


Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи
векторного управління частотно-регульованого асинхронного
електропривода»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-21мз
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

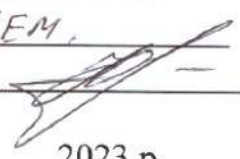

_____ Корнелюк О.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. каф. КЕМСК


_____ Розводюк М.П.
(прізвище та ініціали)

«05» _____ 06 _____ 2023 р.

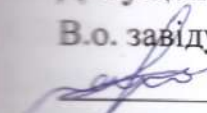
Опонент: доц. каф. ЕСБЕМ

к.т.н. Шугале Ю.А.
_____ (прізвище та ініціали) 

«09» _____ 06 _____ 2023 р.

Допущено до захисту

В.о. завідувача кафедри КЕМСК


_____ к.т.н., доц. Мошноріз М.М.

«07» _____ 06 _____ 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 14 Електрична інженерія
Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ



«20» 03 2023 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Корнелюку Оресту Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода

керівник роботи Розводюк М.П., к.т.н., доцент кафедри КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» 03 2023 року № 68

2. Строк подання студентом роботи «07» 06 2023 року

3. Вихідні дані до роботи

Асинхронний двигун з параметрами: номінальна потужність $P_n = 1,7$ кВт; номінальна напруга $U_n = 380$ В; номінальна швидкість обертання $n_n = 835$ об/хв; номінальний струм $I_n = 5,8$ А; активний опір обмотки статора $R_s = 5,78$ Ом; індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_s = 3,6$ Ом; приведений активний опір обмотки ротора $R'_r = 7,45$ Ом; приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора $X'_r = 3,17$ Ом; перевантажувальна здатність $\lambda = 1,9$; коефіцієнт потужності $\cos\phi = 0,61$; коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу $\cos\phi_0 = 0,166$; коефіцієнт корисної дії $\eta = 61\%$; момент $GD^2 = 0,08$ кг·м².

4. Зміст текстової частини:

1. Аналіз структури векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода.
2. Математичний опис частотно-регульованого асинхронного електропривода як об'єкта управління та розрахунок його параметрів. 3. Дослідження векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічному режимі. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Мета і задачі дослідження; 2. Об'єкт, предмет та методи дослідження; 3. Структури систем векторного керування асинхронним двигуном; 4. Структура системи ПЧ-АД при керуванні за потокозчепленням ротора; 5. Структура асинхронного двигуна, орієнтована за потокозчепленням ротора; 6. Узагальнені результати налаштування контурів регулювання;

7. Схема системи електропривода та асинхронного двигуна в середовищі Simulink (Matlab);
 8. Дослідження системи електропривода при оптимізованих параметрах; 9. Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру струму (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості; 10. Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру струму (стала часу) при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості; 11. Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру потоку (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості; 12. Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру потоку (стала часу) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості; 13. Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру швидкості при оптимальних параметрах контурів струму та потоку.
 14. Новизна та практичне значення одержаних результатів. Апробація результатів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Розводюк М.П., к.т.н., доцент	20.03.2023	05.06.23
Економічна частина	Шулле Ю.А., к.т.н., доцент	20.02.2023	05.06.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.пед.н., завідувач кафедри, професор	20.03.2023	05.06.2023

7. Дата видачі завдання «20» 03 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	20.03.2023	в.к.
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	16.05.2023	в.к.
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	05.06.2023	в.к.
4	Виконання розділу «Економічна частина»	05.06.2023	в.к.
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	05.06.2023	в.к.
6	Попередній захист МКР	07.06.2023	в.к.
7	Нормоконтроль МКР	05.06.2023	в.к.
8	Рецензування МКР	09.06.2023	в.к.
9	Захист МКР		

Студент

Орест КОРНЕЛЮК

Керівник роботи

Михайло РОЗВОДЮК

АНОТАЦІЯ

УДК 62-83

Корнелюк О.О. Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Вінниця: ВНТУ, 2023. 119 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 34 назв; рис.: 76; табл.: 8.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено дослідження поведінки системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода при зміні параметрів налаштування контурів.

Досліджено характер протікання перехідних процесів при оптимальних параметрах налаштування контурів струму, потоку та швидкості, а також при зміні коефіцієнтів підсилення та сталих часу регулювання кожного з контурів.

Дослідження проводилися з використанням програмних продуктів MathCAD та Simulink (Matlab).

Графічна частина складається з 19 плакатів із результатами моделювання.

У розділі охорони праці опрацьовано такі питання, як причини виникнення, дія на організм людини та нормування шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні; карта умов праці (обґрунтування вибору нормованих значень шкідливих та небезпечних виробничих факторів, оцінка факторів виробничого і трудового процесів, гігієнічна оцінка умов праці, оцінка технічного і організаційного рівня, атестація робочого місця); рекомендації щодо поліпшення умов праці, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

У економічному розділі розглянуто питання щодо ефективності наукових досліджень.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотно-векторне керування, асинхронний електропривод, контур регулювання.

ABSTRACT

Kornelyuk O.O. The influence of the setting conditions of the control circuits on the operation of the vector control system of the frequency-regulated asynchronous electric drive. Master's qualification work on specialty 141 – Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, educational program – Electromechanical automation systems and electric drive. Vinnytsia: VNTU, 2023. p.

In Ukrainian speech Bibliography: 34 titles; fig.: 76; tab.: 8.

In the master's qualification work, the behavior of the vector control system of the frequency-regulated asynchronous electric drive when the parameters of the circuit settings are changed is investigated.

The nature of the flow of transient processes at the optimal parameters of setting the current, flow and speed circuits, as well as at the change of the gain coefficients and time constants of adjustment of each of the circuits, was investigated.

Research was conducted using MathCAD and Simulink (Matlab) software products.

The graphic part consists of 19 posters with simulation results.

In the occupational health and safety section, issues such as the causes of occurrence, effects on the human body, and regulation of harmful and dangerous production factors in the production premises are elaborated; map of working conditions (justification of the choice of standardized values of harmful and dangerous production factors, assessment of factors of production and labor processes, hygienic assessment of working conditions, assessment of technical and organizational level, certification of the workplace); recommendations for improving working conditions, as well as fire safety regulations were considered.

The economic section deals with the question of the effectiveness of scientific research.

Key words: asynchronous motor, frequency-vector control, asynchronous electric drive, regulation circuit.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	8
1.1 Аналіз особливостей векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода.....	8
1.2 Структура системи векторного керування асинхронним двигуном.....	10
1.3 Постановка задачі дослідження.....	14
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЯК ОБ’ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ПАРАМЕТРІВ	15
2.1 Математичний опис та розрахунок параметрів асинхронного двигуна.....	15
2.2 Математичний опис та розрахунок параметрів системи керування.....	21
2.2.1 Перетворювач частоти.....	21
2.2.2 Контури струмів.....	23
2.2.3 Контур потокозчеплення ротора.....	25
2.3.4 Контур швидкості.....	26
2.3.5 Задавач інтенсивності.....	28
2.3 Узагальнення умов налаштування контурів.....	28
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ	30
3.1 Дослідження системи електропривода при оптимізованих параметрах.....	30
3.2 Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах ..	34
3.2.1 Неоптимальні параметри контуру струму при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості.....	34
3.2.2 Неоптимальні параметри контуру потоку при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості.....	48

3.2.3 Неоптимальні параметри контуру швидкості при оптимальних параметрах контурів струму та потоку	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..	66
4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи	66
4.1.1 Технічні рішення щодо обладнання робочого місця.....	66
4.1.2 Електробезпека	68
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	69
4.2.1 Мікроклімат	69
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	70
4.2.3 Виробниче освітлення	72
4.2.4 Виробничий шум.....	73
4.2.5 Психофізіологічні фактори	74
4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	75
4.3.1 Дослідження стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах дії іонізуючих випромінювань	76
4.3.2 Дослідження стійкості роботи системи керування електропривода постійного струму в умовах дії електромагнітного імпульсу	77
4.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах надзвичайних ситуацій	80
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	82
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	96
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	99
Додаток В (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	119

ВСТУП

Актуальність теми. Векторне управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом на даний час є найбільш перспективною системою електропривода з точки зору енергоефективності, точності керування та отримання бажаних характеристик. Сучасні векторні частотні перетворювачі мають досить широкий спектр функцій, що дозволяють налаштувати його параметри з припасуванням до конкретного асинхронного двигуна. Це дозволяє надавати всій системі електропривода наперед заданих властивостей, які відповідають налаштуванню згідно до вимог технологічного процесу.

Однак наявність помилок в налаштуванні системи векторного управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом, тобто неоптимальність налагодження, може призводити до різних наслідків: зменшенні енергоефективності, що супроводжується збільшенням втрат електроенергії; збільшення похибки відпрацювання заданих координат, що може супроводжуватися порушенням технологічного процесу; затяжними пусками, що може призводити до збільшення теплового навантаження на ізоляцію обмотки статора асинхронного двигуна та зменшення її робочого ресурсу тощо.

Виходячи з вище викладеного, дослідження умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода є задачею актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно науково-дослідної роботи кафедри Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів «29К4 – Діагностування силового електрообладнання та розподільних електричних мереж» у межах робочого часу у 2021-2022 рр.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є ідентифікація поведінки системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода при зміні умов налаштування контурів регулювання шляхом комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) здійснити аналіз структури векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода з точки зору формування бажаних характеристик;
- 2) математично описати частотно-регульований асинхронний електропривод як об'єкта управління та здійснити розрахунок його параметрів;
- 3) провести дослідження векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічному режимі.

Розв'язанню поставлених задач присвячена дана робота.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси зміни поведінки векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода при різних параметрах налагодження контурів регулювання.

Предметом дослідження є математичні моделі контурів регулювання векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Методи дослідження. Для вирішення і аналізу поставлених задач використані методи: теорія автоматичного керування, теорія систем керування електроприводами, математичне моделювання.

Новизна одержаних результатів. У роботі отримано такий новий результат:

– здійснена ідентифікація поведінки системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічному режимі при зміні умов налаштування контурів регулювання, що дозволяє прогнозувати параметри пуску та тривалість виходу на усталений режим роботи електропривода.

Практичне значення одержаних результатів. Використання одержаних результатів дозволить підвищити точність та якість керування системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода, що забезпечить підвищення енергоефективності та точності керування.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення та результати, виконаних у магістерській кваліфікаційній роботі

досліджень, доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 22 червня 2023 р.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи.
Основний зміст роботи опубліковано в тезах доповіді на конференції [22].

1 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Аналіз особливостей векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода

Суть векторного керування системи ПЧ-АД полягає в зміні частоти й поточних значень змінних АД, а також взаємної орієнтації їх векторів в полярній або декартовій системі координат [1] – [5].

Перевага векторного керування в порівнянні зі скалярним: повне управління АД як в статиці, так і в динаміці, що дає помітне покращення якості перехідних процесів (за рахунок регулювання амплітудних значень змінних і кутів між їх векторами).

При векторному частотному управлінні контролер обчислює напругу, необхідну підтримки моменту, що забезпечує стабільну частоту. На відміну від скалярного режиму, тут відбувається «розумне» керування магнітним потоком ротора [6].

Векторне управління асинхронним двигуном особливо актуальне на низьких частотах – нижче 10 Гц, коли робочий момент двигуна сильно падає. Крім того, даний метод дозволяє тримати стабільну швидкість (з передбачуваною лінійною зміною) при розгоні. Це досягається за рахунок отримання високого пускового моменту до виходу двигуна на режим.

Важливо й те, що при векторному управлінні відбувається заощадження електроенергії (у деяких випадках – до 60%), оскільки більшість часу частотний перетворювач передає в двигун рівно стільки енергії, скільки необхідно для підтримки заданої швидкості.

У найбільш загальному випадку система векторного керування асинхронним електроприводом повинна вирішувати завдання регулювання і стабілізації моменту і швидкості двигуна.

Розрізняють два види векторного управління – без сенсора швидкості (без зворотного зв'язку, або безсенсорне) і зі зворотним зв'язком, коли як сенсор, як правило, використовується енкодер.

Способи отримання інформації про поточні значення і просторове положення векторів змінних АД:

- пряме їх вимірюванням за допомогою відповідних сенсорів;
- опосередковано на основі математичної моделі АД (конфігурація і складність такої моделі визначаються технічними вимогами до ЕП).

Системи з непрямим регулюванням координат ЕП через нестабільність параметрів АД і складністю їх взаємозв'язку поступаються за своїми статичним і динамічним показникам системам з прямим векторним керуванням.

При складності обчислювальних операцій та алгоритмів керування електроприводом перевага систем з непрямим регулюванням полягає в простоті технічних рішень і, отже, у практичній надійності.

При векторному керуванні без зворотного зв'язку частотний перетворювач обчислює швидкість обертання двигуна за математичною моделлю на основі раніше введених даних (параметрів двигуна) та даних про миттєві значення струму і напруги. Маючи отримані розрахунки, перетворювач частоти приймає рішення про зміну вихідної напруги.

Перед включенням векторного безсенсорного режиму необхідно ретельно виставити номінальні параметри двигуна: напругу, струм, частоту, швидкість (оборотів), потужність, кількість полюсів, а також опір обмоток та індуктивні параметри. Якщо якісь значення невідомі, рекомендується провести автотестування двигуна на холостому ході. Деякі моделі векторних перетворювачів частоти встановлюють стандартні параметри для стандартного двигуна після введення номінальних значень. Також необхідно задати межі часових та струмових параметрів векторного керування [6].

Векторне керування зі зворотним зв'язком відрізняється вищою точністю керування швидкістю двигуна [7]. Зворотний зв'язок забезпечує енкодер, який сполучається з частотним перетворювачем через додатковий модуль.

Енкодер встановлюється на валу електродвигуна або наступного механізму і передає дані про поточну частоту обертання. На підставі отриманої інформації, перетворювач змінює напругу, момент і, відповідно, швидкість двигуна. Варто додати, що при високих динамічних навантаженнях (часті зміни моменту) і роботі на знижених швидкостях рекомендується застосування примусового охолодження зовнішнім вентилятором.

Способи живлення АД:

- від джерела напруги;
- від джерела струму (частотно-струмове керування).

Найбільш поширений спосіб живлення – частотно-струмове керування, при якому регулювання струму здійснюється незалежно від частоти живлення АД, чим забезпечується регулювання і його моменту. Це спрощує схему управління та одночасно обмежує перегрів двигуна. При цьому напруги на обмотках статора АД встановлюються автоматично залежно від його режиму роботи.

1.2 Структура системи векторного керування асинхронним двигуном

Спрощена структура системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна приведена на рисунку 1.1 [8].

Керувати швидкістю АД можна, змінюючи його момент, тобто система повинна містити регулятор швидкості, який задає момент, та структуру, що забезпечує його відпрацювання.

Момент двигуна можна змінювати за допомогою керування струмом статора (вектором струму статора). Тоді для синтезу системи ненеобхідно зв'язати момент двигуна з параметрами вектора струму статора.

При векторному управлінні регулювання здійснюється в системі координат, що обертається синхронно з векторами станів двигуна. Цю систему координат можна пов'язати з різними векторами станів, але, як правило, її пов'язують із вектором ψ – потоком ротора. Осі цієї двофазної системи

координат називають d і q , причому по потоку ротора орієнтують віссю d цієї системи [8].

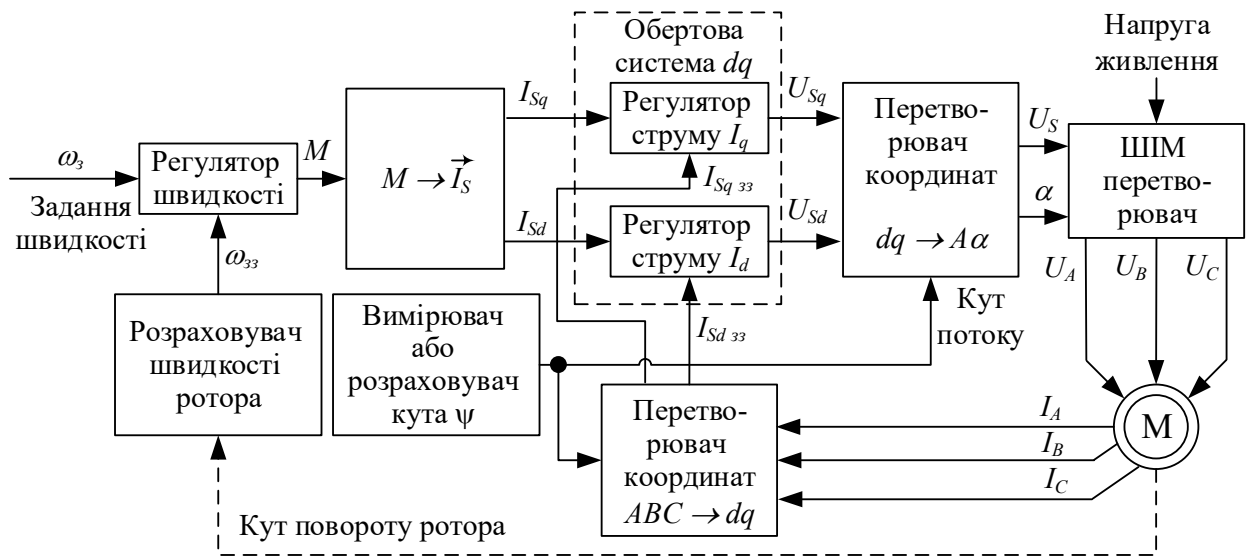


Рисунок 1.1 – Спрощена структура системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна

Векторний регулятор струму, який працює в обертовій системі координат dq , складається з двох скалярних регуляторів d і q проєкцій вектора і використовує як зворотний зв'язок виміряний і перетворений у систему dq реальний вектор статорного струму. Регулятор струму формує в системі dq вектор напруги статора, який характеризується двома складовими: U_{sd} і U_{sq} . Далі за допомогою координатних перетворень вектор напруги статора переводиться в нерухому систему координат, пов'язану зі статором, де потім і реалізується.

Реалізація вектора напруги статора в переважній більшості систем векторного регулювання здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Таким чином, для синтезу системи керування необхідно визначити зв'язок між моментом та проєкціями вектора струму статора на осі системи dq , що обертається синхронно з потоком ротора. Крім того, для здійснення

координатних перетворень ненеобхідно знати поточний кут повороту системи dq (кут повороту ψ), який необхідно виміряти чи розрахувати.

Класична векторна система керування асинхронним електродвигуном при орієнтації системи координат за вектором потокозчеплення ротора приведена на рисунку 1.2 [9].

