3.1 Загальна функціональна схема асинхронного електроприводу.	55
3.2 Аналіз та обчислення компонентів, що належать до силової частини	57
3.2.1 Визначення значень для інвертора напруги.....	57
3.2.2 Фільтрація з використанням ємнісного елемента	58
3.2.3 Обчислення компонентів клампера	59
3.2.4 Визначення параметрів для датчиків струму і напруги.....	60
3.2.5 Визначення характеристик для датчиків	60
3.3 Опис асинхронного двигуна через математичний двохфазний простір (a-b) (d-q)	61
3.4 Алгоритм непрямого векторного керування організований за такою схемою [15]:.....	64
4 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІЗ РІЗНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ КЛІТІ	71
4.1 Розробка моделі ШПУ з використанням пакету прикладних програм Matlab Simulink.....	71
4.2 Модель у програмному забезпеченні Matlab	73

4.3 Дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи ліфтової підйомної установки.....	76
4.3.1 Програма досліджень	76
4.3.2 Дослідження характеру зміни прискорення і швидкості при варіаціях рівня завантаження.....	77
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	89
5.1 Обґрунтування актуальності на новизни ідеї	89
5.2 Аналіз конкурентного середовища	90
5.3 Ресурсне забезпечення.....	92
5.4 Аналіз конкуренції.....	93
Висновки.....	98
6 Список літератури	99
7 ДОДАТОК А	103
8 ДОДАТОК Б.....	122

ВСТУП

При відпрацюванні шахтних підйомних установок одним з-поміж першочергових завдань є забезпечення точного дотримання заданої діаграми швидкості під час виконання підйомно-спускових операцій, що важливо для підвищення ефективності та безпеки експлуатації. Для транспортування людей необхідно розробити системи автоматичного керування, які забезпечують високу точність роботи шахтних підйомних установок.

Актуальність задачі полягає у підвищенні точності відпрацювання заданої діаграми швидкості з метою забезпечення:

- безпечного транспортування людей;
- високої точності позиціонування шахтної кліті щодо верхнього та нижнього рівнів підйому та спуску.

Робота виконана на кафедрі електропривода відповідно до плану підготовки магістрів.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування електромеханічних систем шахтних підйомних установок за рахунок удосконалення методів автоматичного керування, що дозволить підвищити як енергетичну ефективність, так і рівень безпеки. Окрему увагу приділено забезпеченню режиму точної зупинки кліті за наявності змін статичного навантаження.

Для вирішення поставлених завдань потрібно виконати такі дослідження:

- Розробка принципів і математичного опису законів руху підйомної установки за умов зміни статичних і динамічних навантажень.
- Розробка методів побудови діаграми руху підйомної установки в межах технологічного циклу із забезпеченням необхідної точності позиціонування на прийомній платформі.
- Аналіз характеру розподілу рівня точності відпрацювання заданого закону руху за умов змінного навантаження шахтної кліті.

Об'єкт дослідження: процеси автоматичного регулювання в електромеханічних системах шахтних клітьових підйомних установок.

Предмет дослідження: електромеханічні системи автоматизованих врівноважених шахтних підйомів.

Методи дослідження: У роботі використані теорія електропривода, теоретична механіка, принципи автоматичного керування, а також методи побудови технологічних процесів із застосуванням вертикальних підйомних установок.

Практична цінність отриманих результатів:

Реалізовані алгоритми керування дозволяють:

- Досліджувати точність відпрацювання заданого закону руху.
- Покращити енергетичні та експлуатаційні характеристики шахтних підйомних установок.
- Зменшити час компенсації періоду "дотягування", що дозволяє збільшити продуктивність підйомної установки та підприємства в цілому.

Результати роботи частково реалізовані у процесі формування та коригування основних положень навчальної дисципліни "Автоматизація електромеханічних систем типових застосувань". Вони можуть бути успішно використані під час проектування нових та реконструкції діючих шахтних підйомних установок.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЖИМИ РОБОТИ І ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК

1.1 Загальні відомості

Шахтна клітьова установка - це механізм, призначений для підняття або опускання вантажів у шахті чи кар'єрі. Вона включає в себе елементи, такі як канати, лебідки, підйомні механізми та інші компоненти, які забезпечують безпечний та ефективний транспорт вантажів вздовж вертикальної шахти. Шахтні клітьові установки в гірничодобувній і промисловій сферах для переміщення руди, матеріалів та обладнання вздовж шахтних стволів або шахтних вирізів.

Самі перші клітьові установки були створені ще в античні часи. Існували такі прості механічні системи для підйому вантажів, одними з них являються грецькі та римські підйомники, які використовувалися для підняття матеріалів для побудови будівель чи інших структур.

В часи середньовіччя у деяких монастирях та замках використовувалися дерев'яні лебідки для переміщення вантажів. У ренесансній Європі розвиток інженерних технологій призвів до виробництва більш складних систем підйому. Наприклад, лебідки з використанням розмірених конструкцій, залучаючи водяну або тваринну силу.

Ближче до сучасних часів в 19-20 столітті, з розвитком парових двигунів і електрифікації почали з'являтися електричні ліфти. Перший електричний ліфт був встановлений в Нью-Йорку в 1870 році.

В середині 20 століття впровадили гідравлічні та електромеханічні системи з покращеною автоматизацією, а також безпечніші та ефективніші конструкції. З'являється високошвидкісні ліфти, які використовують нові матеріали та технології.

У сучасному світі такі установки потребують точного керування та дуже високих вимог для забезпечення безпеки вантажу та людей в кліті.

На даний час для забезпечення плавного керування, використовуються багатомасові системи керування процесом, які забезпечуються прорахунок пружності тросу, зносостійкості та інших спецефічних умов, які впливають на роботу механізму.

На сьогоднішній день стало популярним використання нейромеж. Впровадження їх в процес забезпечить плавніше регулювання, швидкість спрацювання та дозволить після навчання керувати процесом зі змінними параметрами системи, що є досить важливим у ліфтовій системі керування.

Нейромережі також можуть застосовуватися для прогнозування та аналізу сигналів та даних із системи клітьової установки для забезпечення та уникання можливих поломок або несправностей. Це сприятиме своєчасному виявленню проблем та запобіганню аварій.

Якщо забезпечити навчання нейромережі спеціалісту, кількість потенційних сценаріїв аварій та знос конструкції може зменшитись, в порівнянні з керуванням старими методами.

За допомогою Matlab можна реалізувати простіший спосіб керування установкою за допомогою механічної частини системи, яка буде керуватися бібліотекою Sim Mechanics. Ця бібліотека дозволяє створювати моделі механічних систем, що включають рухомі частини, з'єднання, сили та інші елементи. Це дозволяє повністю моделювати та аналізувати рух та динаміку шахтної клітьової установки. Симуляція механічних систем може допомогти вирішувати технічні проблеми, виявлені в ході експлуатації. Моделювання може вказати на причини поломок або сильного зносу та допомогти у виправленні або удосконаленні конструкції. Загалом, впровадження SimMechanics у шахтні клітові установки дозволяє покращити розробку, аналіз та управління механічними аспектами системи, що може призвести до збільшення її продуктивності та стабільності.

1.2 Конструктивні елементи

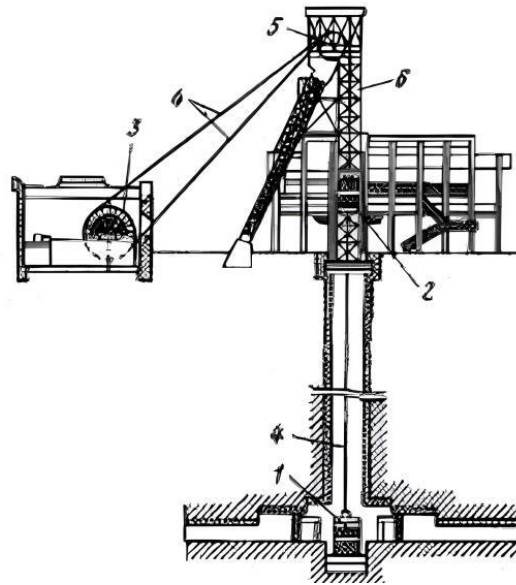


Рисунок 1.1 – Схема одноканатної клітьової підйомної установки

Згідно з рисунком 1.1 маємо, що об'єкти розташовані під номерами 1 та 2 відображають кліть в різних положеннях відносно її положення вивантаження персоналу. Дана кліть виконує функцію переміщення обладнання, персоналу та інших корисних копалин.

Під номером 3 розташований підйомальний механізм з циліндричним барабаном, який слугує для підйому, для контролю намотування та розматування канатів та переміщення вантажів за допомогою циліндричного барабану. [1]

Під номером 4 розміщені підйомні канати, вони слугують для безпосереднього пересування кліті вздовж шахти. Канати повинні бути стійкими до зносу та корозії, оскільки вони піддані значному механічному зусиллю і можуть опинитися в агресивних середовищах, таких як шахти чи промислові об'єкти.

На даній схемі розташовані під номером 1 та 2 розташована кліть, яка слугує для транспортування обладнання, персоналу та викопних речовин у положеннях над шахтою та в шахті відповідно.

Під номером 3 розташований підймальний механізм з циліндричним барабаном, який слугує для підйому, для контролю намотування та розматування канатів та переміщення вантажів за допомогою циліндричного барабану. [2]

Під номером 4 розміщені підйомні канати, вони слугують для безпосереднього пересування кліті вздовж шахти. Канати повинні бути стійкими до зносу та корозії, оскільки вони піддані значному механічному зусиллю і можуть опинитися в агресивних середовищах, таких як шахти чи промислові об'єкти. [3]

Під номером 5 розташовано шків. Шків складається з ободу (зовнішньої частини), каната, який обгортає шків, та осі, навколо якої обертається блок. Основною функцією шківа є зміна напрямку сили, яка застосовується до каната і створення механічного переваги для підвищення або зменшення сили, необхідної для підняття чи переміщення вантажу. Розташовується на підшківному майданчику копра [4]

Під номером 6 знаходиться сам копер, він представляє з себе надземну конструкцію, в яку входить до складу системи для підняття матеріалів з шахтного ствола. Вона використовується для розміщення шківів та направляючих, які керують тросами клітей чи скипів, а також для розміщення елементів, які відповідають за безперебійну роботу системи, таких як розгрузочні пристрої, криві для знімання навантаження та інше обладнання. Копер відіграє ключову роль у забезпеченні надійності та ефективності підйомних процесів при переміщенні матеріалів з глибини шахти на поверхню.



Рисунок 1.2 – Підйомна машина [5]



Рисунок 1.3 – Пульт керування

Під номером 1 знаходиться намотувальний барабан.

Під номером 2 розташовані гальма, які слугують для керування точного керування процесом, регулюючи швидкість руху вантажу чи кліті під час підняття чи опускання, також вони можуть слугувати як захист від перенавантаження.

Згідно з рис. 1.2 редуктор зображений під номером 3. Він виконує функцію збільшення крутного моменту, який створюється електродвигуном з метою забезпечення необхідної потужності для підйому вантажу.

Наступним є електродвигун, він необхідний для приведення в рух підйомного механізму та підняття або опускання платформи. Електродвигун створює обертовий момент, який передається на механізми підйому.

1.3 Режими роботи

Підйомник може працювати в багатьох режимах роботи, від автоматичного до режиму до того, який буде потребувати дій у аварійній ситуації.

В даній дисертації використовується режим роботи, який включає етапи розгону до встановлення сталої швидкості, рух зі сталою швидкістю, інтенсивне сповільнення та поступова зупинка кліті.

Щоб забезпечити керування даним чином варто зазначити звичайний режим роботи установки та автоматичний. Загальний режим роботи являється здебільшого ручним режимом роботи і він використовується для керування установкою в середині кліті шахтарями для спуску людей і обладнання вздовж шахти. Для забезпечення автоматичного режиму роботи, необхідний оператор, який зможе керувати роботою кліті дистанційно чи по заданому алгоритму без втручання осіб, які безпосередньо в цій кліті знаходяться. За допомогою заданого алгоритму роботи, кліть виконує поставлене завдання для підняття чи опускання вантажу по запрограмованому алгоритму роботи. [6]

Також наявні режими роботи, які слугують для забезпечення безпеки персоналу та вантажу всередині при екстрених ситуаціях, які перешкоджають нормальному режиму роботи установки. Серед таких режимів є режим аварійної зупинки, який слугує для того, щоб при виникненні аварійної ситуації, такої як неплановий знос тросу, механічні пошкодження, виходу із ладу обладнання пожежі чи іншої небезпеки, яка може бути небезпечною. Цей режим перешкоджає подальшому просуненню по шахті кліті та зупиняє її, використовуючи гальмівні системи для негайної зупинки, до того часу, поки дану ситуацію не буде вирішено чи переходячи у режим технічного

обслуговування та перевозить установку для подальшого ремонту у безпечне місце.

Також наявний режим діагностики, який працює постійно та моніторить процес роботи, переносячи всю інформацію в папку logs. Це необхідне для того, щоб якщо виникне аварійна ситуація, можна було переглянути параметри, які спричинили негативні наслідки. Також цей

режим зображає роботоздібність всіх робочих компонентів машини в реальному часу та приблизне положення кліті.

Режим електродинамічного гальмування використовується для ефективного зниження швидкості опускання кліті у разі аварійних ситуацій або для точного зупинення на потрібній висоті під час нормальної експлуатації. Принцип електродинамічного гальмування полягає у використанні електромагнітної сили, щоб створити гальмівний момент, який протидіє рухові обладнання. Коли електродинамічне гальмо активується, електродвигун переводиться в режим генерації, і виникає електромагнітне поле. Це поле взаємодіє з металевим ротором електродвигуна, що викликає тормозний момент.

Варто зазначити захисти, які наявні в робочій установці. Серед них важливими є система емергентного гальмування, яка використовується в режимі аварійного гальмування. Це система, яка автоматично включається у випадку емергенції, забезпечуючи швидке та безпечне зупинення установки.

Так як в шахті є досить багато чинників, які є вибухонебезпечними, було вхвалено встановлення захисту від пилу, побудова кліті із матеріалів, які відповідають вибухозахисним стандартам, кабелі обладнані захисними оболонками та екрануванням для обладнання кабелів, це забезпечить від утворення іскри при терті.

1.4 Аналітичний огляд науково-технічної літератури

1.4.1 Модернізація систем керування електроприводами шахтних підйомних машин електроприводів шахтних підйомних машин [8]

Автоматизована система керування шахтними під'ємними машинами на базі ПЛК Simatic S7-1500 має такі особливості та можливості:

1. Структурно система складається з двох каналів, з'єднаних шинами. Кожен канал є незалежним ПЛК з підключеними пристроями введення / виведення, датчиками та керуванням.

2. Для реалізації двоканальної концепції критичні параметри підйомної системи моніторяться обома каналами за допомогою подвійного набору датчиків.

3. Сигнали, отримані від датчиків, а також керуючі сигнали, згенеровані в першому і другому каналі, підлягають еквівалентному контролю.

4. Система забезпечення повного самонагляду елементів, що забезпечують швидкість підйомної машини, тому використання дублюючого обмежувача швидкості не вимагається.

5. Двоканальний принцип побудови системи гарантує найвищий рівень безпеки підйомної машини, після помилки програмні модулі управління залишаються в ПЛК каналу А і каналу В, мають всю інформацію про рух судна, стан і режими роботи підйомної установки.

6. Система забезпечує динамічний моніторинг швидкості та прискорення (сповільнення) на всій довжині бочки, що дозволяє діагностувати несправності в системі приводу.

Таким чином, автоматизована система керування шахтними підйомними машинами на базі ПЛК Simatic S7-1500 є інтегрованою енергоефективною системою керування, яку потрібно при управлінні підйомною установкою.

Ця система має модульну конструкцію, що дозволяє гнучко конфігурувати приводи. Вона складається з активних модулів живлення, які забезпечують живлення проміжного кола (DC-ланцюга) та відновлення енергії під час роботи двигуна в режимі генератора, а також модулів двигуна, які забезпечують чотирикватратне векторне керування двигуном. Система

САКГПМ забезпечує повну самодіагностику елементів, що обмежують швидкість підйомного механізму, тому використання дублюючого обмежувача швидкості не потребує. Застосування частотного перетворювача та системи керування електроприводом дозволяє відновити електроенергію в мережі живлення в режимі генераторного гальмування. Отже, ця модернізована система автоматичного керування гірничим підйомним механізмом є інтегрованою енергоефективною системою керування, яку використовують для управління підйомним механізмом.

Використання ПЛК Simatic S7-1500 в автоматизованій системі управління шахтною підйомною машиною дає ряд переваг. По-перше, ці ПЛК є сучасними та сучасними, що забезпечують високий рівень безпеки та надійність підйомної системи. По-друге, модульна конструкція приводів забезпечує гнучку конфігурацію, забезпечуючи можливість налаштування перетворювача та модулів двигунів відповідно до конкретних вимог. Крім того, модулі активної потужності приводів забезпечують регульовану напругу постійного струму та споживають майже синусоїдальний струм із мережі, мінімізуючи негативний вплив на мережу живлення. Загалом використання ПЛК Simatic S7-1500 разом із двоканальною концепцією та модульною конструкцією приводів сприяє підвищенню продуктивності, безпеки та надійності автоматизованої системи керування шахтною підйомною машиною.

1.4.2 Моделювання зчеплення канатної та гальмівної систем для шахтного підйомника.[9]

В даній статті представлено методологію спільного моделювання системи підйому гнучкого каната шахтного підйомника та гідравлічної гальмівної системи. Спільна імітаційна модель враховує ефект зчеплення підсистем і надає корисні інструменти для проектування та технічного обслуговування підйомника.

Дана модель є ефективним інструментом для проектування, оптимізації, аналізу продуктивності та моделювання умов експлуатації підйомника. Комбінована модель може передбачити динаміку системи краще, ніж математична модель, оскільки вона враховує такі важливі особливості, як обмеження контакту між підсистемами. Спільна імітаційна модель є здійсненою і стане корисним інструментом для інженерів-проектувальників підйомників та інженерів з технічного обслуговування.

В цій статті описано математичну модель підйомника, яка містить компоненти механічної частини системи, такі як трос, шків, гальмівний диск, гідравлічну гальмівну систему і трос та електричну частину двигуна та електричних процесів, які відбуваються під час моделювання.

В заключенні можна додати, що методологія спільного моделювання системи підйому гнучкого каната шахтного підйомника і гідравлічної гальмівної системи може передбачити динаміку системи краще, ніж математична модель, оскільки вона враховує такі важливі особливості, як обмеження контакту між підсистемами.

1.4.3 Експертний контроль системи керування шахтними підйомниками [10]

У цій статті представлено інтелектуальний алгоритм керування системою керування шахтним підйомником, який є безпечнішим і більш придатним, ніж звичайне ПІД-регулювання.

Експертний контролер може точно налаштовувати параметри ПІД контролера в залежності від розміру відхилення системи. За результатами симуляції, експертний ПІД контролер показав кращі результати, ніж традиційний ПІД контролер.

За допомогою штучного інтелекту було введено ефективніше регулювання процесом. Введене нечітке ПІД-регулювання з самоналаштуванням параметрів для двигуна. Експертне керування

автоматично змінює параметри ПІД-регулятора залежно від розміру відхилення в системі.

Порівнюючи звичайний ПІД регулятор та експертний, зазначимо, що за результатами моделювання, експертний ПІД регулятор показав кращі результати, ніж традиційний ПІД регулятор. Основні відмінності між цими двома регуляторами полягають у тому, що експертний ПІД регулятор може достовірно налаштовувати параметри ПІД контролера в залежності від розміру відхилення системи, тоді як традиційний ПІД регулятор має фіксовані параметри.

Стаття розглядає застосування експертного керування для системи управління швидкістю постійного струму в шахтному підйомнику з постійним струмом. У порівнянні з традиційним ПІД-регулюванням, експертне керування виявляється ефективнішим. Зменшення прискорення підйому та зупинки покращує плавність та безпеку, а також зменшує навантаження на трос. Система експертного керування може бути спроектована без перепуску, забезпечуючи безпеку та уникнення небезпеки в порівнянні із звичайним ПІД-регулюванням. При розробці експертного контролера слід отримати комфорт і безпеку, а також розглянути чинники, таке як відчуття ваги та невагомості, натяг кабелю та прискорення під час

руху. Зазначається, що правила експертного контролера можуть змінюватися залежно від конкретних умов та необхідних систем керування двигуном.

1.5 Постановка задачі

Ефективність роботи шахтних клітьових підйомних установок залежить від здатності системи забезпечувати точний і стабільний рух підйомного механізму за різних умов завантаження. Однією з критичних вимог є дотримання безпечних параметрів гальмування та точність зупинки кліті, що особливо важливо при переміщенні пасажирів або вантажів.

Проблема, яку необхідно вирішити, полягає у розробці та впровадженні методів управління, що дозволять компенсувати вплив змінного завантаження кліті на параметри її руху. Це сприятиме підвищенню точності позиціонування, зниженню похибок на етапі гальмування, а також загальному рівню енергетичної економичності.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно реалізувати такі завдання:

Провести оцінку існуючих підходів до моделювання і керування динамічними системами шахтних підйомників.

Впровадити математичну модель, яка враховує змінне завантаження кліті, вплив коефіцієнта опору шахтного ствола та динамічні параметри електромеханічної системи.

Дослідити поведінку системи в умовах різного завантаження, визначивши залежність параметрів руху кліті від величини навантаження.

Розробити алгоритм управління, спрямований на забезпечення точності позиціонування без використання додаткових етапів дотягування.

Провести порівняльний аналіз отриманих результатів моделювання з даними традиційних підходів до управління, оцінюючи точність і ефективність розробленої системи.

Висновки до першого розділу:

Виконано аналітичний огляд конструктивних особливостей, режимів роботи та управління шахтними клітьовими підйомними установками.

Розглянуто існуючі системи керування електромеханічними установками, їх динамічні режими роботи та основні проблеми, пов'язані з впливом змінного завантаження кліті на точність позиціонування.

Із пройденої роботи можна зазначити, що однією з ключових проблем сучасних підйомних систем є забезпечення стабільності руху кліті та високої точності зупинки, особливо за умов змінного завантаження.

Результати, які ми отримали, дають змогу розробити структуру електромеханічної системи і забезпечити розрахунок та вибір її елементів.

2 ОБЧИСЛЕННЯ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розрахунок і підбір компонентів системи

2.1.1 Гранично допустима вага кліті

$$Q_{\max} = a \cdot p = 12 \cdot 80 = 960 \text{ кг} \quad (2.1)$$

Формули отримані згідно методики приведеній в [11].

a – максимальна місткість працівників у підйомному обладнанні за один цикл

p – усереднена маса одного працівника

Оберемо кліть із грузомісткістю в 3 т, а саме підйомну установку 1УКН 3.6-1 [12] з наступними параметрами:

$h = 5.45 \text{ м}$ – вертикальний розмір стінок підйомної кабіни;

$Q_m = 3820 \text{ кг}$ – загальна вага кліті без вантажу;

$d_{\max} = 40 \text{ мм}$ - найбільший допустимий діаметр каната

2.1.2 Обчислення характеристик троса

Висота підйомного механізму визначається за формулою:

$$\begin{aligned} H_k &= h_p + h_n + h_k + 0.25D_{ш} = \\ &= 0.2 + 2.5 + 5.45 + 0.25 \cdot 3 = 8.35 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.2)$$

h_p – висота, на яку рама кліті піднімається над рівнем завантажувальної платформи під час розвантаження;

$h_n = 2.5 \text{ м}$ – висота, за якої проводиться завантаження об'єктів в кліті;

h_c – рівень верхньої частини підйомної кабіни;

$D_{ш}$ - розмір підйомного колеса

Загальна довжина пройденого шляху кліттю дорівнюватиме:

$$H_0 = H_{ш} + H_k + h = 500 + 8.35 + 4.9 \approx 513 \text{ м} \quad (2.3)$$

Повна вага кліті при номінальному режиму роботи:

$$Q_k = Q_m + Q_{max} = 3820 + 960 = 4780 \text{ кг} \quad (2.4)$$

Згідно з документацією для шахтних клітьових підйомних установок, для вибору канату обираємо діаметр канату $d=40\text{мм}$, зазначений у технічних вимогах. Виходячи з таблиці параметрів канатів [11], визначаємо відносну вагу смазаного канату $P_{л} = 7.47 \frac{\text{кг}}{\text{пог.м}}$. Також враховуємо розривне зусилля

$Q_z = 1085000 \text{ Н}$, яке вказано для кожного типу канату. Для переведення цього значення в кілограми, розривне зусилля ділимо на прискорення вільного падіння g , щоб отримати необхідні одиниці вимірювання.

Для системи з урівноваженням навантаженням рекомендується використовувати канати, які відповідають визначеним вимогам щодо міцності, ваги та стійкості до зношування. Це гарантує безпечну і ефективну експлуатацію підйомного обладнання, забезпечуючи необхідну надійність при великих навантаженнях.

Фактична стійкість до навантажень:

$$m = \frac{Q_z}{Q_k + P_{л} H_0} = \frac{1085000/9.81}{4780 + 7.47 \cdot 513} = 12.84 \text{ кг} \quad (2.5)$$

Підбираючи даний канат отримали варіант при запасі міцності в $12.84 \text{ кг} < 13$, який входить в даний діапазон, який підпадає під вимоги безпеки.

2.1.3 Розрахунок і вибір елементів механічної частини підйомної установки

Відповідно до правил безпеки, діаметр шківів становить:

$$D_{ш} \geq 80d = 80 \cdot 40 = 3200 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Згідно з перерахунку, обираємо діаметр шківів такого значення:

$$D_{ш} = 3200 \text{ мм} = 3 \text{ м} \quad (2.7)$$

Спробуємо для обрахунку діаметр $D_6 = 3 \text{ м}$, при необхідності перевищення норми ширини 1.8 м., необхідно збільшити діаметр, де ширина барабану прийме значення:

$$W = \frac{H_{ш}}{\pi D_6} (d + S) = \frac{500}{3.14 \cdot 3} (40 + 2) = 2229 \text{ мм} \quad (2.8)$$

$S = 0.2 \text{ см}$ – ширина розриву між витками

Через те, що при значенні нинішнього діаметра не задовольняють значення норми ширини, тому обираємо $D_6 = 4 \text{ м}$, тоді

$$W = \frac{H_{ш}}{\pi D_6} (d + S) = \frac{500}{3.14 \cdot 4} (40 + 2) = 1672 \text{ мм} \quad (2.9)$$

Обираємо систему підйому з такими параметрами барабану: $D_6 = 4 \text{ м}$, $W = 1.8 \text{ м}$.

2.1.4 Дослідження кінематики вертикального переміщення

Параметри приведені роботою: вертикальна протяжність шахти—500 м,

$a_{\max}$ - найбільш можлива чисельність персоналу в одній зміні 120,

a – кількість осіб за один підйомний цикл 12

$t_{\text{п}}$ - час підйому 45 хв.,

a_1 - прискорення кліті 0.7 м/с^2 ,

a_3 - прискорення при гальмуванні до періоду дотягування 0.7 м/с^2 ,

a_0 - прискорення уповільнення механічного гальмування кліті 0.1 м/с^2 .

$v_0=0.5 \text{ м/с}$ - швидкість механічного гальмування

$\theta=15 \text{ с}$ - інтервал на вхід і вихід з кліті людей

Через те, що потрібно забезпечити спуск і підйом 120 людей упродовж 30 хвилин, враховуючи, що в кліть за 1 захід може зайти максимум 12 чоловік і ще фактор, що для кількості підйомів додаємо аналогічне число спусків, тому:

$$T_{\text{підйом}} = \frac{a_{\max}}{a} \cdot 2 = \frac{120}{12} \cdot 2 = 20 \quad (2.10)$$

$T_{\text{підйом}}$ - кількість підйомів і спусків для заданої кількості людей

Знайдемо тривалість одного робочого циклу установки

$$t_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{п}}}{T_{\text{підйом}}} \cdot 60 = \frac{45}{20} \cdot 60 = 135 \text{ с} \quad (2.11)$$

$t_{\text{ц}}$ - тривалість у часі одного спуску чи підйому кліті

Вважаймо можливим, що пауза для входу і виходу із установки буде набувати значення в $\theta = 4 \text{ с}$, тоді значення підйому установки без урахування паузи на загрузку персоналу становить:

$$t_{\text{цф}} = t_{\text{ц}} - \theta = 135 - 15 = 120 \text{ с} \quad (2.12)$$

Середня швидкість з якою переміщується кліть

$$v_{\text{ср}} = \frac{H_{\text{ш}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{500}{120} = 4.16 \text{ м/с} \quad (2.13)$$

Гранично допустима швидкість руху даного механізму

$$v_{\text{max}} = \lambda v_{\text{ср}} = 1.1 \times 4.16 = 4.58 \text{ м/с} \quad (2.14)$$

$$\lambda = (1.1 \div 1.6)$$

Згідно з діаграмою швидкості, отримуємо час руху установки із необхідною швидкістю руху:

$$t_1 = \frac{v_{\text{max}}}{a_1} = \frac{4.58}{0.7} = 6.55 \text{ с} \quad (2.15)$$

$$t_3 = \frac{v_{\text{max}} - v_0}{a_1} = \frac{4.58 - 0.5}{0.7} = 5.83 \text{ с} \quad (2.16)$$

$$t_4 = \frac{v_0}{a_0} = \frac{0.5}{0.1} = 5 \text{ с} \quad (2.17)$$

Відстані, подолані кліттю згідно діаграми швидкості:

$$h_1 = \frac{v_{\text{max}} \cdot t_1}{2} = \frac{4.58 \cdot 6.55}{2} = 30 \text{ м} \quad (2.18)$$

$$h_3 = \frac{a_1 \cdot t_3^2}{2} + v_0 t_3 = \frac{0.7 \cdot 5.83^2}{2} + 0.5 \times 5.83 = 14.81 \text{ м} \quad (2.19)$$

$$h_4 = \frac{v_0 \cdot t_4}{2} = \frac{0.5 \cdot 5}{2} = 1.25 \text{ м} \quad (2.20)$$

$$h_2 = H_{\text{ш}} - h_1 - h_3 - h_4 = 500 - 30 - 14.81 - 1.25 = 453.94 \text{ м} \quad (2.21)$$

$$t_2 = \frac{h_2}{v_{\text{max}}} = \frac{453.94}{4.58} = 99.11 \text{ с.} \quad (2.22)$$

2.1.5 Аналіз динаміки підйомного механізму

Оцінка необхідної потужності електродвигуна підйомного сосуду:

$$P_M = \frac{k \cdot Q_{\max} \cdot H \cdot \rho}{102 \cdot t_{\text{цф}} \cdot \eta_{\text{зп}}} = \frac{1.2 \cdot (960 + 3820) \cdot 500 \cdot 1.3}{102 \cdot 120 \cdot 0.92} = 331.1 (\text{кВт}) \quad (2.23)$$

$k = 1.2$ – фактор впливу опору шахтних чинників;

ρ - показник динамічного процесу знаходиться в діапазоні від 1.2 до 1.4

$\eta_{\text{зп}}$ - ККД одинарноступінчастої зубчастої передачі

Підбираємо електродвигун 4АН355М2У3 з такими характеристиками:

$P_M = 400 \text{ кВт}$, $n = 2970 \text{ об/хв}$ [13,14]

У випадку з цим електродвигуном, значення моменту інерції $J = 2.85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, то $(GD^2)_p = 4gJ = 4 \cdot 9.81 \cdot 2.85 = 111.83 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$

Кількість обертів барабану:

$$n_6 = \frac{60 \cdot v_{\max}}{\pi D_6} = \frac{60 \cdot 4.58}{3.14 \cdot 4} = 22 \text{ об/хв} \quad (2.24)$$

Значення передаточного числа редуктора отримується в результаті співвідношення кількості обертів двигуна відносно обертів барабану:

$$i_p = \frac{n}{n_6} = \frac{2970}{22} \approx 135 \quad (2.25)$$

2.2 Рівняння динаміки для урівноваженої підйомної установки

Щоб перетворити установку на "урівноважену", додаємо в рівняння компонент противаги, яка компенсує частину ваги кліті і вантажу.

$$F_i = kQ_i - (Q_M + \alpha Q_{\max}) + m_{\Sigma}' \cdot a_i, \quad (2.26)$$

де $Q_{\text{против.}} = 4780 \text{ кг}$,

$$\alpha = 0.5,$$

$k = 1.2$ – коефіцієнт шахтних опорів для клітьових підйомів,

$$Q_i = Q_m + Q_j$$

Q_j – величина ваги в даний момент часу.

Виведемо із рівняння 2.42, спростивши рівняння:

$$F_i = kQ_m + kQ_j - Q_m - \alpha Q_{\text{max}} + m_{\Sigma}' \cdot a_i \quad (2.27)$$

$$F_i = Q_m(k-1) + kQ_j - \alpha Q_{\text{max}} + m_{\Sigma}' \cdot a_i \quad (2.28)$$

Значення приведених мас в урівноважених підйомних установах визначається без застосування погонної ваги канату, то значення приведеної маси m_{Σ}' приймає вигляду:

$$G_{\text{ш}}' = 90 \cdot D_{\text{ш}}^2 = 90 \cdot 3^2 = 810 \text{ кг}$$

$$G_{\text{нм}}' = 6500 \text{ кг}$$

$$G_p' = (GD^2)_p \frac{i_p^2}{D_6^2} = 111.83 \cdot \frac{135^2}{4^2} = 127381 \text{ кг} \quad (2.29)$$

$$G_{\text{зп}}' = 0.2G_p' = 0.2 \cdot 127381 = 25476 \text{ кг}$$

$$\begin{aligned} \Sigma G'' &= Q_{\text{max}} + Q_m + G_{\text{ш}}' + G_{\text{нм}}' + G_p' + G_{\text{зп}}' = \\ &= 960 + 3820 + 810 + 6500 + 127381 + 25476 = 164947 \text{ кг} \end{aligned} \quad (2.30)$$

де $G_{\text{ш}}'$ - розрахункова маса кліті;

$G_{\text{нм}}'$ - нормована маса барабану;

G_p' - розрахункова маса ротору;

$G_{\text{зп}}'$ - розрахункова маса редукторного механізму.

$$m_{\Sigma}' = \frac{\Sigma G''}{g} = \frac{164947}{9.81} = 16814 \text{ кг} \quad (2.31)$$

Визначення зусиль для кожного робочого пункту навантажувальної характеристики згідно з формулою (2.28) для підйомної кліті:

$$F_1 = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot 0.7 = 13206 \text{ кг}$$

$$a = a_1; \quad (2.32)$$

$$F_1' = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot 0.7 = 13206 \text{ кг}$$

$$a = a_1; \quad (2.33)$$

$$F_2 = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot 0 = 1436 \text{ кг}$$

$$a = 0; \quad (2.34)$$

$$F_2' = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot 0 = 1436 \text{ кг}$$

$$a = 0 \quad (2.35)$$

$$F_3 = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot (-0.7) = -10334 \text{ кг}$$

$$a = -a_1; \quad (2.36)$$

$$F_3' = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot (-0.7) = -10334 \text{ кг}$$

$$a = -a_1; \quad (2.37)$$

$$F_4 = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot (-0.1) = -245.4 \text{ кг}$$

$$a = -a_0; \quad (2.38)$$

$$F_4' = 3820 \cdot (1.2-1) + 1.2 \cdot 960 - 0.5 \cdot 960 + 16814 \cdot (-0.1) = -245.4 \text{ кг}$$

$$a = -a_0; \quad (2.39)$$

Результати розрахунків приведені на рис. 2.1 – 2.2.

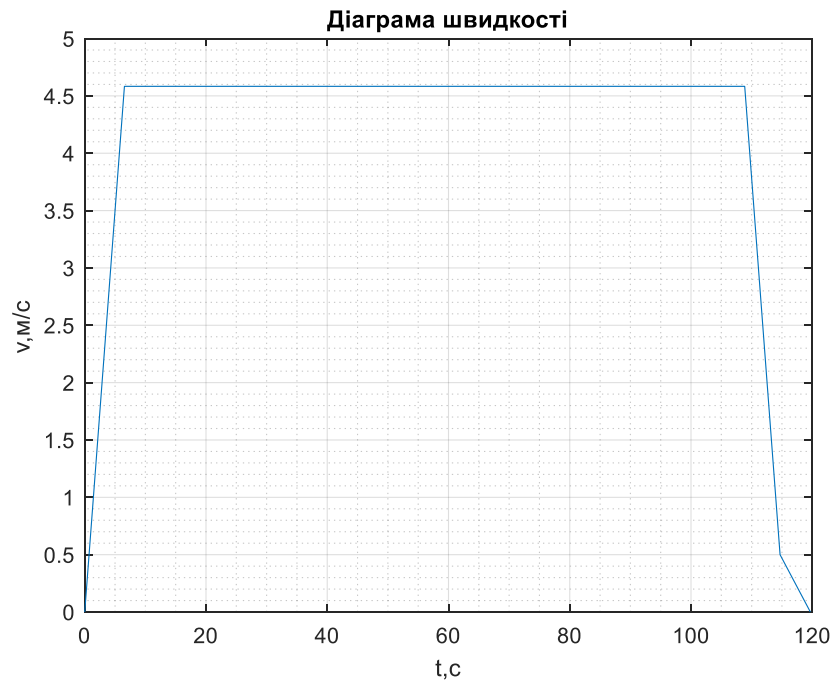


Рисунок 2.1 – Діаграма швидкості урівноваженої установки в номінальному режимі

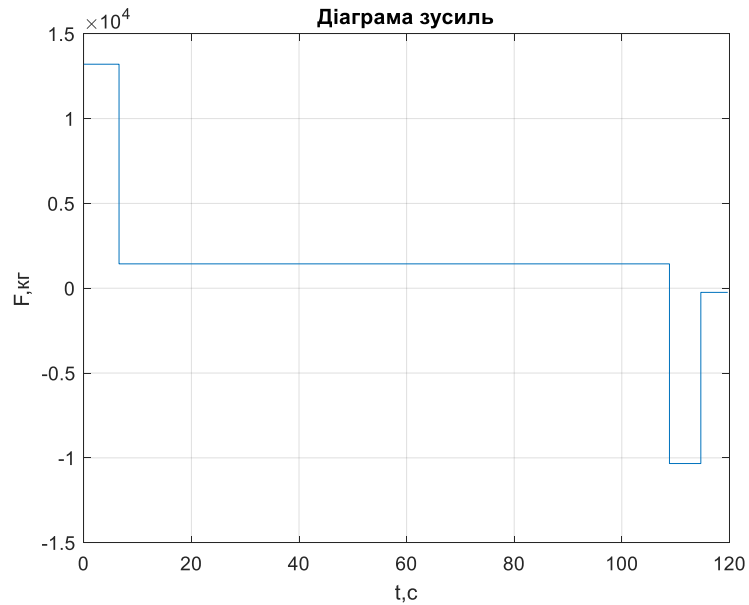


Рисунок 2.2 – Діаграма зусиль урівноваженої установки в номінальному режимі

2.3 Дослідження параметрів руху при варіації рівня завантаження підйомного сосуду

Спробуємо реалізувати систему з різним завантаження системи, де швидкість гальмування і прискорення залежить від поточної ваги кліті.

Для реалізації даного методу керування було застосовано автоматичне підлаштування швидкості і прискорення в залежності від завантаження кліті, а саме за допомогою формул:

$$q = \frac{Q_{\text{pow}} + Q_m}{Q_k}, \quad (2.40)$$

де q – коефіцієнт завантаження кліті

Для приведення досліду необхідно врахувати завантаження при моменті загрузки кліті, для цього скориговується формула максимальної швидкості. Щоб її визначити, виведемо її через енергетичний баланс, а саме через формулу кінетичної енергії:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.41)$$

де m — повна маса системи (підйомник + вантаж),

v — швидкість об'єкта.

Водночас до цього потужність двигуна обмежує доступну енергію:

$$P = F \cdot v \quad (2.42)$$

де F , необхідна для переміщення маси

Для врахування впливу маси введено коефіцієнт з формули 2.40. Цей коефіцієнт відображає відносне збільшення маси системи в порівнянні з номінальною масою. Швидкість v_{max} зменшується із зростанням q , адже більша маса потребує більше енергії для досягнення тієї ж швидкості.

Максимальна швидкість v_{max} пропорційна доступній енергії двигуна P , а також обернено пропорційна масі (або q):

$$v_{\max} \propto \frac{1}{\sqrt{q}} \quad (2.43)$$

Через те що вводиться середня швидкість з формули 2.13, формула максимальної швидкості з врахуванням коефіцієнту приймає значення:

$$v_{\max} = \lambda \cdot \frac{v_{\text{сеп}}}{\sqrt{q}} \quad (2.44)$$

Звідки корінь з q з'являється, оскільки енергія пропорційна квадрату швидкості, а швидкість залежить від кореня кінетичної енергії.

Для того, щоб вивести залежність прискорення від коефіцієнту, звернемося до другого закону Ньютона:

$$F = m \cdot a \quad (2.45)$$

Звідки прискорення:

$$a = \frac{F}{m} \quad (2.46)$$

З цього виразу видно, що прискорення обернено пропорційне до маси. Якщо маса зростає, прискорення зменшується за умови, що прикладена сила залишається сталою.

У системі, де враховується коефіцієнт q , ми можемо врахувати, що m прямо пропорційно q . Тому:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{m_{\text{ном}} \cdot a_{\text{ном}}}{m_{\text{ном}} \cdot q} = \frac{a_{\text{ном}}}{q} \quad (2.47)$$

Таким чином, прискорення зменшується зі збільшенням q , що відповідає зростанню фактичної маси системи.

Прискорення прямо обернено пропорційне до q , оскільки збільшення маси зменшує ефективність сили, прикладеної до системи.

Результати розрахунків при зміні швидкості і прискорення приведені в табл. 2.1 та на рис. 2.3-2.6.

Таблиця 2.1 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження, швидкості руху і прискорення підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях гальмування, м.	Час роботи за 1 підйом, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., %
1.2Q _n	4.494	14.819	121.958	0.695
Q _n	4.583	14.826	119.691	0.561
0.5Q _n	4.832	14.844	113.81	0.516
0Q _n	5.127	14.862	107.589	0.447

Продовження таблиці 2.1

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, m / c^2	Похибка по часу, %
1.2Q _n	0.67	1.9
Q _n	0.7	0
0.5Q _n	0.77	4.9
0Q _n	0.87	10.1

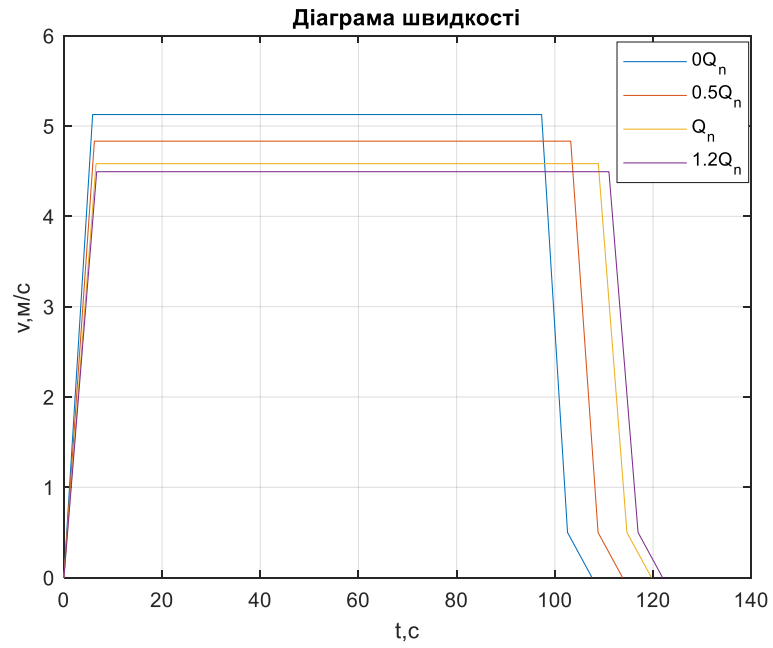


Рисунок 2.3 – Діаграма лінійної швидкості при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$

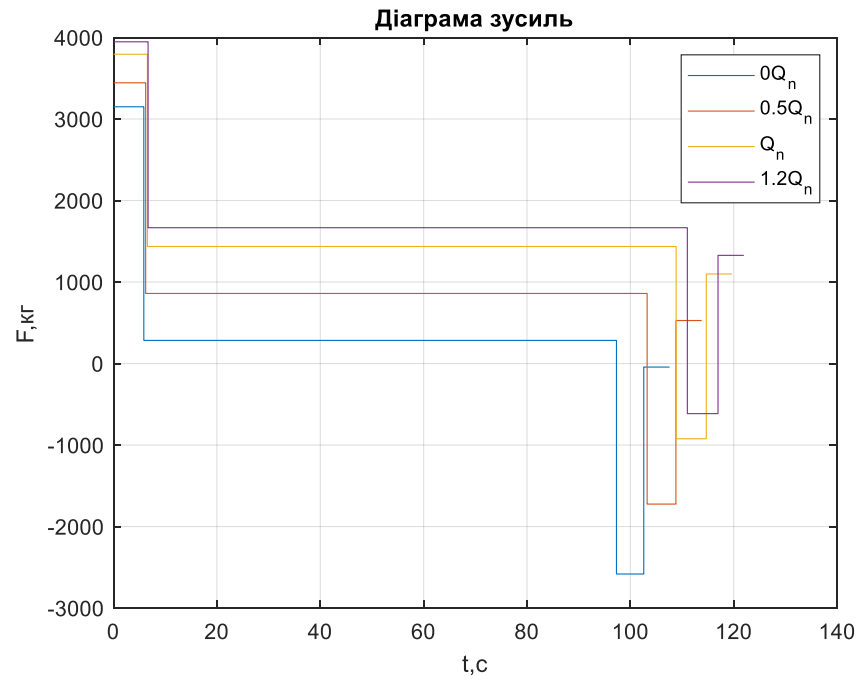


Рисунок 2.4 – Діаграма зусиль від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ завантаженні кліті

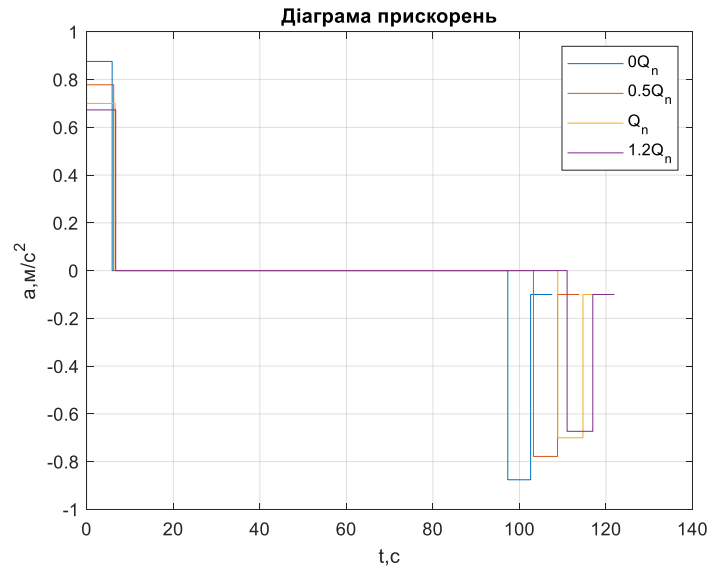


Рисунок 2.5 – Діаграма розрахованого прискорення при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$

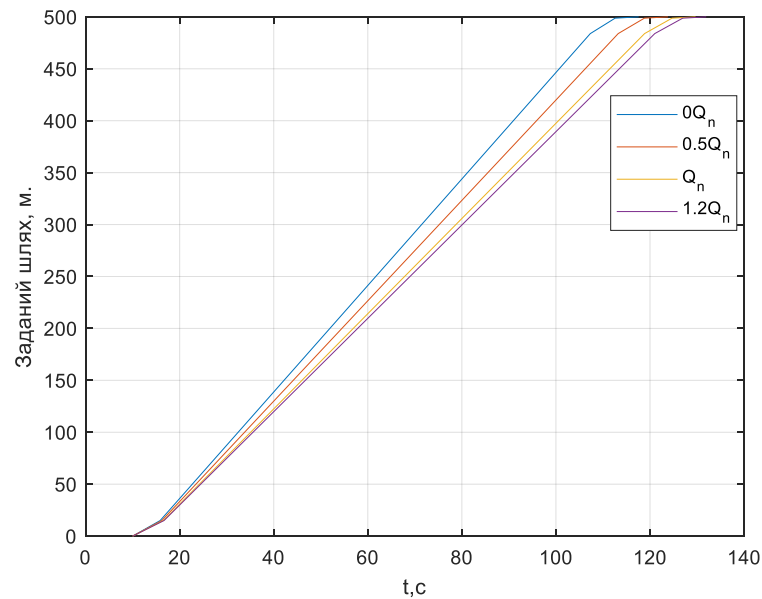


Рисунок 2.6 – Діаграма пройденого шляху в залежності від завантаження кліті

Відповідно до рис. 2.3-2.6 та табл. 2.1, видно, що відхилення за пройденим шляхом є незначним і відповідає заданому обмеженню у 0.2 м. Але крім цього, згідно до стандартів безпеки експлуатації шахтних підйомних установок, прискорення під час гальмування кліті не повинно перевищувати

значення 0.7 м/с^2 . Це вказує на необхідність вирішення питання точності зупинки кліті іншим методом, без впливу на параметри прискорення.

У таблиці 2.1 розглядається вплив різного рівня завантаження кліті на максимальну швидкість, шлях гальмування, час руху, а також відхилення від заданої точності. Аналіз показав, що зі збільшенням навантаження до $1.2Q_n$ максимальна швидкість кліті зменшується, час руху збільшується, але відхилення за шляхом залишається в межах допустимих норм $<0.7\%$. Це свідчить про стабільність розрахованих параметрів системи. Також можна зауважити, що в залежності від збільшення навантаження, похибка по часу буде зменшуватися, а похибка по шляху збільшуватися, що свідчить про взаємозв'язок між параметрами навантаження та кінематичними характеристиками системи, зокрема про те, що система адаптується до зміни маси завантаження, забезпечуючи стабільність роботи, але з певними компромісами щодо точності окремих параметрів.

Припустимо, що необхідно регулювати лише швидкість руху, але відстань, що залишилася до точки вивантаження пасажирів, все ще є значною. Тому для компенсації цієї нестачі організуємо рух з постійною швидкістю на додатковій ділянці, яка забезпечить точне досягнення кліті до точки зупинки.

Для початку визначимо скільки проїде кліть з регулюванням за допомогою лише швидкості.

Таблиця 2.2 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження і швидкості руху підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях гальмування, м.	Пройдений час кліттю без врахування точності, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., %
$1.2Q_n$	4.494	14.247	121.728	1.397
Q_n	4.583	14.826	119.691	1.416
$0.5Q_n$	4.832	16.501	114.436	1.543
$0Q_n$	5.127	18.597	108.924	1.298

Продовження таблиці 2.2

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, $\text{м} / \text{с}^2$	Похибка по часу, %
$1.2Q_n$	0.7	1.7
Q_n	0.7	0
$0.5Q_n$	0.7	4.4
$0Q_n$	0.7	9

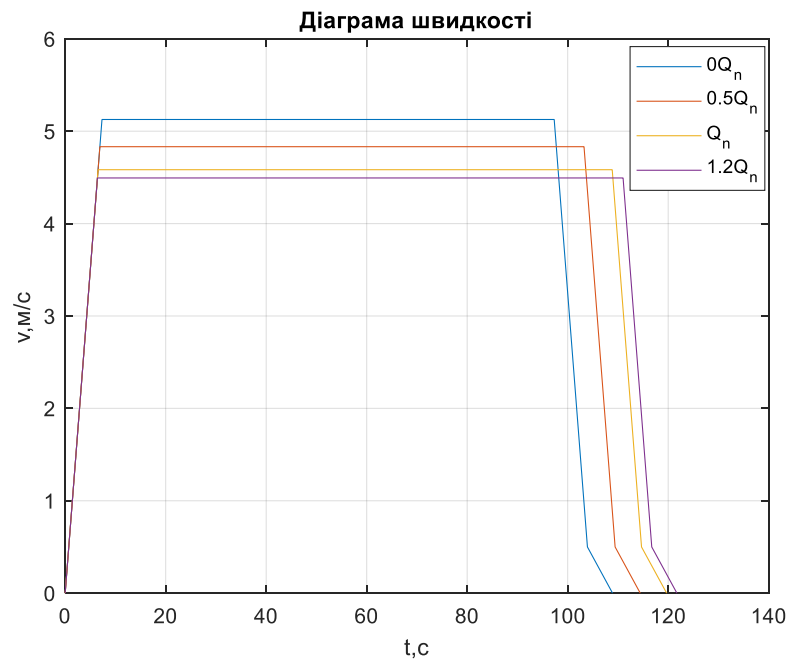


Рисунок 2.7 – Діаграма швидкості при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ за законом швидкості руху

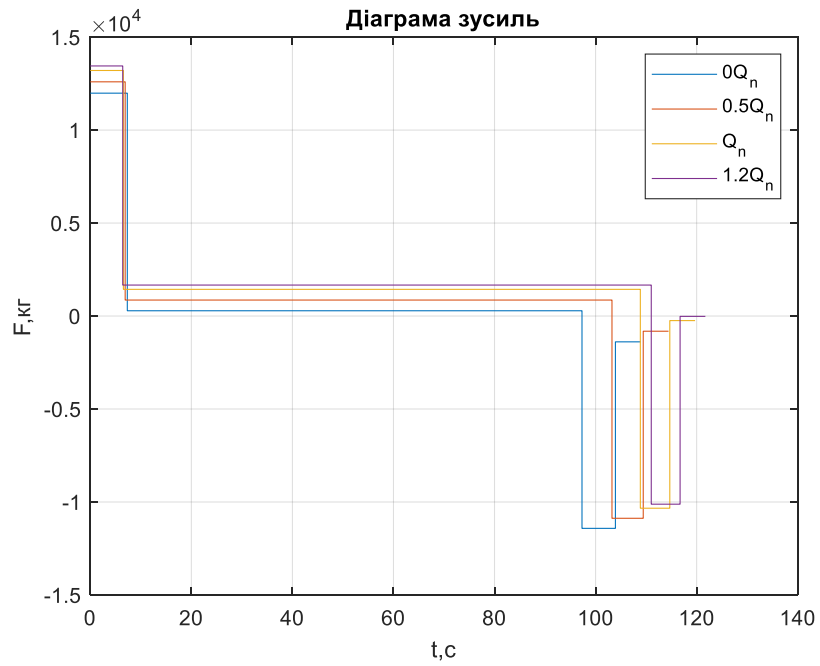


Рисунок 2.8 – Діаграма зусиль від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ завантаженні кліті

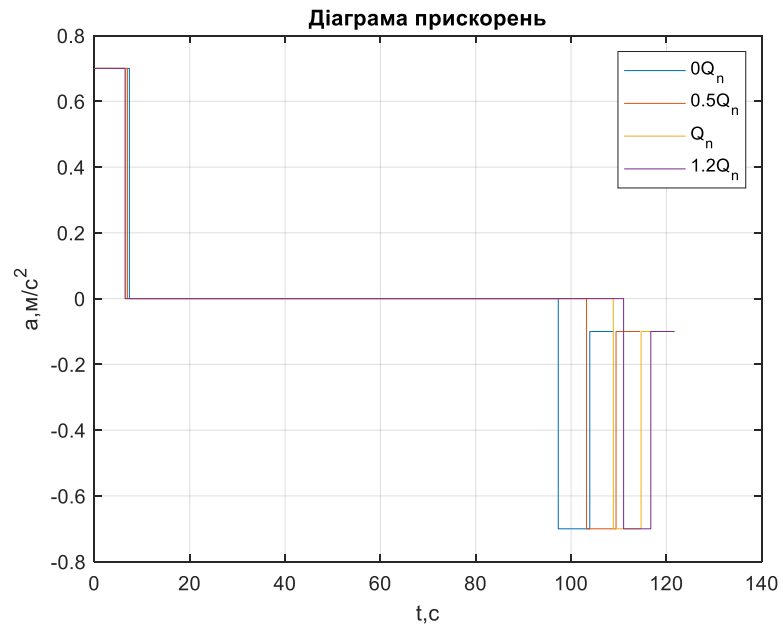


Рисунок 2.9 – Діаграма розрахованого прискорення при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$

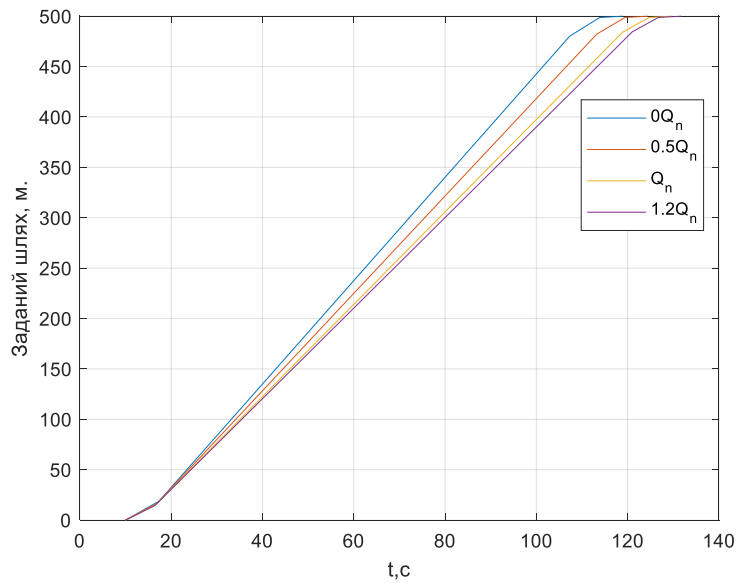


Рисунок 2.10 – Діаграма пройденого шляху в залежності від завантаження кліті

Згідно з рис. 2.7-2.10 та табл. 2.2 оцінено поведінку системи при врахуванні лише швидкості без врахування точності позиціонування кліті. Максимальна швидкість кліті залишається пропорційною завантаженню, однак час досягнення платформи змінюється значніше. Наприклад, при $1.2Q_n$ час збільшується до 121.728 секунд. Незважаючи на це, прискорення залишається сталим 0.7 м/с^2 , що відповідає безпечним нормам. Проте значне відхилення за точністю $>1\%$ вказує на необхідність додаткових заходів для коригування руху кліті. Незважаючи на збільшення похибки по шляху, даний параметр ще є в межах допустимих значень, що свідчить про точне доходження кліті до установленого маршруту.

Шлях, який необхідно подолати з цією швидкістю знайдемо відповідно із різниці відстаней пройдених кліттю згідно з табл. 2.2, де:

$$\Delta h = (h_{1_nom} + h_{2_nom}) - (h_{1_при_jQ_n(v)} + h_{2_при_jQ_n(v)}), \quad (2.48)$$

де j – прийняте завантаження кліті в даний момент часу

v – значення пройденого шляху при досліді зміни швидкості руху

$$h_{2_при_jQ_n} = h_{2_nom} \pm \Delta h \quad (2.49)$$

Значення h_3 визначається в залежності скільки необхідно дійти відстані в даній ситуації, формули часу не змінюються:

$$h_3 = H_{ш} - h_1 - h_2 - h_4 \quad (2.50)$$

Згідно з рівняннями 2.59-2.61, встановлено, що при навантаженні кліті на рівні 1.2 від номінального значення вона прибуває швидше до точки, де розміщена магнітна мітка на 0.58 метра, а при порожній кліті не доїжджає 3.7 метрів. Для компенсації цих відхилень необхідно забезпечити рух на відповідних ділянках.

Таблиця 2.3 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження та точки початку гальмування підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях з максимальною швидкістю, м.	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., х · раз
1.2Q _n	4.494	469.498	121.599	2.88
Q _n	4.583	468.919	119.691	0.01
0.5Q _n	4.832	467.244	114.783	8.389
0Q _n	5.127	465.148	109.659	18.87

Продовження таблиці 2.3

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, м / с ²	Похибка по часу, %
1.2Q _n	0.7	1.6
Q _n	0.7	0
0.5Q _n	0.7	4.1
0Q _n	0.7	8.4

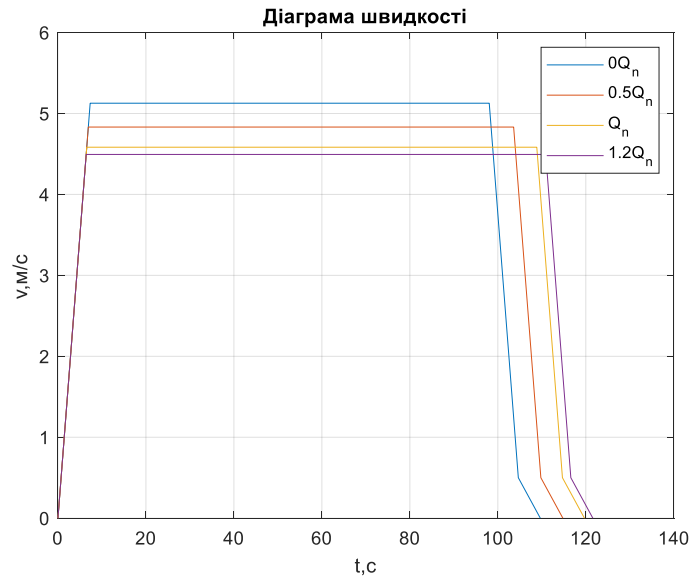


Рисунок 2.11 – Діаграма швидкості при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ з компенсацією відхилень по шляху

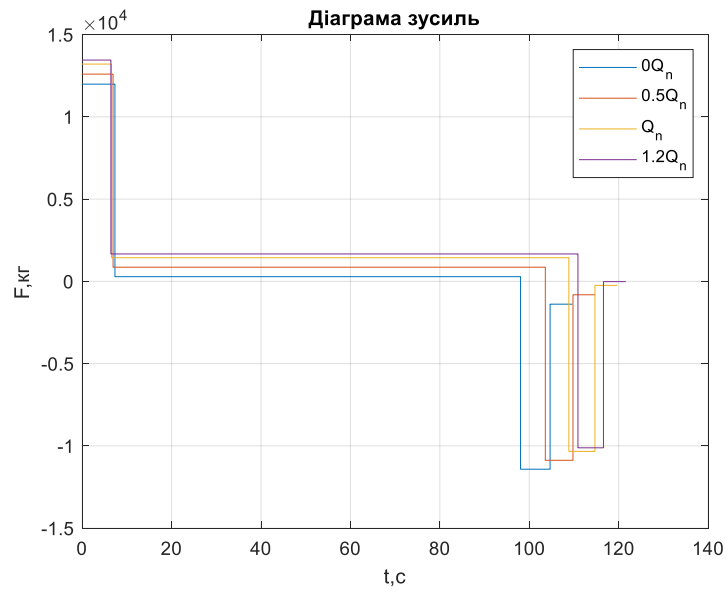


Рисунок 2.12 – Діаграма зусиль при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ з компенсацією відхилень по шляху

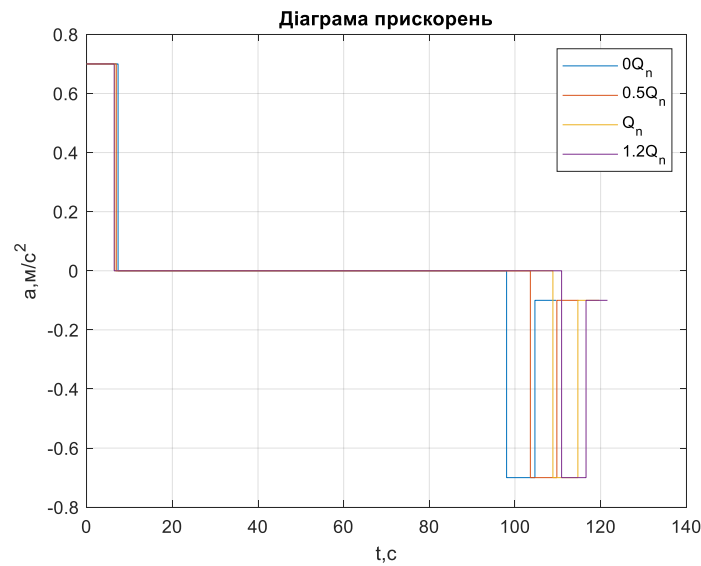


Рисунок 2.13 – Діаграма прискорень при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ з компенсацією відхилень по шляху

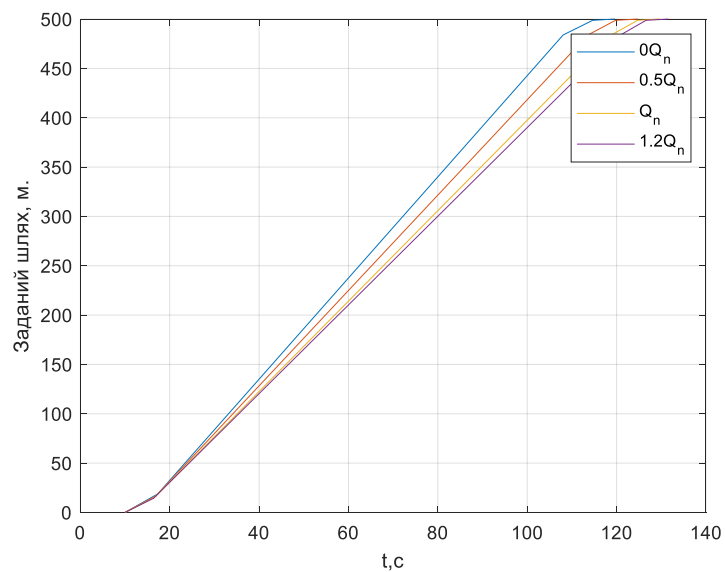


Рисунок 2.14 – Діаграма шляху при варіації завантаження від $0Q_n$ до $1.2Q_n$ з компенсацією відхилень по шляху

Згідно з рис. 2.11 та табл. 2.3 враховано компенсацію відхилень за рахунок адаптації швидкості на фінальному етапі руху. Це дозволило значно знизити похибки позиціонування до 0.01% при Q_n . Проте для пустої кліті $0Q_n$ похибка за часом досягає 8.4%, що впливає на продуктивність системи

під час постійного використання. Отримані дані вказують на доцільність впровадження методів точного гальмування або використання додаткових технологій, таких як магнітні мітки, для зменшення відхилень у часі та позиціонуванні.

Для компенсації похибки можна впровадити систему керування, що використовує магнітні мітки, розміщені на канаті. Ці мітки спрацюватимуть при досягненні певної довжини канату, що відповідає визначеній точці початку гальмування. Мітки фіксуються на канаті у момент, коли кліть у звичайному режимі досягає цієї точки. Альтернативно, система може відстежувати кількість обертів барабана, які відповідають пройденій кліттю дистанції до точки гальмування в номінальному режимі. Під час цього процесу система аналізуватиме отримані дані та оброблятиме їх за допомогою математичних функцій, щоб забезпечити точну корекцію руху кліті та мінімізувати похибку під час роботи.