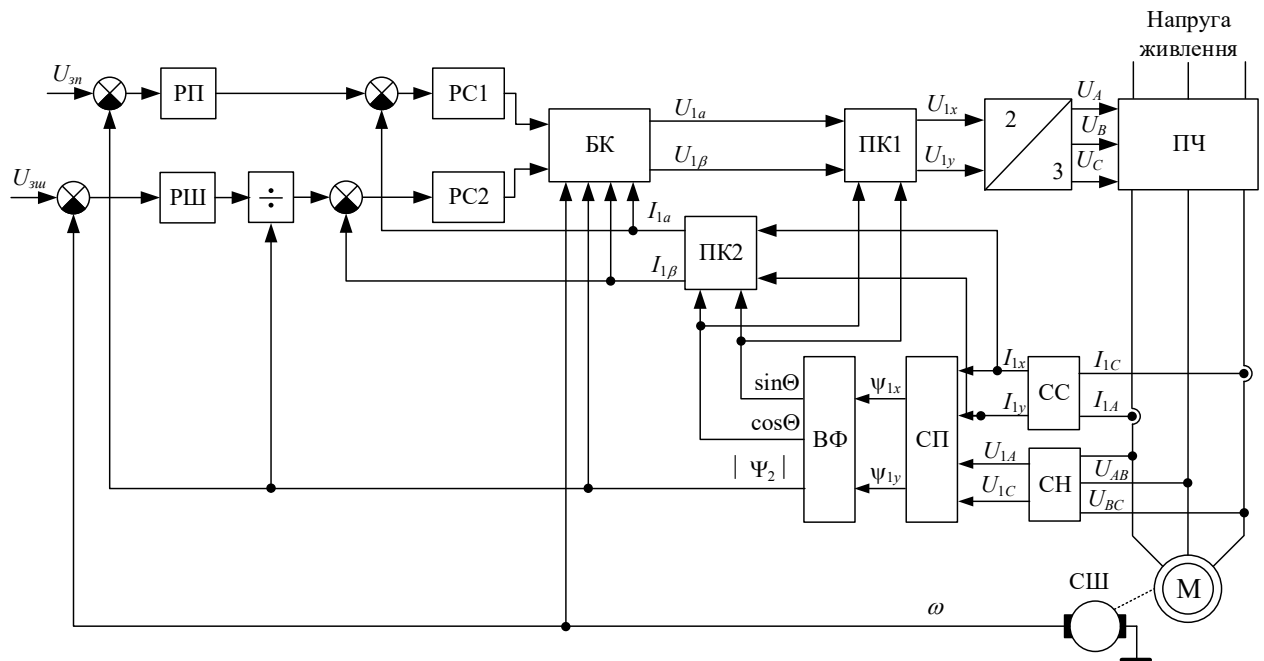


Рисунок 1.2 – Класична векторна система керування асинхронним електродвигуном при орієнтації системи координат за вектором потокозчеплення ротора

На рисунку 1.2: РШ – регулятор швидкості; РС1 – ПІ-регулятор струму статора $I_{1\alpha}$; РС2 – ПІ-регулятор струму статора $I_{1\beta}$; РП – ПІ-регулятор потокозчеплення; ПЧ – перетворювач частоти; М – асинхронний електродвигун; ВФ – вектор-фільтр, що виділяє модуль вектора потокозчеплення ротора та кут повороту системи координат; ПФ – перетворювач фаз із системи координат $(x-y)$ у трифазну (abc) ; ПК1 – перетворювач системи координат $(x-y)$ у трифазну (abc) ; ПК2 – перетворювач системи координат $(x-y)$ у $(\alpha-\beta)$; БК – блок компенсації; СН – сенсор напруг статора; СС – сенсор швидкості; СП – обчислювач складових потокозчеплення по осях $x-y$;

U_{zn} – напруга задання потокозчеплення; $U_{zш}$ – напруга задання швидкості; U_{1x} та U_{1y} – складові напруги статора (проекції) по осях x та y ; $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$ – складові напруги статора (проекції) по осях α та β ; U_A , U_B , U_C – фазні напруги на виході ПЧ; U_{AB} , U_{BC} – значення лінійних напруг на вході СН; I_{1x} , I_{1y} – складові струму статора (проекції) на осі x та y ; $I_{1\alpha}$, $I_{1\beta}$ – моментна та швидкісна складові струму статора (проекції на осі α і β); θ – електричний кут між віссю координат α та вектором потокозчеплення ротора Ψ_2 ; Ψ_2 – потокозчеплення ротора; ω – кутова швидкість обертання двигуна.

Функціональна схема класичної системи прямого векторного управління асинхронного двигуна з сенсорами потокозчеплення та швидкості показана на рисунку 1.3 [9] – [12].

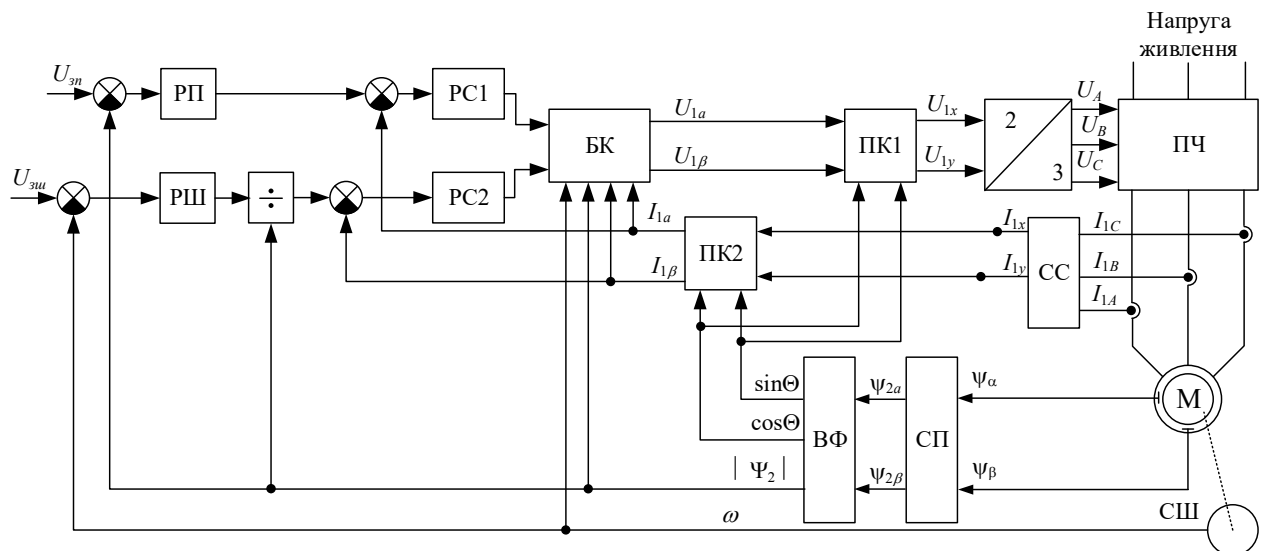


Рисунок 1.3 – Функціональна схема класичної системи прямого векторного управління асинхронного двигуна з сенсорами потокозчеплення та швидкості

У цій функціональній схемі заданими величинами є кутова швидкість двигуна та модуль вектора потокозчеплення. Усі інші величини в цій системі функціонально пов'язані і забезпечують підтримку заданих величин на необхідному рівні.

1.3 Постановка задачі дослідження

З аналізу встановлено, що векторні частотно-регульовані асинхронні електроприводи будуються за принципом орієнтації системи координат за вектором потокозчеплення ротора.

Для подальшого дослідження потрібно:

1) математично описати частотно-регульований асинхронний електропривод як об'єкт управління та розрахувати його параметри;

2) дослідити систему електроприводу в динамічному режимі при різних налаштуваннях контурів регулювання.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

2.1 Математичний опис та розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Номінальна фазна напруга при з'єднанні обмотки в «зірку»:

$$U_{\phi n} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \quad (2.1)$$

де U_n – номінальна (лінійна) напруга двигуна.

$$U_{\phi n} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ (В)}.$$

Номінальна кутова швидкість [13]:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}, \quad (2.2)$$

де n_n – номінальна швидкість обертання двигуна.

$$\omega_n = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 835}{60} = 87,4 \text{ (рад/с)}.$$

Кутова частота напруги живлення статора:

$$\omega_s = 2\pi f, \quad (2.3)$$

де f – частота напруги живлення.

$$\omega_s = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,2 \text{ (с)}.$$

Синхронна швидкість обертання вала двигуна:

$$n_s = \frac{60f}{Z_p}, \quad (2.4)$$

де Z_p – кількість пар полюсів.

$$n_s = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ (об/хв)}.$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_s}{60}. \quad (2.5)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,7 \text{ (рад/с)}.$$

Індуктивність від магнітного поля розсіювання статора:

$$L_{sl} = \frac{X_{sl}}{\omega_s}, \quad (2.6)$$

де X_{sl} – індуктивний опір обмотки статора.

$$L_{sl} = \frac{3,6}{314,2} = 0,011 \text{ (Гн)}.$$

Індуктивність від магнітного поля розсіювання ротора [14]:

$$L_{rl} = \frac{X'_{rl}}{\omega_s}, \quad (2.7)$$

де X'_{rl} – приведений індуктивний опір обмотки ротора.

$$L_{rl} = \frac{3,17}{314,2} = 0,01 \text{ (Гн)}.$$

Індуктивність від основного магнітного потоку:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_s}, \quad (2.8)$$

де X_m – індуктивний опір кола намагнічування:

$$X_m = \frac{U_{\phi n}}{I_0 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0}}, \quad (2.9)$$

де I_0 – струм холостого ходу двигуна;

$\cos \varphi_0$ – коефіцієнт потужності двигуна в режимі холостого ходу.

$$X_m = \frac{219,393}{4,17 \sqrt{1 - \cos^2 80,445}} = 128,005 \text{ (Ом)}.$$

$$L_m = \frac{128,005}{314,2} = 0,407 \text{ (Гн)}.$$

Індуктивність обмотки статора L_s і ротора L_r відповідно:

$$L_s = L_{sl} + L_m, \quad (2.10)$$

$$L_r = L_{rl} + L_m. \quad (2.11)$$

$$L_s = 0,011 + 0,407 = 0,419 \text{ (Гн)}.$$

$$L_r = 0,01 + 0,407 = 0,418 \text{ (Гн)}.$$

Результуюча індуктивність:

$$L'_s = L_{sl} + k_r L_{rl}, \quad (2.12)$$

де k_r – коефіцієнт зв'язку ротора [15]:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}. \quad (2.13)$$

$$k_r = \frac{0,407}{0,418} = 0,976.$$

Постійна стала часу статора двигуна [16] – [18]:

$$T_s = \frac{L'_s}{R'}, \quad (2.14)$$

де

$$R' = R_s + k_r^2 R'_r, \quad (2.15)$$

де R_s – активний опір обмотки статора;

R'_r – приведений активний опір обмотки ротора.

$$R' = 5,78 + 0,976^2 \cdot 7,45 = 12,874 \text{ (Ом)}.$$

$$T_s = \frac{0,021}{12,874} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

Постійна стала часу ротора двигуна:

$$T_r = \frac{L_r}{R'_r}. \quad (2.16)$$

$$T_r = \frac{0,418}{7,45} = 0,056 \text{ (с)}.$$

Потокозчеплення статора Ψ_{s0} і ротора Ψ_{r0} відповідно:

$$\Psi_{s0} = \frac{U_{\text{фн}}}{\omega_s}, \quad (2.17)$$

$$\Psi_{r0} = k_s \Psi_{s0}, \quad (2.18)$$

де k_s – коефіцієнт зв'язку статора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}. \quad (2.19)$$

$$k_s = \frac{0,407}{0,419} = 0,973.$$

$$\Psi_{s0} = \frac{219,393}{314,2} = 0,698 \text{ (Вб)}.$$

$$\Psi_{r0} = 0,973 \cdot 0,698 = 0,679 \text{ (Вб)}.$$

Номинальний момент двигуна [19]:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (2.20)$$

де P_H – номінальна потужність.

$$M_H = \frac{1,7 \cdot 10^3}{87,44} = 19,442 \text{ (Нм)}.$$

Приведений момент інерції електропривода:

$$J_{en} = J \cdot (1 + \theta), \quad (2.21)$$

де θ – коефіцієнт моменту інерції механізму;

J – момент інерції двигуна:

$$J = \frac{GD^2}{4}. \quad (2.22)$$

$$J = \frac{0,08}{4} = 0,02 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

$$J_{en} = 0,02 \cdot (1 + 1,3) = 0,046 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Структурна схема асинхронного двигуна показана на рисунку 2.1.

Для виключення можливості ділення на нуль в початковій фазі моделювання, на вхід блоку ділення BD подається не потокозчеплення ротора Ψ_{r0} , а сигнал, рівний $\max(\Psi_{r0}, \min)$, де \min – деяке мале число, наприклад $\min = 10^{-6}$.

На рисунку 2.1: U_{sd} – напруга задання двигуна по каналу реактивного струму; U_{sq} – напруга задання двигуна по каналу активного струму; U_{kd} – напруга перехресного зв'язку за каналом реактивного струму (для компенсації); U_{kq} – напруга перехресного зв'язку за каналом активного струму (для компенсації).

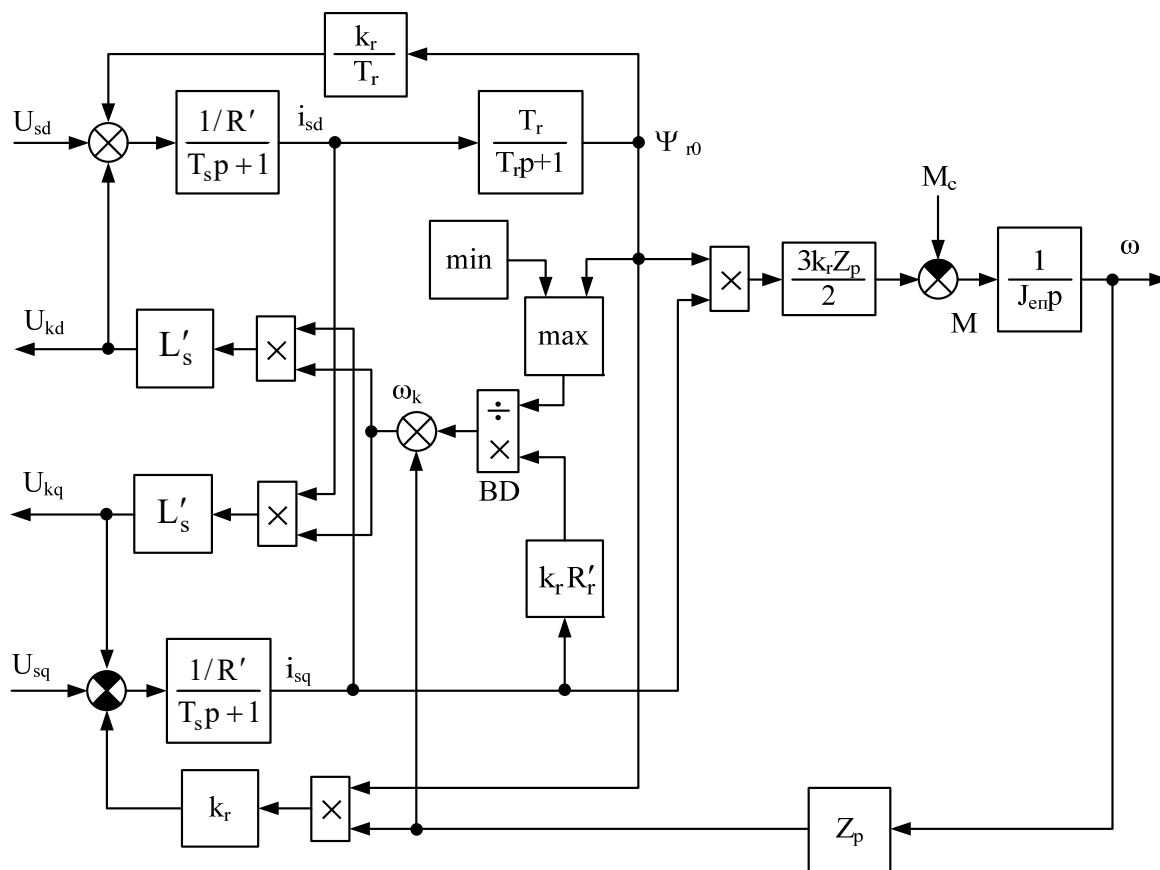


Рисунок 2.1 – Структурна схема асинхронного двигуна, орієнтована за потокозчепленням ротора

2.2 Математичний опис та розрахунок параметрів системи керування

Структурна схема системи ПЧ-АД при керування за потокозчепленням ротора показана на рисунку 2.2, на якому сигнал задання потокозчеплення ротора $U_{\Psi r0} = 10$ В, напруга задання швидкості $U_3 = 10$ В, M_c – момент статичного навантаження.