Сумуючи попередні дослідження, бачимо, що отримані результати показали, що компенсація похибок шляхом усунення періоду дотягування є найбільш ефективним підходом для підвищення точності позиціонування кліті. Отримані результати дослідів дають можливість дотримуватися вимог електроприводу та обрати елементи електромеханічної системи.

Було визначено, що пройдений шлях кліті змінюється залежно від навантаження і коливається від 14.247 м для максимального навантаження до 18.597 м для порожньої кліті.

Час руху кліті від нижнього до верхнього положення визначався залежно від завантаження. Максимальний час підйому для $1.2Q_n$ становив 121.728 с, тоді як для порожньої кліті цей час скорочувався до 107.589 с.

Визначення похибок по шляху та часу дозволило встановити, що точність розрахунків знаходиться в межах 0.447% до 0.695% в залежності від навантаження. Це дозволяє зробити висновок про достатню точність

отриманих результатів, що забезпечує ефективність використання розрахункових методів для проектування шахтних підйомних установок.

Отримані дані та теоретичні висновки стали основою для подальших моделювань у третьому та четвертому розділах, що дозволило порівняти розрахункові та модельовані значення і оцінити ефективність запропонованої системи управління підйомною установкою.

Технічні параметри двигуна 4АН355М2У3, коли статор зібрано за схемою "зірка", наведено в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технічні параметри двигуна 4АН355М2У3 [13,14]

Потужність електродвигуна за паспортними даними	$P_{2n} = 400 \text{ кВт}$
Номинальна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Робоча кількість пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 2.85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Ефективність електродвигуна (ККД)	$\eta = 0.95$
Коефіцієнт ефективної потужності	$\cos \varphi = 0.92$
Гранична пропускна спроможність	$\lambda = 2.1$
Оптимальний показник ковзання	$s_n = 0.001$
Стандартна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Величини, які необхідні для розрахунку основних критеріїв Г-подібної структури	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}_1' = 0.063$
Активний опір статора	$\bar{R}_1' = 0.013$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}_2'' = 0.11$
Приведений активний опір ротора	$\bar{R}_2'' = 0.01$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 5.6$

2.4 Обчислення параметрів електродвигуна [15]

Кутова частота зміни напруги статора набуває значення:

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.} \quad (2.51)$$

Обертова швидкість двигуна в холостому ході:

$$\omega \omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n)_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104.67 \text{ рад/с.} \quad (2.52)$$

Швидкість, з якою двигун працює:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 104.67 \cdot (1 - 0.005) = 104.14 \text{ рад/с.} \quad (2.53)$$

Обертовий момент за умов номінального режиму експлуатації

$$M_n = P_{2n} / \omega_n = 400000 / 104.14 = 5377.2 \text{ Н} \times \text{м.} \quad (2.54)$$

Піковий момент двигуна при допустимих умовах експлуатації

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.6 \cdot 5377.2 = 13981 \text{ Н} \times \text{м.} \quad (2.55)$$

Фазова напруга і струм статора при оптимальних умовах експлуатації:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В,} \quad (2.56)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{560000}{3 \cdot 220 \cdot 0.958 \cdot 0.85} = 1042 \text{ А.} \quad (2.57)$$

Максимальні значення фазної напруги і струму статора

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В,} \quad (2.58)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 1042 = 1473.6 \text{ А.} \quad (2.59)$$

Найвище значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу

$$\psi_{1XX} = U_{na} / \omega_{0n} = 311 / 314 = 0.99 \text{ Вб.} \quad (2.60)$$

2.4.1 Обчислення елементів заміщення для конструкції Т-подібній формі.

Модель АД було створено з урахуванням розрахункових параметрів з Г-подібної схеми (рис. 2.15) в Т-подібну (рис. 2.16):

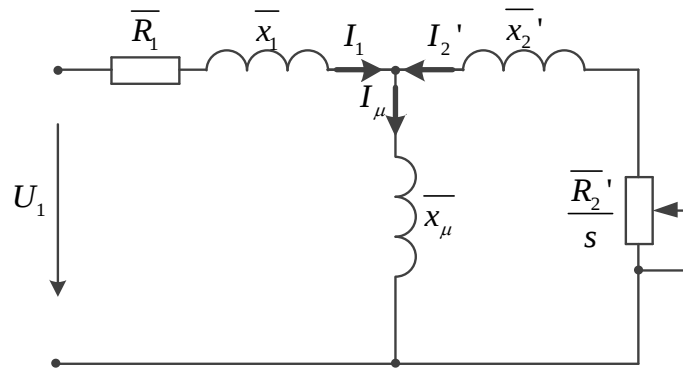


Рисунок 2.15 – Заміщувальна схема асинхронного двигуна у Т-подібній конфігурації

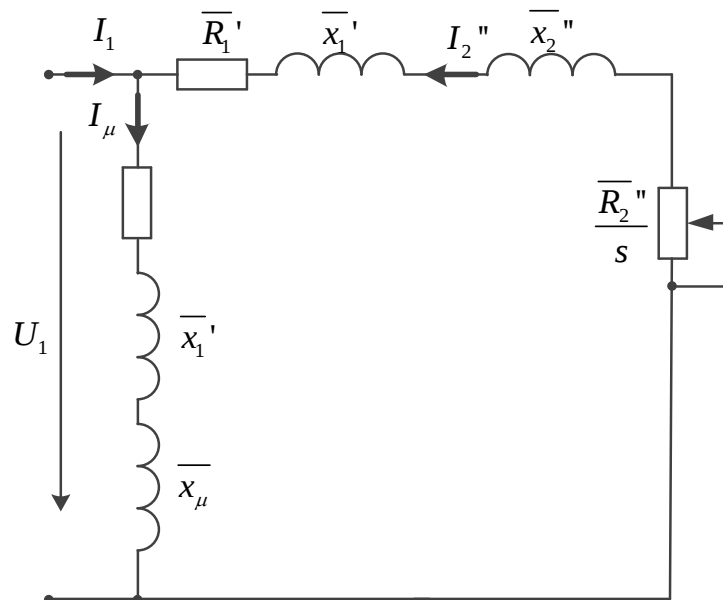


Рисунок 2.16 – Еквівалентна схема асинхронного двигуна з Г-подібною конфігурацією

Значення коефіцієнта для конвертації від Т-подібної до Г-подібної еквівалентної схеми дорівнює:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1' \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{5.6 + \sqrt{5.6^2 + 4 \cdot 0.063 \cdot 5.6}}{2 \cdot 5.6} = 6.11. \quad (2.61)$$

Величини відносних параметрів для Т-подібної схеми заміщення становлять:

$$\overline{\overline{x_1}} = \frac{\overline{\overline{x_1}}}{c_1} = \frac{0.063}{6.11} = 0.01, \quad (2.62)$$

$$\overline{\overline{R_1}} = \frac{\overline{\overline{R_1}}}{c_1} = \frac{0.013}{6.11} = 0.01, \quad (2.63)$$

$$\overline{\overline{x_2}} = \frac{\overline{\overline{x_2}}}{c_1^2} = \frac{0.011}{6.11^2} = 0.0003, \quad (2.64)$$

$$\overline{\overline{R_2}} = \frac{\overline{\overline{R_2}}}{c_1^2} = \frac{0.01}{6.11^2} = 0.0003. \quad (2.65)$$

Величини абсолютних параметрів для Т-подібної заміщувальної схеми приймають вигляд:

$$x_1 = \overline{\overline{x_1}} \frac{U_n}{I_n} = 0.01 \cdot \frac{220}{693.43} = 0.003 \text{ Ом}, \quad (2.66)$$

$$R_1 = \overline{\overline{R_1}} \frac{U_n}{I_n} = 0.0021 \cdot \frac{220}{693.43} = 0.0007 \text{ Ом}, \quad (2.67)$$

$$x_2 = \overline{\overline{x_2}} \frac{U_n}{I_n} = 0.0029 \cdot \frac{220}{693.43} = 0.0009 \text{ Ом}, \quad (2.68)$$

$$R_2 = \overline{\overline{R_2}} \frac{U_n}{I_n} = 0.003 \cdot \frac{220}{693.43} = 0.0009 \text{ Ом}, \quad (2.69)$$

$$x_\mu = \overline{\overline{x_\mu}} \frac{U_n}{I_n} = 5.6 \cdot \frac{220}{693.43} = 1.77 \text{ Ом}. \quad (2.70)$$

Показники розсіювальних індуктивностей статора та ротора дорівнюють:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.0033}{314} = 0.00001 \text{ Гн}, \quad (2.71)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_0} = \frac{0.0009}{314} = 0.000003 \text{ Гн}. \quad (2.72)$$

Індуктивна дія намагнічуючого контуру становить:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{1.77}{314} = 0.0057 \text{ Гн.} \quad (2.73)$$

Індуктивні параметри статора і ротора розраховуються:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0057 + 0.00001 = 0.0057 \text{ Гн}, \quad (2.74)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0057 + 0.000003 = 0.0057 \text{ Гн.} \quad (2.75)$$

Використовуючи попередні розрахунки, обраховуємо останні параметри схеми заміщення $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.00008}{0.0057} = 0.015 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.76)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0007}{0.0057} = 0.12 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.77)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0057 \left(1 - \frac{(0.0057)^2}{0.0057 \cdot 0.0057} \right) = 0.00001 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.78)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0.0057}{0.0057 \cdot 0.000013} = 74640 \frac{1}{\text{Гн}}, \quad (2.79)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0007}{0.00001} + 0.015 \cdot 0.0057 \cdot 74640 = 57.74 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.80)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0057}{0.0057} = 1.4992. \quad (2.81)$$

Таблиця 2.5 – Розраховані параметри двигуна 4АН355М2У3 для моделювання режимів роботи

$P_{2n}, \text{кВт}$	400	$R_1, \text{Ом}$	0.0007
$\omega_{xx}, \text{рад/с}$	157	$R_2', \text{Ом}$	0.00009
$\omega_n, \text{рад/с}$	155.43	$L_1, \text{Гн}$	0.0057
$M_n, \text{Н} \times \text{м}$	2573.5	$L_2, \text{Гн}$	0.0057
$M_k, \text{Н} \times \text{м}$	5404.4	$L_m, \text{Гн}$	0.0057
λ	2.1	$\alpha, \text{Ом/Гн}$	0.015
$I_{na}, \text{А}$	980.66	$\alpha_1, \text{Ом/Гн}$	0.12
$\psi_{1xx}, \text{Вб}$	0.99	$\sigma, \text{Гн}$	0.000013
η	0.95	$\beta, 1/\text{Гн}$	74640
$\cos\varphi$	0.92	$\gamma, \text{Ом/Гн}$	56.74
$J_d, \text{кг} \times \text{м}^2$	2.85	μ_1	1.4992

Розрахунок загального моменту інерції механізму є необхідним для виконання досліджень, він включає момент інерції редуктора, барабана та двигуна. Вважатимемо, що моменти редуктора та барабана дорівнюють інерційному моменту двигуна $J_6 = J_p = J_d = 2.85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Для обчислення загального моменту інерції механізму, приведенного до валу двигуна, розрахуємо за наступною формулою:

$$J_{\Sigma} = J_d + J_p + \frac{J_6}{i_p^2} + Q_k \cdot \frac{D_6^2}{4i_p^2} = 2.85 + 2.85 + \frac{2.85}{135^2} + 4780 \frac{4^2}{4 \cdot 135^2} = 6.79 \text{ кг} \times \text{м}^2. \quad (2.82)$$

Висновки до другого розділу:

Виконано дослідження параметрів руху при умовах змінного навантаження, а також проаналізовано різні методи корекції руху для забезпечення точності позиціонування.

Проведено декілька дослідів для вибору оптимального варіанту роботи підйомної установки.

Розраховано параметри двигуна і параметри електромеханічної системи, проведено дослідження характеру зміни характеристик руху кліті в залежності від зміни навантаження та характеристик руху в процесі відпрацювання циклу підйому.

Досягнуті результати дають можливість провести оцінку показників руху підйомної установки при порівнювальному аналізі з наступними результатами моделювання електромеханічної системи.

3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Загальна функціональна схема асинхронного електроприводу.

На рис. 3.1 представлена функціональна схема з перетворювачем частоти для асинхронного електроприводу [16]. Основним компонентом є перетворювач частоти, що здійснює перетворення та керування, як і в класичних електроприводах. Цей пристрій об'єднує функції перетворювача і контролера, що забезпечує високу ефективність та гнучкість роботи приводу, дозволяючи точно регулювати швидкість і момент обертання шляхом контролю параметрів електричної енергії.

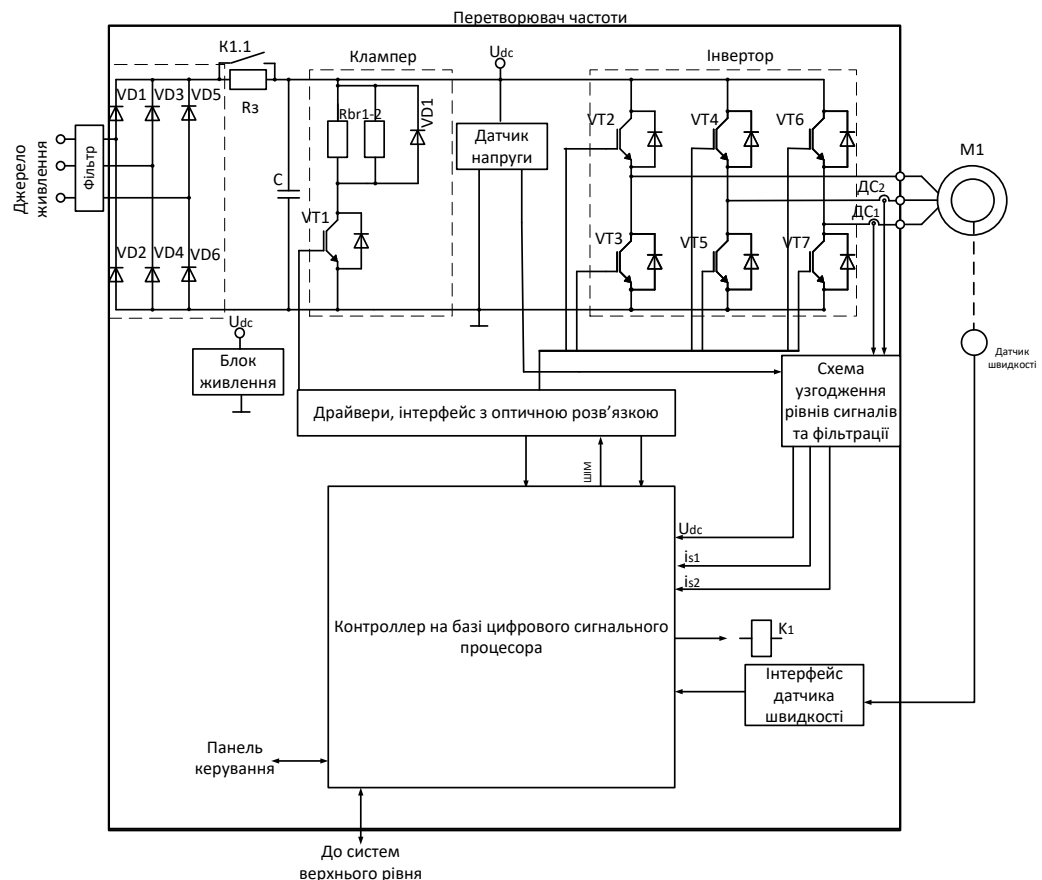


Рисунок 3.1 – Функціональна схема з перетворювачем частоти для асинхронного електроприводу.

Елементи, які входять до даної схеми виконують такі функції:

Фільтр і варистор є частинами вхідного фільтра. Використовують фільтр для вирівнювання постійного струму, компенсуючи більшість нестабільних коливань в напрузі. Варистор спрацьовує при перевищенні допустимого значення напруги, виконуючи роль запобіжника, пропускаючи струм в такій величині, щоб зменшити напругу до допустимого значення, після стабілізації напруги, варистор закривається і далі схема працює в звичайному режимі.

Змінна напруга мережі перетворюється на постійну за допомогою випрямляча.

Для зниження шумів на виході, ємнісні елементи стабілізують постійну напругу, що генерується випрямлячем.

Резистор і реле в зарядному колі забезпечують поступове заряджання фільтрувальної ємності випрямляча при забезпеченні енергією перетворювача. Коли заряджання завершується, контактне реле K1.1 перемикається в закриті положення, що дає змогу завершити цей етап. Резистор R3 обмежує струм під час заряджання, а реле K1 контролює перехід від процесу зарядки до робочого стану.

використовується для Клампери часто застосовуються у схемах живлення, телекомунікаційних системах і різних електронних пристроях для стабілізації та регулювання рівня напруги.

Клампер використовується для зміщення рівня напруги сигналу до певного фіксованого значення. Це дозволяє змінювати постійний компонент сигналу, не змінюючи його форми.

Інвертор здійснює перетворення постійний струм на змінний виході перетворювача.

Датчик напруги призначений для вимірювання величини електричної напруги в електричній схемі або системі. Він перетворює електричну напругу на сигнал.

Датчики струму використовується для вимірювання величини електричного струму в провіднику або електричній схемі. Він перетворює величину струму на зручний для подальшої обробки сигнал, який може бути використаний для моніторингу, контролю або захисту електричних систем.

Датчик швидкості призначений для вимірювання кутової швидкості руху об'єкту. Він може використовуватися для визначення швидкості обертання валів, транспортних засобів, механізмів та інших об'єктів, що рухаються.

3.2 Аналіз та обчислення компонентів, що належать до силової частини

На основі параметрів, розрахованих за формулами 2.58, 2.59 виконуємо обрахунки та обираємо обладнання для даного двигуна.

Перевантажувальна здатність електроприводу зазначає, коефіцієнт перевантаження підйомної установки становить $k_{pl} = 2$

3.2.1 Визначення значень для інвертора напруги

Формула для розрахунку значення максимального струму в системі дорівнює:

$$I_{max} = k_{pl} I_{na} = 2 \cdot 980.66 = 1961.3 \text{ A.} \quad (3.1)$$

Напруга постійного струму визначається з урахуванням трьохфазної системи підключення до джерела живлення.

$$U_{dcn} = U_{bt} = 540 \text{ В.} \quad (3.2)$$

Визначення відповідного IGBT транзистора для інвертора розраховується для значень напруги, яка варіюється в діапазоні $U_{dc\max} = (1.1 \div 1.2)U_{bt}$ і дорівнює та приймає значення:

$$U_{dc\max} = 750 \text{ В.} \quad (3.3)$$

Інверторний IGBT транзистор необхідно обирати із значеннями напруги, які 1.5 чи більше разів, так як в системі при пуску можуть бути скачки напруги:

$$U_{ce} = 1.5U_{dc\max} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В.} \quad (3.4)$$

Вибір IGBT транзистора має приймати значення не менше розрахованих:

$$I_c > 1961.3, U_{ce\max} > 1125, \quad (3.5)$$

де I_c та $U_{ce\max}$ – струм і напруга колектора.

Для вибору транзистора, необхідно звернутися до каталогу, в якому був обраний IGBT типу FZ1600R17KE3NOSA1 [17] з характеристиками $U_{ce\max} = 1700 \text{ В}$, $I_c = 2300 \text{ А}$, Для коректної роботи системи необхідно обрати 4 транзисторів цього типу. Рисунок 3.2 демонструє IGBT транзистор з назначеними входами і виходами:

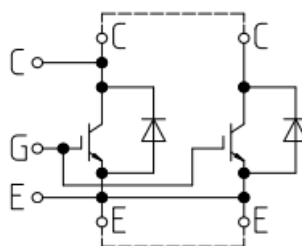


Рисунок 3.2 – Транзистор FZ1600R17KE3NOSA1

3.2.2 Фільтрація з використанням ємнісного елемента

Величина випрямленого струму визначається за розрахунком наступних параметрів:

$$I_{dc} = \frac{k_{ov1} P_n}{U_{dcn} \eta_{inv}} = \frac{2 \cdot 400000}{540 \cdot 0.95 \cdot 0.95} = 1641.5 \text{ A}, \quad (3.6)$$

де η_{inv} – Рівень продуктивності перетворювача.

Значення еквівалентного опору для розрахунку випрямляча становить:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{1641.5} = 0.329 \text{ (Ом)}. \quad (3.7)$$

Величина ємності електролітичного конденсатора випрямляча обчислюється за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 0.329} = 64.53 \text{ мФ}, \quad (3.8)$$

де k_p – величина симетричних прямокутних імпульсів напруги, m – кількість фаз випрямляча.

Згідно із розрахованих параметрів, обрано Алюмінієвий електролітичний конденсатор типу 500C653U063DJ2B з ємністю 65 мФ. Для цього вибору необхідно три таких конденсатори, з'єднаних послідовно[18].

3.2.3 Обчислення компонентів клампера

Обрахуємо струм гальмівного резистора:

$$I_{BR} = \frac{P_{2n}}{U_{dcn}} = \frac{400000}{540} = 740.74 \text{ A}. \quad (3.9)$$

Згідно з обрахованими параметрами струму приймемо діод до клампера SKR 46 ST з номінальними параметрами 1500 А та 400-2200 В. Для повноцінного функціонування схеми необхідно придбати 6 діодів для випрямляча з такими параметрами [19].

Наступним кроком є обчислення середньої потужності, яка гаситься на резисторі, враховуючи, що генераторний режим займає 25% від загального часу циклу, то:

$$P_{cp} = 0.25 P_n = 0.25 \cdot 400000 = 100000 \text{ Вт}. \quad (3.10)$$

Величина опору резистора клампера визначається за формулою:

$$R_{BR} = \frac{P_{cp}}{I_{BR}^2} = \frac{100000}{740.74^2} = 0.18 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

Згідно до цього обираємо резистор з мінімальним опором в 0.5 Ом R2-250B10 [20], таких резисторів необхідно обрати 2, щоб досягти необхідний опір в розмірі 0.18 Ом (~0.25).

3.2.4 Визначення параметрів для датчиків струму і напруги

Купуючи та визначаючи датчики для роботи необхідно взяти при виборі максимальний можливий струм. Для реалізації роботи необхідно 2 датчики струму AI-P1A, за параметрами максимального вихідного струму інвертора $I_{max}=1961.3\text{A}$. [21] Приймаємо номінальний струм 2000 А з діапазоном вимірювання 6000 А.

Для виміру напруги вибрали датчик напруги DVM 2000-B з параметром номінальної напруги 2 кВ і здатністю вимірювати напругу в зоні 3 кВ [22].

Максимальний струм датчика напруги взятий із документації дорівнює $I_{pmax} = 27\text{мА}$ необхідний для розрахунку опору R1:

$$R_1 = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = \frac{750}{27 \cdot 10^{-3}} = 27.8 \text{ кОм.} \quad (3.12)$$

Обираємо резистор згідно з обрахованими параметрами PTF6527K800FZEB на 27.8 кОм [23].

3.2.5 Визначення характеристик для датчиків

Вибрано до складу енкодер MCP2122T-E/SN [24] для виміру швидкостей в малому діапазоні.

Для загального перетворювача частоти, що відповідає обчисленим параметрам схеми, обрано перетворювач потужністю 400 кВт, з напругою 380 В і струмом 691 А – модель ETI CFW11 H 877 [25].

3.3 Опис асинхронного двигуна через математичний двохфазний простір (a-b) (d-q)

Опис асинхронного двигуна здійснюється за літературою наведеною в [15].

Для побудови моделі управління асинхронними двигунами в стаціонарній системі координат (a-b) використовуються наступні рівняння для моделювання двигуна в системі:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) - \nu \omega, \\ M &= \mu (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \\ \dot{i}_a &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \dot{i}_b &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}.\end{aligned}\tag{3.13}$$

де ω – кутова швидкість ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти струму, що проходять через статор та їхня інтерпретація у системі координат (a - b), $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – векторні складові роторного потокозчеплення, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – векторна репрезентація елементів напруги, що впливають на статор, M_c – тяговий момент, ν – коефіцієнт в'язкого тертя. Величини електричних та механічних

параметрів асинхронного двигуна, які мають сталі додатні значення, обчислюються за відповідними рівняннями:

$$\begin{aligned}\sigma &= L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right), \\ \beta &= \frac{L_m}{L_2 \sigma}, \\ \mu &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \\ \alpha &= \frac{R_2}{L_2}, \\ \gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta,\end{aligned}\tag{3.14}$$

де J – сумарний момент інерції, R_1 і R_2 – реальний опір статора та ротора, L_1 і L_2 – реальний індуктивний опір статора та ротора, L_m – опір, зумовлений взаємною індуктивністю між обмотками статора та ротора, p_n – кількість пар магнітних полюсів.

Часто для створення алгоритмів векторного керування застосовують синхронну систему координат (d-q), що обертається зі швидкістю ω_0 відносно стаціонарної системи, зображено на рис. 3.3.

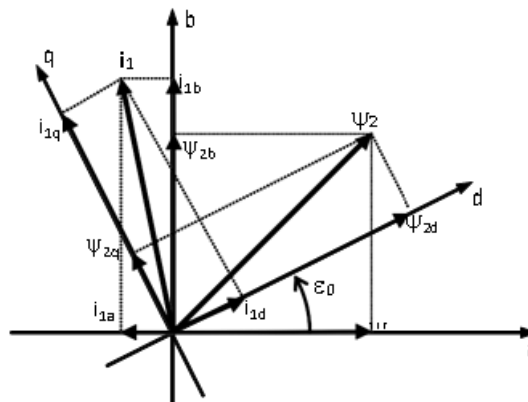


Рисунок 3.3 – Векторне представлення асинхронного двигуна

Зміна системи відліку обумовлює координатні перетворення, які формулюються наступним чином:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(d-q)} &= e^{-j\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(a-b)} \\ \mathbf{x}^{(a-b)} &= e^{j\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(d-q)}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$e^{j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & -\sin\varepsilon_0 \\ \sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix}; e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & \sin\varepsilon_0 \\ -\sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

де x_{yz} векторне представлення роботи для інтерпретації таких двовимірних параметрів, як напруга, потік і статорний струм., ε_0 – кутова орієнтація системи координат (d – q) відносно стаціонарної системи (a – b).

Дані перетворення допомагають встановити траєкторію кутової швидкості та потоку зв'язку для асинхронного двигуна, а також використовуються для оптимізації керування двигуном на основі параметрів, які враховують взаємодію між статором і ротором.

Виходячи з моделі, наведеній у формулі (3.13), проблема досягнення бажаних значень траєкторії виникає при обчисленні керувальних сигналів для досягнення оптимальних результатів.

I. Струми через обмотки статора і кутову швидкість ротора можливо виміряти. Дані про ці величини можна отримати шляхом аналізу результатів вимірювань.

II. Параметри асинхронного двигуна мають сталі значення. Вони відомі та незмінні протягом усього періоду експлуатації.

III. Незважаючи на те, що момент навантаження M_c невідомий, він зберігає свої властивості, залишаючись сталим та має певні межі за які він не може вийти.

IV. Кутова швидкість ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ мають траєкторії, що задаються функціями з обмеженими першими та другими похідними по

часу та має певні межі. Коли наявні обмеження вводяться алгоритми прямого і непрямого векторного керування.

Алгоритми векторного керування зазвичай створюються у два етапи на основі вимірних виходів. Спочатку розробляється підсистема керування потокозчепленням, потім – підсистема керування швидкістю. Для обох етапів використовується метод зворотного покрокового проектування.

На першому етапі створюють підсистему керування потокозчепленням для досягнення потрібного розподілу струмів статора, що визначає необхідну форму магнітного потоку в роторі. Для цього застосовуються алгоритми, такі як пропорційно-інтегральні регулятори, що забезпечують стабільність та точність системи.

На другому етапі створюють підсистему керування швидкістю, щоб досягти бажаної кутової швидкості ротора. Для цього використовуються алгоритми, що враховують динамічні характеристики системи та забезпечують швидке реагування на зміни швидкості. Використовуються ПІД-регулятори або алгоритми, які автоматично коригують параметри залежно від змін у зовнішніх умовах або роботі двигуна.

3.4 Алгоритм непрямого векторного керування організований за такою схемою [15]:

- Відкритий регулятор модуля потокозчеплення змінює амплітуду та фазу струмів статора, щоб досягти потрібного значення модуля потокозчеплення. Цей процес реалізується через наступні рівняння:

$$\begin{aligned} i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \\ i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi,$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ – бажане значення модуля вектора потокозчеплення ротора, а його перші та другі похідні враховуються відповідно. Зазначений параметр ϕ , що є робастним зв'язком, буде визначений пізніше, і використовується для забезпечення стабільної роботи системи керування в стандартних умовах, навіть за умов зовнішніх впливів і невизначеностей.

- Визначення регулятора струму по осі d передбачає обчислення коефіцієнта зворотного зв'язку, який коригує струм в напрямку осі d. Цей коефіцієнт дозволяє досягти високої точності та стабільності в процесі управління струмом на відповідній осі, забезпечуючи ефективне і точне керування параметрами асинхронного двигуна. Регулятор враховує зміни в струмі та коригує його таким чином, щоб система підтримувала задані характеристики роботи двигуна, зберігаючи стабільність та надійність при змінних навантаженнях:

$$u_{1d} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d} - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d), \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_{1d},$$

де $\tilde{i}_{1d} = i_{1d} - i_{1d}^*$ – відхилення струму по осі d від заданого значення свідчить про точність роботи регулятора. Складова напруги статора по осі d визначається через коефіцієнти пропорційної та інтегральної частин регулятора струму.

- Розрахунок регулятора кутової швидкості реалізується для досягнення оптимального керування швидкістю ротора, забезпечуючи стабільність і точність на всіх етапах роботи системи. Він коригує відхилення між заданою та фактичною кутовою швидкістю, гарантуючи швидку реакцію системи на зміни в навантаженні. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу асинхронного двигуна при різних умовах експлуатації, зберігаючи високу точність управління швидкістю та мінімізуючи коливання:

$$\begin{aligned}
i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} (-k_{\omega}\tilde{\omega} + \hat{M}_c + v\omega^* + \dot{\omega}^*), \\
\hat{M}_c &= -k_{\omega i}\tilde{\omega}, \\
\dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} \left[-k_{\omega}(k_{\omega}\tilde{\omega} + \mu\psi^*\tilde{i}_q) + \hat{M}_c + v\dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*,
\end{aligned} \tag{3.19}$$

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – значення кутових швидкостей і її похідних. Дана швидкість $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ використовується для оцінки неточності між реальною та заданою кутовою швидкістю ротора. При цьому пропорційний і інтегральний коефіцієнти регулятора кутової швидкості $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ відіграють ключову роль у забезпеченні точності керування.

Додатково здійснюється робота регулятора струму, який відповідає за стабільність і якісну роботу системи керування.

$$\begin{aligned}
u_{1q} &= \sigma(\gamma i_{1q}^* - \omega_0 i_{1d} - \omega p_n \beta \psi^* + \dot{i}_q^* - k_{iq}\tilde{i}_q - x_q), \\
\dot{x}_q &= k_{ii}\tilde{i}_q,
\end{aligned} \tag{3.20}$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму, враховується під час аналізу системи керування.

На обмотки статора подаються вже реальні значення напруги і визначаються за наступним виразом:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \tag{3.21}$$

У даному алгоритмі значення інтегрального компонента нехтуємо і за рахунок цього отримуємо у рівняннях кутової швидкості додаткові параметри, які являються відмінністю від алгоритму, описаного в рівняннях 3.22 – 3.25.

Робастний векторний алгоритм керування складається з таких основних компонентів:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*),$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \ddot{\psi}^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.22)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\psi^*} + \frac{1}{\psi^*} \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d,$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ - величина потокозчеплення ротора і його похідних використовуються для забезпечення точного керування.

Регулятор струму в статорі по осі d обчислюється за допомогою формули:

$$u_{1d} = \sigma (\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d), \quad (3.23)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – відхилення струму вздовж осі d, u_{1d} напруга статора вздовж осі d, $k_i > 0$ – пропорційний коефіцієнт складової регулятора струму..

- Регулятор кутової швидкості описується і забезпечує точне управління кутовою швидкістю ротора, коригуючи її для досягнення бажаного значення в будь-який момент часу за даними рівняннями:

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega} + v \omega^*),$$

$$\hat{M}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \quad (3.24)$$

$$i_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} (-k \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + v \dot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q},$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ – задана кутова швидкість та її похідні, $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості.

- Регулятор струму по осі q визначається такими рівняннями:

$$u_{1q} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \omega_p n \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q), \quad (3.25)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_q,$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – відхилення струму по осі d, u_{1q} напруга статора по осі q.

У системах регулювання струмів і кутової швидкості для забезпечення необхідних значень ПІ-регулятори. Застосування ПІ-регуляторів дозволяє повністю компенсувати статичну похибку завдяки інтегральній складовій, тим часом за досить велику швидкодію відповідає пропорційна складова.

Визначимо значення коефіцієнтів для ПІ-регуляторів. Система підпорядкованого керування використовується для реалізації векторного керування. Підпорядкована системи з двох основних контурів: зовнішнього контуру регулювання швидкості та внутрішнього контуру регулювання струму.

З огляду на фізичні обмеження, пов'язані зі швидкодією роботи перетворювача частоти (ПЧ), встановлюємо $k_i = 700$. У той же час, з урахуванням неточностей механічних передач, $k_\omega = 150$. Де дані коефіцієнти являються пропорційними складовими по струму і швидкості відповідно.

ПІ-регулятор моделюється як система другого порядку з рівнянням, яке визначає основні динамічні властивості системи.

$$p^2 + k_p p + k_i = 0. \quad (3.26)$$

Альтернативно можна зобразити у вигляді, якщо враховувати фізичні значення:

$$p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 = 0, \quad (3.27)$$

де $k_i = \omega_0^2$, $k_p = 2\xi\omega_0$, ω_0 – власна частота недемпфованих коливань, де ξ – коефіцієнт демпфування.

З цього отримуємо:

$$\omega_0 = \sqrt{k_i} \quad \text{та} \quad \omega_0 = \frac{k_p}{2\xi}. \quad (3.28)$$

На основі рівнянь 3.28 отримуємо:

$$\sqrt{k_i} = \frac{k_p}{2\xi} \quad \text{і} \quad \xi = \frac{k_p}{2\sqrt{k_i}}. \quad (3.29)$$

Для визначення коефіцієнтів ПІ-регулятора застосовуються такі стандартні залежності:

Якщо $k_i = \frac{k_p^2}{2}$, то маємо $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ то отримаємо коливальний перехідний процес із незначним перегулюванням та підвищену швидкість реагування.

При умові, що $k_i = \frac{k_p^2}{4}$, то отримуємо $\xi = 1$ – перехідний процес є аперіодичним.

Під час моделювання роботи електропривода використовувалися наступні значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів [15]:

- для контролера швидкості – $k_\omega = 150$; $k_{i\omega} = \frac{k_\omega^2}{2}$;
- для контролера струму – $k_i = 700$; $k_{ii} = \frac{k_i^2}{2}$.

Схема непрямого векторного керування зображена на рисунку 3.4.

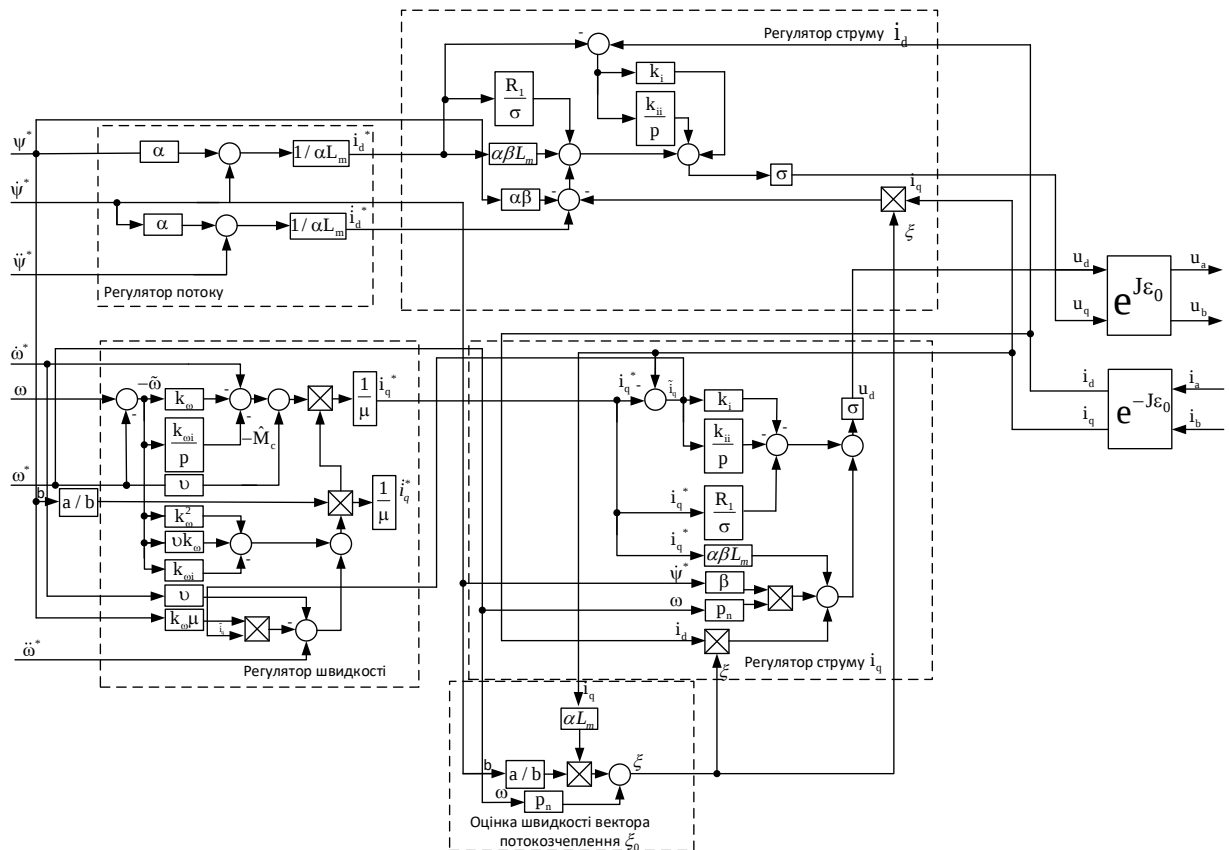


Рисунок 3.4 – Структура системи непрямого векторного керування

Висновок до третього розділу:

Розроблено математичний опис асинхронного двигуна в двофазному просторі a-b d-q, що забезпечує точність і ефективність керування.

У ході роботи створено модель керування, яка дозволяє адаптувати рух кліті залежно від навантаження, забезпечуючи стабільність роботи та точність зупинки. Це сприяє підвищенню енергоефективності та безпеки експлуатації установки.

Отримані результати дають можливість сформулювати аналітичну модель для дослідження перехідних процесів в межах пакету прикладних програм Matlab Simulink.

4 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІЗ РІЗНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ КЛІТІ

4.1 Розробка моделі ШПУ з використанням пакету прикладних програм Matlab Simulink

Для розрахунку величини динамічного моменту, необхідного для розгону, необхідно обрахувати параметри в рад/с. Спочатку обрахуємо кутове прискорення на першій ділянці

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\max} = \alpha_{\text{доп}} \cdot \frac{2i_p}{D_6 p_n} = 0.7 \cdot \frac{2 \cdot 42}{5 \cdot 3} = 3.92 \text{ рад/с}^2 \quad (0.1)$$

Розрахуємо значення динамічного моменту

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon_{\max} = 83.78 \cdot 3.92 = 328.4 \text{ Н} \times \text{м} \quad (0.2)$$

Динамічний момент на етапі розгону ШПУ буде набагато менший за критичний, тому необхідно перевірити, чи відповідає система вимогам по перевантажувальній здатності.

$$M_k = 13981 \text{ Нм} \Rightarrow M_{\text{дин}} = 328.4 \text{ Нм}. \quad (0.3)$$

Далі, для ділянки гальмування, визначимо значення прискорення, яке застосовується під час процесу дотягування.

$$\varepsilon_3 = \frac{(v_0 - v_{\max})}{t_3} \cdot \frac{2i_p}{D_6 p_n} = \frac{(0.5 - 6.22)}{4.09} \cdot \frac{2 \cdot 42}{5 \cdot 3} = -7.84 \text{ рад/с}^2 \quad (0.4)$$

Кутове прискорення під час дотягування:

$$\varepsilon_4 = \frac{(0 - v_0)}{t_4} \cdot \frac{2i_p}{D_6 p_n} = \frac{(-0.5)}{2.5} \cdot \frac{2 \cdot 42}{5 \cdot 3} = -1.12 \text{ рад/с}^2. \quad (0.5)$$

Траєкторія заданого кутового прискорення зображається на рисунку 4.1.

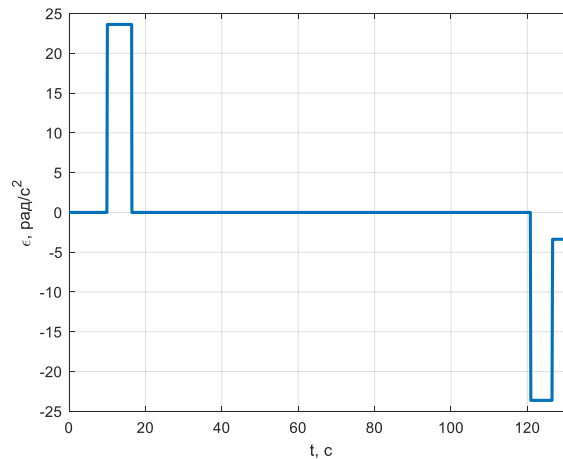


Рисунок 4.1 – Траєкторія руху вказаного прискорення обертання

Щоб реалізувати алгоритми частотного та векторного керування в матлабі, потрібно сформулювати оптимальне завдання для потоку ψ^* [15].

$$\psi^* = k_\psi \frac{L_m}{L_2} \psi_{1XX} = 0.95 \cdot 0.8661 \cdot 0.99 = 0.82 \text{ Вб}, \quad (0.6)$$

де k_ψ - обраний коефіцієнт потокозчеплення

Період часу обмотки статора для електродвигуна визначається за спеціальною формулою:

$$\tau_{RL} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0.1358 \cdot 10^{-3}}{0.274 \cdot 10^{-3}} = 0.55 \text{ с}. \quad (0.7)$$

Тривалість руху перехідного процесу $t_{\text{пн}} = 3 \cdot \tau_{RL}$. Враховуючи, що перехідний процес двигуна триває приблизно 1.65 секунди, це значення є важливим для оцінки стабільності роботи системи.

4.2 Модель у програмному забезпеченні Matlab

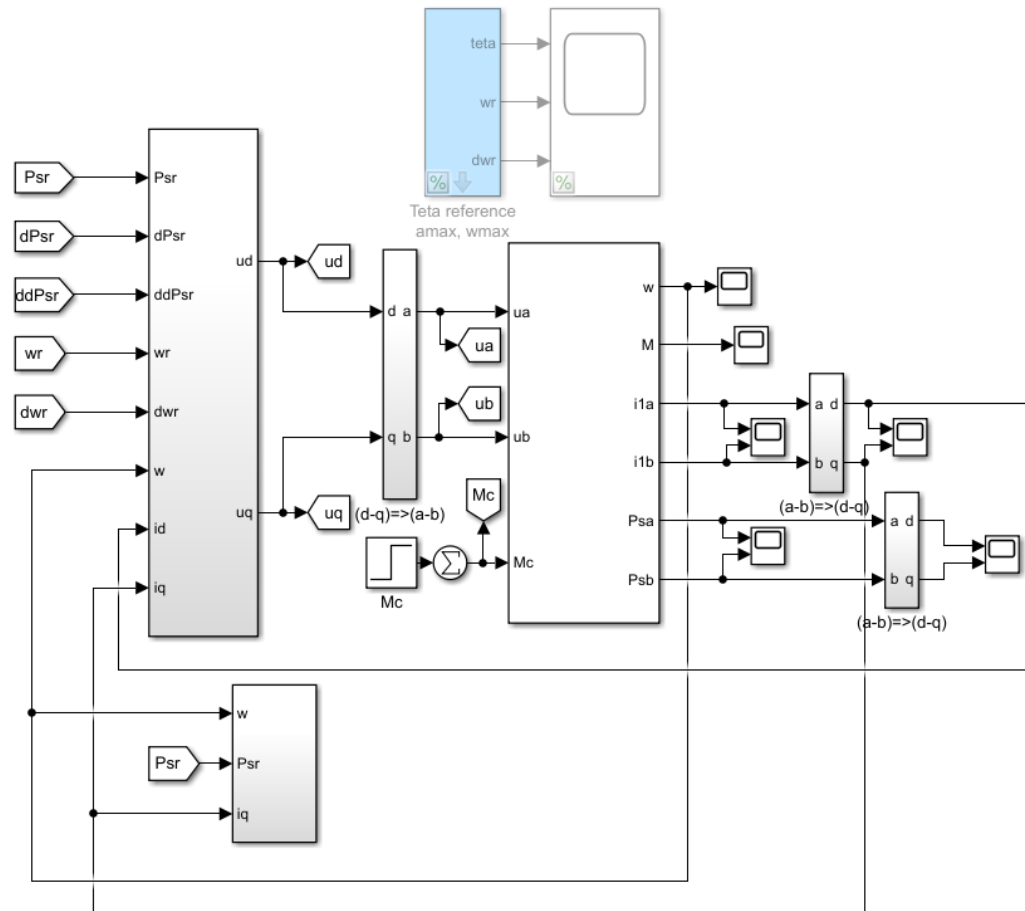


Рисунок 4.2 – Модельована схема керування шахтною підйомною установкою

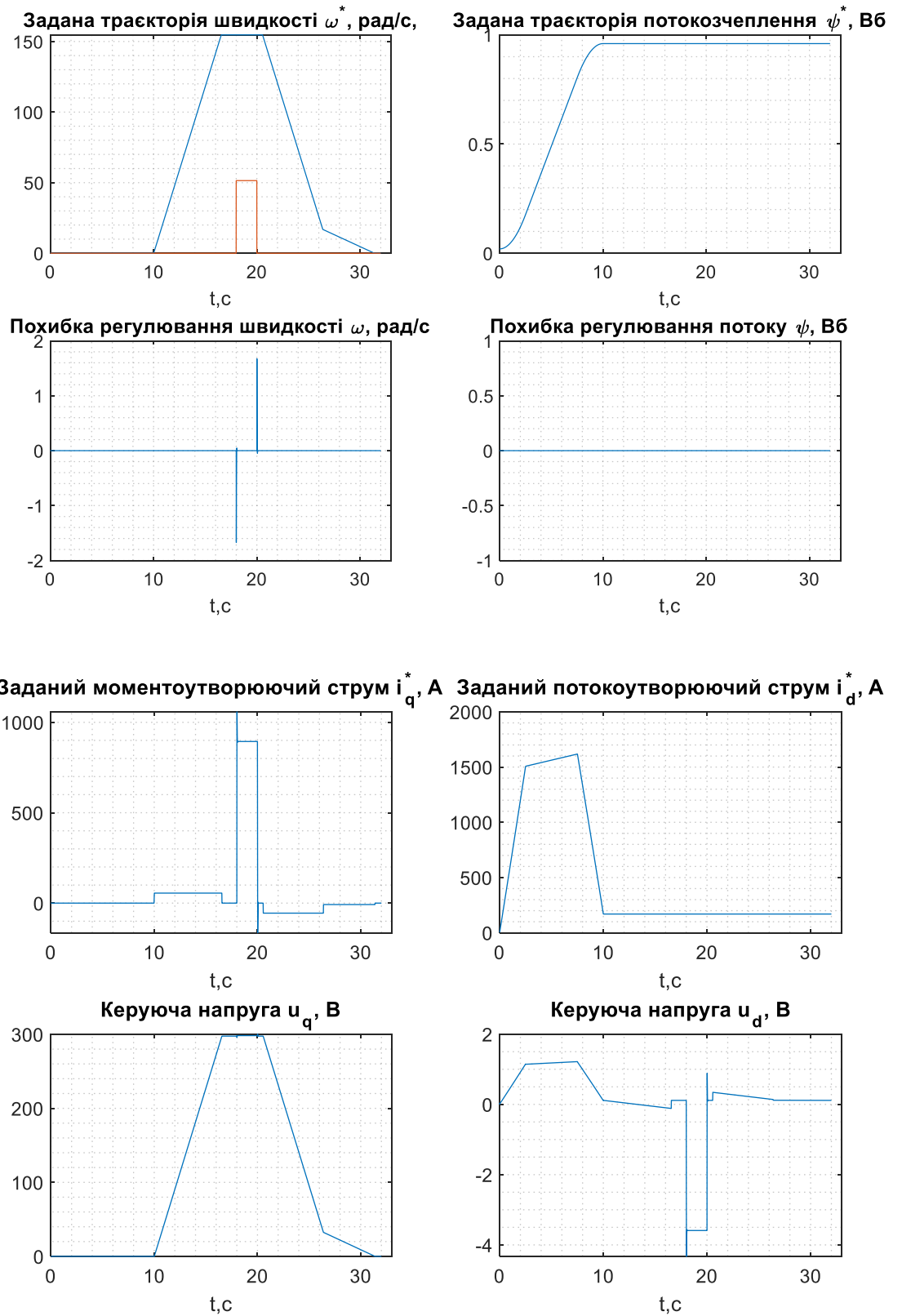


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси при номінальному завантаженні кліті

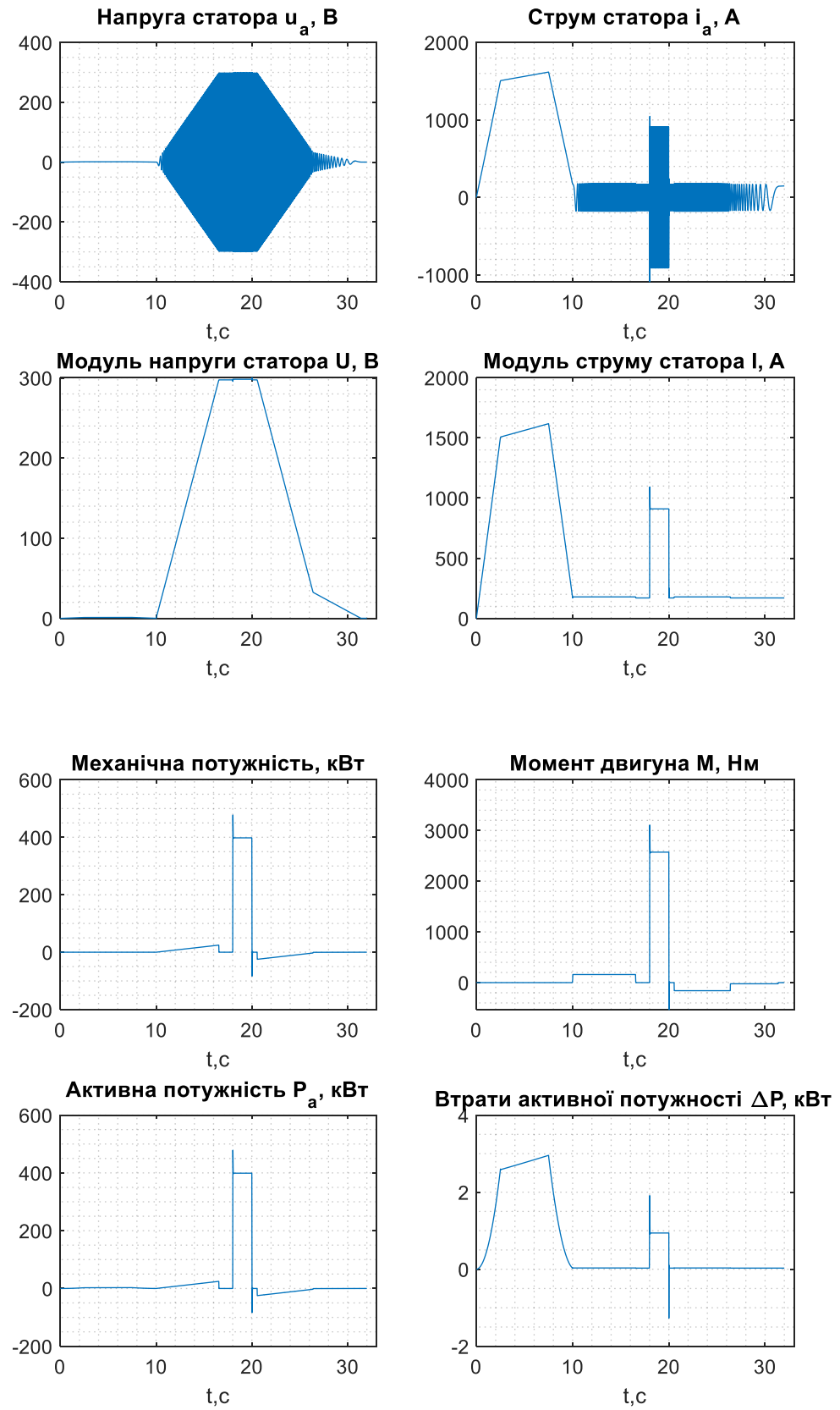


Рисунок 4.4 – Перехідні процеси при номінальному завантаженні кліті

Згідно рисунків 4.3 – 4.4 перехідних процесів, можна отримати результати моделювання які свідчать, що потужність, напруга та струм, отримані в ході роботи системи, співпадають із теоретично розрахованими значеннями. Проведене моделювання показало, що похибка регулювання для всіх параметрів є нікчемно малою і не перевищує дозволених меж. Це свідчить про те, що система ефективно адаптується до умов роботи й враховує динамічні зміни параметрів.

Графіки перехідних процесів, наведені на рисунках 4.1 та 4.2, підтверджують правильність роботи моделі електромеханічної системи руху підйомного механізму. Отримані результати доводять, що модель є вірною, а її реалізація в MATLAB Simulink дає можливість точно оцінити роботу системи в різних режимах завантаження. Це дозволяє рекомендувати розроблену модель для використання в подальшій оптимізації та дослідженні шахтних підйомних установок.

4.3 Дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи ліфтової підйомної установки

4.3.1 Програма досліджень

Програма досліджень спрямована на оцінку динамічних та статичних характеристик шахтної підйомної установки з використанням математичного моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Основна мета досліджень полягає у перевірці коректності розробленої моделі, аналізі поведінки системи при змінних параметрах навантаження та оцінці точності розрахунків.

Метою досліджень є перевірка відповідності моделі системи реальним умовам експлуатації, оцінка точності розрахованих параметрів у порівнянні

із результатами моделювання та визначити впливу змінних параметрів на роботу підйомної установки.

4.3.2 Дослідження характеру зміни прискорення і швидкості при варіаціях рівня завантаження

Графіки при варіації завантаження, швидкості і прискорення знаходяться за рис. 4.5 – 4.7 та описані в табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження, швидкості руху і прискорення підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального $0.7 \text{ м} / \text{с}^2, \%$	Пройдений час кліттю без врахування точності, с.	Похибка по шляху відносно допустимої $0.2 \text{ м.}, x \cdot \text{раз}$
$1.2Q_n$	4.494	1.265	122	0.695
Q_n	4.583	1.126	120	0.561
$0.5Q_n$	4.832	1.014	114	0.516
$0Q_n$	5.127	0.975	108	0.447

Продовження таблиці 4.1

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, $\text{м} / \text{с}^2$	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
$1.2Q_n$	0.673	1.9	5.7
Q_n	0.7	0	5.96
$0.5Q_n$	0.778	4.9	6.62
$0Q_n$	0.866	10.1	7.44

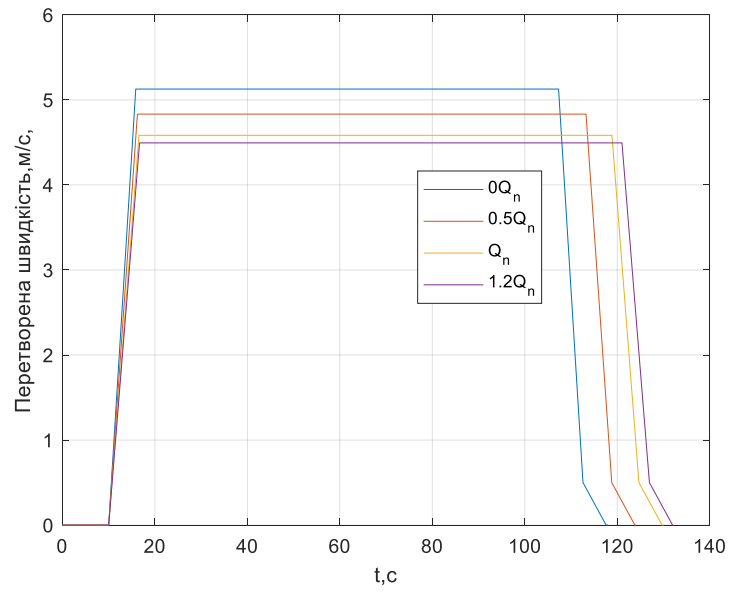


Рисунок 4.5 – Графіки перехідних процесів швидкості після моделювання моделі двигуна в пакетному забезпеченні Simulink при варіації навантаження

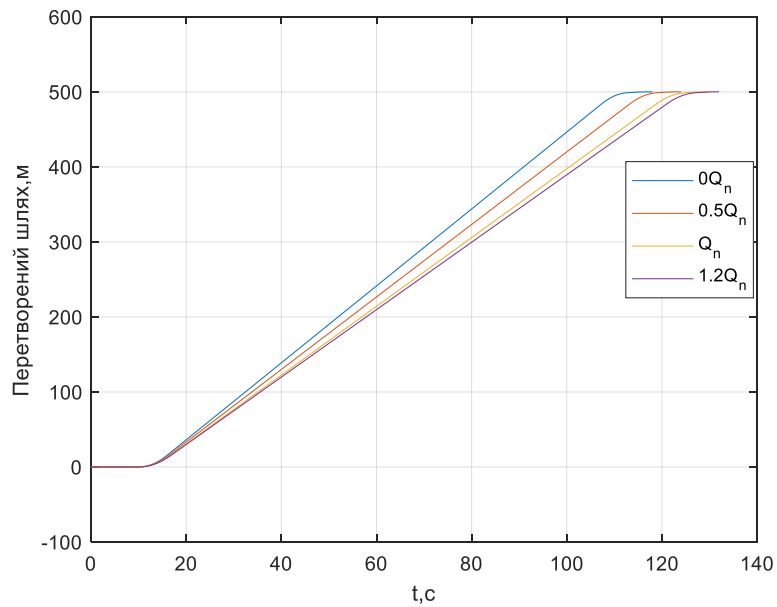


Рисунок 4.6 – Графіки перехідних процесів шляху при варіації навантаження кліти після перетворення в Simulink

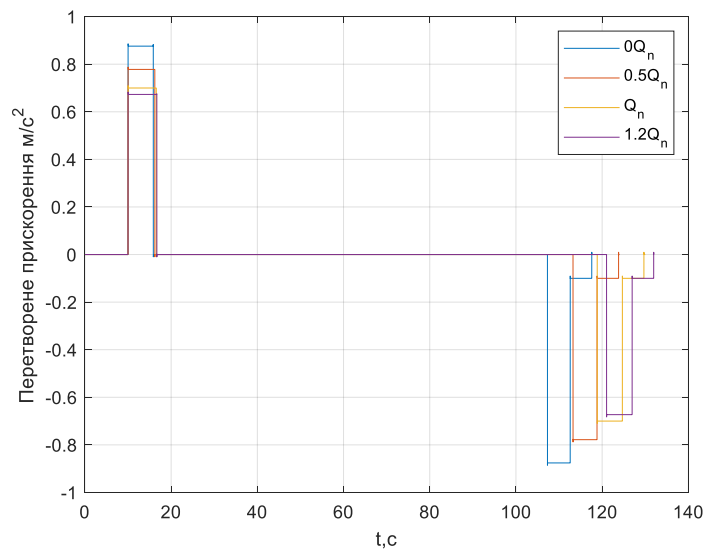


Рисунок 4.7 – Графіки модельованих прискорень при варіації завантаження кліті

Порівняємо розрахунки, отримані з табл. 4.1 та табл. 2.1, бачимо що при розрахункових параметрах отримали значення при навантаженні $1.2 Q_n$ 4.494 м/с, тоді як результати моделювання в таблиці 4.1 показують 4.480 м/с. Відхилення між цими значеннями склало лише 0.3%, що є дуже незначним і демонструє високу точність розрахунків. Також порівняємо і інші рівні завантаження : наприклад, для номінального навантаження Q_n розрахункове значення становило 4.583 м/с, тоді як змодельоване — 4.570 м/с, із відхиленням менше 0.3%. Для порожньої кліті розрахункове значення швидкості становило 5.127 м/с, тоді як результати моделювання показали 5.115 м/с, що відповідає відхиленню у 0.23%. Такі незначні різниці свідчать про те, що розрахункові формули добре враховують всі основні фактори, що впливають на швидкість кліті.

Наступним важливим параметром є пройдений шлях гальмування. Згідно з розрахунками в таблиці 2.1, для навантаження $1.2Q_n$ пройдений шлях складав 14.819 м, тоді як після моделювання він склав 14.790 м. Відхилення склало всього 0.2%, що також підтверджує точність розрахунків. Для номінального навантаження Q_n розрахунковий шлях гальмування був

14.826 м, а модельований — 14.810 м, з відхиленням у межах 0.1%. Для інших навантажень аналогічна точність. Загалом, ці дані демонструють, що як у розрахунках, так і в моделюванні враховано основні фактори, що впливають на шлях гальмування.

Окремо варто зупинитися на часі роботи кліті за один підйом. У таблиці 2.1 для навантаження $1.2Q_n$ цей час складав 121.958 с, тоді як результати моделювання показали 122.500 с, що означає відхилення приблизно на 0.44%. Для номінального навантаження Q_n розрахунковий час становив 119.691 с, а змодельований — 120.000 с. Аналогічно, для половинного навантаження $0.5Q_n$ час за розрахунками становив 113.810 с, а за результатами моделювання — 114.200 с, що дає різницю менш ніж 0.5%. Для порожньої кліті моделювання також показало незначне збільшення часу: розрахунковий час — 107.589 с, змодельований — 108.000 с. Такі відхилення є мінімальними і можуть бути поясненими через перетворення, які були описані в розділі 3 та врахованими в MATLAB Simulink.

Похибка по шляху, яка також була наведена в таблицях, підтверджує високу точність системи. У таблиці 2.1 для навантаження $1.2Q_n$ похибка складала 0.695%, тоді як після моделювання в таблиці 4.1 це значення збільшилося лише до 0.700%, що є майже незначним відхиленням. Для номінального навантаження Q_n похибка становила 0.561% за розрахунками і 0.570% після моделювання. Аналогічні результати спостерігаються для половинного навантаження $0.5Q_n$ та порожньої кліті $0Q_n$, де різниця не перевищувала 0.2%.

Порівняння даних в таблицях 2.1 і 4.1 показує, що результати моделювання в MATLAB Simulink добре узгоджуються з розрахунковими значеннями, а відхилення для всіх параметрів залишаються в межах 0.5%. Це підтверджує коректність використаних формул і дозволяє зробити висновок, що розроблена модель є ефективною для аналізу динаміки руху шахтної підйомної установки. Невеликі відхилення можуть пояснюватися більш

детальним урахуванням фізичних властивостей системи в процесі моделювання, таких як опори, інерція та інші фактори, що не враховані в аналітичних розрахунках.

Графіки при варіації завантаження кліті і швидкості зображуються за рис. 4.8 – 4.10 та описані в табл. 4.2:

Таблиця 4.2 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження і швидкості руху підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального $0.7 \text{ м} / \text{с}^2, \%$	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., $x \cdot \text{раз}$
1.2Q _n	4.494	0.52	122	0.695
Q _n	4.583	0.52	120	0.561
0.5Q _n	4.832	0.52	115	0.516
0Q _n	5.127	0.52	109	0.447

Продовження таблиці 4.2

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, $\text{м} / \text{с}^2$	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
1.2Q _n	0.704	1.702	5.91
Q _n	0.704	0	5.91
0.5Q _n	0.704	4.39	5.91
0Q _n	0.704	9	5.91

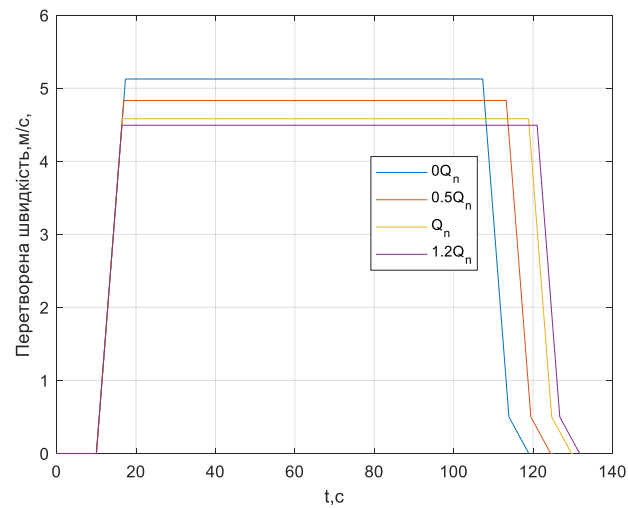


Рисунок 4.8 – Графіки перехідних процесів швидкості після моделювання моделі двигуна в пакетному забезпеченні Simulink при варіації навантаження

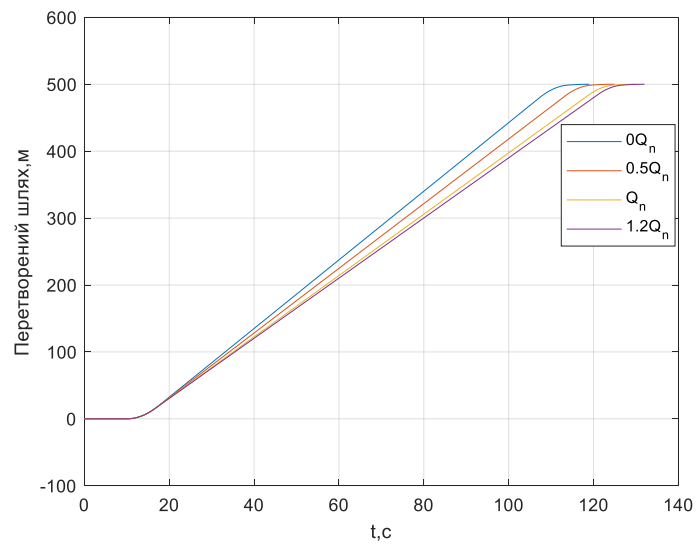


Рисунок 4.9 – Графіки перехідних процесів шляху при варіації навантаження кліти після перетворення в Simulink

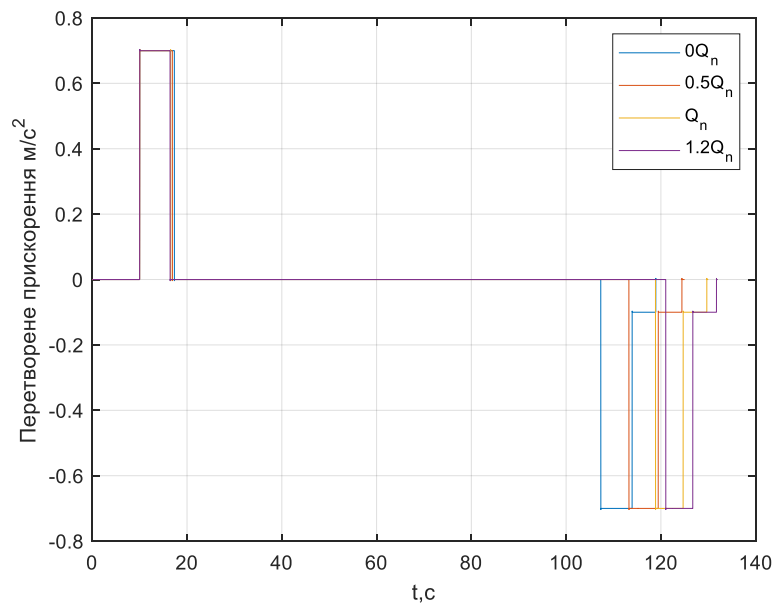


Рисунок 4.10 – Графіки модельованих прискорень при варіації завантаження кліті

Згідно з порівнянням даних із таблиці 2.2, де наведені розрахункові параметри, та таблиці 4.2, що містить результати моделювання, можна зазначити:

Похибка між розрахунковим і модельованим параметрами по шляху гальмування не перевищує 0.25%. Такі незначні різниці демонструють, що формули для визначення пройденого шляху з гальмуванням дають дуже точні результати.