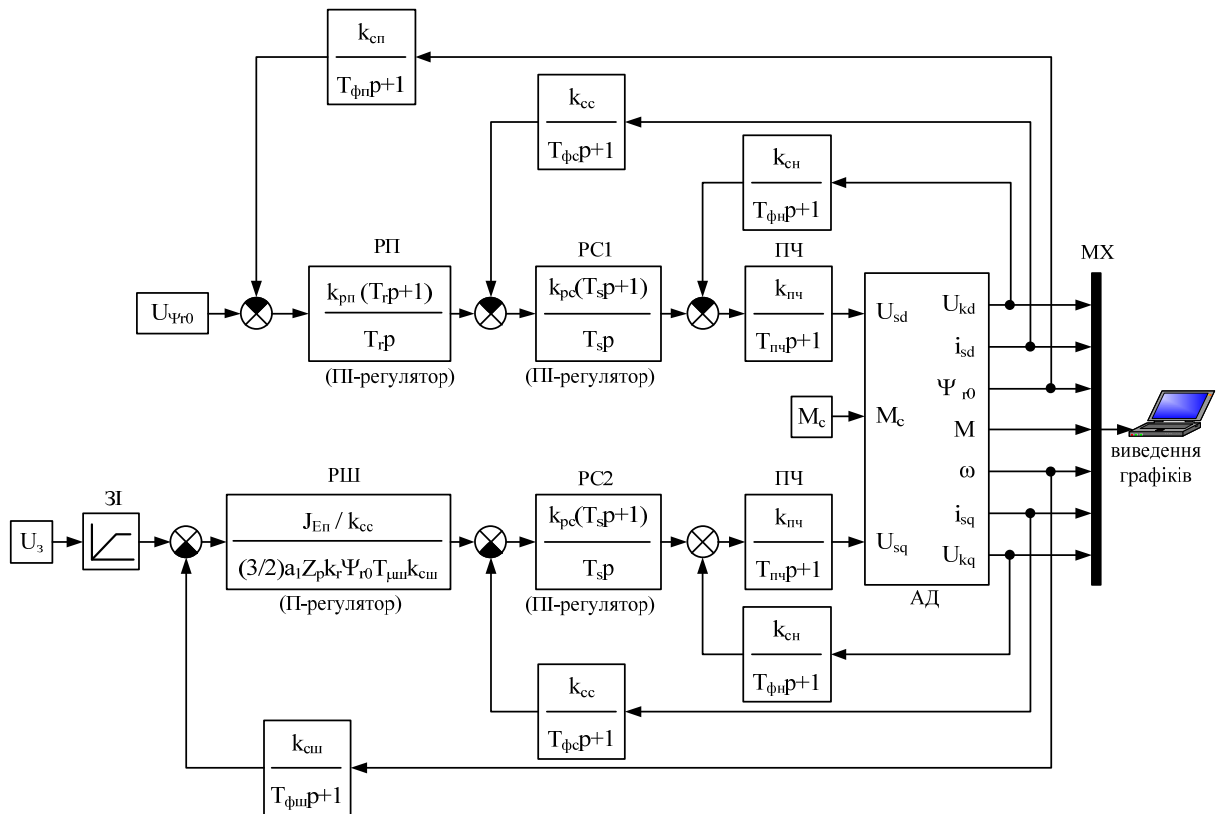


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи ПЧ-АД при керуванні за потокозчепленням ротора

2.2.1 Перетворювач частоти

Перетворювач частоти з автономним інвертором напруги представимо у вигляді передавальної функції з аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{nc}(p) = \frac{k_{nc}}{T_{nc}p + 1}, \quad (2.23)$$

де k_{nc} – коефіцієнт підсилення перетворювача частоти:

$$k_{nc} = \frac{U_{\phi n}}{U_{on.max}}, \quad (2.24)$$

де $U_{on.max}$ – амплітуда опорної синусоїдальної напруги ($U_{on.max} = 10$ В);

T_{nc} – стала часу перетворювача частоти:

$$T_{nc} = \frac{1}{m_n f}, \quad (2.25)$$

де m_n – кратність пульсацій струму (для трифазної мостової схеми $m_n = 6$, для трифазної нульової схеми $m_n = 3$).

$$k_{nc} = \frac{219,393}{10} = 21,939.$$

$$T_{nc} = \frac{1}{3 \cdot 50} = 3,333 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

Тоді

$$W_{nc}(p) = \frac{21,939}{3,333 \cdot 10^{-3} p + 1}.$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за напругою:

$$k_{cn} = \frac{U_{з.н}}{U_{\phi n}}, \quad (2.26)$$

де $U_{з.н}$ – напруга задання каналу напруги ($U_{з.н} = 10$ В).

$$k_{cn} = \frac{10}{219,393} = 0,046.$$

В колі зворотного зв'язку за напругою використаємо фільтр першого порядку з передавальною функцією

$$W_{\phi_n}(p) = \frac{1}{T_{\phi_n} p + 1}, \quad (2.27)$$

де T_{ϕ_n} – стала часу фільтра сенсора напруги:

$$T_{\phi_n} = \frac{1}{\omega_g}, \quad (2.28)$$

де ω_g – гранична частота смуги пропускання (приймаємо $\omega_g = 500 \text{ с}^{-1}$).

$$T_{\phi_n} = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

2.2.2 Контури струмів

Мала некомпенсована стала часу контуру струму в спрощеному вигляді можна представити як

$$T_{\mu c} = T_{m n} + T_{\phi c}, \quad (2.29)$$

де $T_{\phi c}$ – стала часу фільтра в колі зворотного зв'язку за струмом (можна прийняти $T_{\phi c} = T_{\phi n}$).

Якщо в якості сенсора струму використати шунт, то його коефіцієнт підсилення:

$$k_{ш} = \frac{U_{ш.н}}{I_{ш.н}}, \quad (2.30)$$

де $U_{ш.н}$ – номінальна напруга шунта (для стандартних вимірювальних шунтів $U_{ш.н} = 75 \text{ мВ}$);

$I_{ш.н}$ – номінальний струм шунта (вибираємо з умови $I_{ш.н} \geq \lambda I_{\phi n} = 11,02 \text{ А}$: 15 А).

$$k_{ш} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{15} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (В/А)}.$$

Коефіцієнт підсилення сенсора струму:

$$k_{n.cc} \leq \frac{10}{k_{uc} \lambda I_{\phi n}}. \quad (2.31)$$

$$k_{n.cc} \leq \frac{10}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9 \cdot 5,8} = 181,488.$$

Вибираємо стандартний коефіцієнт підсилення сенсора струму $k_{п.с.с} = 133,3$.

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{cc} = k_{uc} k_{n.cc}. \quad (2.32)$$

$$k_{cc} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 133,3 = 0,667.$$

Настройка на модульний оптимум внутрішніх контурів струму забезпечується ПІ-регуляторами з передавальною функцією:

$$W_{pc}(p) = \frac{k_{pc}(T_s p + 1)}{T_s p}, \quad (2.33)$$

де k_{pc} – коефіцієнт підсилення регулятора струму:

$$k_{pc} = \frac{T_s}{T_{\mu c} k_{nc} k_{cc} \frac{1}{R'}}. \quad (2.34)$$

$$k_{pc} = \frac{1,665 \cdot 10^{-3}}{8,867 \cdot 10^{-3} \cdot 21,939 \cdot 0,667 \cdot \frac{1}{12,874}} = 0,168.$$

Тоді

$$W_{pc}(p) = \frac{0,168 \cdot (1,655 \cdot 10^{-3} p + 1)}{1,655 \cdot 10^{-3} p}.$$

2.2.3 Контур потокозчеплення ротора

Стабілізування магнітного потоку забезпечується ПІ-регулятором потоку з передавальною функцією

$$W_{pn}(p) = \frac{k_{pn}(T_r p + 1)}{T_r p}, \quad (2.35)$$

де k_{pn} – коефіцієнт підсилення регулятора потоку:

$$k_{pn} = \frac{T_r}{\frac{1}{k_{cc}} k_{cn} L_m T_{\mu n}}, \quad (2.36)$$

де k_{cn} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за за потоком:

$$k_{cn} = \frac{U_{3.n}}{\Psi_{r0}}, \quad (2.37)$$

де $U_{3.n}$ – напруга задання потоку ($U_{3.n} = 10$ В);

$T_{\mu n}$ – мала некомпенсована стала часу контуру потоку, яку в спрощеному вигляді можна подати як

$$T_{\mu n} = 2T_{\mu c} + T_{\phi n}, \quad (2.38)$$

де $T_{\phi n}$ – стала часу фільтра в колі зворотного зв'язку за потоком (можна прийняти $T_{\phi n} = T_{\phi n} = 2 \cdot 10^{-3}$ с).

$$T_{\mu n} = 2 \cdot 8,867 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} = 0,019 \text{ (с)}.$$

$$k_{cn} = \frac{10}{0,679} = 14,722.$$

$$k_{pn} = \frac{0,056}{\frac{1}{0,667} \cdot 14,722 \cdot 0,407 \cdot 0,019} = 0,322.$$

Тоді

$$W_{pn}(p) = \frac{0,322 \cdot (0,056p + 1)}{0,056p}.$$

2.3.4 Контур швидкості

Для стабілізації кутової швидкості можна взяти П-регулятор з передавальною функцією

$$W_{ш}(p) = \frac{J_{en} \cdot \frac{1}{k_{cc}}}{\frac{3}{2} \cdot a_1 Z_p k_r \Psi_{r0} T_{\mu ш} k_{сш}}, \quad (2.39)$$

де a_1 – коефіцієнт, який вибирається в межах від 2 до 4;

$T_{\mu ш}$ – мала некомпенсована стала часу контуру швидкості, яку в спрощеному вигляді можна подати як

$$T_{\mu ш} = 2T_{\mu c} + T_{фш}, \quad (2.40)$$

де $T_{фш}$ – стала часу фільтра в колі зворотного зв'язку за швидкістю (можна прийняти $T_{фш} = T_{фн} = 2 \cdot 10^{-3}$ с);

$k_{сш}$ – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю.

$$T_{\mu ш} = 2 \cdot 8,867 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} = 0,019 \text{ (с)}.$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю можна визначити як

$$k_{сш} = k_{mг} k_{д.мг} k_{ншш}, \quad (2.41)$$

де $k_{mг}$ – коефіцієнт підсилення тахогенератора:

$$k_{mг} = \frac{U_{н.мг}}{\omega_{н.мг}}, \quad (2.42)$$

де $U_{н.мг}$ – номінальна напруга тахогенератора ($U_{н.мг} = 200$ В);

$\omega_{н.тг}$ – номінальна кутова швидкість тахогенератора:

$$\omega_{н.тг} = \frac{\pi n_{н.тг}}{30}, \quad (2.43)$$

де $n_{н.тг}$ – номінальна швидкість обертання тахогенератора, який вибирається з умови

$$n_{н.тг} \geq n_n; \quad (2.44)$$

$k_{д.тг}$ – коефіцієнт дільника тахогенератора:

$$k_{д.тг} = \frac{U_{з.ш}}{\omega_{н.тг}}, \quad (2.45)$$

де $U_{з.ш}$ – напруга задання напруги керування в каналі регулювання швидкості ($U_{з.ш} = 10$ В);

$k_{ншш}$ – нормувальний коефіцієнт підсилення сенсора швидкості ($k_{ншш} = 1$).

При $n_{н.тг} = 1000$ об/хв:

$$\omega_{н.тг} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ (рад/с)}.$$

$$k_{тг} = \frac{10}{104,72} = 1,91.$$

$$k_{д.тг} = \frac{10}{200} = 0,05.$$

$$k_{сшш} = 1,91 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,095.$$

Тоді

$$W_{ш}(p) = \frac{0,046 \cdot \frac{1}{0,667}}{\frac{3}{2} \cdot 3 \cdot 0,976 \cdot 0,679 \cdot 0,019 \cdot 0,095} = 12,5.$$

2.3.5 Задавач інтенсивності

Задавач інтенсивності забезпечує подання напруги задання на вхід системи.

Постійна часу задавача інтенсивності:

$$T_{3I} = \frac{J_{en} \omega_n}{M_n}, \quad (2.46)$$

$$T_{3I} = \frac{0,046 \cdot 87,441}{19,442} = 0,207 \text{ (с)}.$$

Структурна схема задавача інтенсивності подана на рис. 2.3.

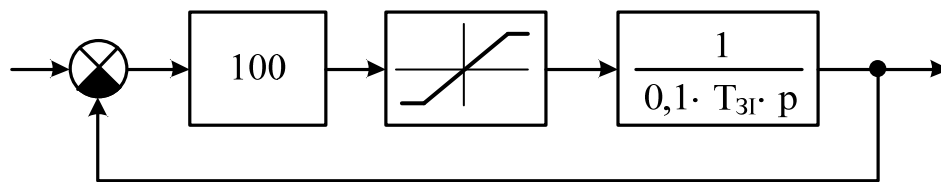


Рисунок 2.3 – Структурна схема задавача інтенсивності

2.3 Узагальнення умов налаштування контурів

В результаті розрахунків отримані умови налаштування контурів регулювання, які приведені в таблиці 2.1.

Для подальшого дослідження приймемо розраховані параметри коефіцієнтів підсилення контурів струму $k_{pc.onm}$, потоку $k_{pn.onm}$, швидкості $k_{pu.onm}$ та сталі часу контурів струму $T_{s.onm}$ й потоку $T_{r.onm}$ як оптимальні.

Дослідимо поведінку системи електропривода за умов, що зазначені коефіцієнти підсилення та сталі часу контурів будуть відрізнятися від своїх оптимальних значень.

Таблиця 2.1 – Узагальнені результати настройки контурів регулювання

Кон-тур	Мала постійна часу контуру	Регулятор		Розрахункові вирази	
		Тип	Передавальна функція	Коефіцієнт підсилення, постійна часу регулятора	Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру
стру-му	$T_{\mu c} = T_{mn} + T_{\phi c}$ $T_{\mu c} = 8,867 \cdot 10^{-3} \text{ с}$	III	$\frac{k_{pc}(T_s p + 1)}{T_s p}$	$k_{pc} = \frac{T_s}{T_{\mu c} k_{n\mu} k_{cc}} \frac{1}{R'}$ $k_{pc} = 0,168$ $T_s = \frac{L'_s}{R'}$ $T_s = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с}$	$k_{cc} = k_u k_{n.cc}$ $k_{cc} = 0,667$
потоку	$T_{\mu n} = 2T_{\mu c} + T_{\phi n}$ $T_{\mu n} = 0,019 \text{ с}$	III	$\frac{k_{pn}(T_r p + 1)}{T_r p}$	$k_{pn} = \frac{T_r}{\frac{1}{k_{cc}} k_{cn} L_m T_{\mu n}}$ $k_{pn} = 0,322$ $T_r = \frac{L_r}{R'_r}$ $T_r = 0,056 \text{ с}$	$k_{cn} = \frac{U_{3.n}}{\Psi_{r0}}$ $k_{cn} = 14,722$
швид-кості	$T_{\mu u} = 2T_{\mu c} + T_{\phi u}$ $T_{\mu u} = 0,019 \text{ с}$	II	$\frac{J_{en} \cdot \frac{1}{k_{cc}}}{\frac{3}{2} \cdot a_1 Z_p k_r \Psi_{r0} T_{\mu u} k_{cu}}$	$k_{pu} = \frac{J_{en} \cdot \frac{1}{k_{cc}}}{\frac{3}{2} \cdot a_1 Z_p k_r \Psi_{r0} T_{\mu u} k_{cu}}$ $k_{pu} = 12,5$	$k_{cu} = k_{mz} k_{0.mz} k_{n\mu u}$ $k_{cu} = 0,095$

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ

Досліджувати динамічні режими системи електропривода будемо в середовищі Simulink (Matlab) [20], [21].

3.1 Дослідження системи електропривода при оптимізованих параметрах

Структура системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода при оптимізованих контурах струму, потоку та швидкості в середовищі Simulink (Matlab) приведена на рисунку 3.1.

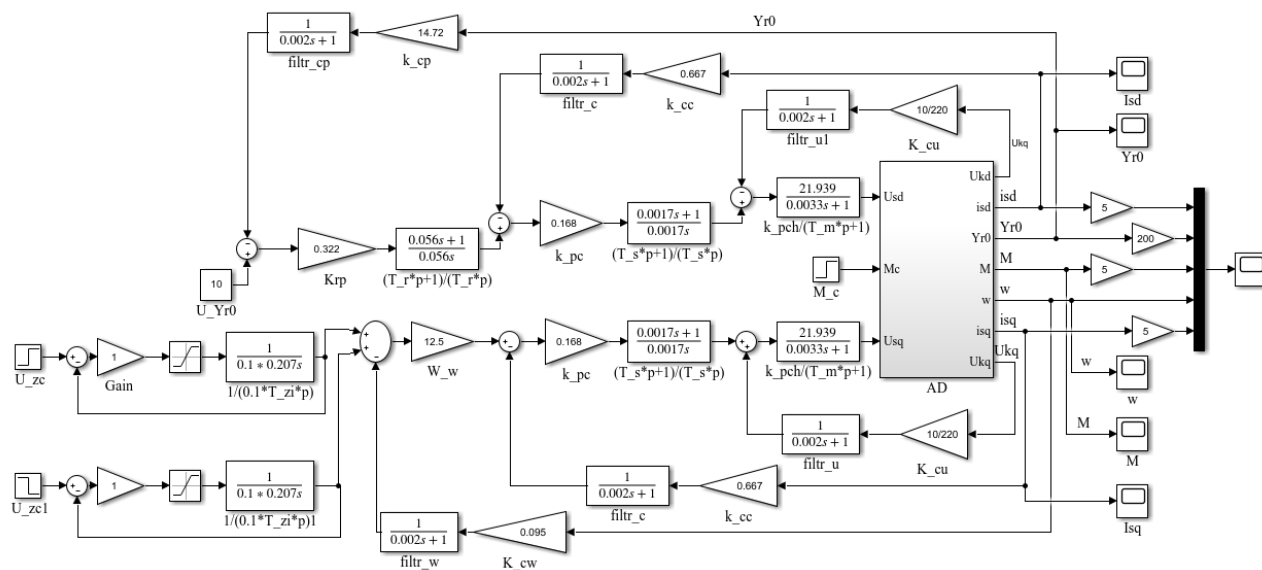


Рисунок 3.1 – Структура система електропривода при оптимізованих контурах струму, потоку та швидкості в середовищі Simulink (Matlab)

Структура асинхронного двигуна AD приведена на рисунку 3.2.

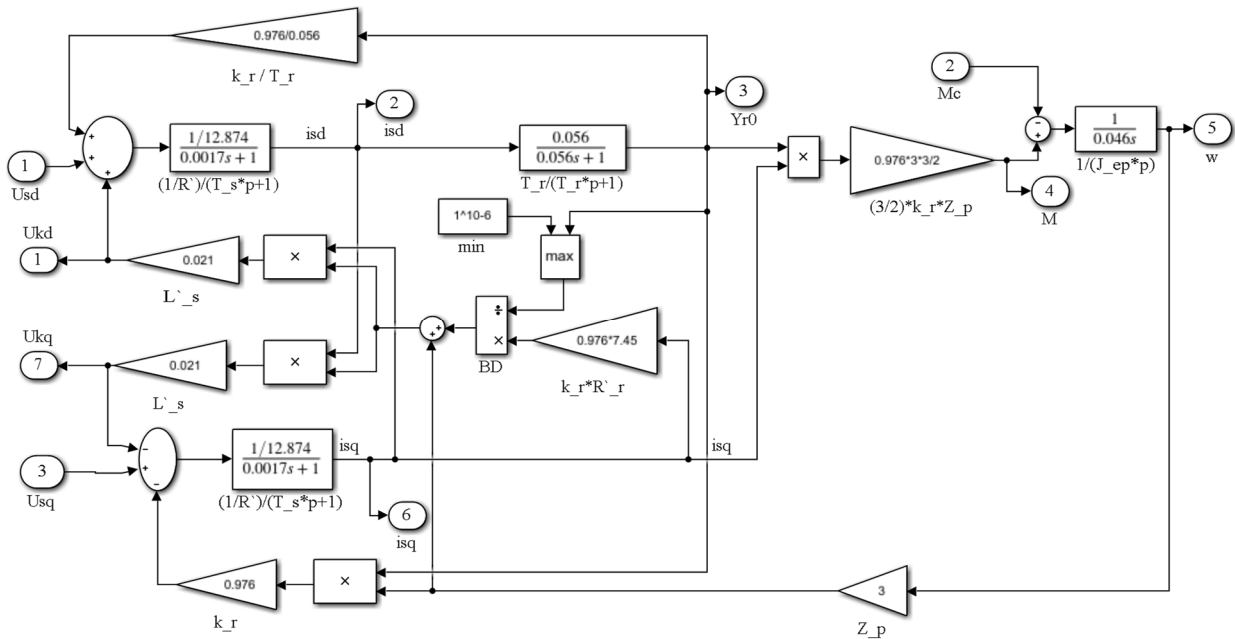


Рисунок 3.2 – Структура асинхронного двигуна АД

Результати моделювання динамічних режимів електропривода при оптимізованих контурах приведені на рисунках 3.3 – 3.7.