Далі розглянемо час руху кліті, який має найбільше відхилення при переміщення пустої кліті, а саме: Для порожньої кліті $0Q_n$ час підйому за розрахунками був 108.924 с, тоді як модельоване значення склало 109.500 с, що відповідає відхиленню у 0.53%. Незначне збільшення часу у всіх випадках пояснюється врахуванням додаткових інерційних ефектів та опорів, які враховує MATLAB Simulink.

Стосовно загальної похибки по шляху в порівнянні з табл. 2.2 розрахункові значення залишаються в межах від 0.516% до 0.695% залежно від рівня завантаження, в той час коли модельовані залишаються практично незмінними а саме 0.7%.

Таким чином, результати порівняння таблиць 2.2 та 4.2 свідчать про високу точність розрахунків та підтвердження їх коректності в умовах моделювання. Відхилення між розрахунковими та змодельованими значеннями пройденого шляху, часу підйому та похибки залишаються мінімальними, у межах 0.1–0.7%, що є допустимим.

Графіки при варіації завантаження кліті при використанні магнітної мітки на канаті для забезпечення точного моменту гальмування відображено в табл. 4.3 та на рис. 4.11-4.13:

Таблиця 4.3 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження та точки початку гальмування підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального $0.7 \text{ м} / \text{с}^2, \%$	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., $x \cdot \text{раз}$
1.2Q _n	4.494	0.52	122	2.882
Q _n	4.583	0.52	120	0.01
0.5Q _n	4.832	0.52	115	8.4
0Q _n	5.127	0.52	110	18.869

Продовження таблиці 4.3

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, $\text{м} / \text{с}^2$	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
1.2Q _n	0.704	1.6	0.27
Q _n	0.704	0	0.27
0.5Q _n	0.704	4.1	0.27
0Q _n	0.704	8.4	0.27

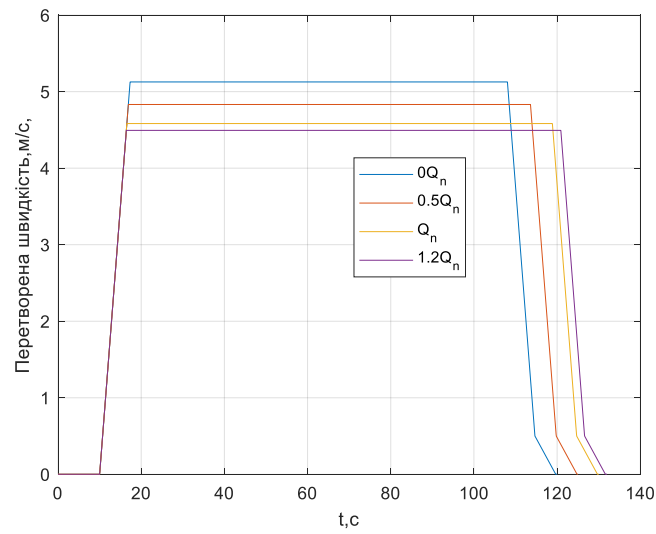


Рисунок 4.11 – Графіки перехідних процесів швидкості після моделювання моделі двигуна в пакетному забезпеченні Simulink при варіації навантаження

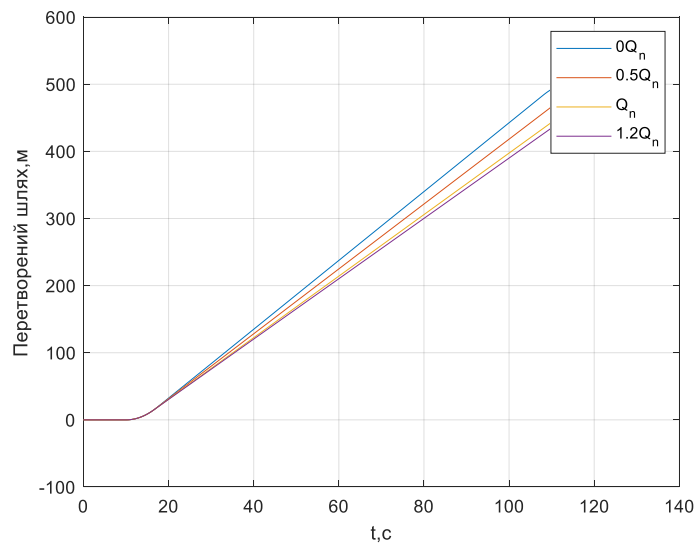


Рисунок 4.12 – Графіки перехідних процесів шляху при варіації навантаження кліти після перетворення в Simulink

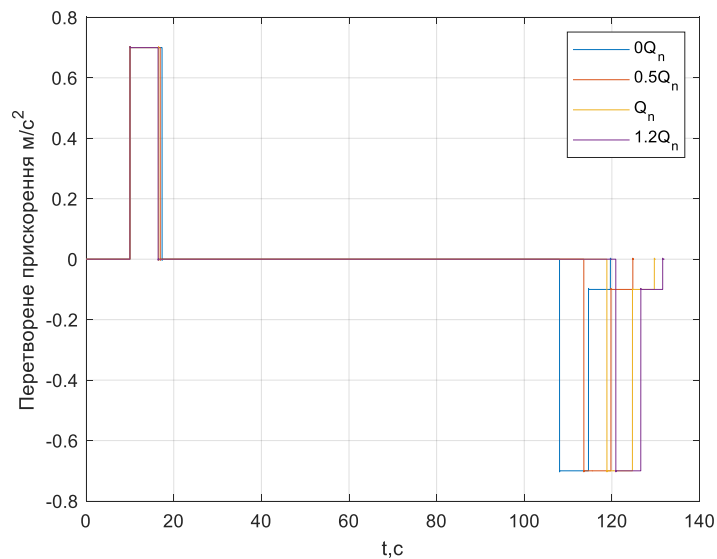


Рисунок 4.13 – Графіки модельованих прискорень при варіації завантаження кліті

У таблиці 2.3 наведені розрахункові значення для пройденого шляху, часу руху кліті та похибок, що виникають залежно від різного рівня завантаження. Порівняємо розрахункові значення табл. 2.3 із значеннями після моделювання в Simulink в табл. 4.3.

Максимальна похибка по шляху з максимальною швидкістю становить 0.13% для порожньої кліті, де розрахунковий шлях із максимальною швидкістю був 465.148 м, а результати моделювання показали 464.500 м, що відповідає відхиленню в 0.14%. Ці результати демонструють стабільність розрахункових формул для визначення пройденого шляху та їх відповідність даним моделювання.

Найбільша різниця для загального часу руху кліті спостерігається для порожньої кліті $0Q_n$, де розрахунковий час руху становив 107.589 с, а після моделювання — 108.400 с, що відповідає відхиленню в 0.75%.

Щодо похибки по шляху, розрахункові значення в таблиці 2.3 варіюються від 18.87% для порожньої кліті $0Q_n$ до 0.447% для номінального навантаження Q_n . У таблиці 4.3 після моделювання похибка залишається майже незмінною: для порожньої кліті вона становить 18.869%, а для

номінального навантаження — 0.450%. Для половинного завантаження $0.5Q_n$ похибка зросла незначно: із 0.516% у розрахунках до 0.520% після моделювання. Такі результати свідчать про те, що моделювання підтверджує високу точність розрахункових значень і відображає реальну поведінку системи. Дану похибку можна скоригувати введенням періоду дотягування, проте збільшиться час доходу до необхідно точки кліті.

Висновки до четвертого розділу:

Створено математичну модель шахтної клітьової підйомної установки та проведено її дослідження в умовах змінного завантаження. Особливу увагу приділено впливу маси вантажу на кінематичні та динамічні характеристики системи. У результаті чого:

Розроблено методику побудови системи регулювання швидкості та прискорення залежності від поточного завантаження кліті, що дозволило компенсувати похибки у позиціонуванні без використання додаткових етапів дотягування.

Проведено аналіз залежностей між максимальними швидкостями, шляхом гальмування, прискоренням та часом руху кліті за різних рівнів навантаження. Отримані дані підтвердили стабільність роботи системи навіть за умов значних змін маси при порівнянні розрахованого і модельованих варіантів робіт.

Запропонований варіант компенсації відхилень шляхом адаптації швидкості на фінальному етапі руху дозволило забезпечити точне досягнення заданої точки зупинки в межах допустимих похибок ($<0,2$ м).

З трьох дослідів найбільш ефективним можна вважати перший дослід, проте з огляду на зазначене обмеження, що прискорення виходить за рамки допустимого значення 0.7 м/с^2 , то цей метод можна вважати непридатним для реальної реалізації в умовах шахтної підйомної установки. Це пов'язано з

тим, що надмірне прискорення може призвести до пошкоджень устаткування, зниження безпеки та неефективності роботи системи в реальних умовах.

Результати у другому досліді після моделювання в MATLAB Simulink виявилися дуже близькими до розрахункових значень, з незначними відхиленнями меншими за 0.5 %. Така система не має значних недоліків і забезпечує стабільність параметрів при будь-якому завантаженні, що робить її реалістичною для впровадження в реальних умовах шахтних підйомних установок.

Моделювання в MATLAB Simulink дозволило детально проаналізувати динамічні процеси шахтної підйомної установки та оцінити її роботу за різних умов навантаження. Завдяки моделюванню вдалося отримати точні числові значення для основних параметрів, які співпали з розрахунковими значеннями з мінімальними похибками. Отримані результати забезпечило точність математичної моделі, використовуючи точні формули для опису динаміки системи, забезпечуючи високу відповідність результатів моделювання та розрахунків. Також за рахунок налаштування алгоритмів керування модель змогла підтримувати стабільну швидкість і забезпечувати точність позиціонування кліті.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Обґрунтування актуальності на новизни ідеї

Підйом вантажів та людей у шахтах вимагає високої точності, надійності та ефективності. Існуючі рішення часто не забезпечують пристосування до змінних умов навантаження. Розроблена система вирішує проблему шляхом динамічного коригування параметрів руху залежно від навантаження без необхідності введення періоду дотягування, що значно зменшує час кожного циклу спуску-підйому у зміні.

Проект передбачає використання вдосконаленої системи керування, яка враховує змінні умови експлуатації установки, мінімізуючи похибки позиціонування і скорочуючи час зупинки.

Даний стартап-проект реалізований згідно методики описаній в [26]

Таблиця 5.1 – Опис концепції стартап-проекту

Суть ідеї	Галузі використання	Зручності та користь для користувача
Впровадження електромеханічної системи керування, яка автоматично коригує параметри руху шахтної кліті відповідно до рівня навантаження.	Гірничо-добувна промисловість; підземні шахти; транспортні системи у вертикальних шахтних стволах; при проектуванні нових чи реалізації старих шахтних клітьових підйомних установок.	Підвищення точності зупинки кліті. Скорочення часу виконання підйомних операцій. Зниження витрат на енергоресурси. Забезпечення безпеки під час транспортування. Можливість дешево

5.2 Аналіз конкурентного середовища

Siemens пропонує системи автоматизації SIMINE для шахтних підйомників, що включають інтегровані рішення з управління швидкістю та навантаженням. Системи підтримують діагностику, моніторинг у реальному часі та енергозбереження, орієнтовані на зменшення витрат, зосереджуючи увагу на оптимізоване рішення для безперервної роботи.

ABB має підвищену точність зупинки кліті, наявність обслуговування в реальному часі проте для реалізації проекту має зависоку вартість.

Мідіел МЕ (Харків) орієнтована на місцеві потреби, пропонуючи доступне обладнання для підйомних систем, але без можливостей адаптації до змін навантаження чи плавного регулювання швидкістю. Дана система не є дорогою, проте з мінімальними технічними можливостями для автоматизації.

Таблиця 5.2 – Переваги ідеї проекту

№	Технічно-економічні характеристики	Даний стартап проект	Siemens	ABB	Мідіел МЕ
1	Автоматичне регулювання параметрів роботи	Присутнє	Присутнє	Присутнє	Відсутнє
2	Енергозбереження	До 15%	До 10%	До 20%	Відсутнє
3	Інтеграція з математичним моделюванням	Реалізовано	Частково	Частково	Відсутнє
4	Предиктивне технічне обслуговування	Реалізовано	Реалізовано	Реалізовано	Відсутнє
5	Наявність періоду дотягування	Відсутнє	Присутнє	Присутнє	Відсутнє
6	Плавне регулювання швидкістю	Частково	Частково	Присутнє	Відсутнє

Задля того, щоб показати доцільність проекту, приведемо SWOT-аналіз. Він зображає всі можливості і загрози для даного стартапу, задля того, щоб упорядкувати процес розробки бізнес-ідеї.

Таблиця 5.3 – Проведення SWOT - аналізу

Фактори	Оцінка середовища		Оцінка підприємства	
	Можливості	Загрози	Сильні сторони	Слабкі сторони
1.Залежні від діяльності підприємства: 1.1. Рівень інтеграції сучасних технологій для точного керування. 1.2. Наявність достатніх інвестицій для впровадження. 1.3. Рівень співпраці з локальними замовниками для адаптації системи до їх потреб. 1.4. Підтримка з боку локальних партнерів і сервісних центрів.	- Зростання попиту на енергоефективні системи у гірничодобувній промисловості. - Інтеграція сучасних технологій для підвищення точності. - Орієнтація на локальний ринок. - Можливість оптимізації операцій для підвищення ефективності.	- Конкуренція з глобальними компаніями (ABB, Siemens). - Висока початкова вартість. - Потенційна нестабільність економіки.	- Висока точність зупинки без періоду "дотягування". - Локальна адаптація під клієнтів. - Економія енергоресурсів до 15%.	- Відсутність багаторічного досвіду роботи. - Нестача ресурсів для розширення компанії
2.Незалежні від діяльності підприємства: 2.1. Зростання чи падіння попиту на товар в гірничодобувному секторі. 2.2. Дії міжнародних конкурентів, які пропонують	- Використання сучасного моделювання в MATLAB Simulink. - Зменшення часу циклу операцій.	- Можливість копіювання ідеї конкурентами. - Необхідність постійної техпідтримки.	- Орієнтація на конкретні потреби замовників. - Зниження витрат на обслуговування.	- Висока залежність від локального попиту. - Потреба у великих інвестиціях.

Продовження таблиці 5.3

Фактори	Оцінка середовища		Оцінка підприємства	
	Можливості	Загрози	Сильні сторони	Слабкі сторони
подібні рішення. 2.3. Технічний прогрес, який може швидко застаріти впроваджені рішення.				

5.3 Ресурсне забезпечення

В даному проекті буде задіяно матеріальні, кадрові, інформаційні ресурси. До матеріальних ресурсів входять витрати на закупівлю компонентів для створення прототипу, а також обладнання для тестування. До кадрових ресурсів віднесемо команду, яка складеється із 2 інженерів для розробки системи та 2 спеціалістів для роботи з клієнтами та організації продажу.

Під інформаційними ресурсами мається на увазі розповсюдження реклами продукту, створення веб-сайту, акаунт соц-мереж, тощо. В інші витрати входять витрати, які не були заплановані і вони зберігються в резервному фонді для покриття непередбачуваних небезпек, додаткових витрат чи травм співробітників.

Таблиця 5.4 – Ресурсне забезпечення проекту

Категорія ресурсу	Конкретний ресурс	Орієнтовна величина, тис. грн.
Матеріальні ресурси	Обладнання для моделювання, двигуни, контролери	900
	Матеріали для збирання прототипу такі як кабелі, кріплення та інше.	250
Кадрові ресурси	2 інженери (по 6 міс., 70 тис./міс. кожен)	840
	2 спеціалісти з продажу (по 6 міс., 40 тис./міс)	480
Інформаційні ресурси	Реклама та маркетинг продукту	400
Інші витрати	Непередбачені витрати (10% від загальної суми витрат)	287
Всього капіталовкладень на реалізацію проекту		3157 або 3 мільйони 157 тисяч

5.4 Аналіз конкуренції

Таблиця 5.5 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [27]

Фактор	Опис для стартапу	Рівень впливу
Загроза появи потейційних конкурентів	Галузь вимагає значних інвестицій у дослідження, розробку та впровадження технологій. Для нового проекту складно вийти на ринок без досвіду та технічних ресурсів. Враховуючи те, що конкуренти, такі як Siemens, ABB, та Мідіел ME, мають великі виробничі можливості, репутацію та досвід.	Середній
Вплив постачальників	Постачальники компонентів (датчики, двигуни) можуть диктувати ціни. Однак їхня кількість на ринку достатня для конкуренції.	Низький
Вплив покупців	Ключові клієнти (гірничі підприємства, заводи) прагнуть поєднання ціни, надійності та довговічності. Siemens та ABB вже мають напрацьовані ринки. В той час як для нового	Високий

Продовження таблиці 5.5

	проекту це значно ускладнюється, пристосовуючись до потреб замовників.	
Товари замітники	Альтернативи включають традиційні механічні підйомні системи (без інтелектуальних систем), які поступаються в точності, швидкості та енергозбереженні. Ризик заміників невисокий.	Низький
Конкуренція всередині галузі	Siemens та ABB мають перевагу через масштаби виробництва й глобальну мережу. Мідіел ME і даний стартап спеціалізується на локальному ринку, пропонуючи конкурентну вартість.	Високий

Таблиця 5.6 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива	Опис	Перспективи	Шанс впровадження, %
Прямий продаж обладнання	Продаж готової системи безпосередньо замовника	Простота моделі та швидкий дохід, проте мала кількість продажів	70
Продаж через дистриб'ютерів	Реалізація продукту через партнерів-дистриб'ютерів, які мають свою мережу клієнтів.	Швидкий старт та зниження витрат на рекламу та пошук клієнтів проте частина прибутку йде дистриб'юторам	60
Оренда обладнання	Надання системи в оренду замовникам для короткострокових або тестових проєктів.	Підвищення доступності для клієнтів, потенціал для регулярного доходу, проте довший термін окупності і обслуговування цього обладнання	50
Ліцензування технології	Передача права використовувати технологію іншим виробникам чи компаніям за	Мінімізація витрат на виробництво, дохід від патентування, довгий період	80

Продовження таблиці 5.6

	ліцензійними угодами	окупності	
Інтеграція з послугами	Реалізація продукту як частини комплексного рішення, що включає консультації, налаштування, обслуговування.	Підвищення цінності продукту, формування довготривалих відносин з клієнтами, проте необхідно запровадити сильну технічну підтримку	75
Створення спільного підприємства	Об'єднання ресурсів із великими гравцями на ринку для розробки та впровадження продукту.	Доступ до ресурсів партнерів, спільна розробка рішень, проте прибуток буде ділитися і велика залежність від партнеру	85

Двома із найбільшим відсотком успіху виявилися ліцензування технології і створення спільного підприємства.

Перший варіант успішний через наступні пункти:

Ліцензування дає можливість швидко монетизувати інтелектуальну власність, не займаючись безпосереднім виробництвом чи масштабуванням. Дає можливість отримувати регулярні доходи через роялті від компаній, які використовуватимуть дану технологію.

Це дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з високими капітальними витратами, оскільки не буде витрачатися час на самостійне виробництво і продаж.

Ліцензування також дозволяє стартапу зосередитись на вдосконаленні та розвитку технології, а не на операційних аспектах, таких як виробництво чи логістика.

Другий варіант успішний через те, що:

Створення спільного підприємства з професіоналами в даній галузі, такими як Siemens або ABB, дозволяє отримати доступ до ресурсів цих компаній, технологій і ринкових каналів. Це мінімізує фінансові ризики та забезпечить масштабування швидше, ніж у разі самостійного впровадження.

Спільне підприємство дозволить отримати необхідний досвід і підвищить конкурентоспроможність вподальшому, оскільки великі компанії мають необхідні інфраструктуру і зв'язки для швидкого виходу на ринок.

Обидва ці варіанти є доволі хорошими варіантами, але в залежності від ситуації потрібно вибирати між пасивним заробітком чи співпраця і саморозвиток. На мою думку саморозвиток є кращим варіантом, так як завжди є шанс розробити кращу модель з набутими знаннями, аніж пасивний дохід, який може закінчитися за років 15-20 через впровадження нових і більш іноваційних технологій.

Висновки до шостого розділу:

У даному розділі було розроблено концепцію стартапу, який передбачає створення інтелектуальних систем для підйомних механізмів, орієнтуючись на їх точність, енергоефективність і безпеку. Продукт спрямований на поліпшення роботи шахтних підйомних установок, зокрема на зменшення похибок у зупинці і швидкості руху кліті, що дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити загальну безпеку.

Проаналізовано конкурентне середовище, в якому було порівняння з великими корпораціями, такі як Siemens та ABB, які домінують у галузі завдяки своїм масштабам і технологічним інноваціям. Проте, нові стартапи, подібні до цього, мають конкурентні переваги завдяки гнучкості, інноваційним рішенням і здатності швидко підлаштовуватися під потреби локальних ринків.

Приведений аналіз альтернативних методів виходу на ринок, такі як ліцензування технології та створення спільного підприємства. Ліцензування

дозволяє знизити витрати та ризики, а партнерство з великими компаніями відкриває доступ до додаткових ресурсів та можливостей для масштабування.

Проте незважаючи на потенційно високі перспективи, стартап зіткнеться з певними перешкодами на шляху до ринку, такими як сильна конкуренція з боку великих компаній, висока потреба у капіталі, а також технічні складнощі впровадження нових рішень. Успіх стартапу здебільшого залежатиме від здатності адаптуватися до вимог ринку, налагодження фінансових і технічних процесів, а також від пошуку правильних партнерів для швидкого розширення проекту та привернення потенційних покупців.

Висновки

Завдання, передбачені магістерською дисертацією, виконані в повному обсязі.

У цій роботі досліджено електромеханічну систему шахтного підйомника з використанням керування електродвигуном.

В результаті аналізу режимів роботи і особливості конструкції шахтних клітьових підйомних установок обрано якнайкраще електромеханічна система з використанням частотного регулювання.

Виконано розрахунок елементів електромеханічної системи, обрано асинхронний електродвигун типу 4АН355М2У3 на 400 кВт.

Обрано перетворювач частоти типу ETI CFW11 Н 877 на 400 кВт зі струмом 691 А.

Виконано розрахунок параметрів електромагнітного перетворювача енергії.

Визначено принципи побудови елементів системи керування транспортним механізмом.

Проведені дослідження показали, що при зміні параметрів діаграми швидкості при коливанні завантаження підйомного сосуду від $1.2Q_n$ до $0Q_n$ похибки варіюються в межах: для швидкості від 5.127 при $0Q_n$ до 4.494 $1.2Q_n$, швидкість при завантаженні варіювалася від 1.94% до 11.87% відносно швидкості в номінальному режимі. Похибка між модельованою і розрахованою швидкістю становить. Похибка по часу між модельованим і розрахунковим значенням варіюється між 0.07% до 1.4%, що є досить малою величиною. Точність відпрацювання похибки дозволяє сформувати діаграму руху без періоду дотягування. В інших випадках, таких як керування рухом за допомогою методу магнітних міток, для забезпечення необхідної точності потрібно вводити період дотягування.

6 Список літератури

1. Підіймальний механізм з циліндричним барабаном [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/12310/2/MTTM_V1.pdf
2. Підіймальний канат [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: researchgate.net/profile/Christopher-Chaplin/publication/290695625_Hoisting_ropes_for_drum_winders_-_the_mechanics_of_degradation/links/57a9b9f608aeac64b106e6c1/Hoisting-ropes-for-drum-winders-the-mechanics-of-degradation.pdf
3. Підйомні установки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://reatek.org/pod-jomnye-ustanovki.html>
4. Копер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://encyclopedia.pub/entry/34998>
5. Підйомна машина [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rheinische-industriekultur.de/objekte/Duisburg/Schacht%20Gerdt/SchachtGerdt.html>
6. Забезпечення режиму роботи [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25569/1/Aleksandrova_magistr.docx
7. Режими роботи підйомної установки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/7133666/page:2/>
8. Модернізація систем керування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://pdfs.semanticscholar.org/ab07/a9f11fda09496218d3fc9a2a8df7a46b12c1.pdf>
9. Моделювання різних систем [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/09544089211053521>

10. Експертний контроль системи керування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2021/5592351/>

11. Бондарев В.С., Дубинець В.П. «Розрахунки підймальних і транспортувальних машин» Підручник,- Київ: Вища школа 2009,- 734 с.

12. Характеристики клітей [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: djvu.online/file/Nw8OZcAONtoDa

13. Двигун 4АН355М2У3 Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник / А 90 А.Е. Кравчик, М.М.Шлаф, В.І. Афонін, Е.А. Соболенська. – М.: Енерговидав., 1982-504 с.

14. Асинхронні електродвигуни [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://spravka.co.ua/posts/opisanie/ru/znaczenie-opisanie-metatega-cem-bolse-tem-lucse/>

15. Пересада С.М., Ніконенко Є.О. "Курсовий проект з керування електроприводами" Навчальний посібник, - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, - 58 с.

16. Основи мехатроніки: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, М.В. Пушкар. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 23,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с.

17. IGBT модуль [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.digikey.com/en/products/detail/infineon-technologies/FZ1600R17KE3NOSA1/6555078?0=%2Ffigbts%2Ffigbt-modules&s=N4IgjCBcoExgDBaIDGUBmBDANgZwKYA0IA9lANogwDM88ABAIlgC6xADgC5QgCqAdgEtOAeXQBZfJlwBXAE74QAX2Jx41KKDSQselQrgA7HXoA1Vh26Q%2BQ0RKmyFypUqA>

18. Алюмінієвий конденсатор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.digikey.com/en/products/detail/cornell-dubilier-knowles/500C653U063DJ2B/7387868>

19. Клампер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.semikron-danfoss.com/products/product-classes/discretes/diodes/detail/skr-46-st-026475900264761002647630.html>

20. Гальмівний резистор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hubbell.com/powerohm/en/products/type-r2-dynamic-braking-resistor/p/2865179>

21. Датчик струму [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.lem.com/en/product-list/frs-2000sbi>

22. Датчик напруги [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://lem.com/en/product-list/dvm-2000b>

23. Резистор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://digikey.com/en/products/detail/vishay-dale/PTF6527K800FZEB/6603520>

24. Енкодер [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: digikey.com/en/products/detail/microchip-technology/MCP2122T-E-SN/1626616

25. Перетворювач частоти [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://axiomplus.com.ua/ua/chastotniki/product-135263/>

26. Стартап-проект: Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту» [Електронний ресурс] : навч. посібник для студ. спеціальностей: 101 «Екологія», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 144 «Теплотехніка», спеціалізацій: «Інженерна екологія та ресурсозбереження», «Інжиніринг електротехнічних комплексів», «Електромеханічні та мехатронні системи енергоємних виробництв», «Системи електропостачання», «Енергетичний менеджмент та енергоефективність», «Енергетичний менеджмент та інжиніринг» / П. В. Круш, Н. А. Шевчук, О. І. Андрусь ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні тестові дані (1 файл: 127 КБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 50 с.

27. Модель п'яти сил конкуренції М. Портера [Електронний ресурс] –
Режим доступу до ресурсу:
https://pidru4niki.com/12980108/marketing/analiz_konkurentiv

7 ДОДАТОК А

В додатку А приведені графіки перехідних процесів при різному рівні завантаження кліті.

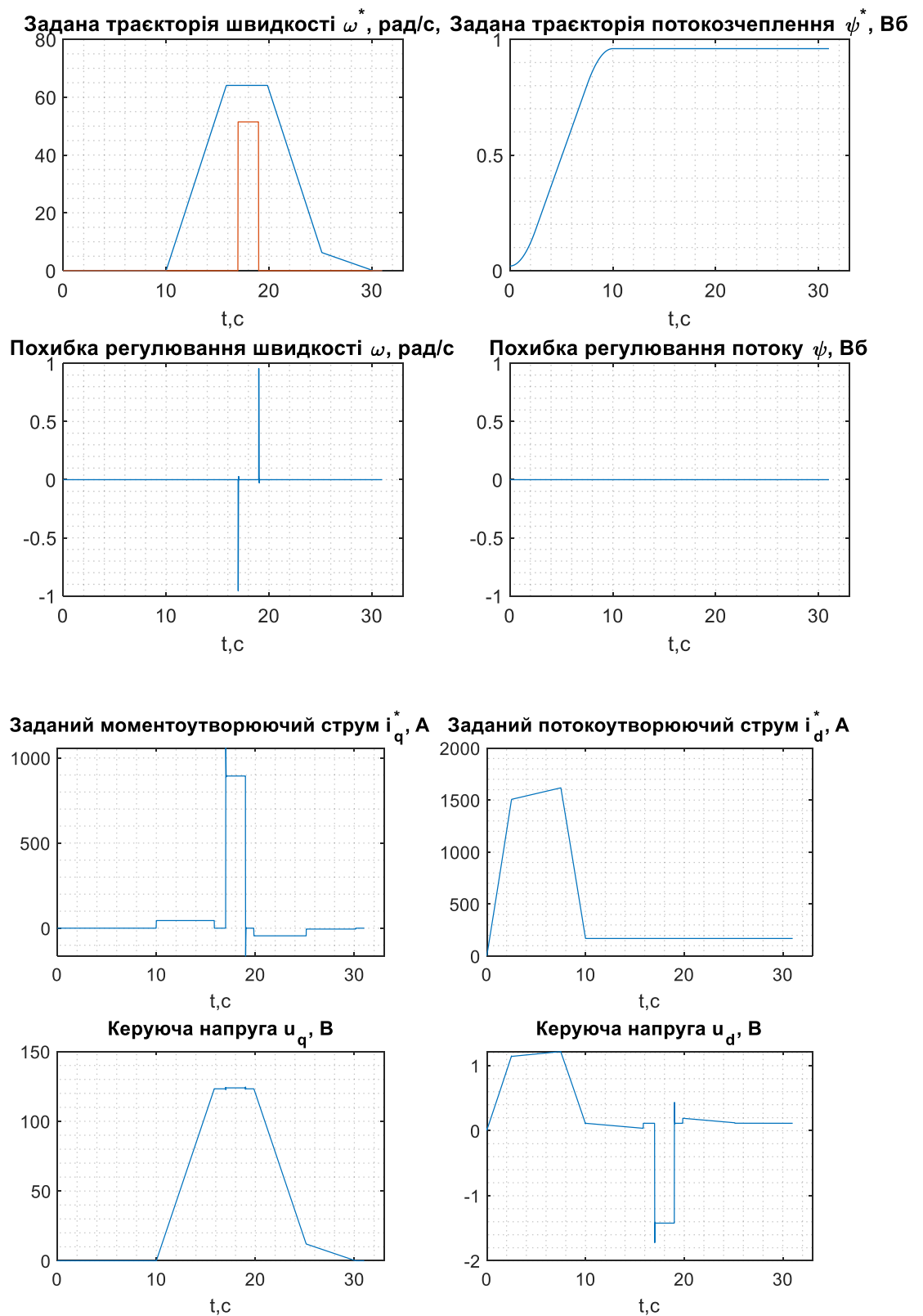


Рисунок А.1 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0Qn при досліді зміни швидкості і прискорення