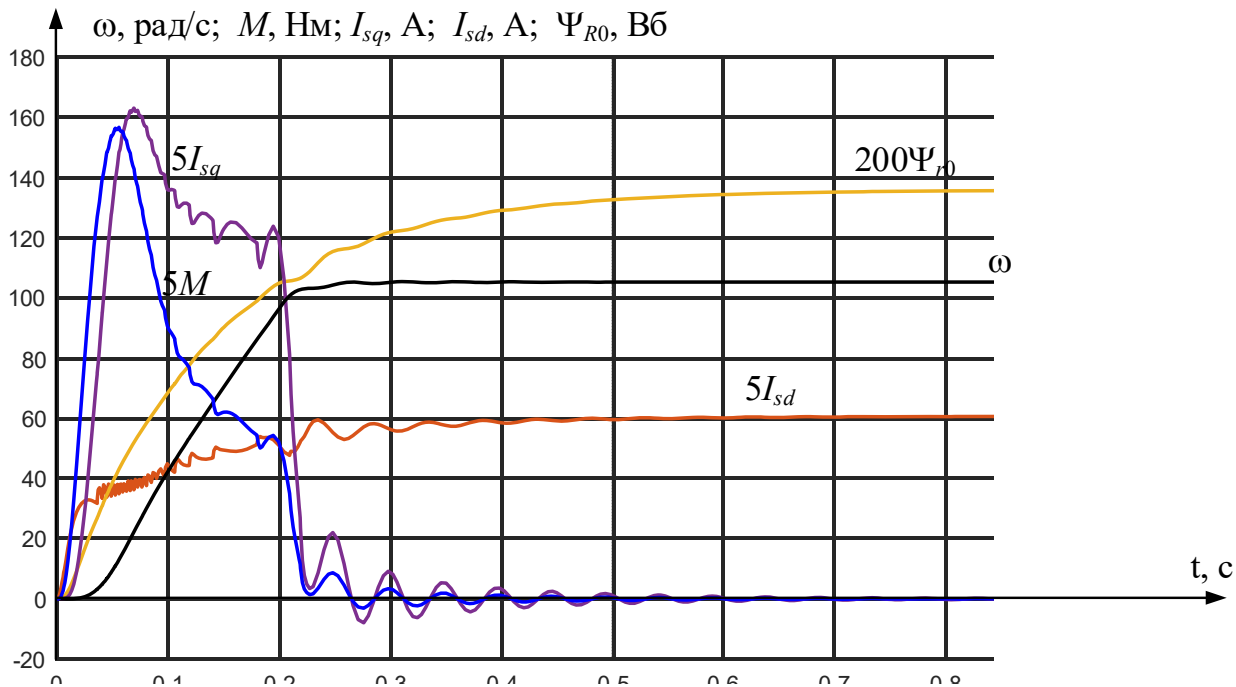


Рисунок 3.3 – Запуск без навантаження при оптимізованих параметрах

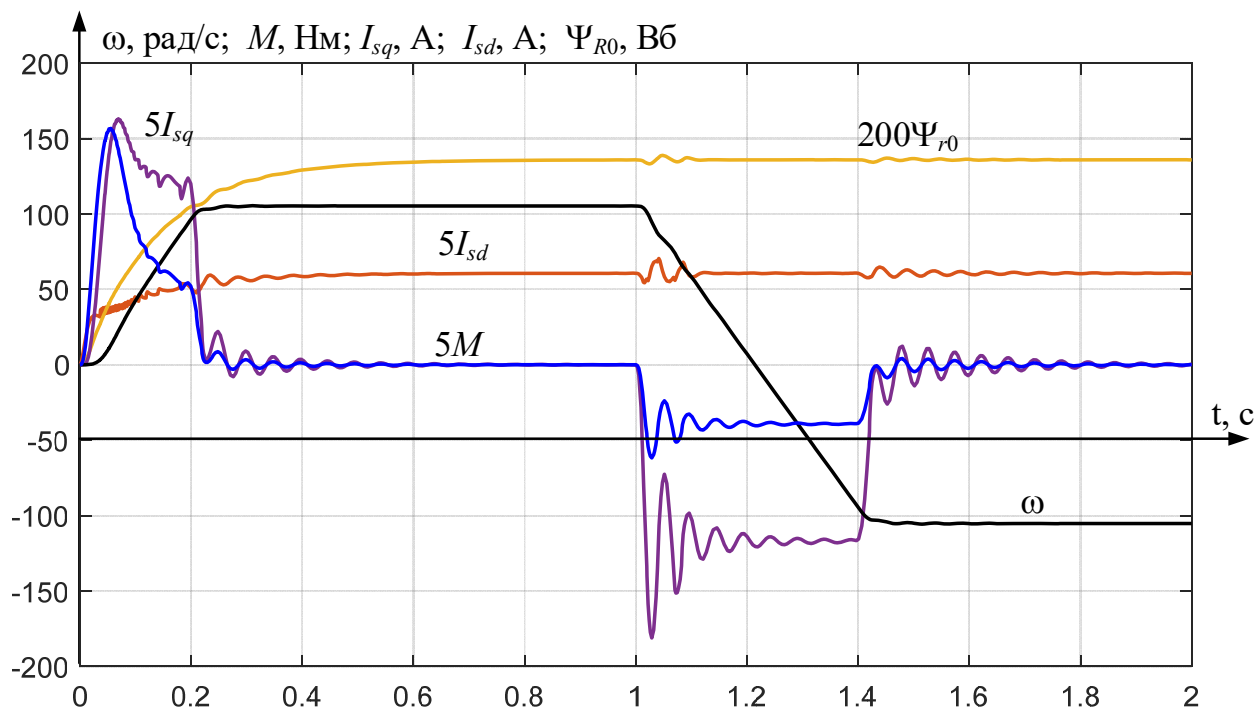


Рисунок 3.4 – Запуск та реверс без навантаження при оптимізованих параметрах

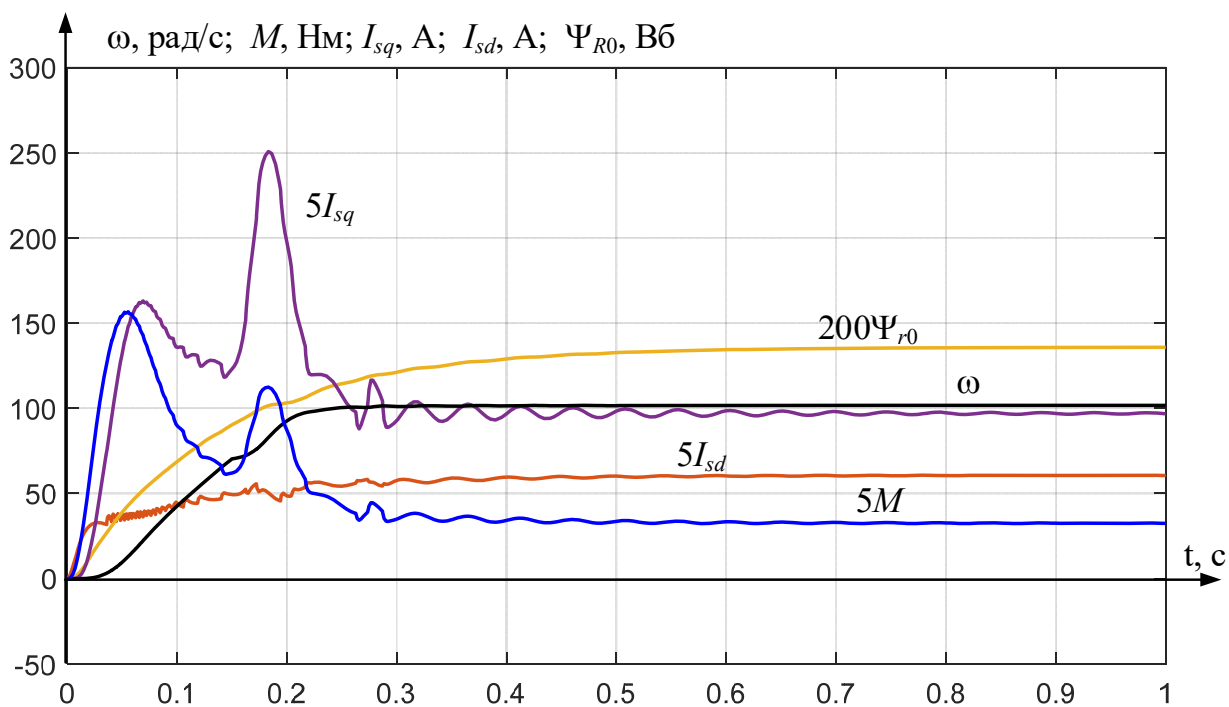


Рисунок 3.5 – Запуск з номінальним навантаженням при оптимізованих параметрах

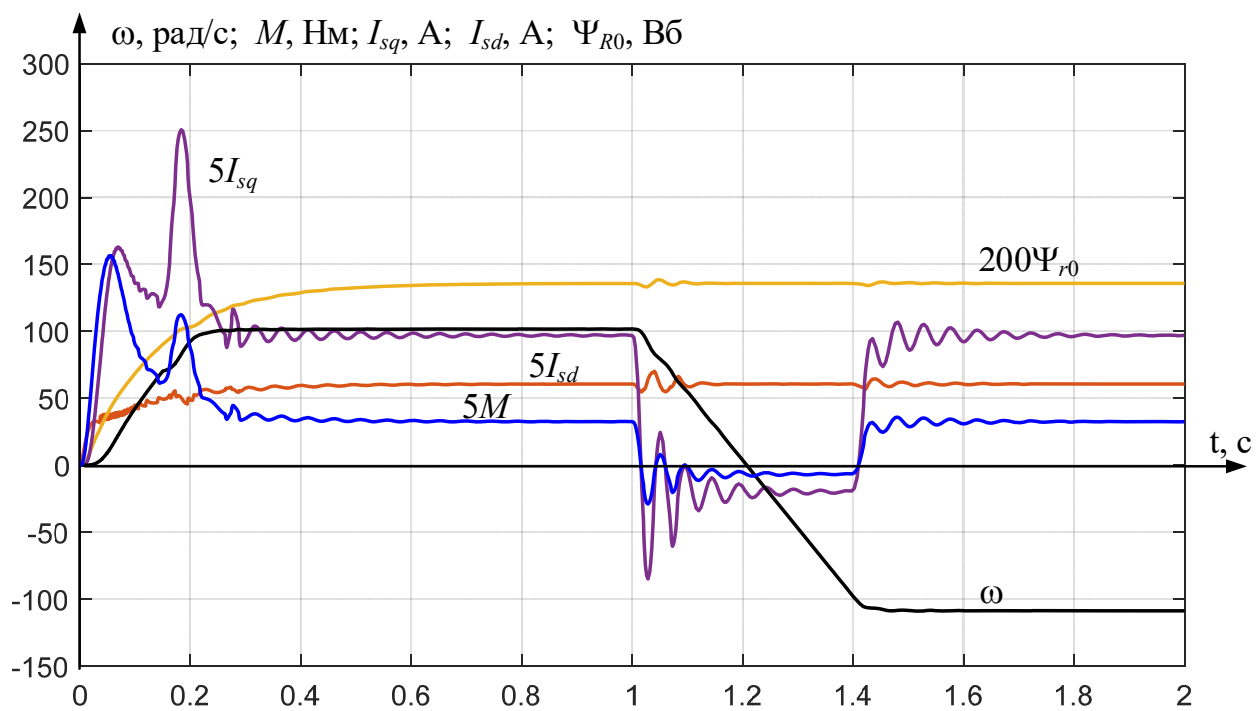


Рисунок 3.6 – Запуск та реверс з навантаженням при оптимізованих параметрах

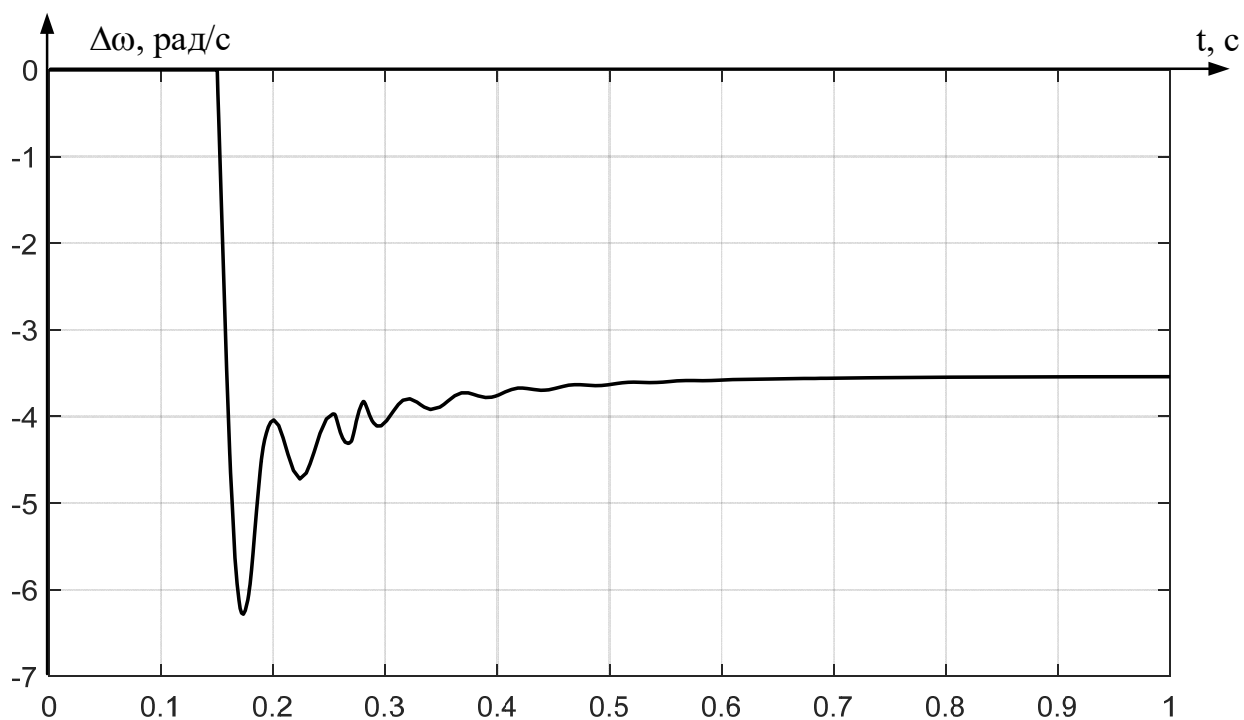


Рисунок 3.7 – Похибка системи електропривода при оптимізованих параметрах

Як видно з графіків перехідних процесів, при оптимізованих параметрах контурів система адекватно відпрацьовує сигнали задання, а статична похибка, що становить 6,2 рад/с (див. рисунок 3.7). При цьому максимальне значення струму по поперечній осі $I_{sq} = 31$ А при пуску без навантаження і $I_{sq} = 50$ А при пуску з номінальним навантаженням. Максимальне значення моменту при пуску становить $M = 32,4$ Нм, а потокозчеплення асимптотично наближається до значення 0,68 Вб. Час виходу швидкості на усталений режим становить 0,25 с.

3.2 Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах

3.2.1 Неоптимальні параметри контуру струму при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості

Результати дослідження системи електропривода при зміні коефіцієнта підсилення контуру струму і при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості приведені на рисунках 3.8 – 3.21.

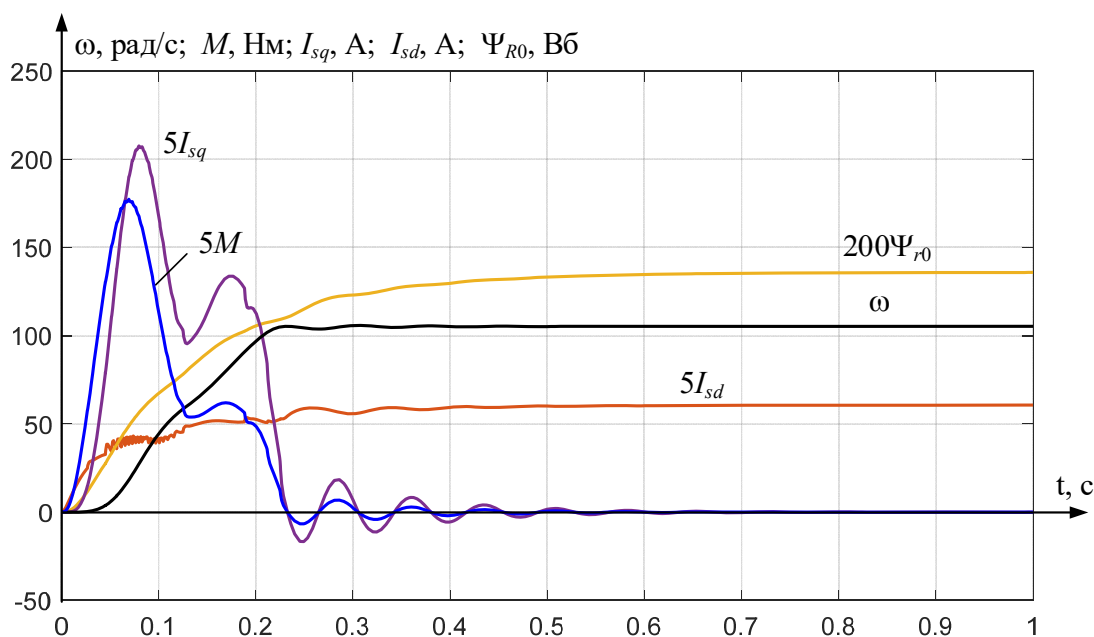


Рисунок 3.8 – Запуск без навантаження при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 2 = 0,084$