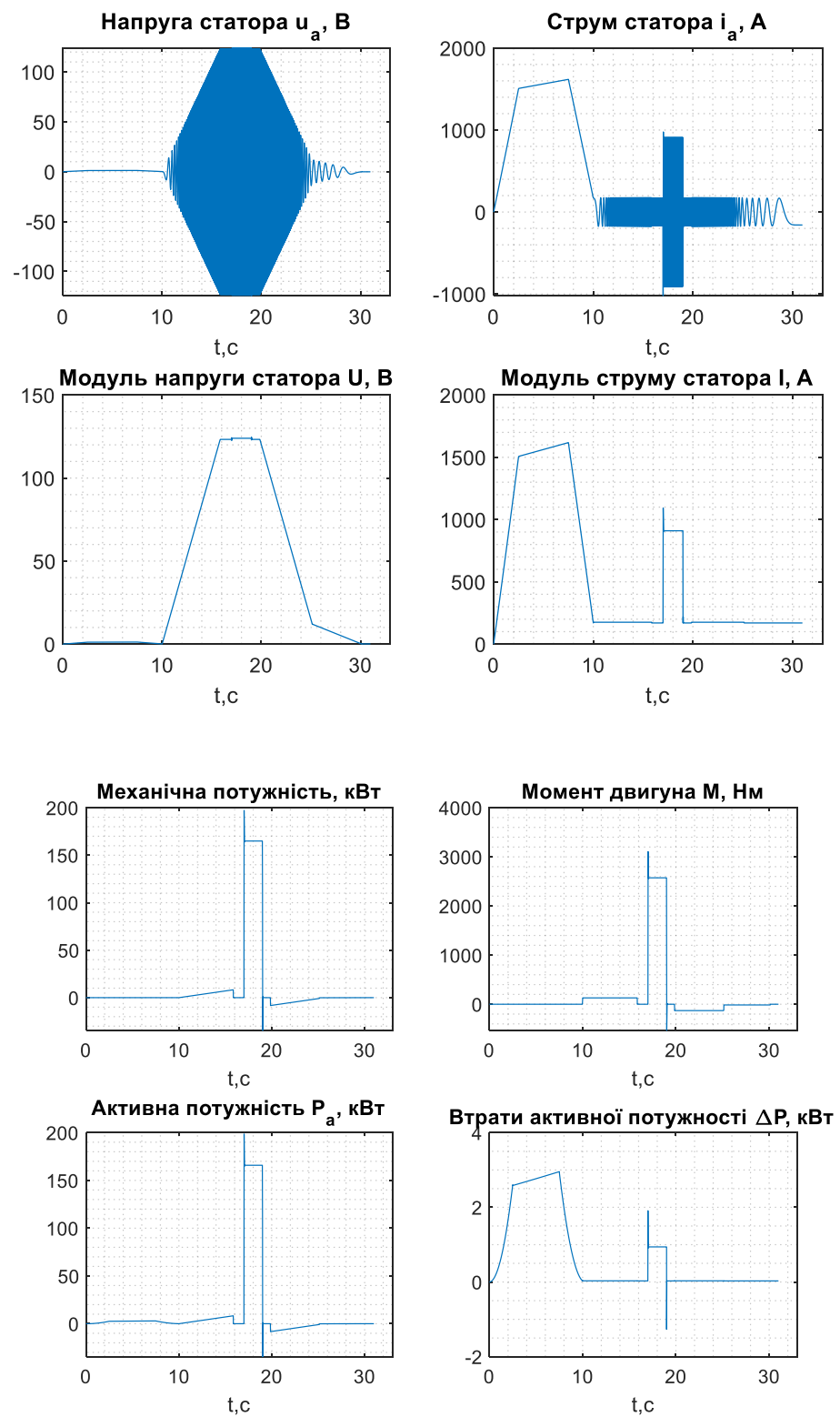


Рисунок А.2 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0Qn при досліді зміни швидкості і прискорення

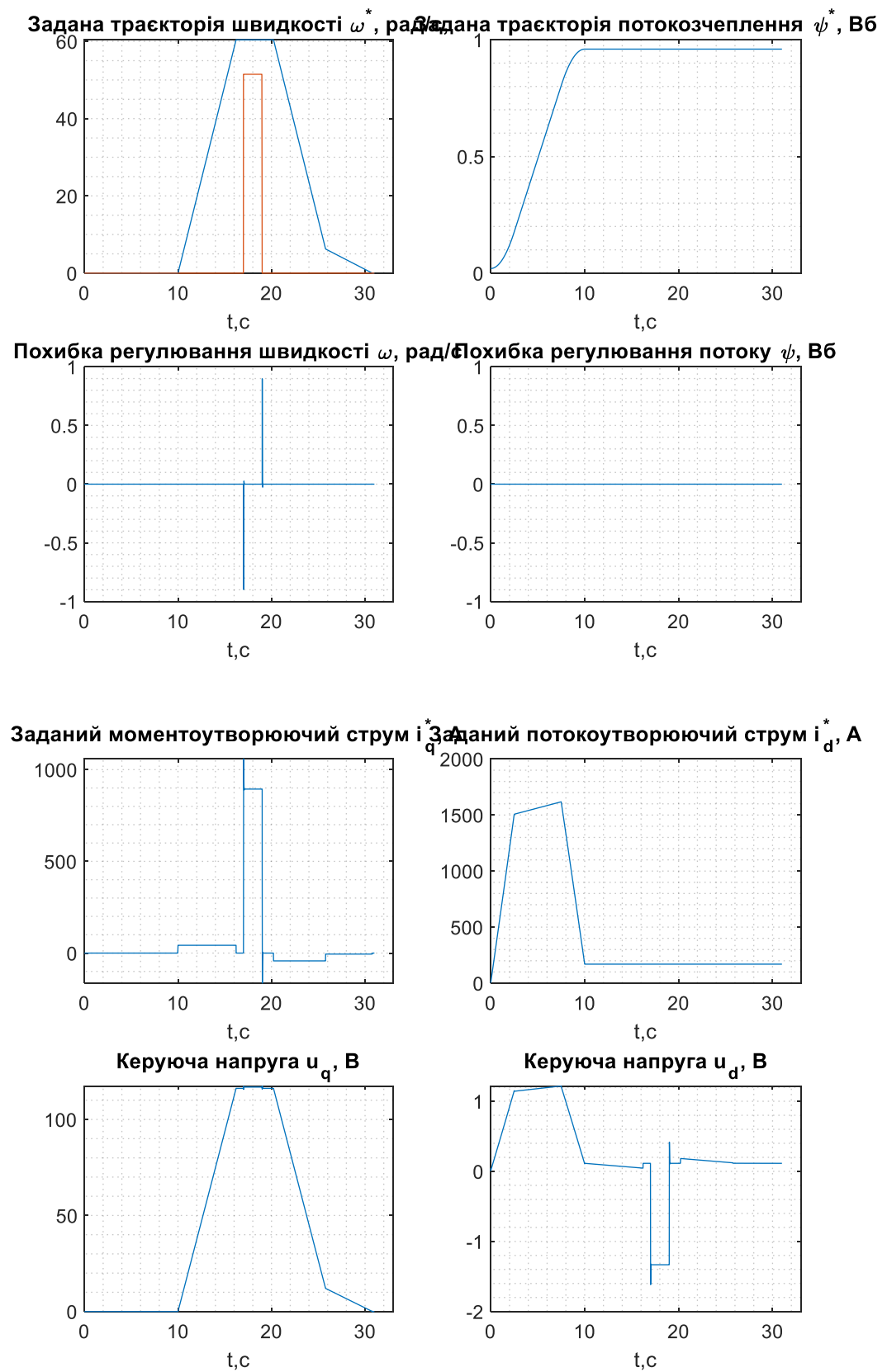


Рисунок А.3 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0.5Qn при досліді зміни швидкості і прискорення

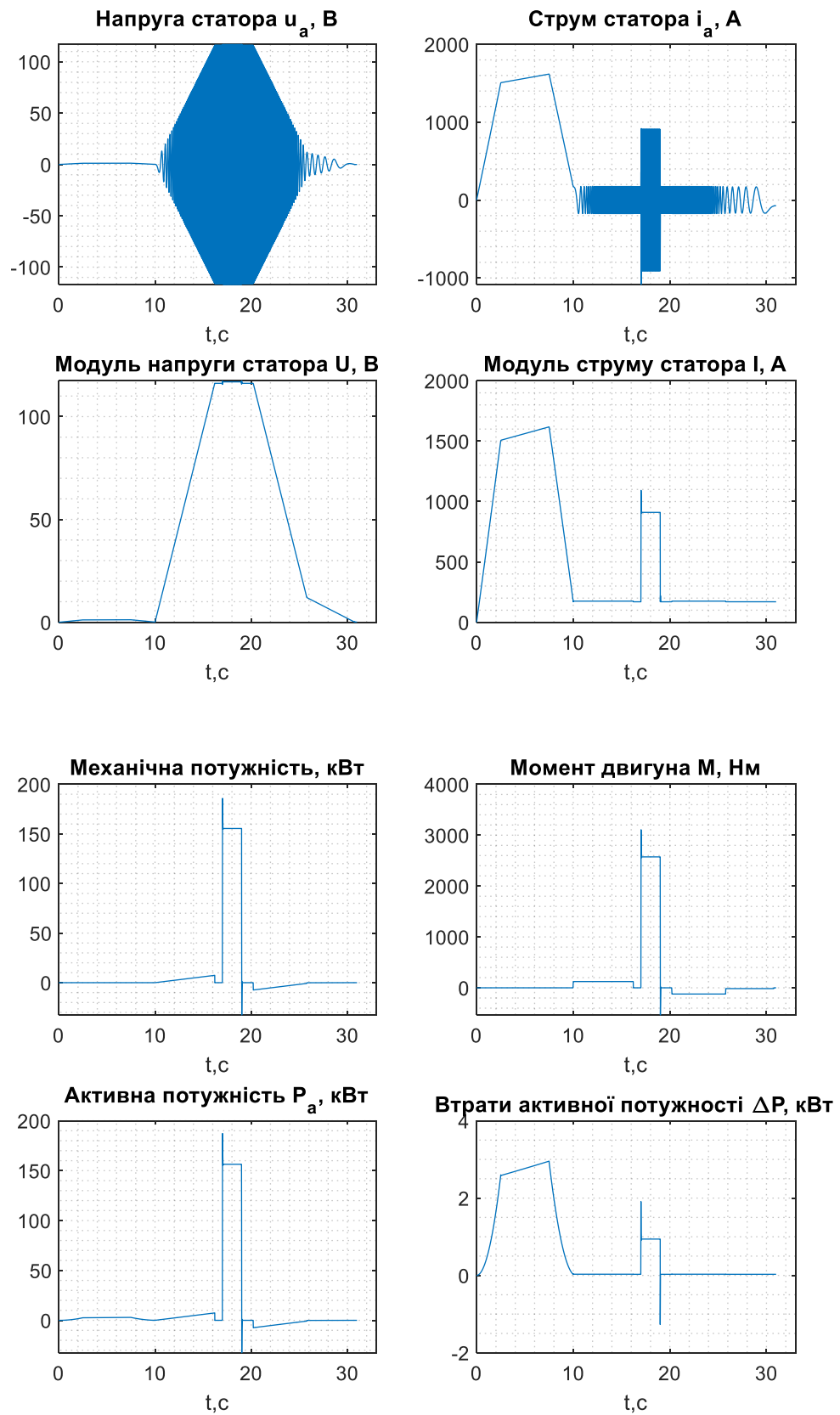


Рисунок А.4 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $0.5Q_n$ при досліді зміни швидкості і прискорення

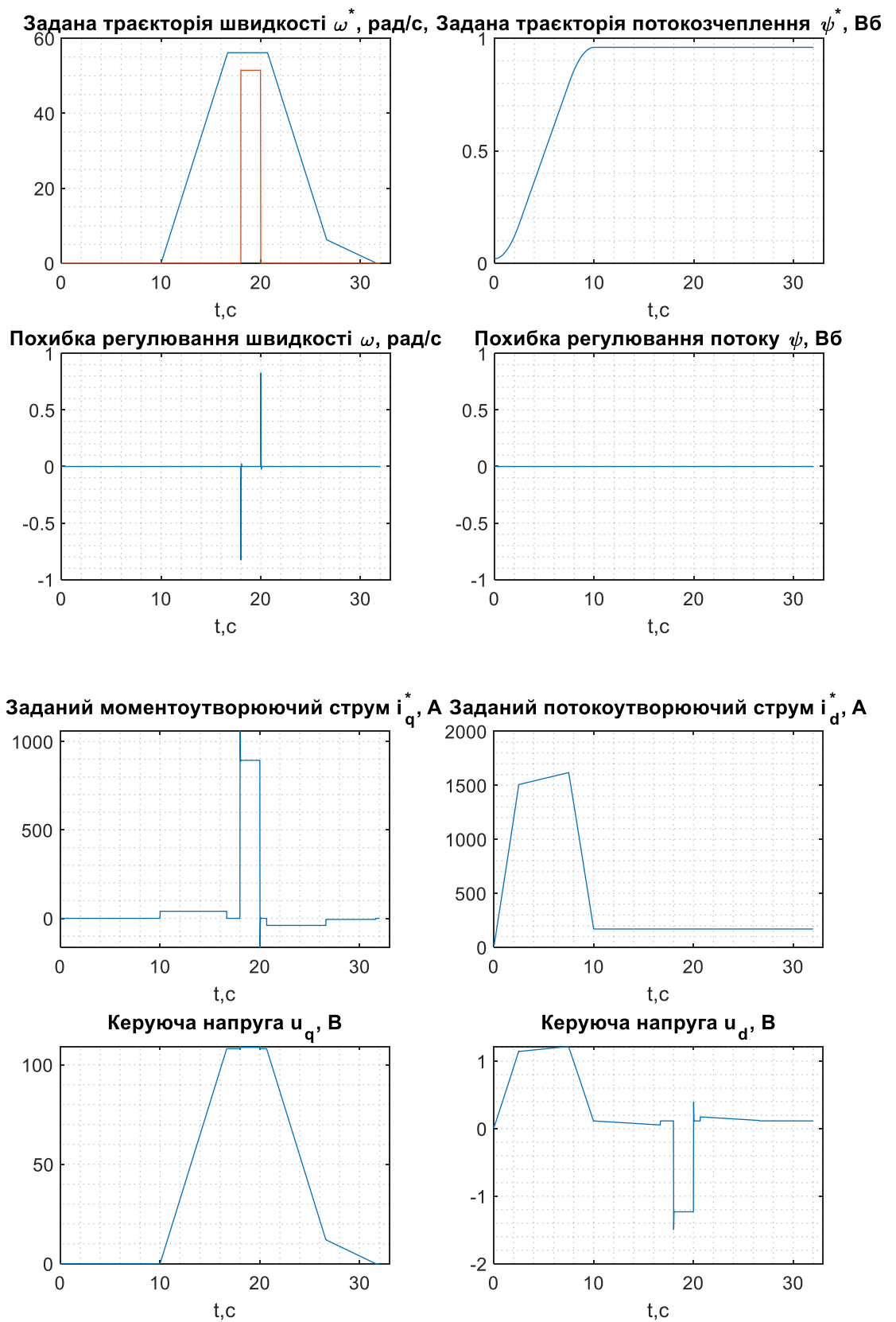


Рисунок А.5 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 1.2Qn при досліді зміни швидкості і прискорення

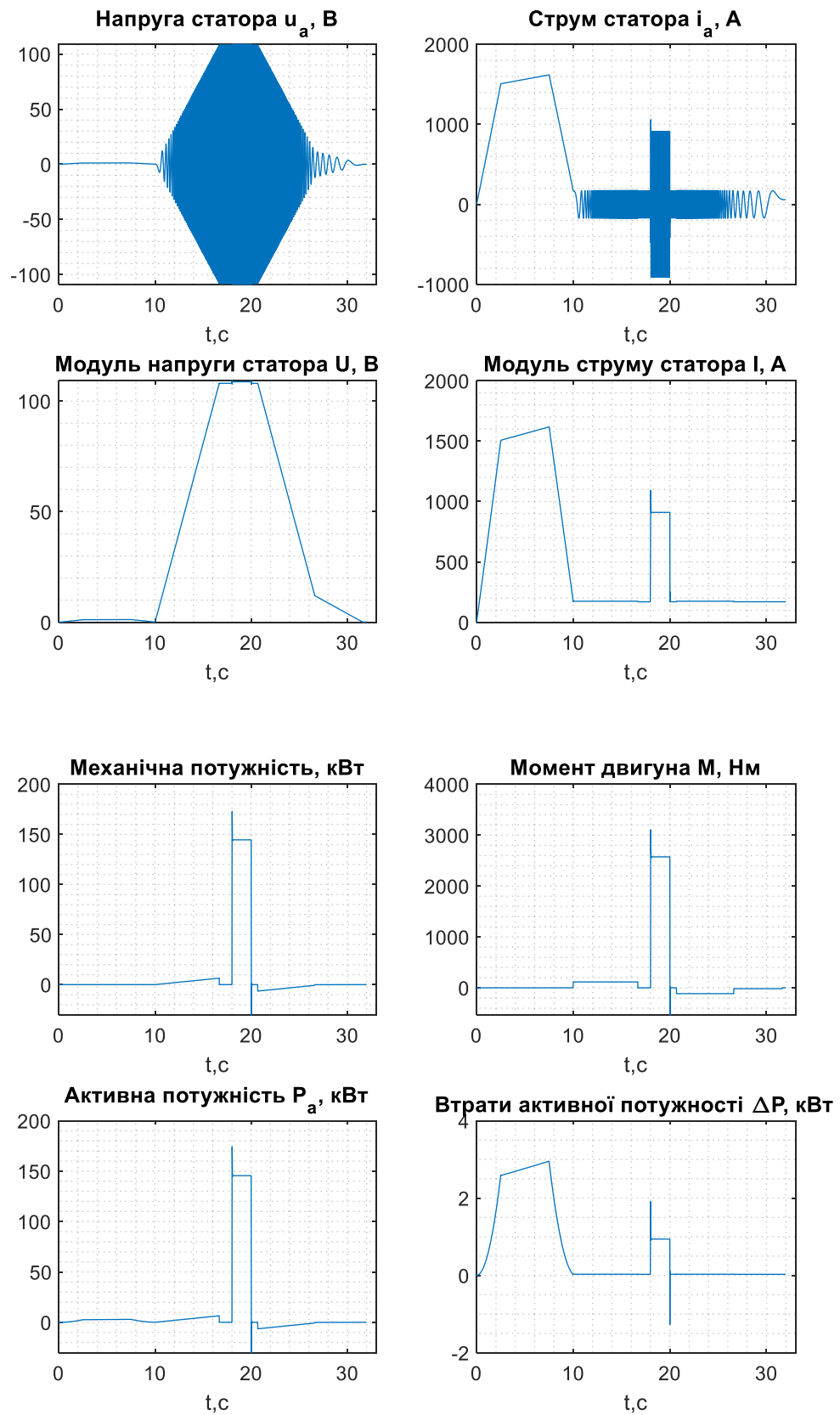


Рисунок А.6 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $1.2Q_n$ при досліді зміни швидкості і прискорення

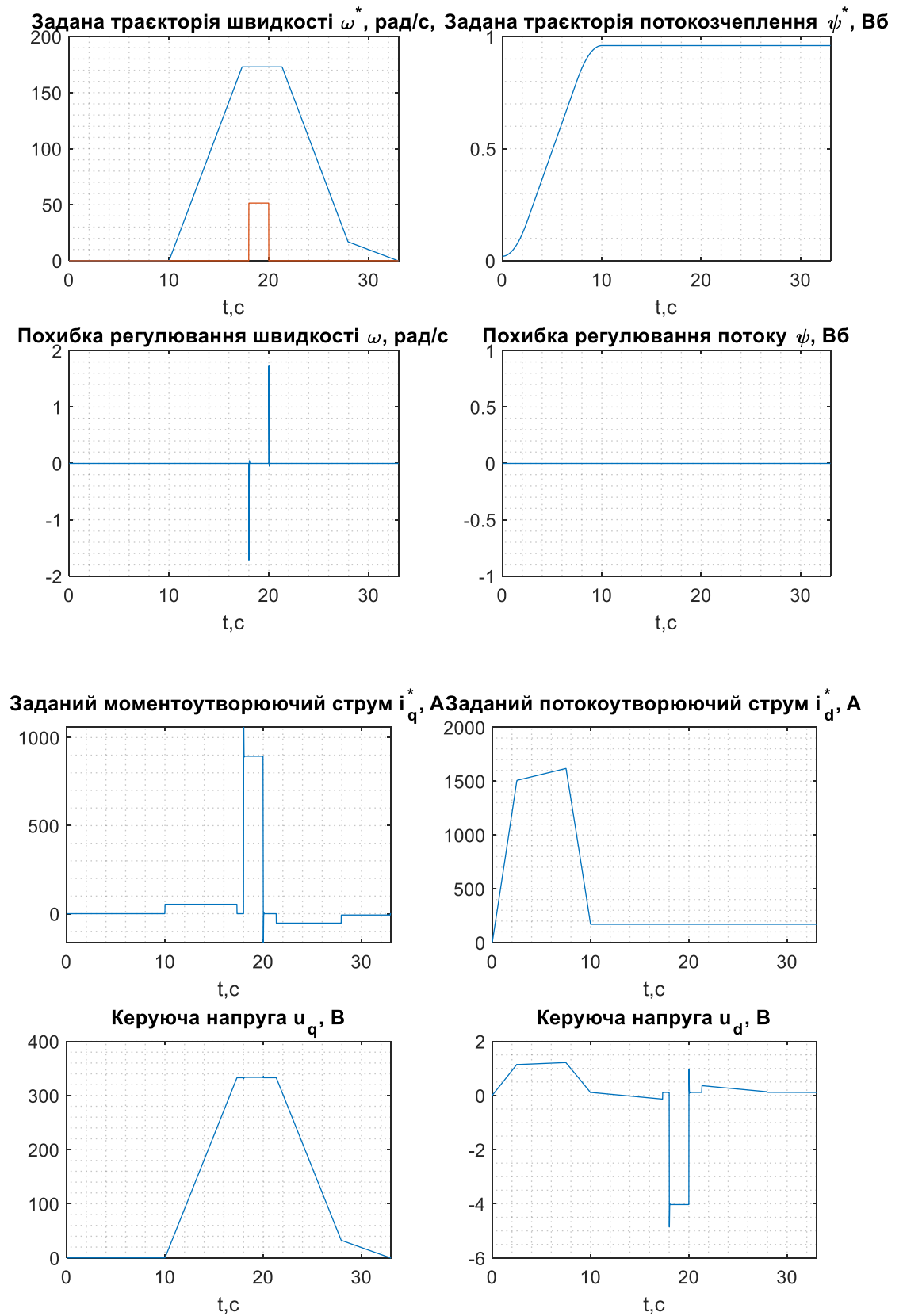


Рисунок А.7 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0Qn
при досліді зміни швидкості

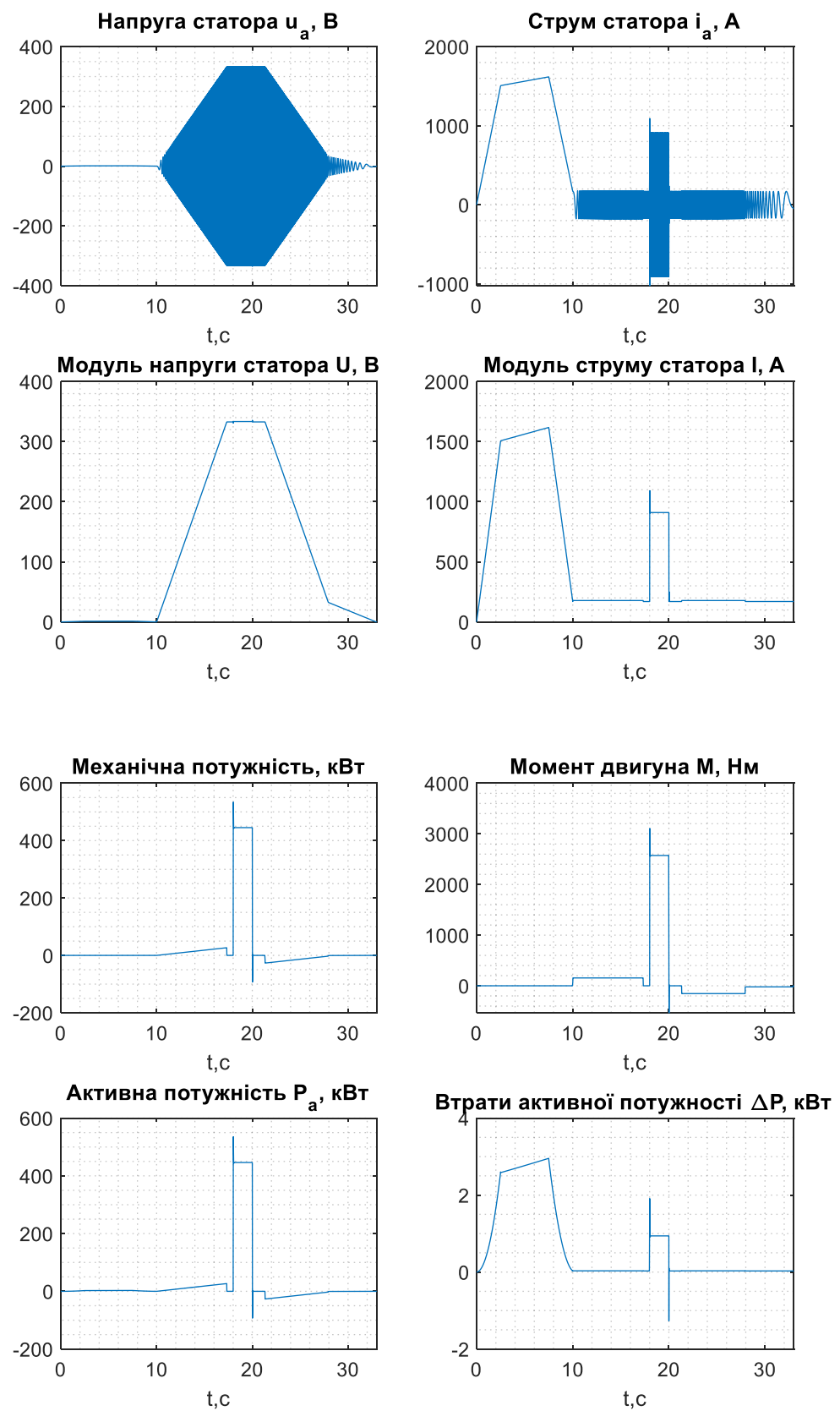


Рисунок А.8 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0Qn
при досліді зміни швидкості

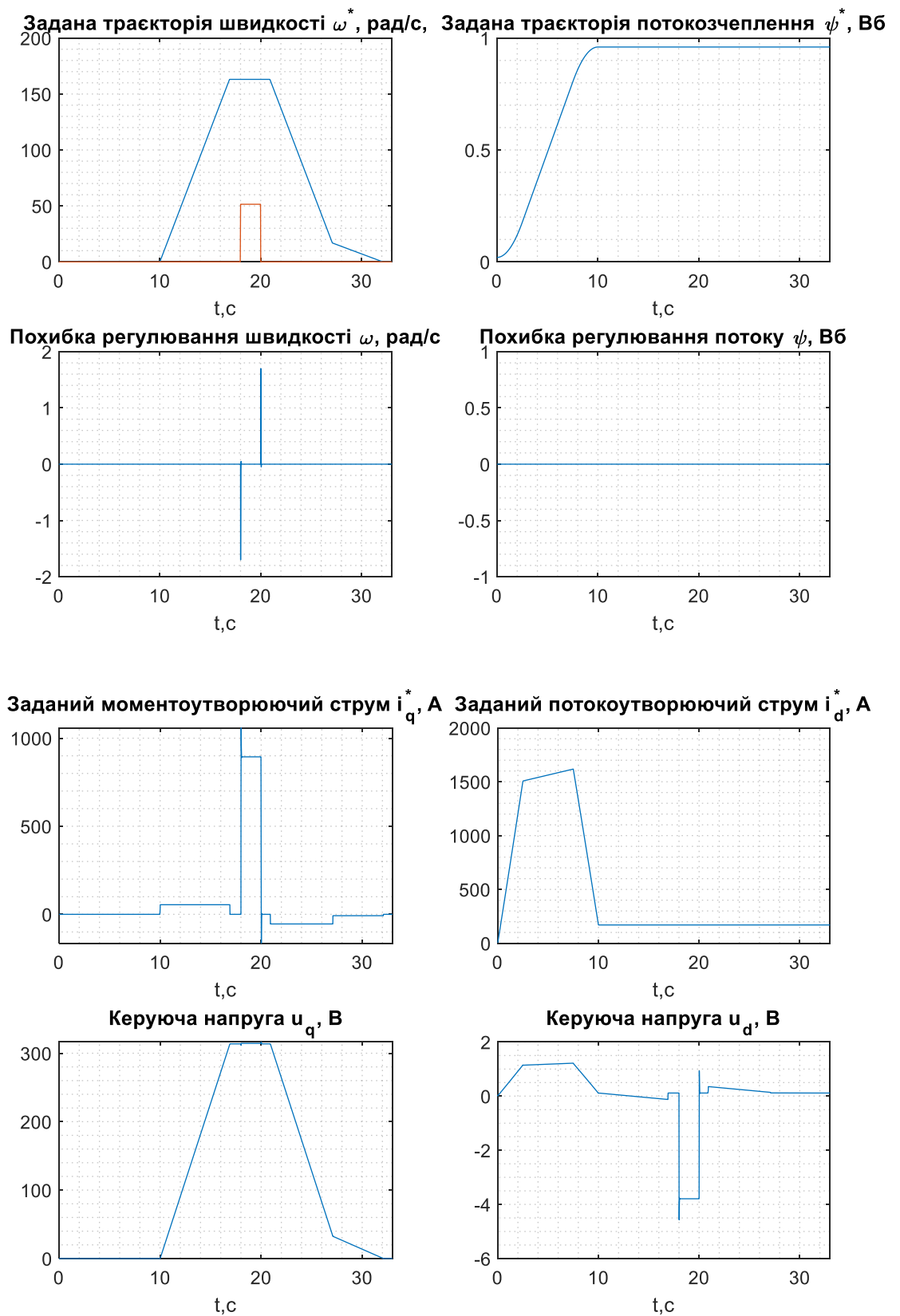


Рисунок А.9 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $0.5Q_n$ при досліді зміни швидкості

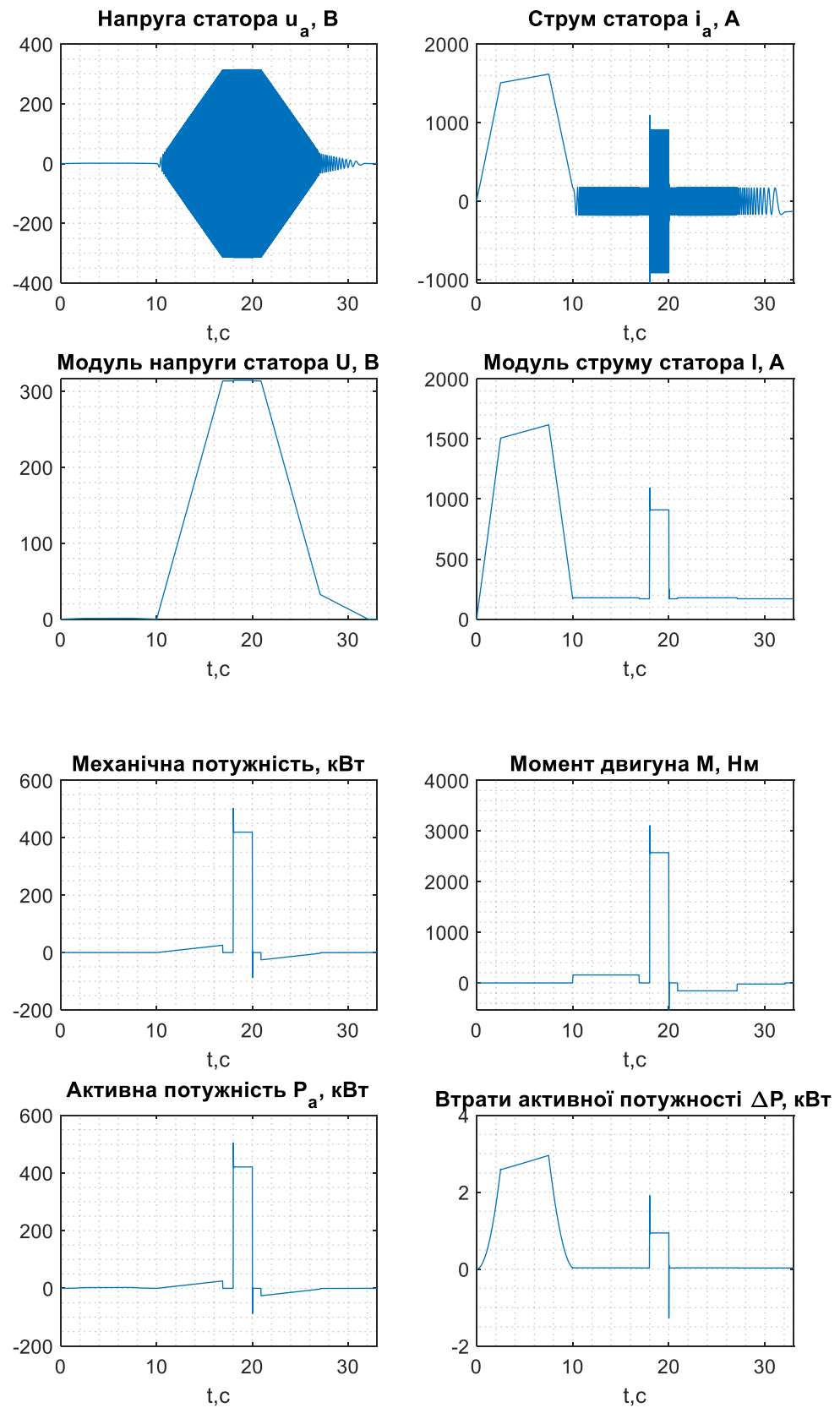


Рисунок А.10 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $0.5Q_n$ при досліді зміни швидкості