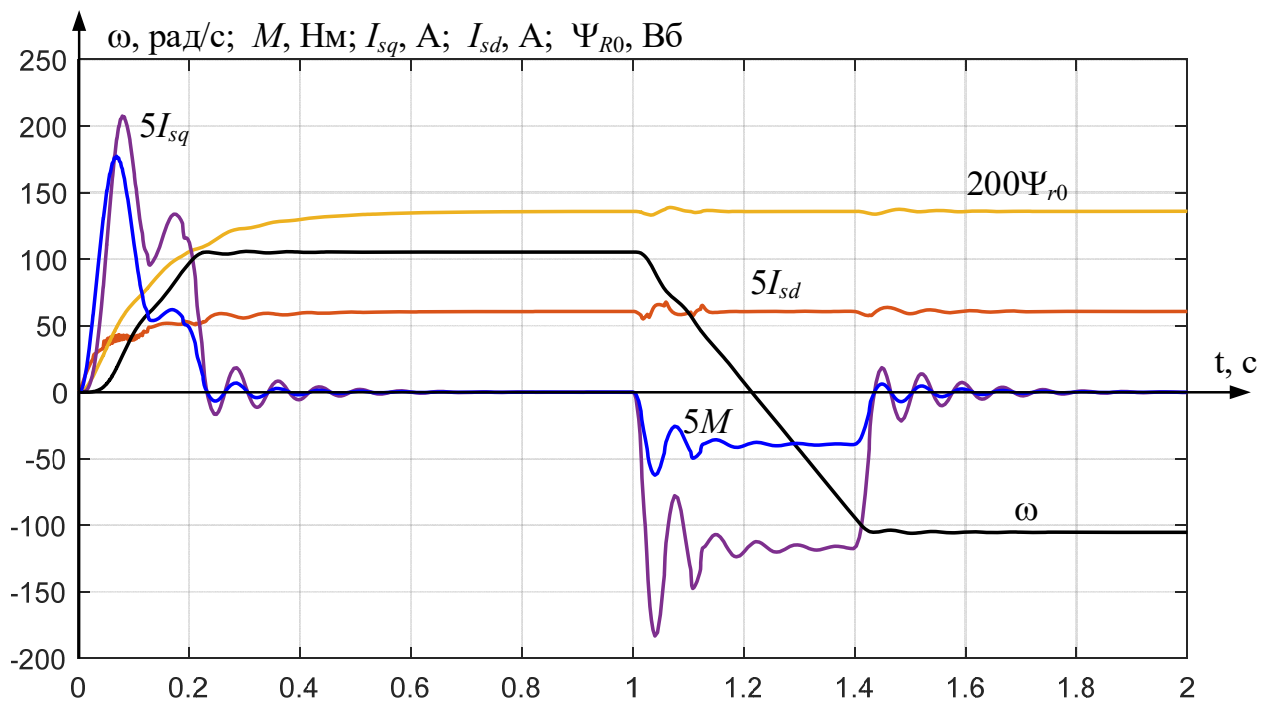


Рисунок 3.9 – Запуск та реверс без навантаження при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 2 = 0,084$

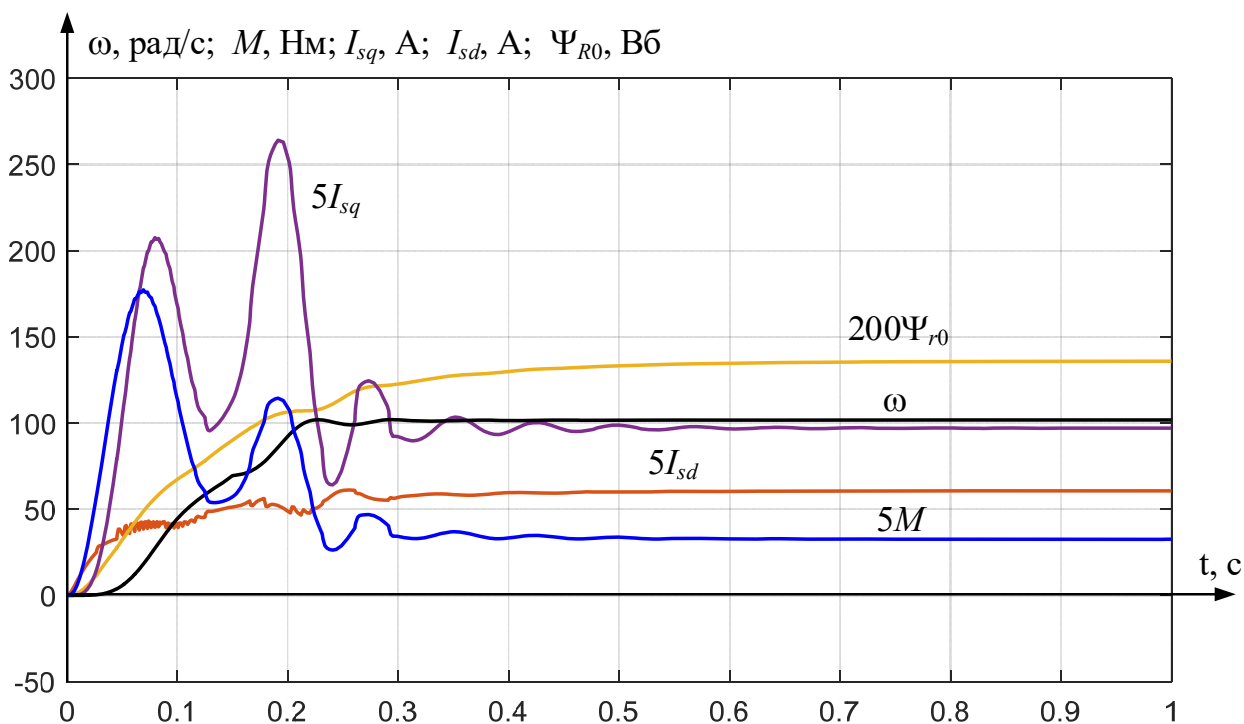


Рисунок 3.10 – Запуск з навантаженням при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 2 = 0,084$

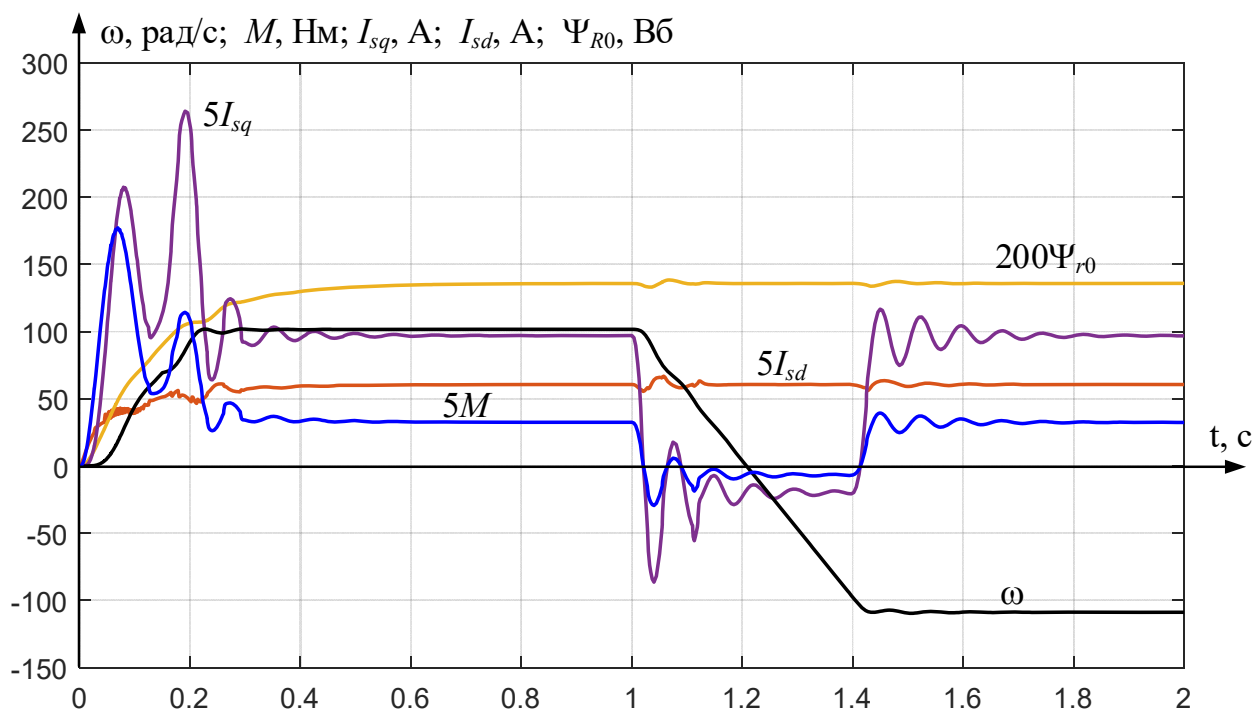


Рисунок 3.11 – Запуск та реверс з навантаженням при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 2 = 0,084$

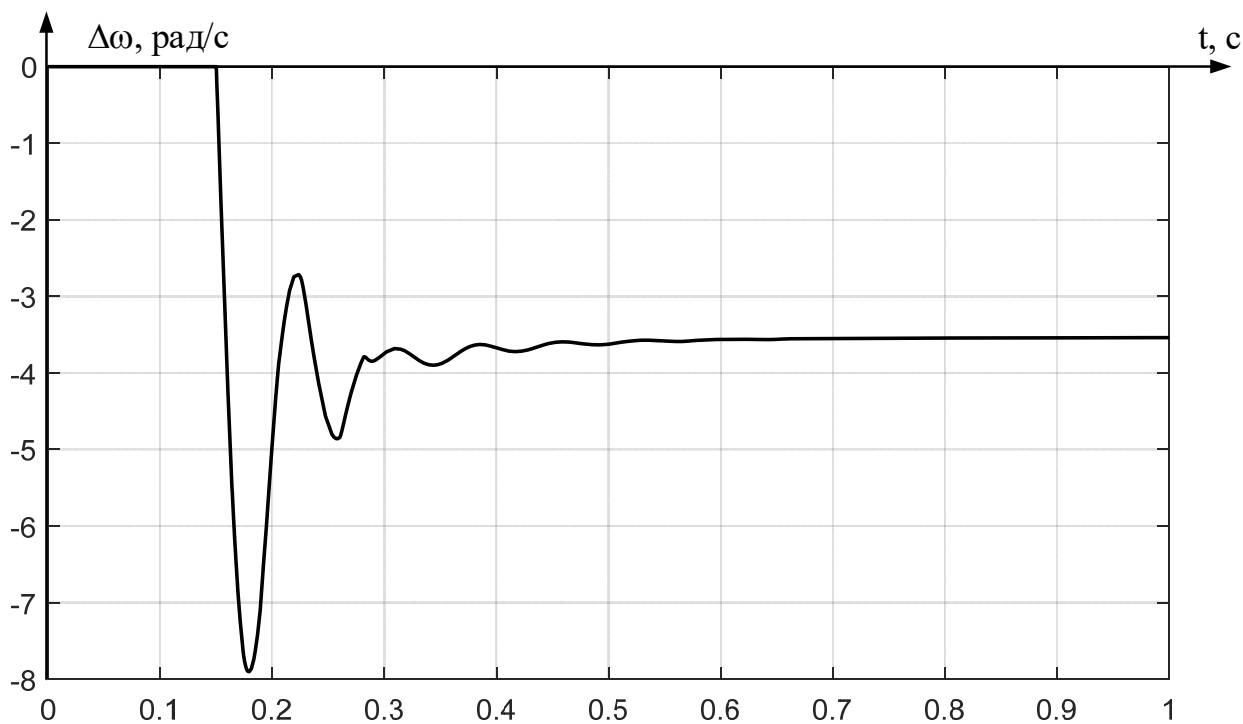


Рисунок 3.12 – Похибка системи електропривода при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 2 = 0,084$

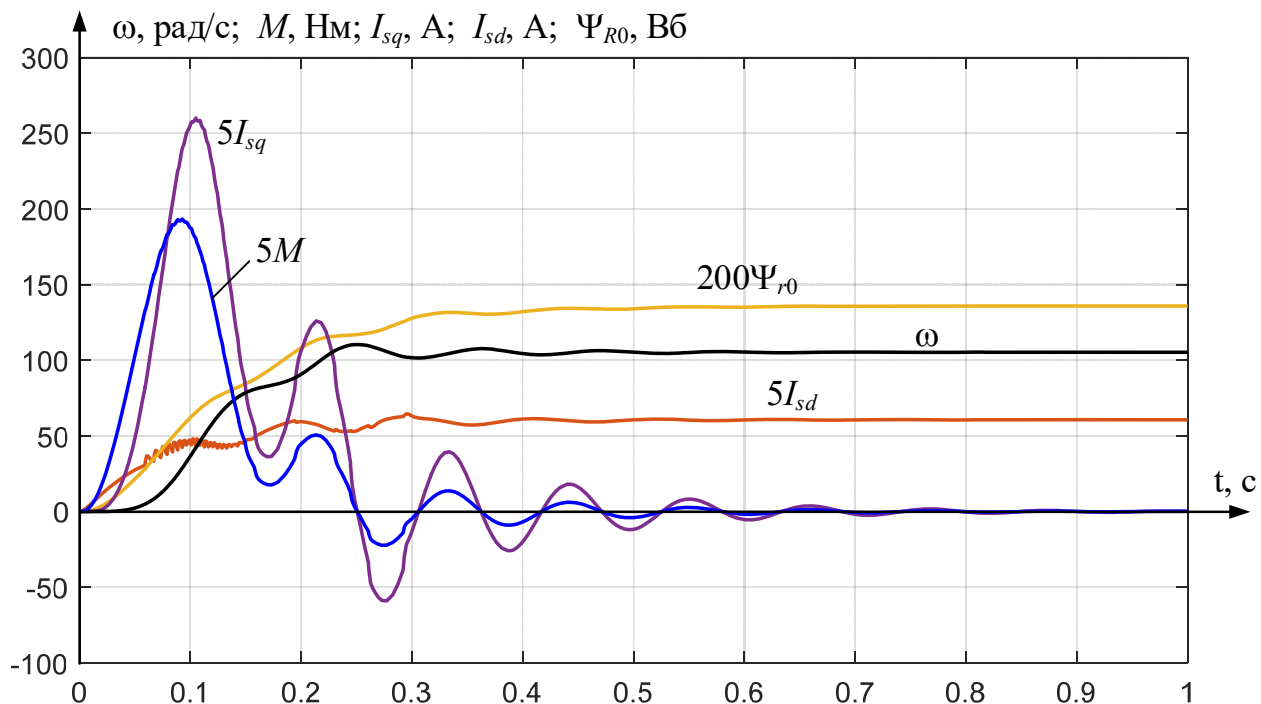


Рисунок 3.13 – Запуск без навантаження при $k_{rc} = k_{rc.opt} / 4 = 0,042$

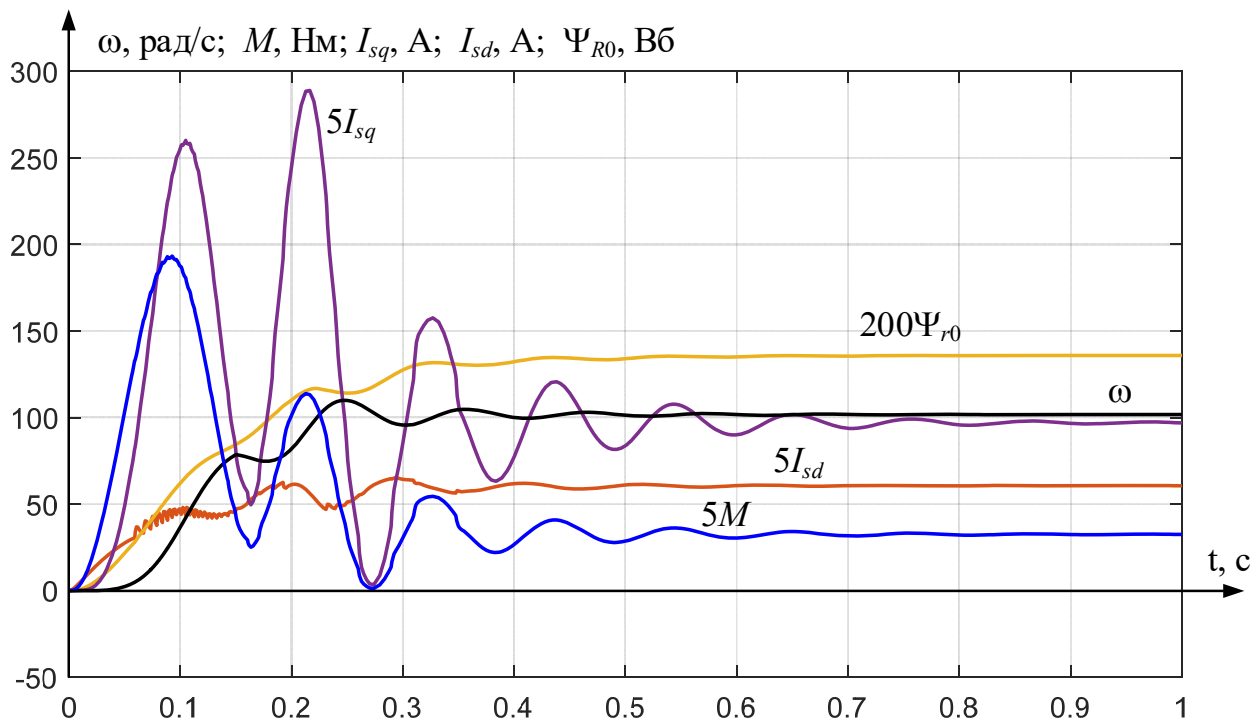


Рисунок 3.14 – Запуск з навантаженням при $k_{rc} = k_{rc.opt} / 4 = 0,042$

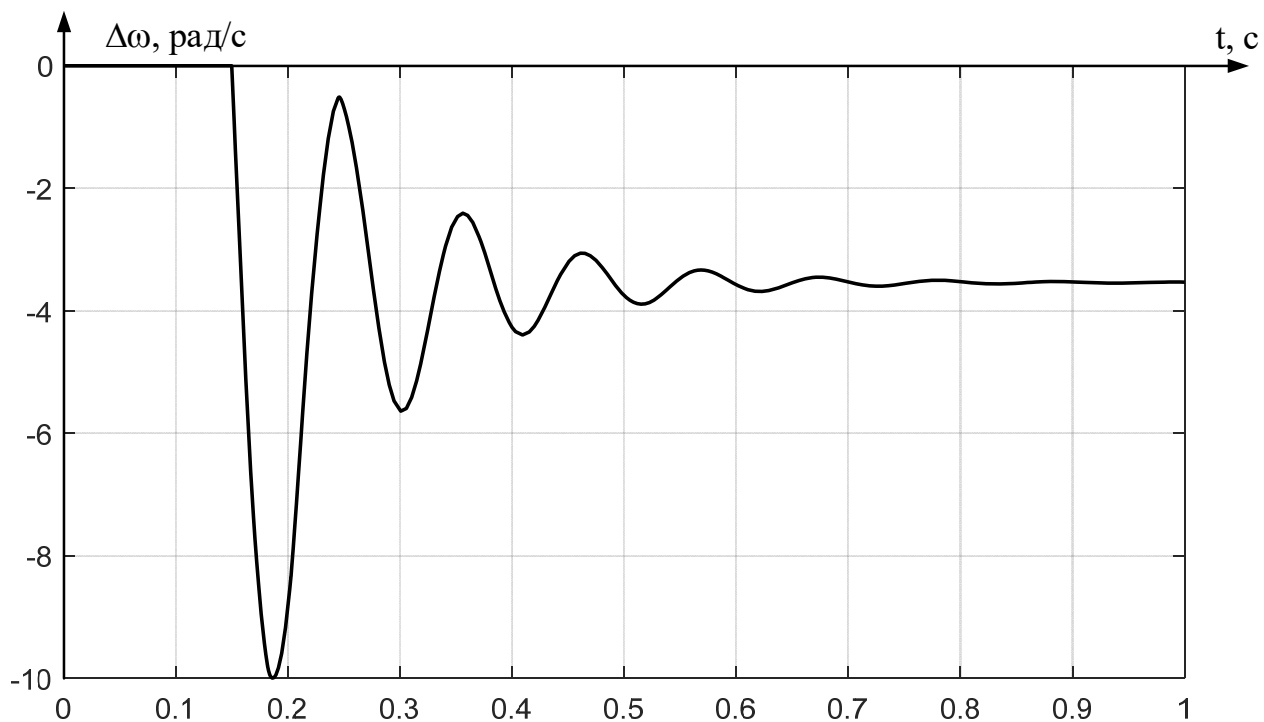


Рисунок 3.15 – Похибка системи електропривода при $k_{pc} = k_{pc.onm} / 4 = 0,042$