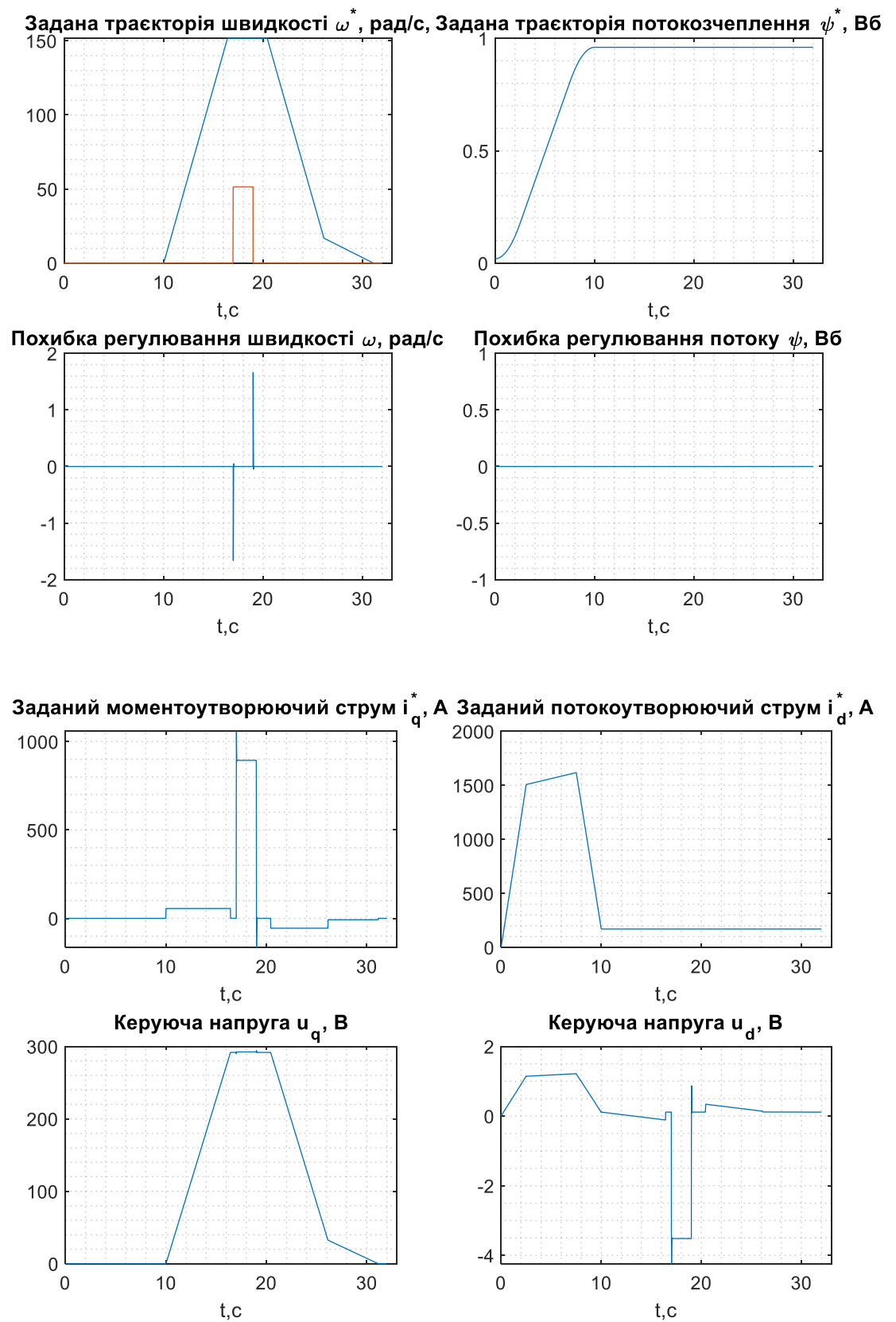


Рисунок А.11 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 1.2Qn при досліді зміни швидкості

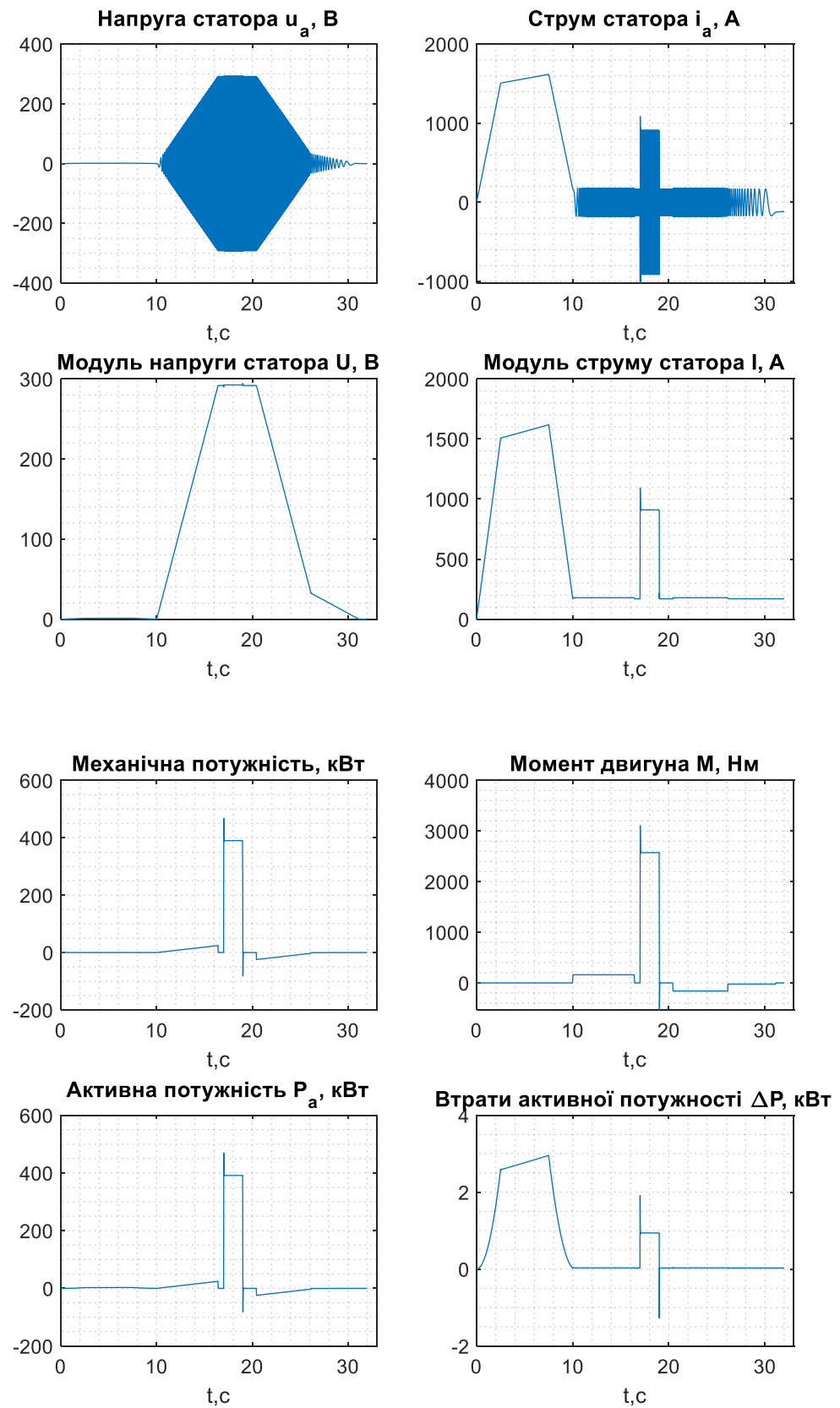


Рисунок А.12 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $1.2Q_n$ при досліді зміни швидкості

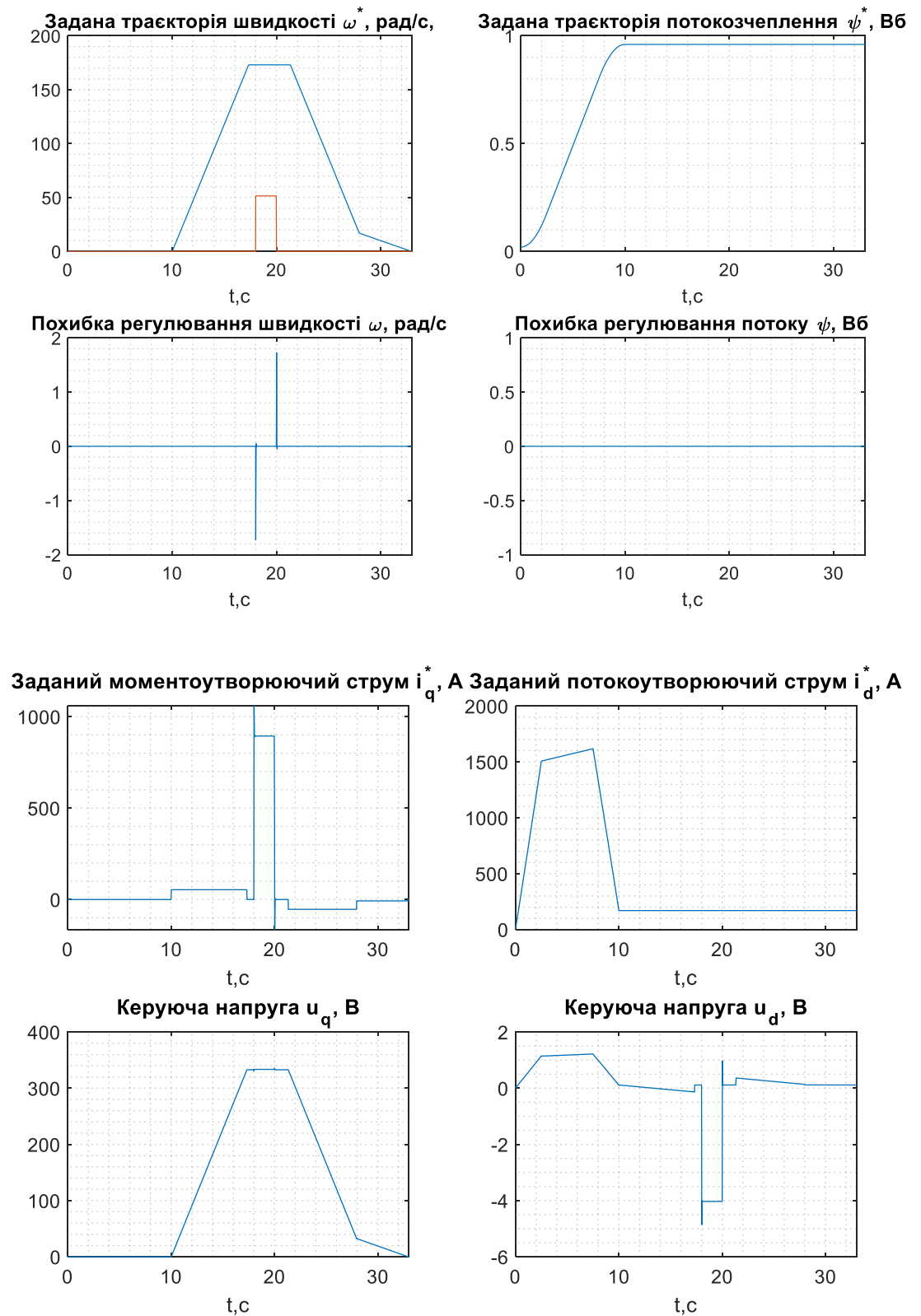


Рисунок А.13 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті
0Qn при досліді керування магнітною міткою

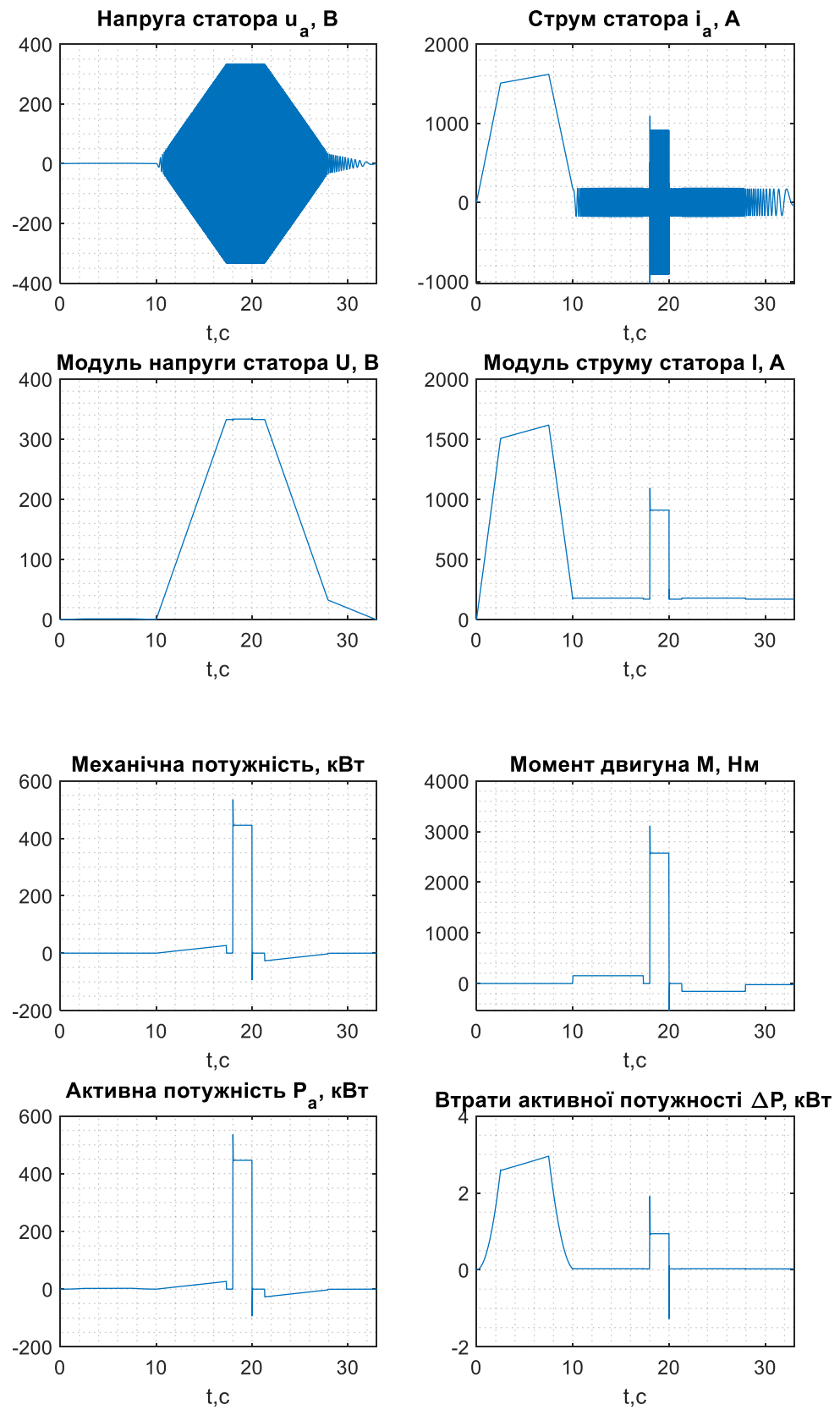


Рисунок А.14 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 0Qn при досліді керування магнітною міткою

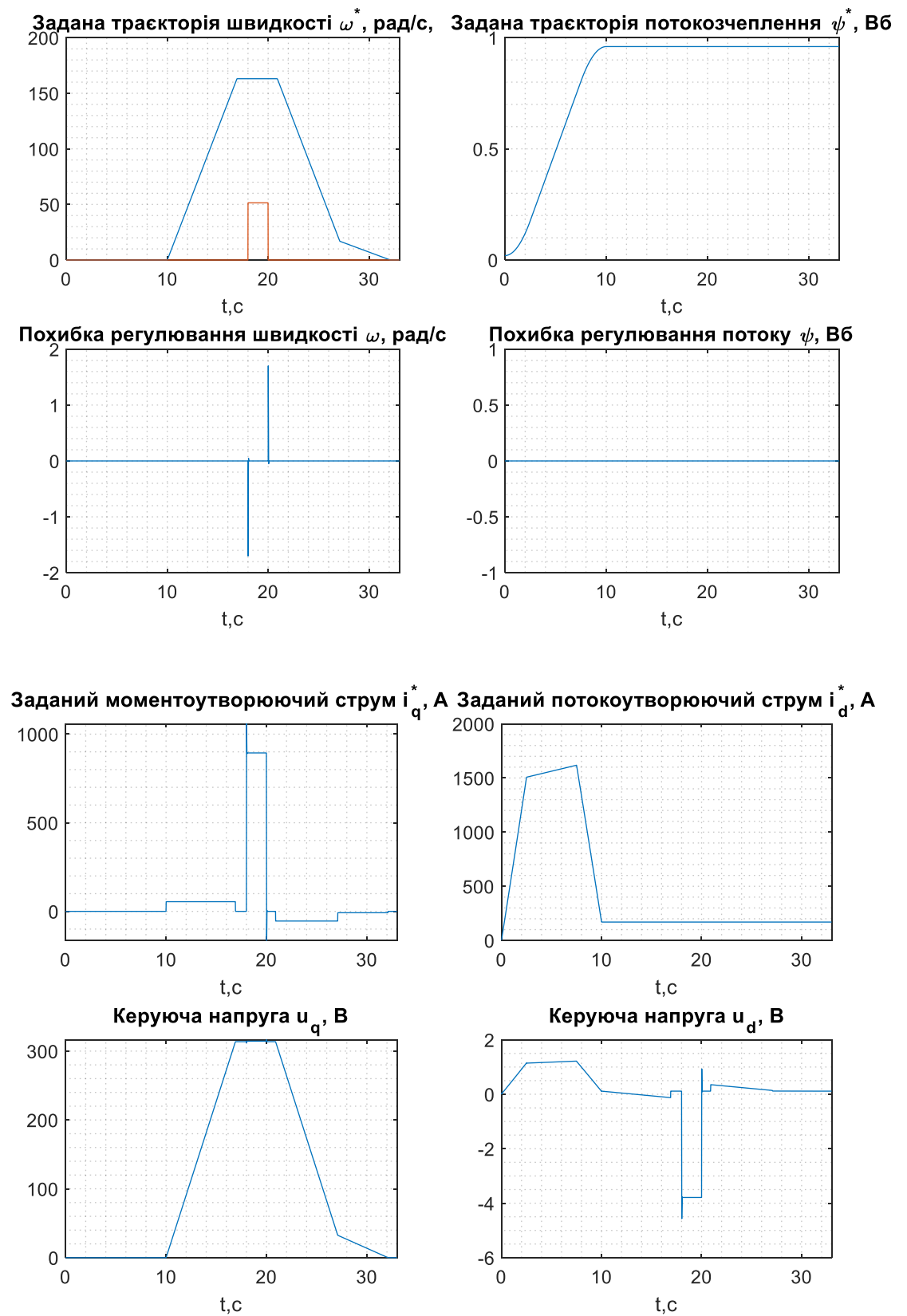


Рисунок А.15 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті
0.5Qn при досліді керування магнітною міткою

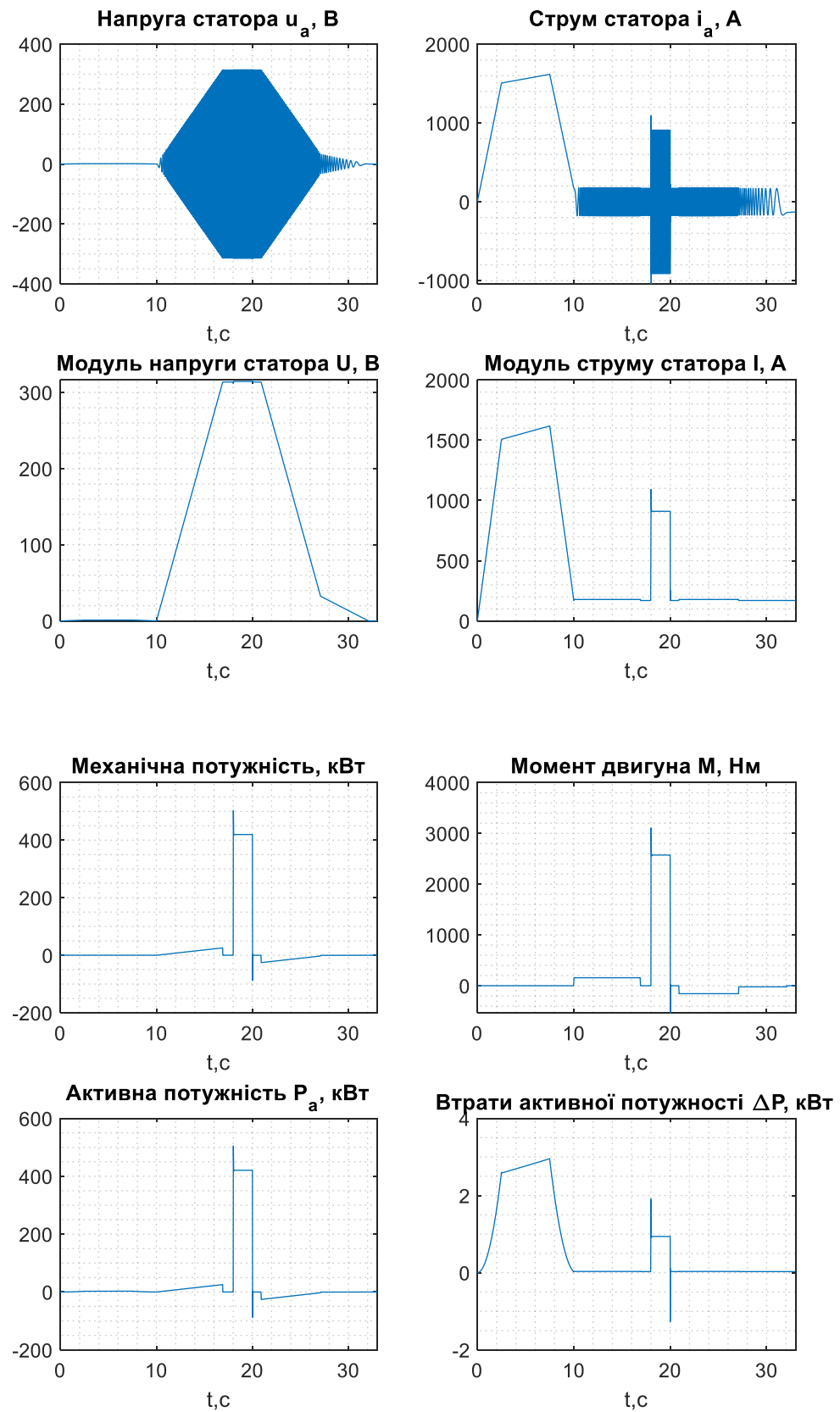


Рисунок А.16 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті $0.5Q_n$ при досліді керування магнітною міткою

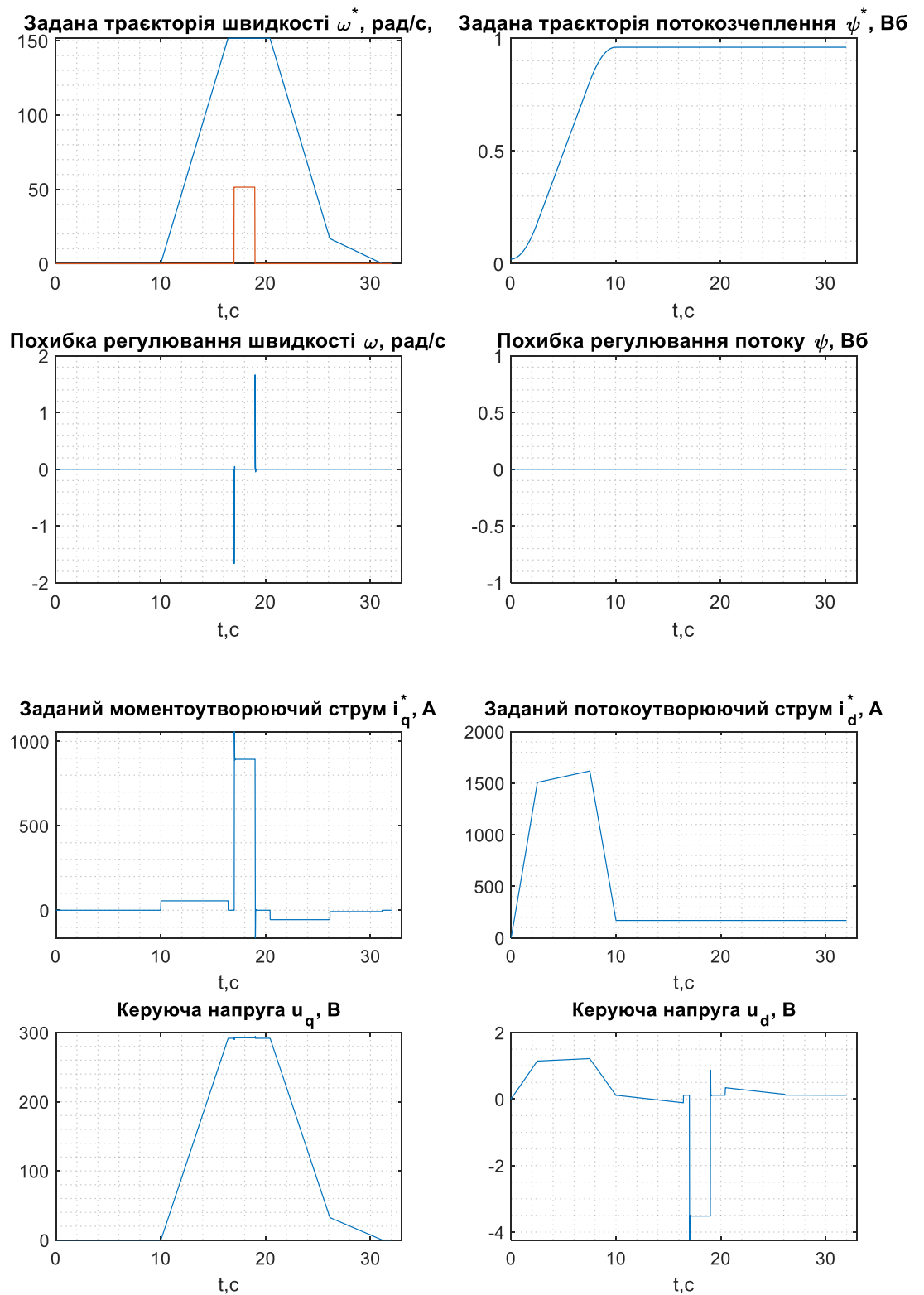


Рисунок А.17 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті
1.2Qn при досліді керування магнітною міткою

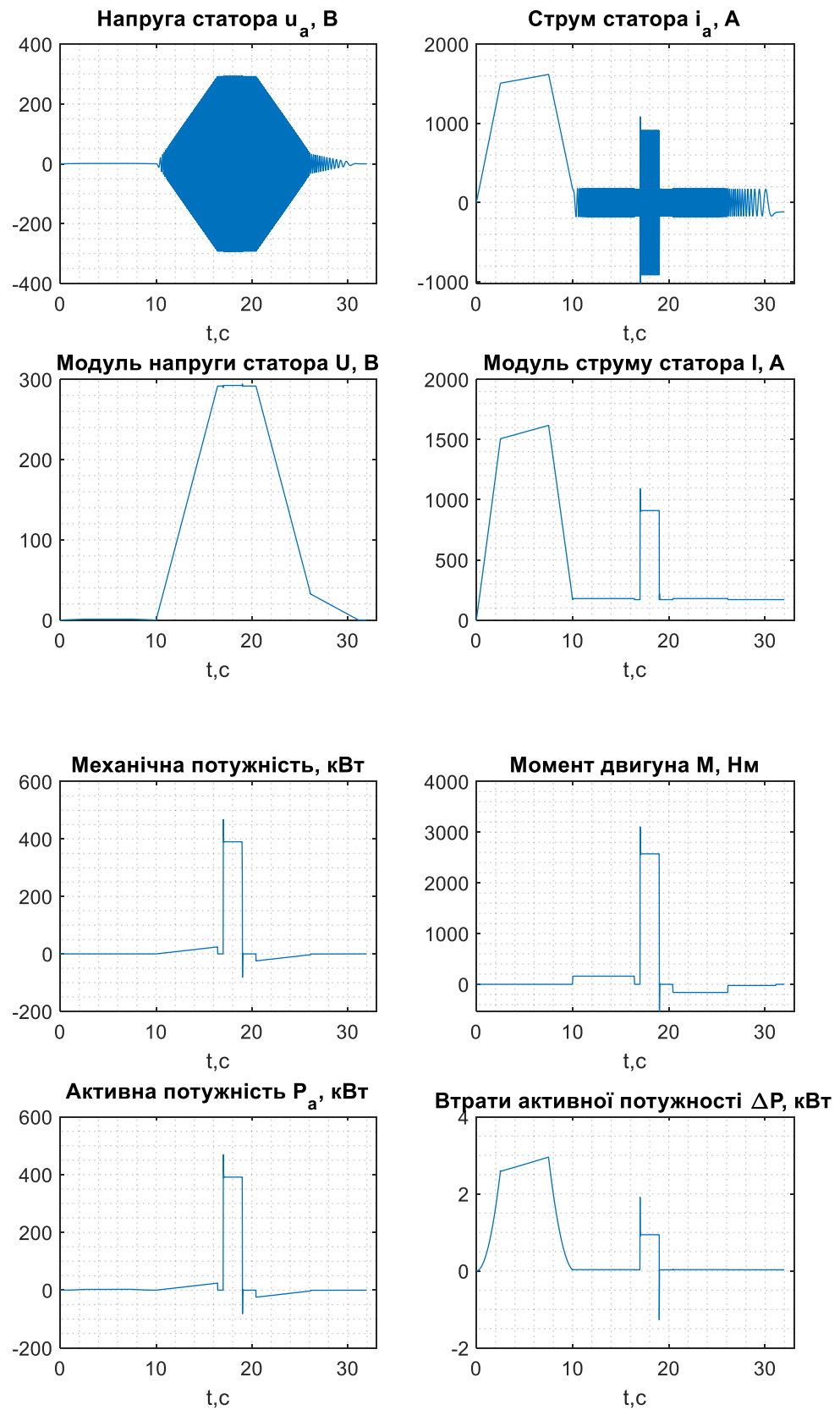
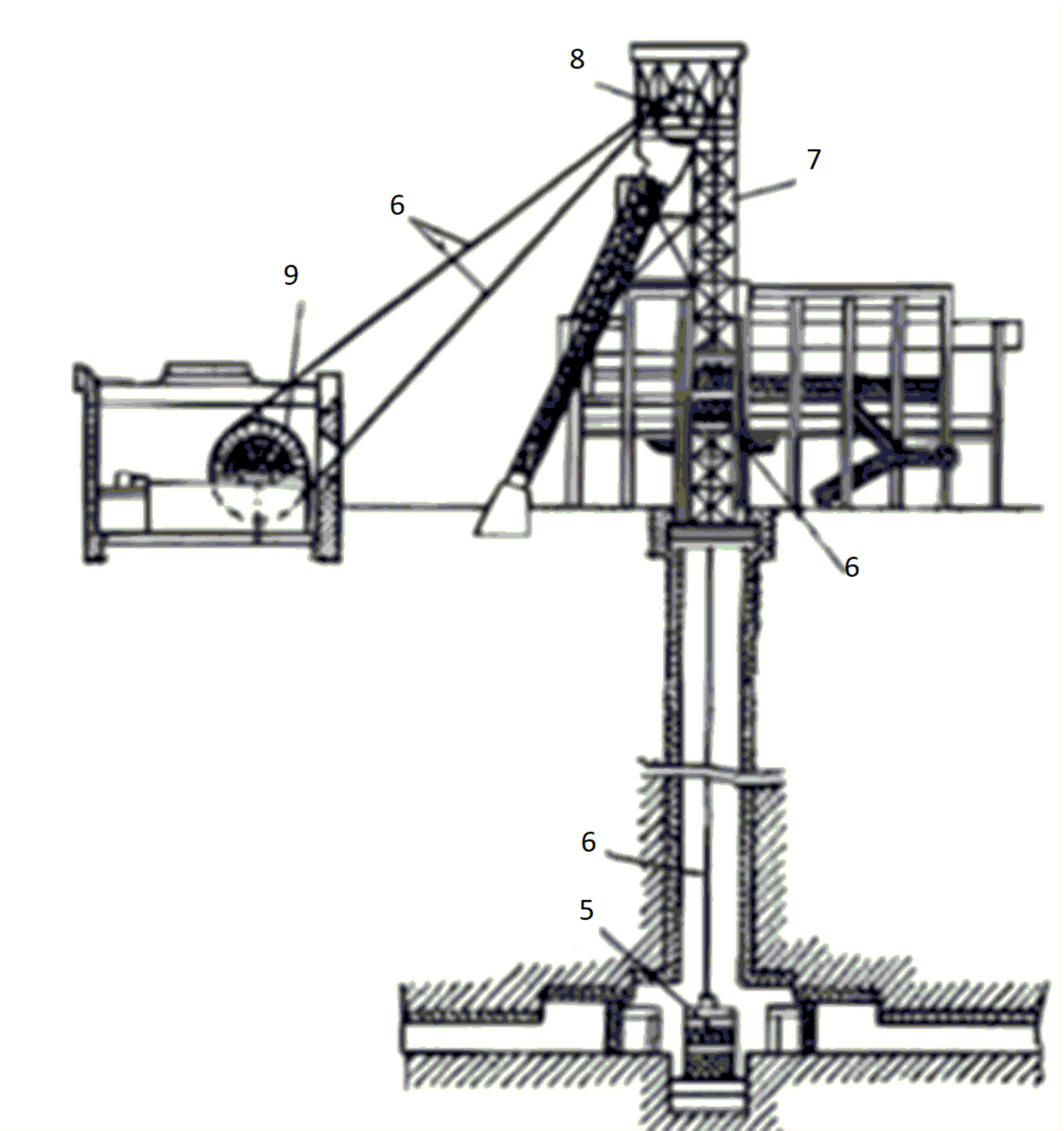


Рисунок А.18 – Графіки перехідних процесів при завантаженні кліті 1.2Qn при досліді керування магнітною міткою