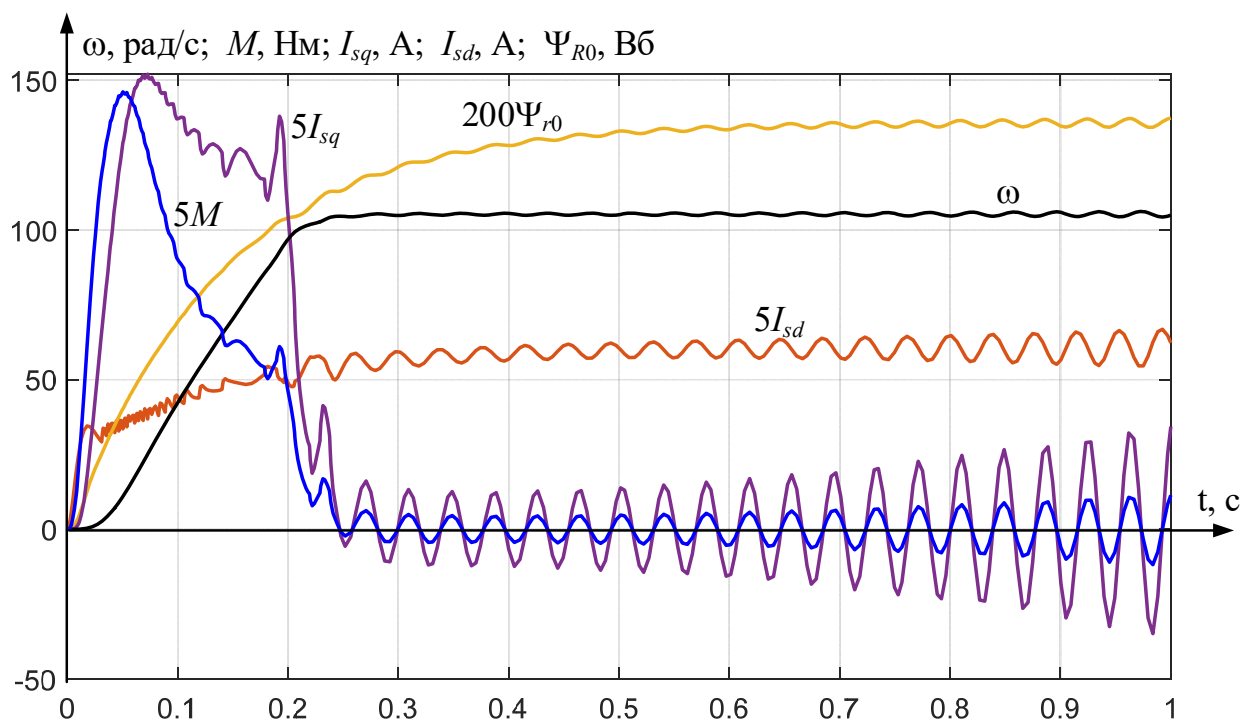


Рисунок 3.16 – Запуск без навантаження при $k_{pc} = 1,5k_{pc.onm} = 0,252$

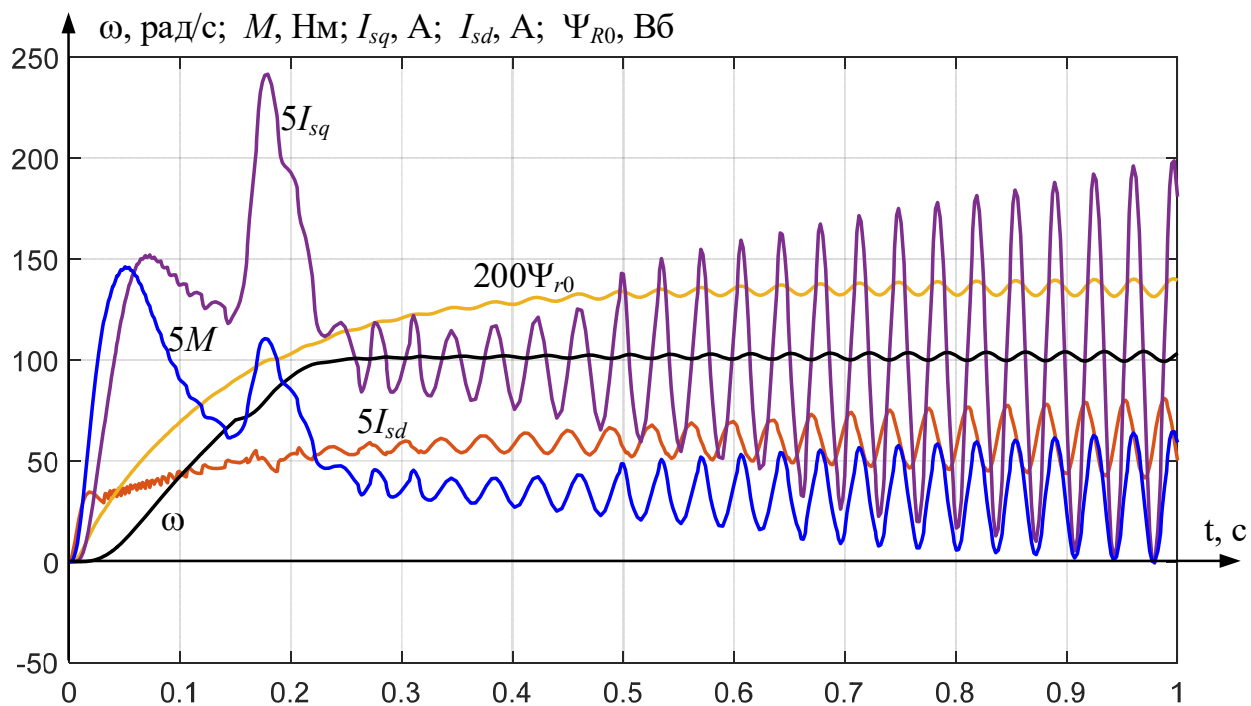


Рисунок 3.17 – Запуск з навантаженням при $k_{pc} = 1,5k_{pc.onm} = 0,252$

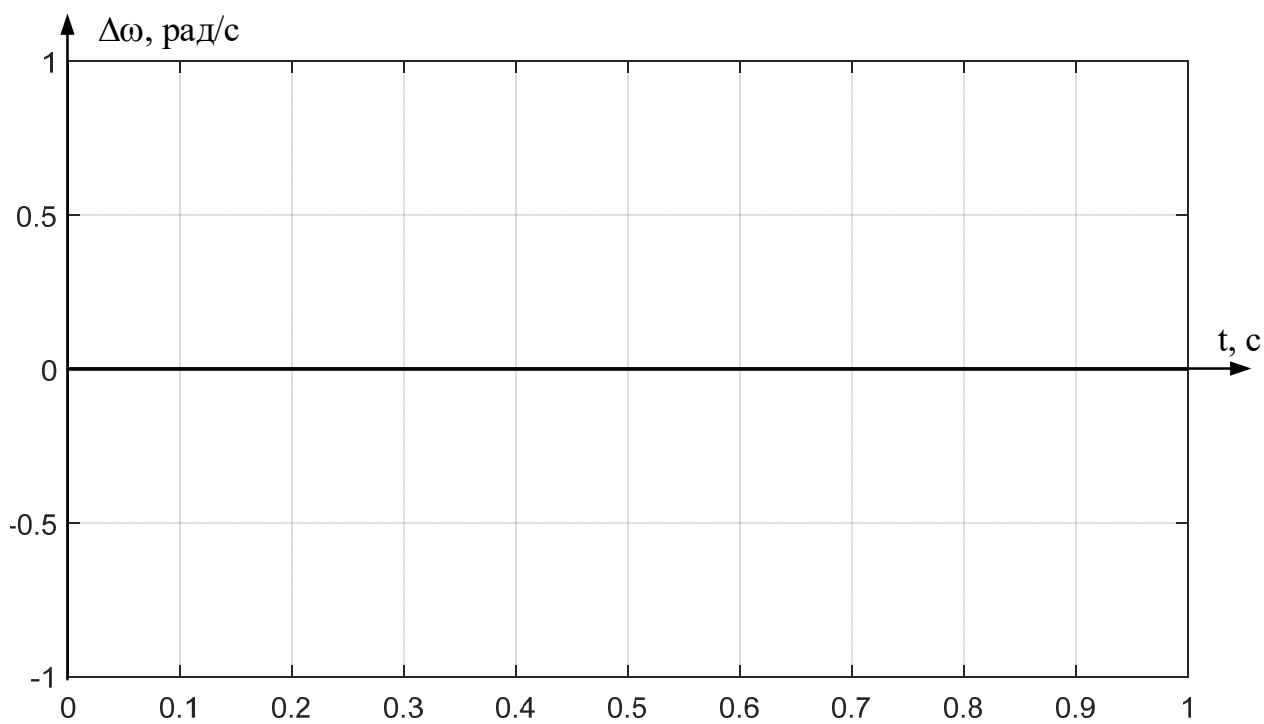


Рисунок 3.18 – Похибка системи електропривода при $k_{pc} = 1,5k_{pc.onm} = 0,252$

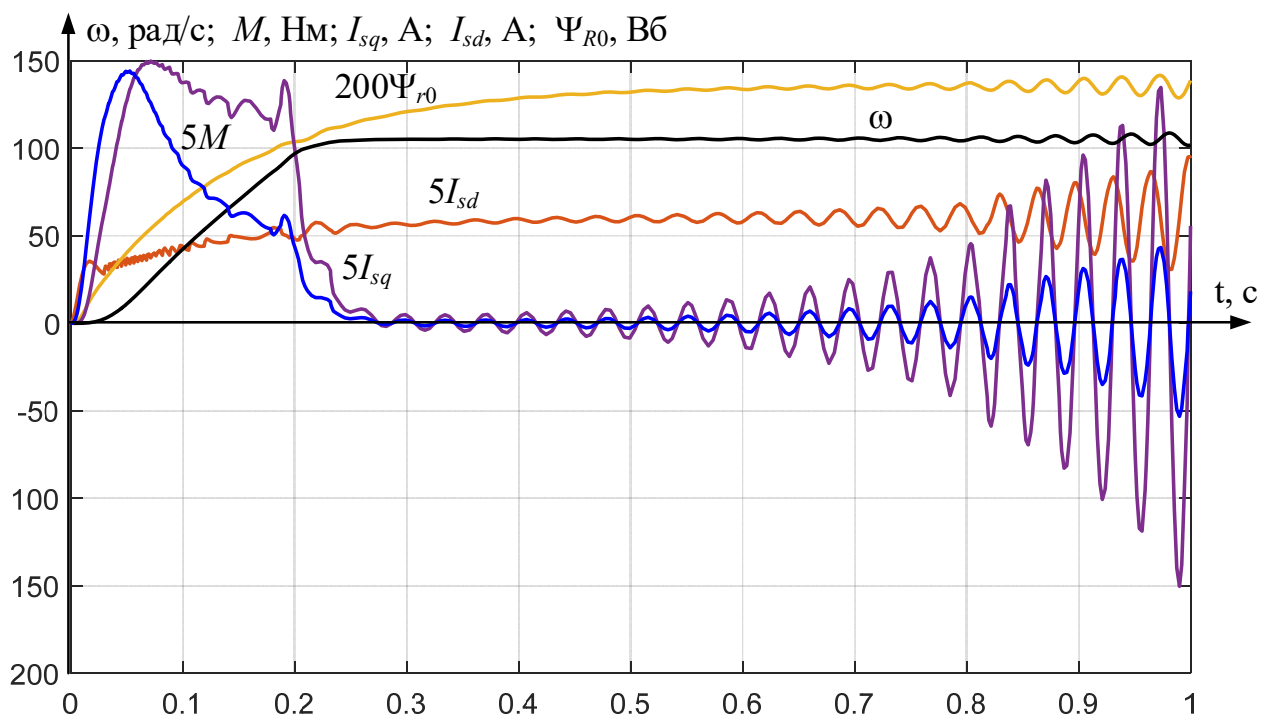


Рисунок 3.19 – Запуск без навантаження при $k_{pc} = 1,7k_{pc.onm} = 0,2856$

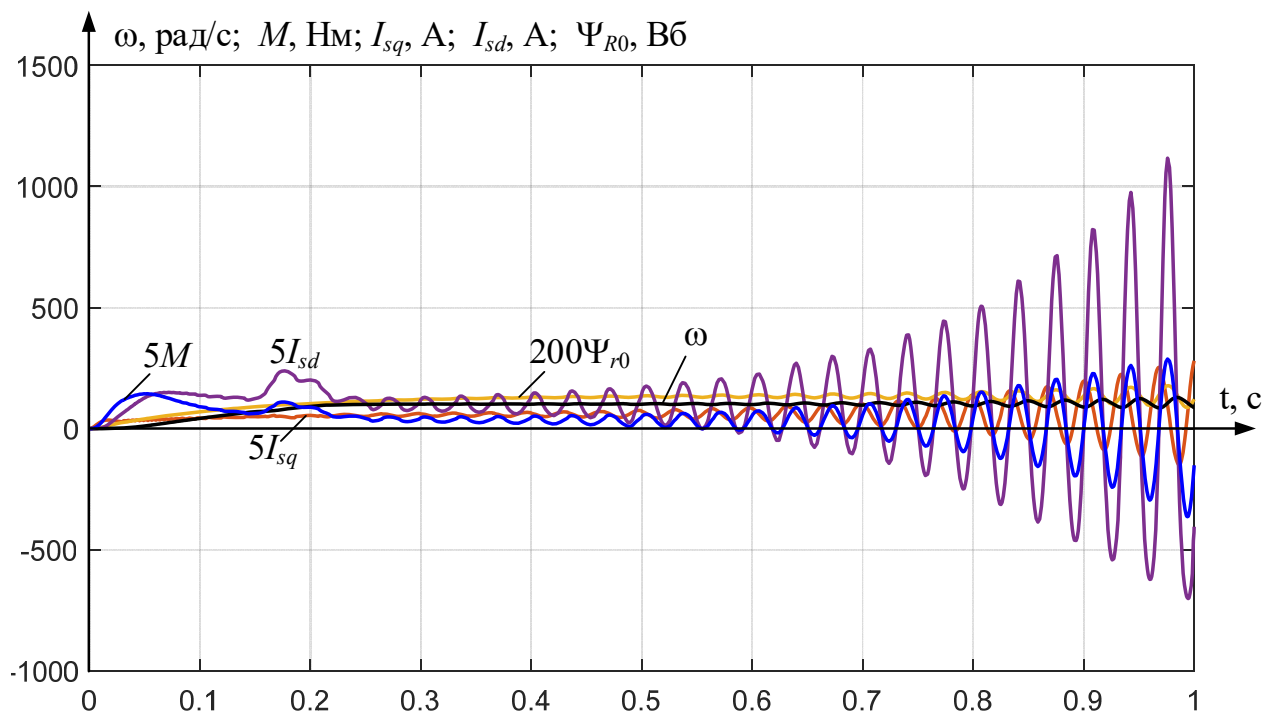


Рисунок 3.20 – Запуск з навантаженням при $k_{pc} = 1,7k_{pc.onm} = 0,2856$

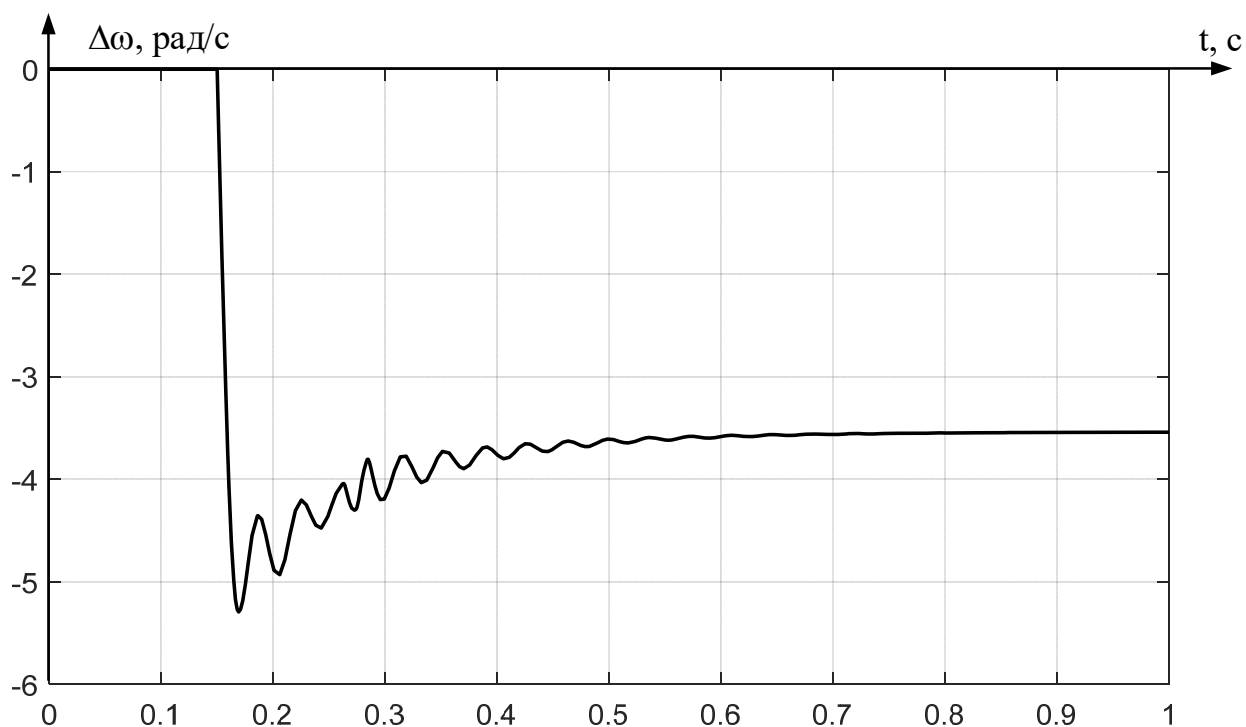


Рисунок 3.21 – Похибка системи електропривода при $k_{pc} = 1,7k_{pc.opt} = 0,2856$

При зменшенні коефіцієнта підсилення контуру струму k_{pc} відносно його оптимального значення спостерігається збільшення струму по поперечній осі I_{sq} , збільшення моменту M , часу виходу швидкості на усталене значення та збільшення похибки системи електропривода. При цьому зростає коливальність перехідних процесів.

При збільшенні коефіцієнта підсилення контуру струму k_{pc} відносно його оптимального значення перехідні процеси системи електропривода мають коливальний розбіжний характер. При цьому швидкість виходить на своє усталене значення за час 2,5 с з подальшим збільшенням амплітуди коливань.

Фіналізуємо, що зменшення коефіцієнту підсилення контуру струму призводить до затяжного пуску з коливальним збіжним характером перехідних процесів, а при збільшенні коефіцієнту підсилення контуру струму відбувається «розвал» системи з коливальним розбіжним характером перехідних процесів.

Результати дослідження системи електропривода при зміні сталої часу контуру струму і при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості приведені на рисунках 3.22 – 3.33.

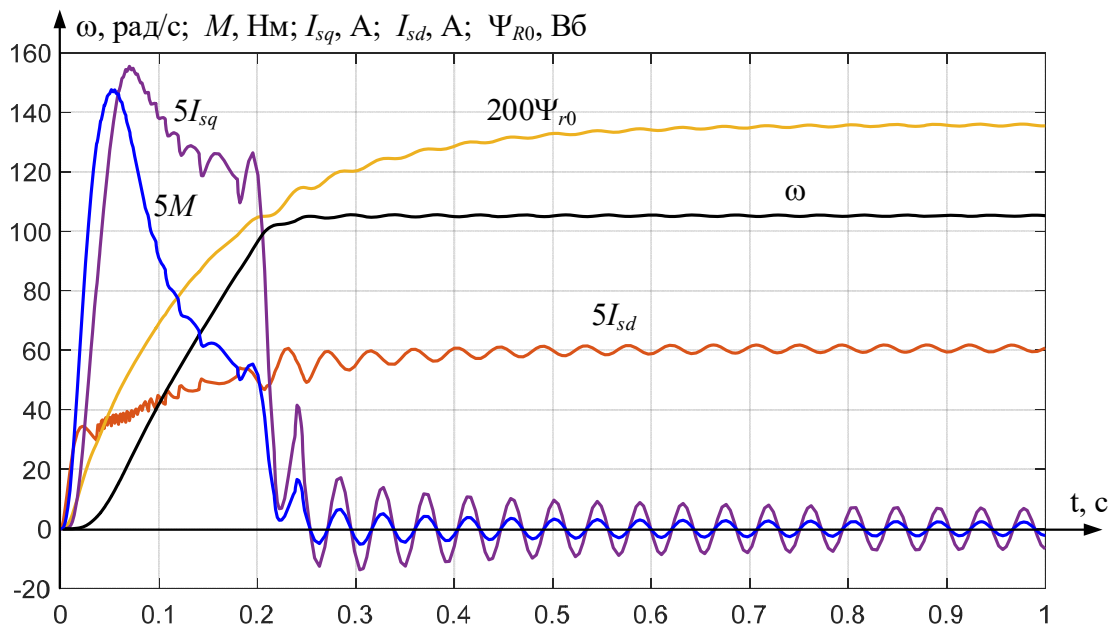


Рисунок 3.22 – Запуск без навантаження при $T_s = T_{s.onm} / 1,2 = 1,38 \times 10^{-3}$ с

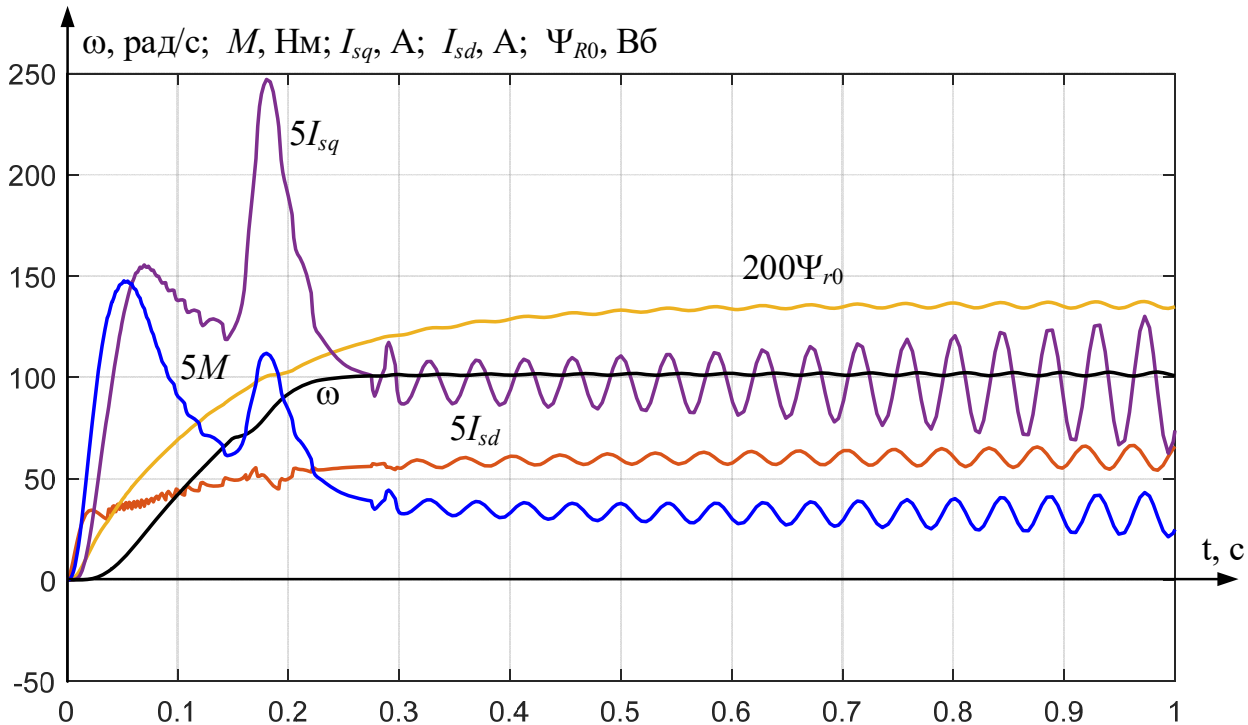


Рисунок 3.23 – Запуск з навантаженням при $T_s = T_{s.onm} / 1,2 = 1,38 \times 10^{-3}$ с

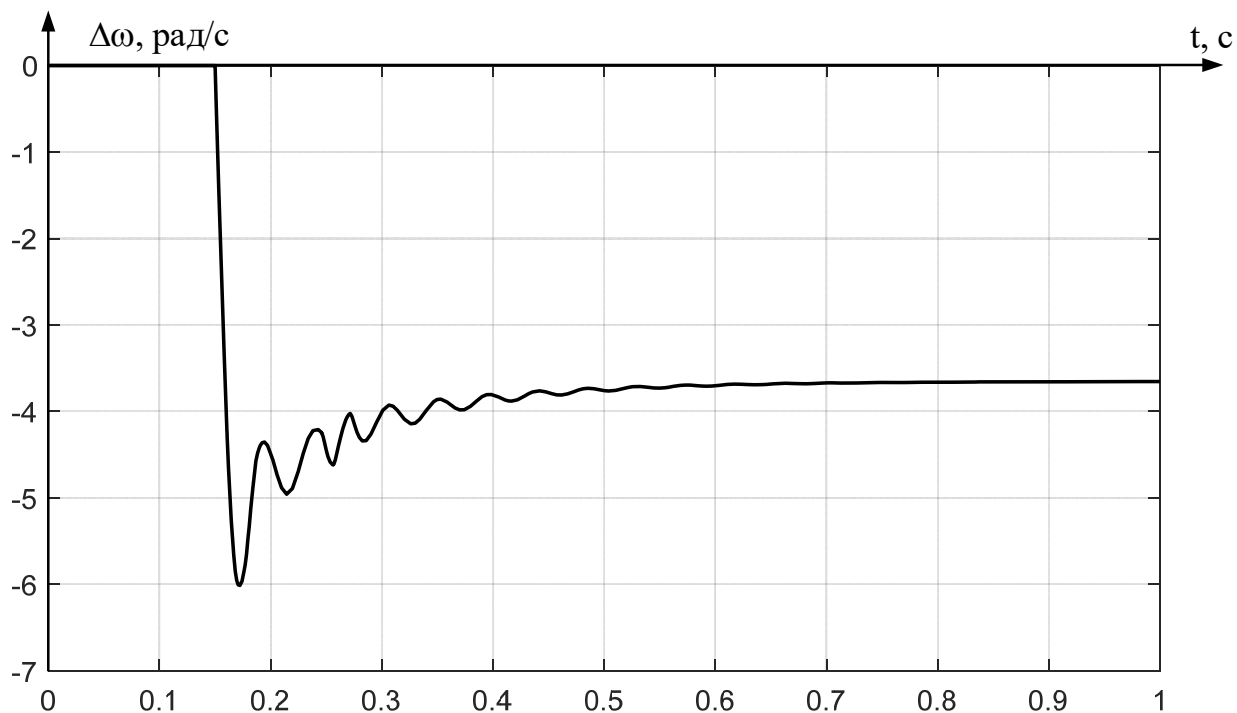


Рисунок 3.24 – Похибка системи електропривода при $T_s = T_{s.onm}/1,2 = 1,38 \times 10^{-3}$ с

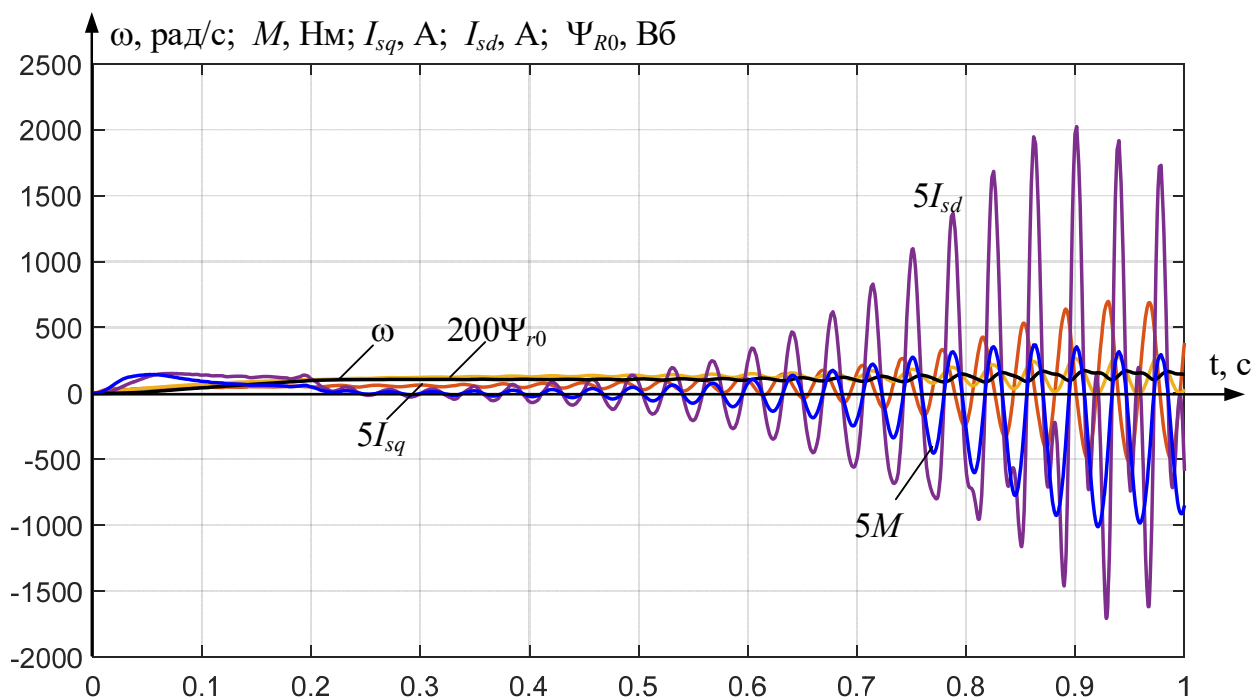


Рисунок 3.25 – Запуск без навантаження при $T_s = T_{s.onm}/1,5 = 0,0011$ с

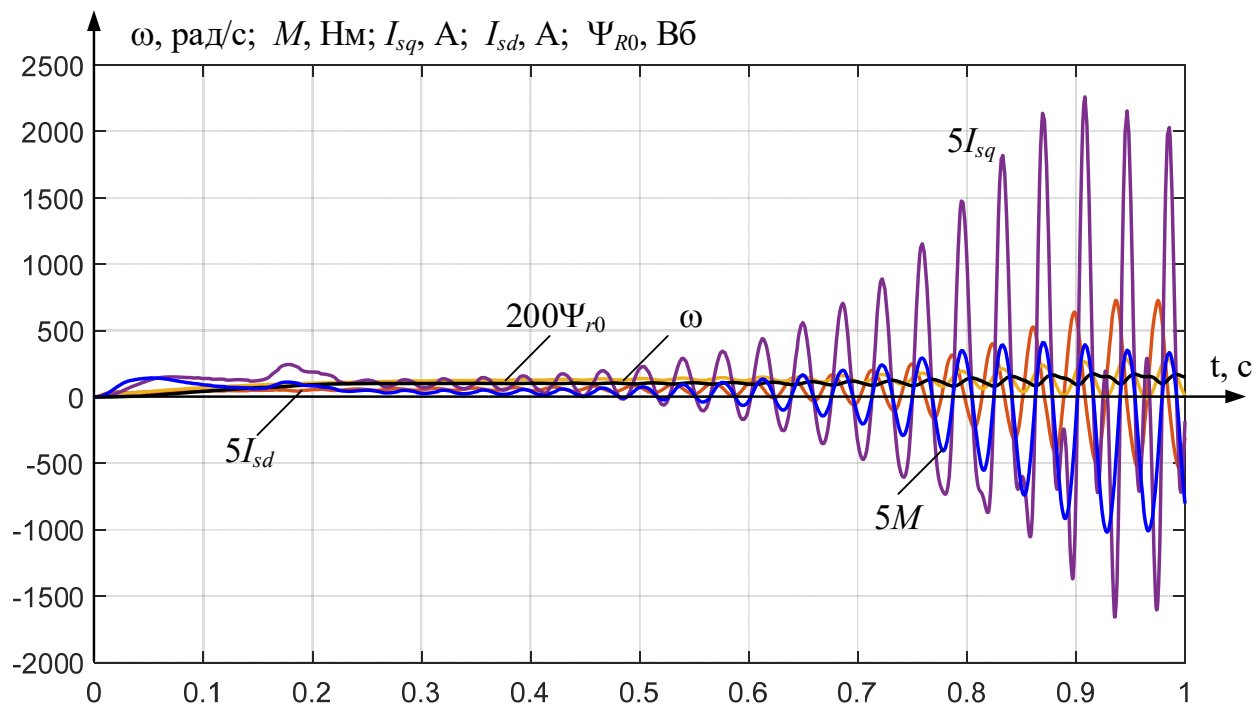


Рисунок 3.26 – Запуск з навантаженням при $T_s = T_{s.onm} / 1,5 = 0,0011$ с

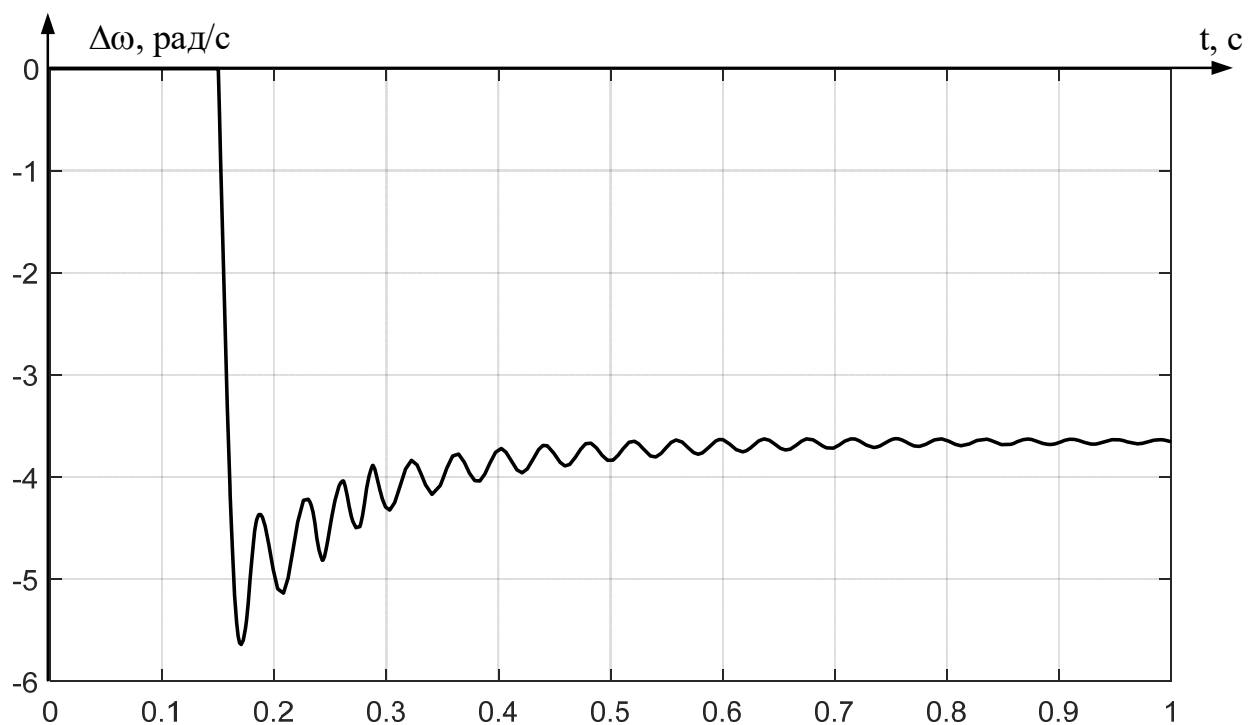


Рисунок 3.27 – Похибка системи електропривода при $T_s = T_{s.onm} / 1,5 = 0,0011$ с