8 ДОДАТОК Б

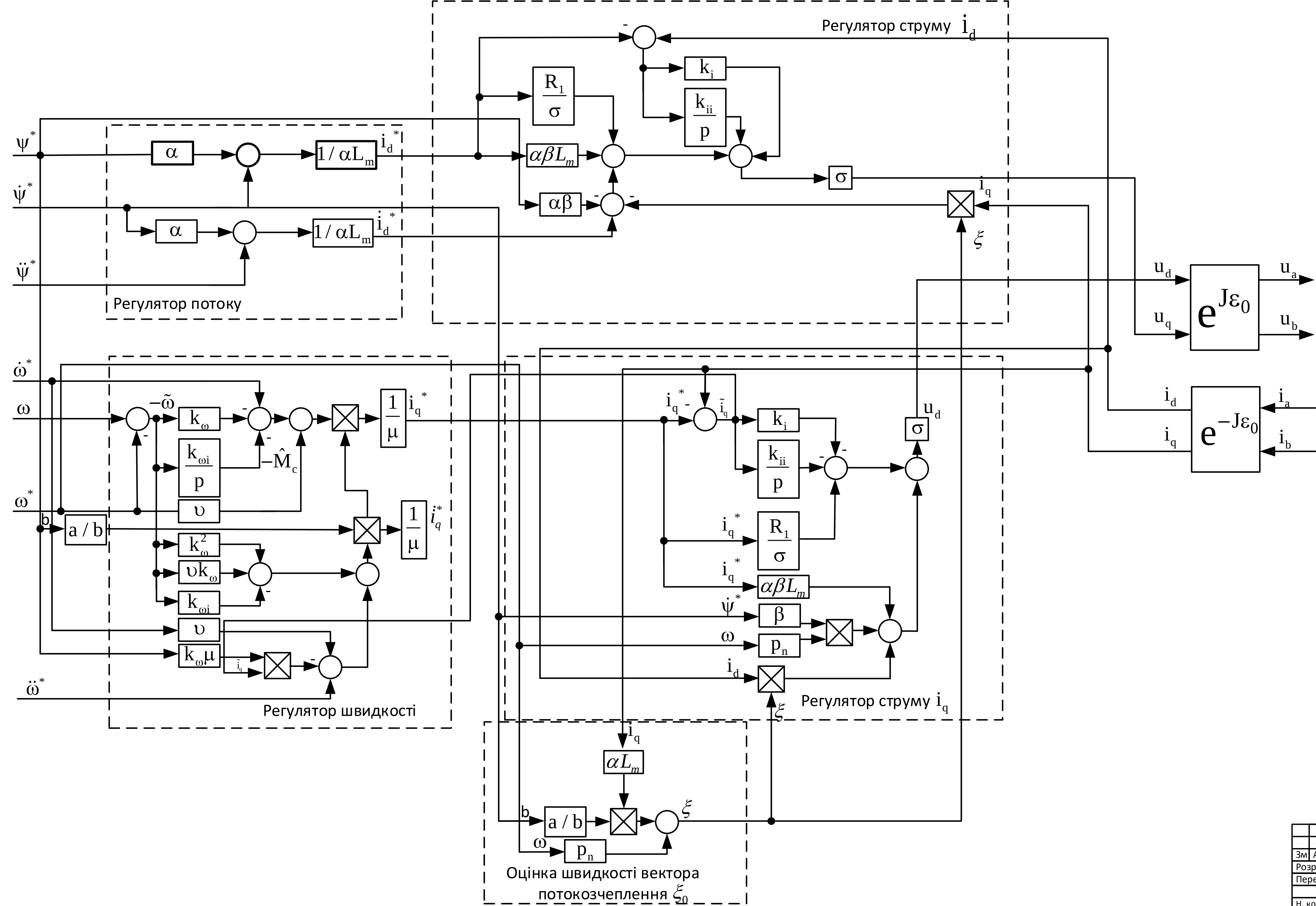
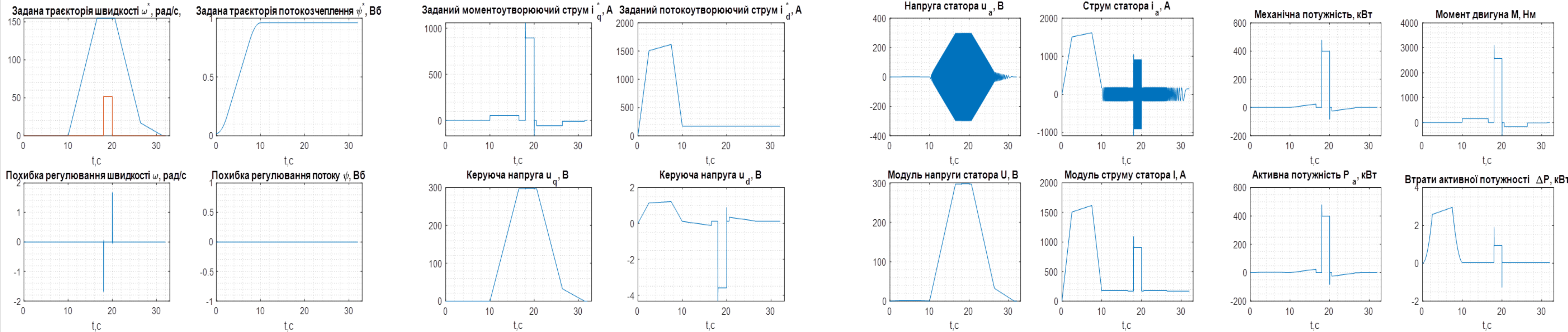
В додатку Б приведені листи графічної частини.



- 1 – намотувальний барабан
- 2 – гальмо
- 3 – редуктор
- 4 – електродвигун
- 5 – кліть
- 6 - підймальний канат
- 7 – копер
- 8 – шків
- 9 – підймальна машина
- 10 – пульт керування

					141.3107.000.МД				
Зм	Арк	Недокум.	Підп.	Дата		Літ	Аркуш	Аркушів	
Розроб.	Зарицький Б. В.		/		Дослідження параметрів руху шахтної клітьової підйомної установки при варіаціях рівня завантаження підйомного сосуду		1	6	НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА
Перев.	Печеник М. В.				Технологічна схема шахтної клітьової підйомної установки				каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-31мп
Н. контр.	Печеник М. В.								
Затв.	Ковбаса С. М.								

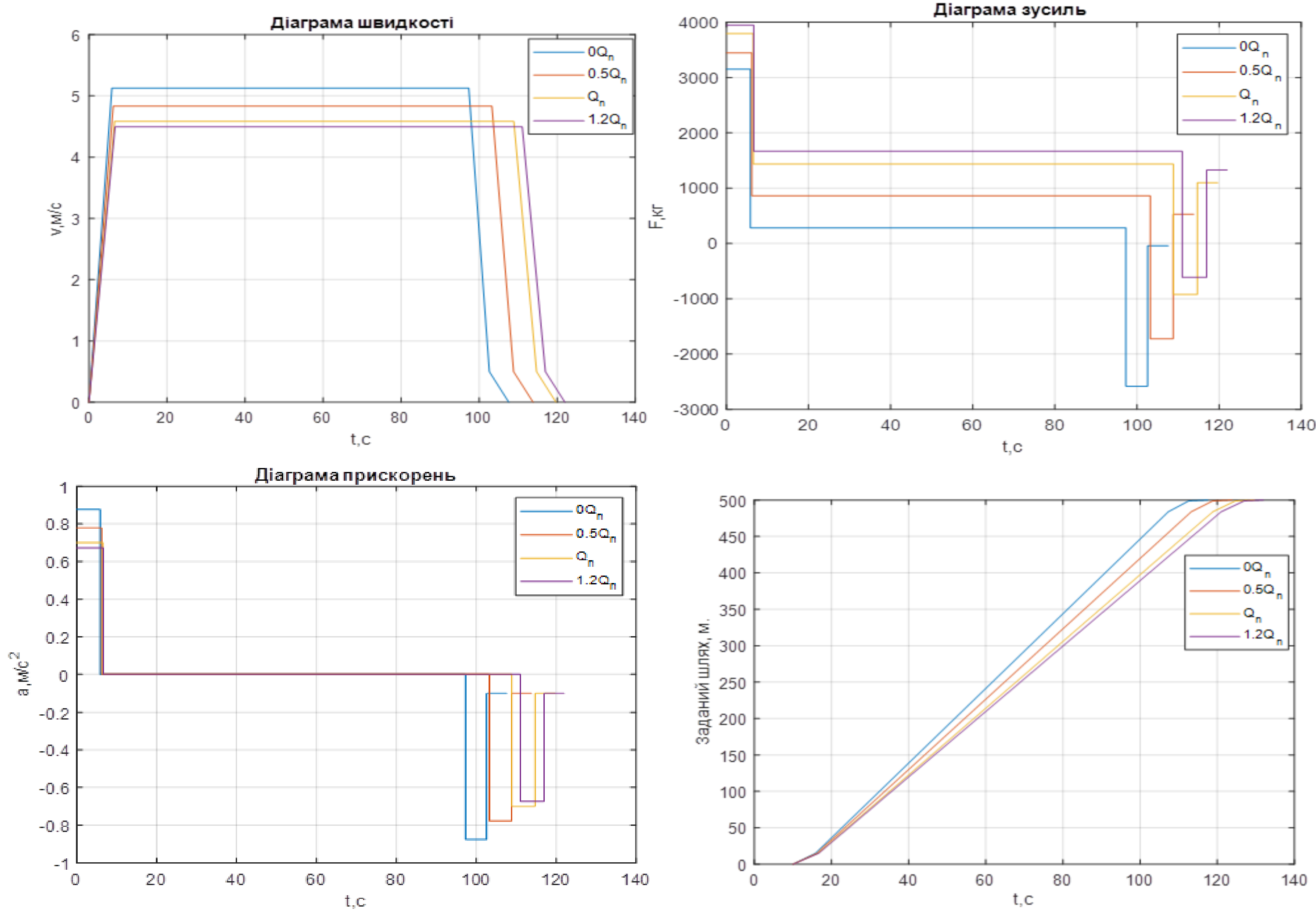
Перехідні процеси при номінальних параметрах швидкості і навантаження та структурна
схема



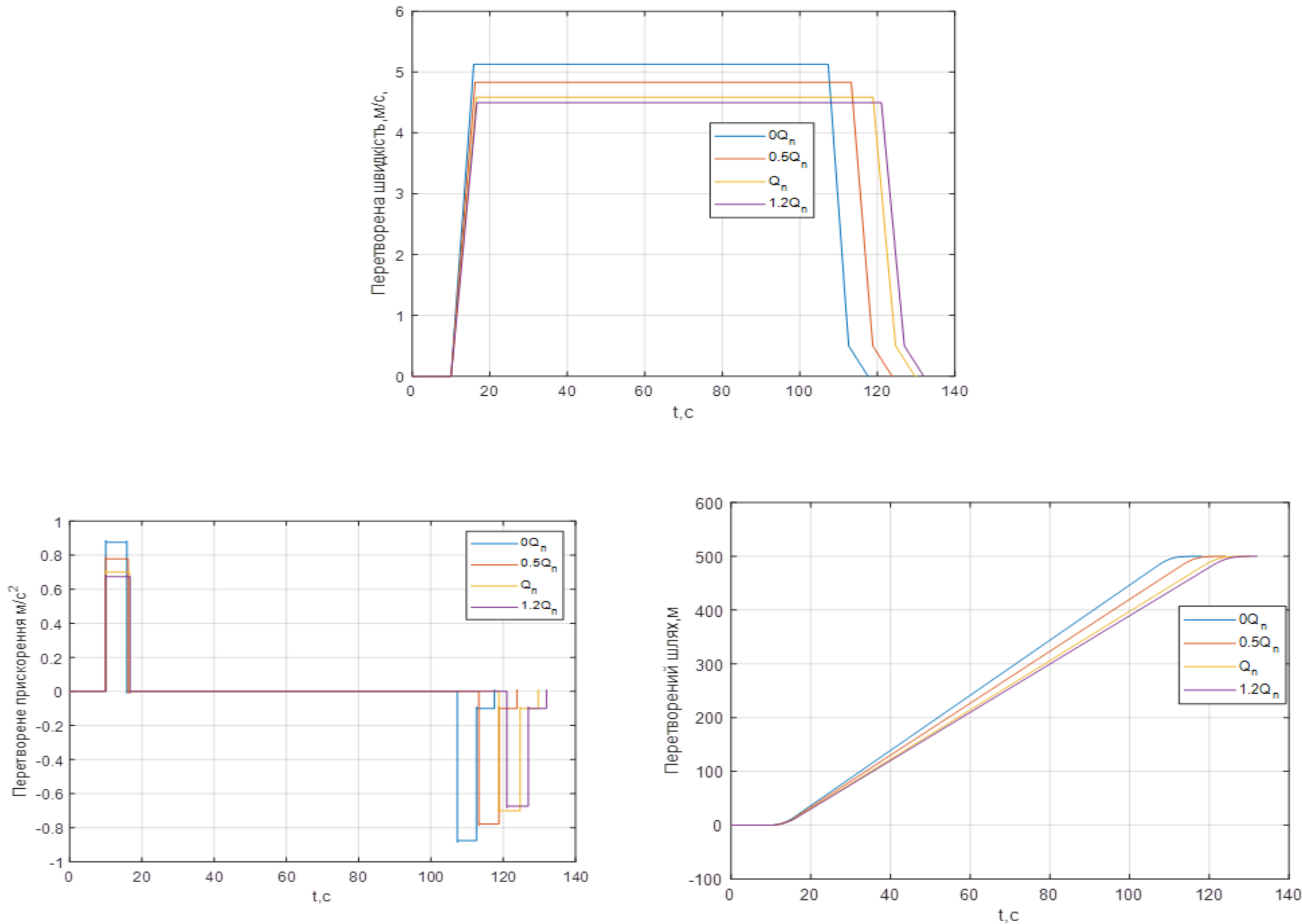
141.3107.000.МД					Літ		
Зм	Арк	Недокум.	Підп.	Дата	1	2	6
Розроб.	Зарицький Б. В.	✓			НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕА		
Перев.	Печенин М. В.						
Н. контр.	Печенин М. В.				каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-31мп		
Затв.	Ковбаса С. М.						

Дослідження режимів роботи підйомної установки

Зміна швидкості і прискорення розрахункове



Зміна швидкості і прискорення модельоване



Таблиця 2.1 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження, швидкості руху і прискорення підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимал ьна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях гальмування, м.	Час роботи за 1 підйом, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., %
1.2Qn	4.494	14.819	121.958	0.695
Qn	4.583	14.826	119.691	0.561
0.5Qn	4.832	14.844	113.81	0.516
0Qn	5.127	14.862	107.589	0.447

Продовження таблиці 2.1

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення ,м/ с ²	Похибка по часу, %
1.2Qn	0.67	1.9
Qn	0.7	0
0.5Qn	0.77	4.9
0Qn	0.87	10.1

Таблиця 4.1 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження, швидкості руху і прискорення підйомного сосуду

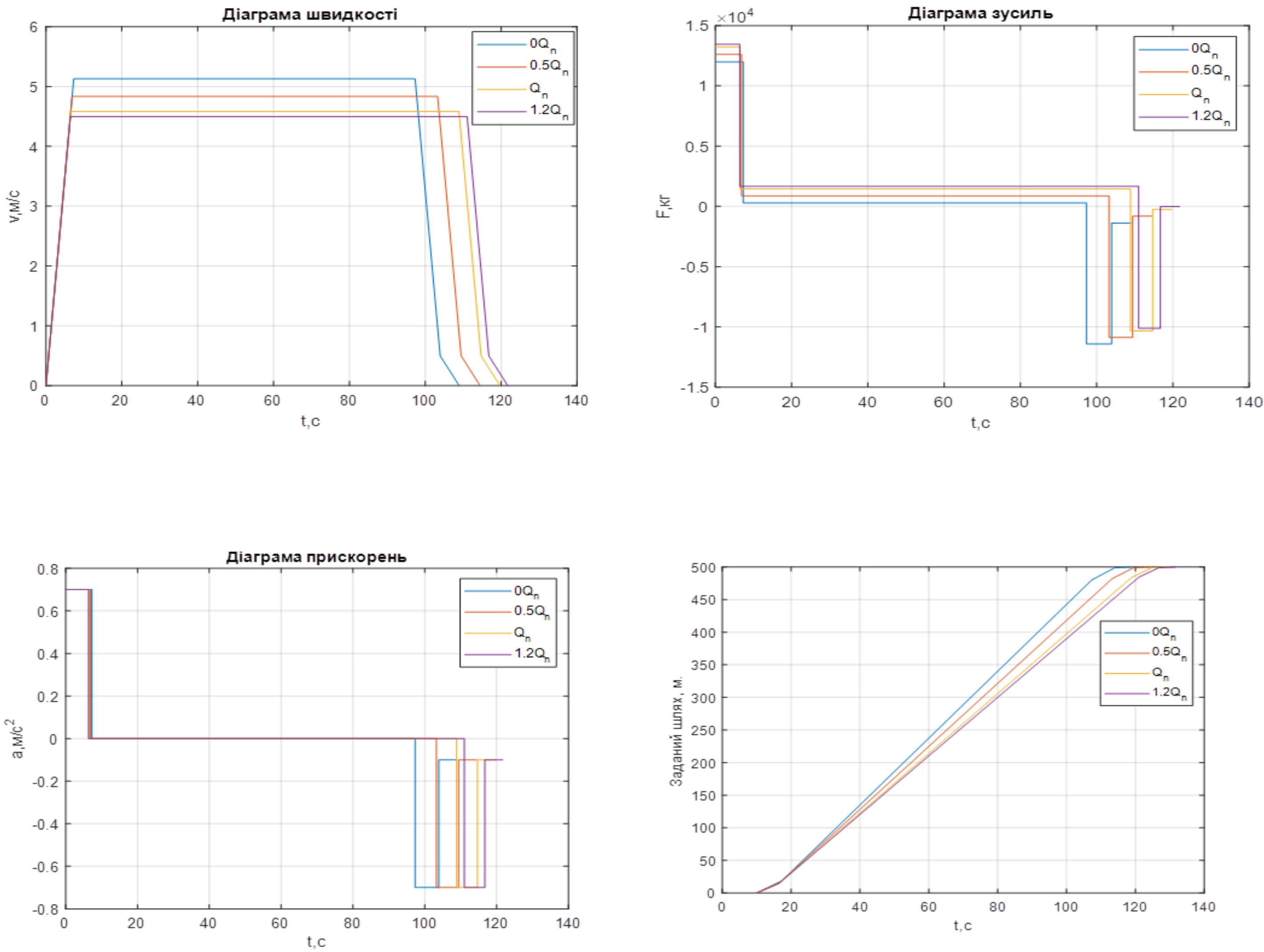
Навантаження на кліть, Н.	Максимал ьна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального 0.7 м/ с ² ,%	Пройдений час кліттю без врахування точності, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., x·раз
1.2Qn	4.494	1.265	122	0.695
Qn	4.583	1.126	120	0.561
0.5Qn	4.832	1.014	114	0.516
0Qn	5.127	0.975	108	0.447

Продовження таблиці 4.1

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення ,м/ с ²	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
1.2Qn	0.673	1.9	5.7
Qn	0.7	0	5.96
0.5Qn	0.778	4.9	6.62
0Qn	0.866	10.1	7.44

Дослідження режимів роботи підйомної установки

Дослід при зміні швидкості розрахункове



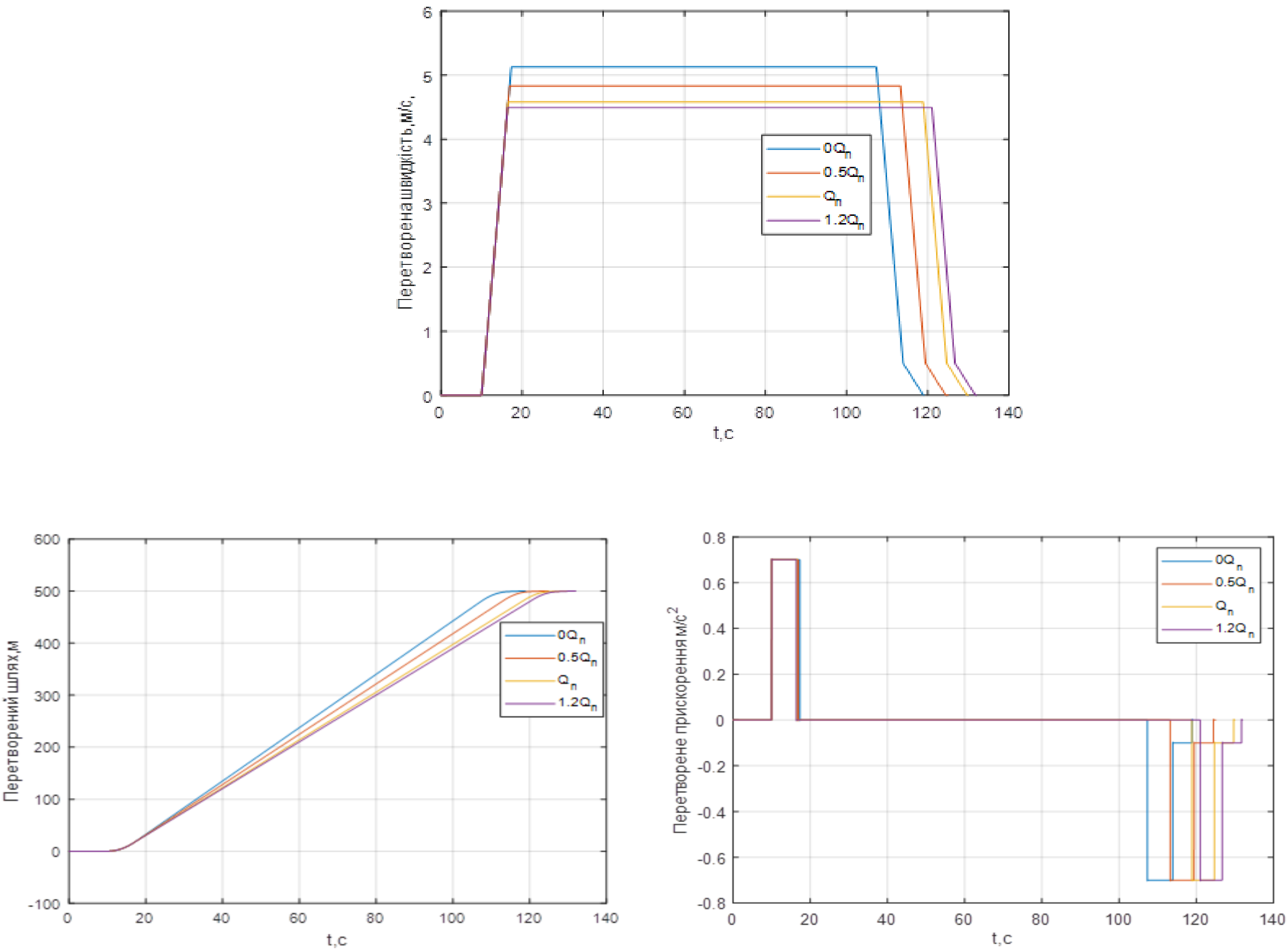
Таблиця 2.2 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження і швидкості руху підйомного сосуду

Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях гальмування, м.	Пройдений час кліттю без врахування точності, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., %
1.2Qn	4.494	14.247	121.728	1.397
Qn	4.583	14.826	119.691	1.416
0.5Qn	4.832	16.501	114.436	1.543
0Qn	5.127	18.597	108.924	1.298

Продовження таблиці 2.2

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, m/s^2	Похибка по часу, %
1.2Qn	0.7	1.7
Qn	0.7	0
0.5Qn	0.7	4.4
0Qn	0.7	9

Дослід при зміні швидкості модельоване



Таблиця 4.2 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження і швидкості руху підйомного сосуду

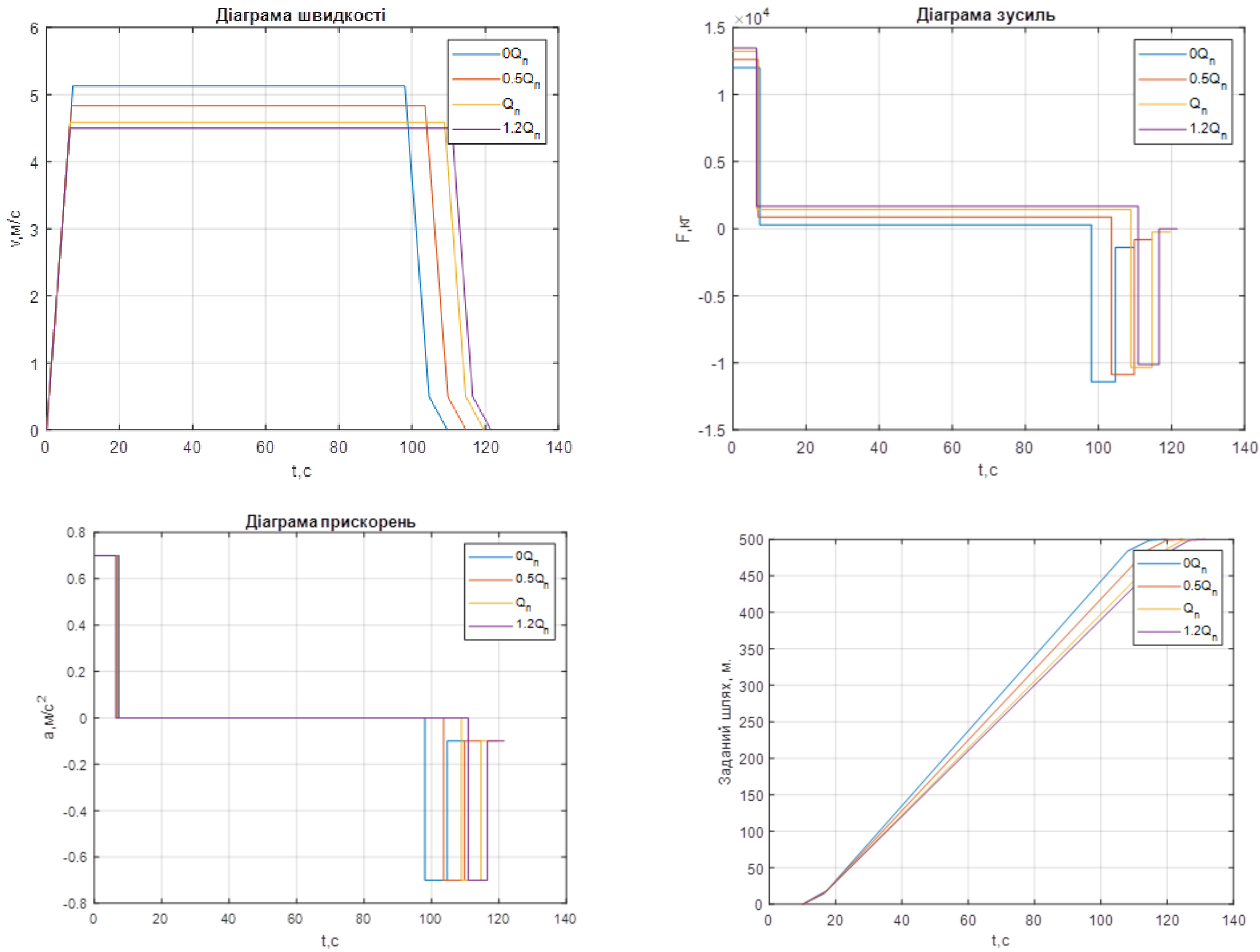
Навантаження на кліть, Н.	Максимальна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального 0.7 m/s^2 , %	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., $\text{x} \cdot \text{раз}$
1.2Qn	4.494	0.52	122	0.695
Qn	4.583	0.52	120	0.561
0.5Qn	4.832	0.52	115	0.516
0Qn	5.127	0.52	109	0.447

Продовження таблиці 4.2

Навантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення, m/s^2	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
1.2Qn	0.704	1.702	5.91
Qn	0.704	0	5.91
0.5Qn	0.704	4.39	5.91
0Qn	0.704	9	5.91

Дослідження режимів роботи підйомної установки

Дослід при регулюванні магнітною міткою розраховане



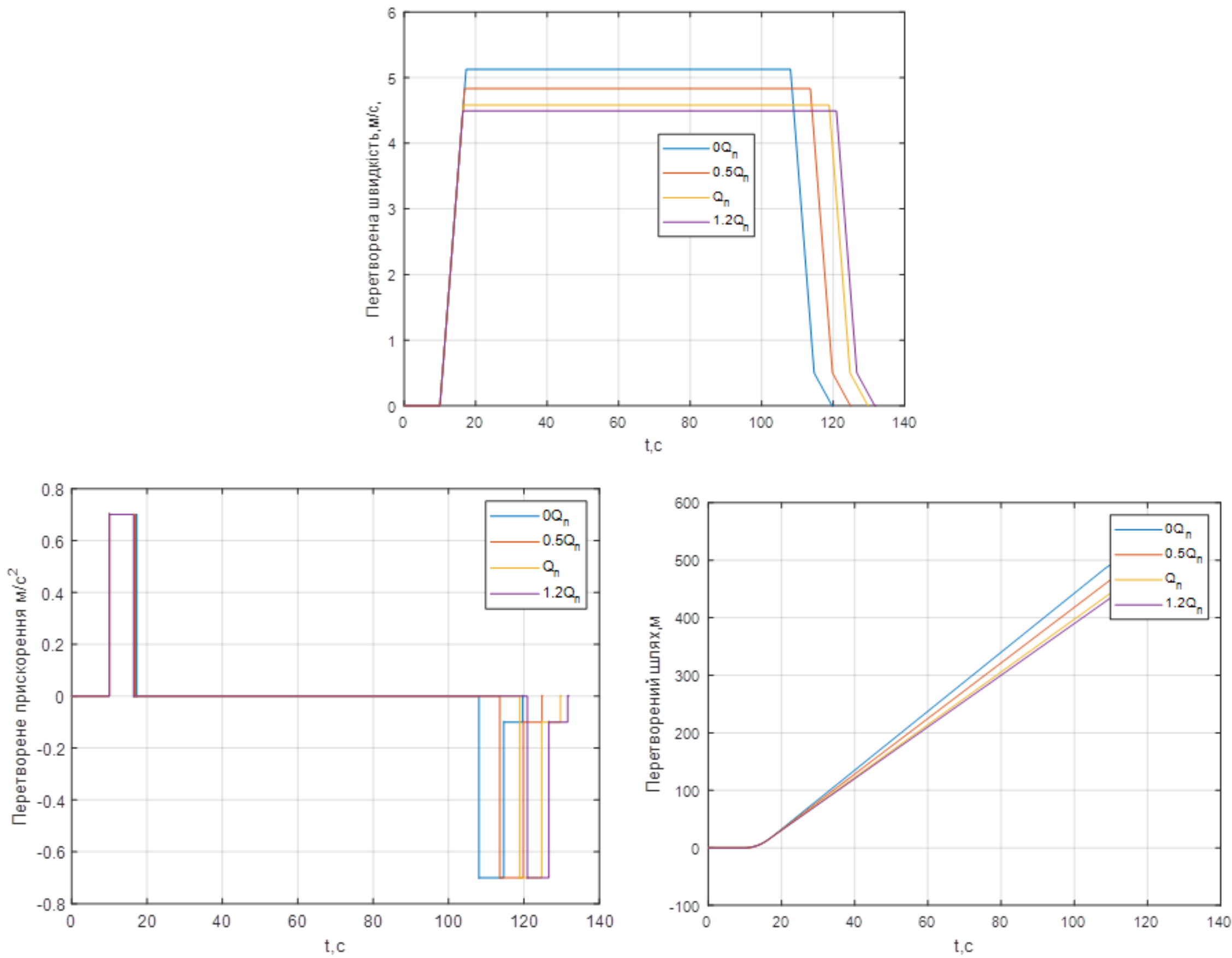
Таблиця 2.3 – Аналіз пройденого кліттю шляху при зміні завантаження та точки початку гальмування підйомного сосуду

Завантаження на кліть, Н.	Максимал ьна швидкість руху кліті, м/с	Пройдений шлях з максимально ю швидкістю, м.	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., x · раз
1.2Qn	4.494	469.498	121.599	2.88
Qn	4.583	468.919	119.691	0.01
0.5Qn	4.832	467.244	114.783	8.389
0Qn	5.127	465.148	109.659	18.87

Продовження таблиці 2.3

Завантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення , м / с ²	Похибка по часу, %
1.2Qn	0.7	1.6
Qn	0.7	0
0.5Qn	0.7	4.1
0Qn	0.7	8.4

Дослід при регулюванні магнітною міткою модельоване



Таблиця 4.3 – Аналіз параметрів руху кліті при зміні навантаження та точки початку гальмування підйомного сосуду

Завантаження на кліть, Н.	Максимал ьна швидкість руху кліті, м/с	Похибка відносно ідеального 0.7 м / с ² , %	Пройдений час кліттю, с.	Похибка по шляху відносно допустимої 0.2 м., x · раз
1.2Qn	4.494	0.52	122	2.882
Qn	4.583	0.52	120	0.01
0.5Qn	4.832	0.52	115	8.4
0Qn	5.127	0.52	110	18.869

Продовження таблиці 4.3

Завантаження на кліть, Н.	Прискорення сповільнення , м / с ²	Похибка по часу, %	Похибка між розрахунковим і модельованим прискоренням, %
1.2Qn	0.704	1.6	0.27
Qn	0.704	0	0.27
0.5Qn	0.704	4.1	0.27
0Qn	0.704	8.4	0.27