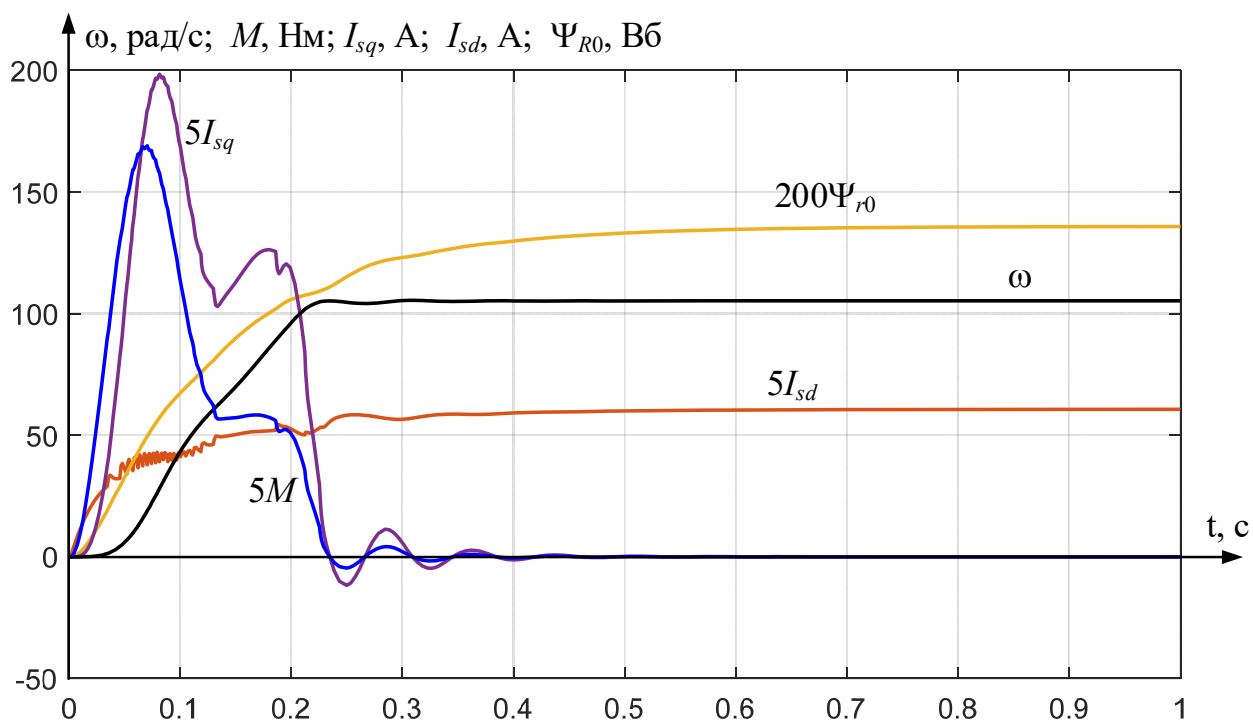


Рисунок 3.28 – Запуск без навантаження при $T_s = 2T_{s.onm} = 3,31 \times 10^{-3}$ с

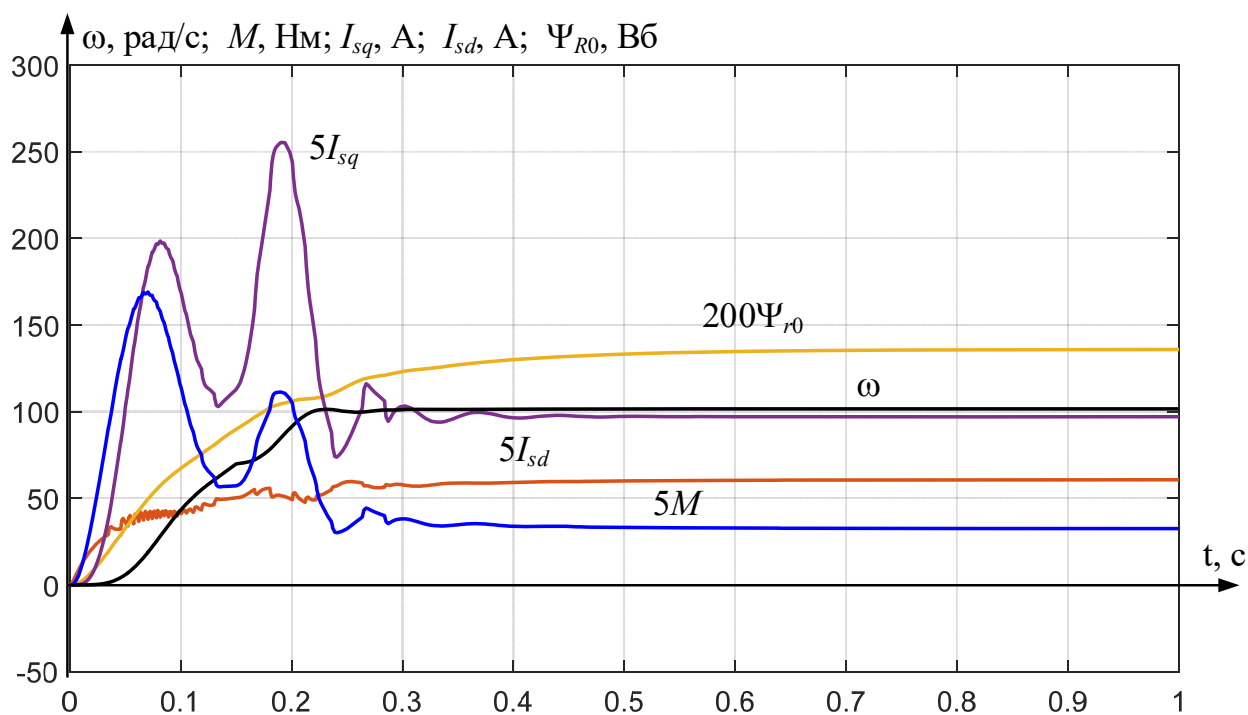


Рисунок 3.29 – Запуск з навантаженням при $T_s = 2T_{s.onm} = 3,31 \times 10^{-3}$ с

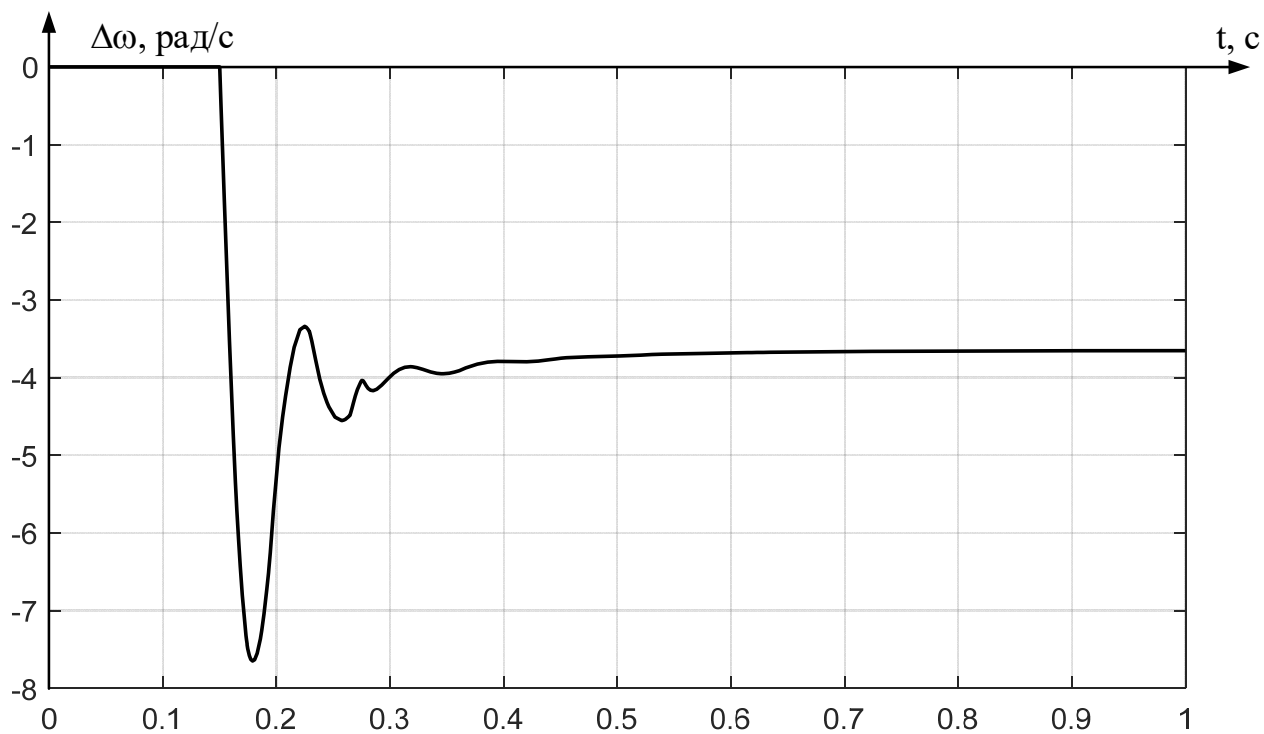


Рисунок 3.30 – Похибка системи електропривода при $T_s = 2T_{s.onm} = 3,31 \times 10^{-3}$ с

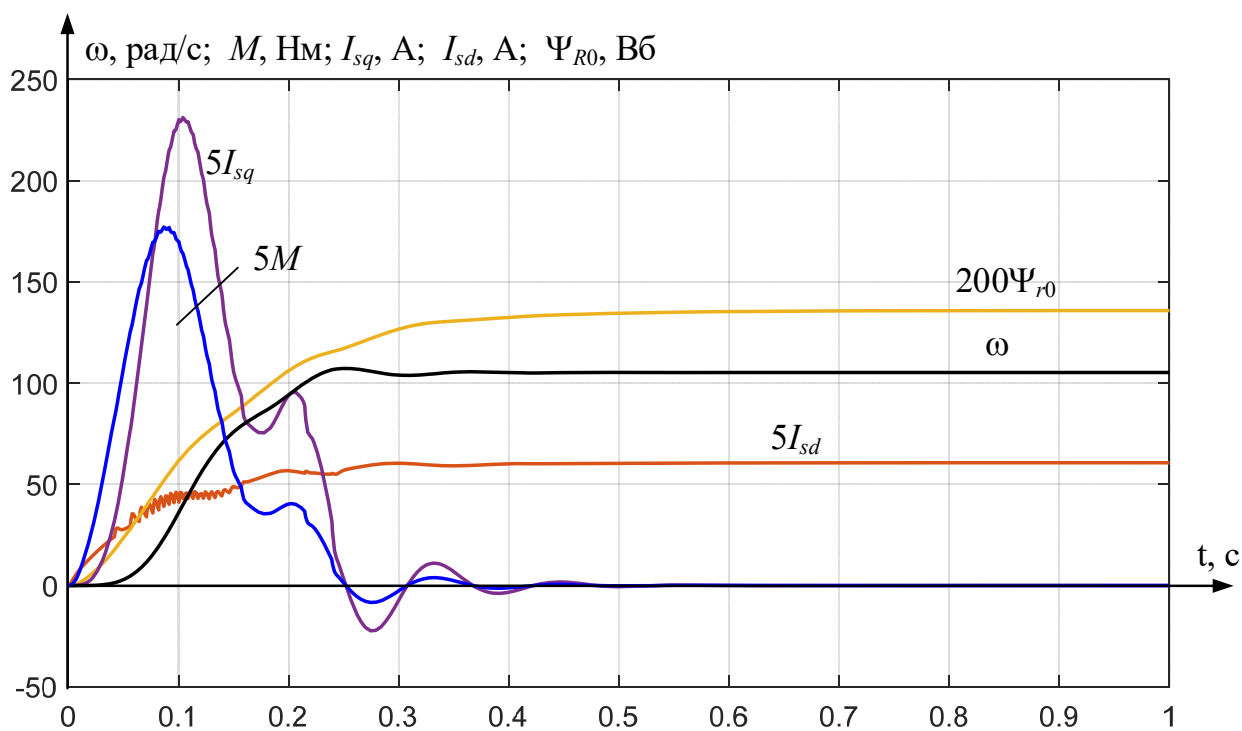


Рисунок 3.31 – Запуск без навантаження при $T_s = 4T_{s.onm} = 6,62 \times 10^{-3}$ с

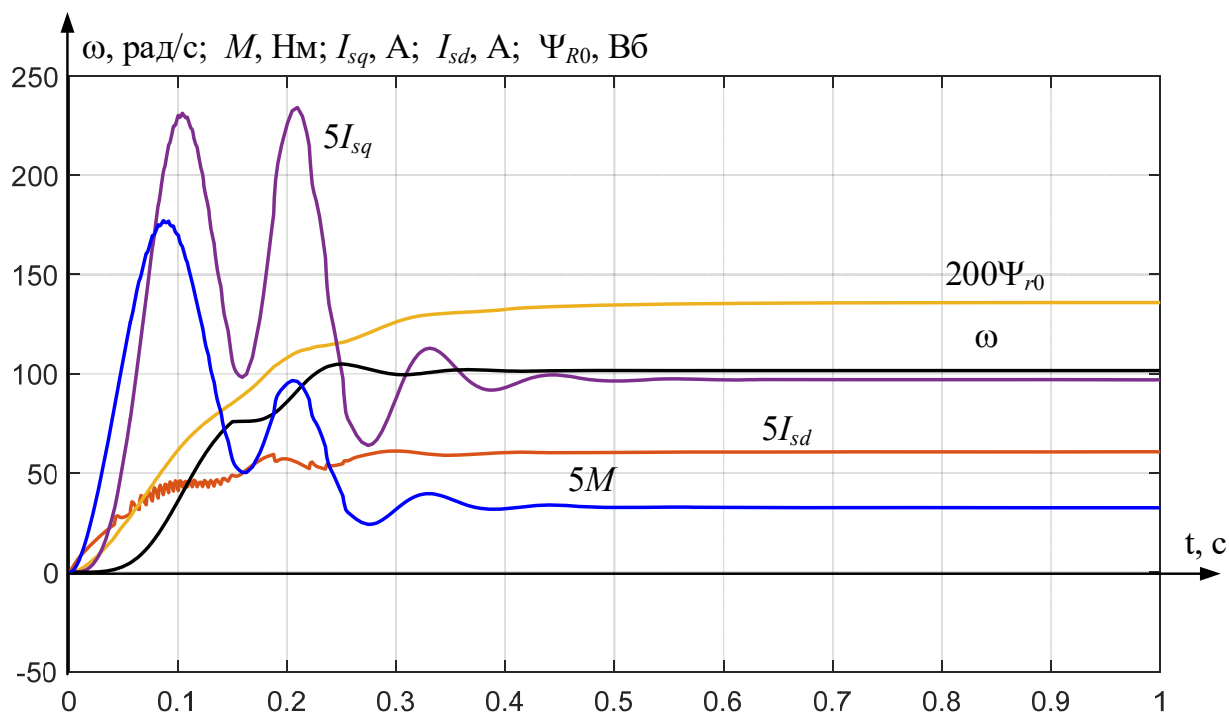


Рисунок 3.32 – Запуск з навантаженням при $T_s = 4T_{s.onm} = 6,62 \times 10^{-3}$ с

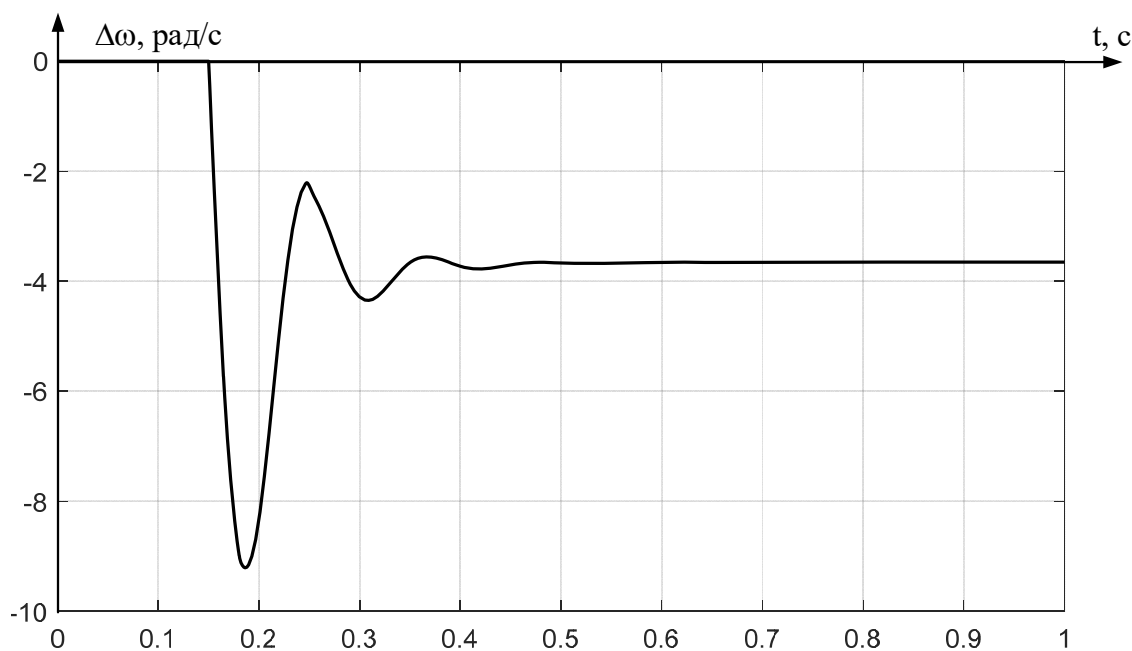


Рисунок 3.33 – Похибка системи електропривода при $T_s = 4T_{s.onm} = 6,62 \times 10^{-3}$ с

Проаналізувавши отримані графіки, можна стверджувати, що при зменшенні сталої часу контуру струму відбувається «розвал» системи з коливальним розбіжним характером перехідних процесів, а при збільшенні сталої часу контуру струму збільшується час пуску зі збільшенням коливальності перехідних процесів.

3.2.2 Неоптимальні параметри контуру потоку при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості

Результати дослідження системи електропривода при зміні коефіцієнта підсилення контуру потоку і при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості приведені на рисунках 3.34 – 3.45.

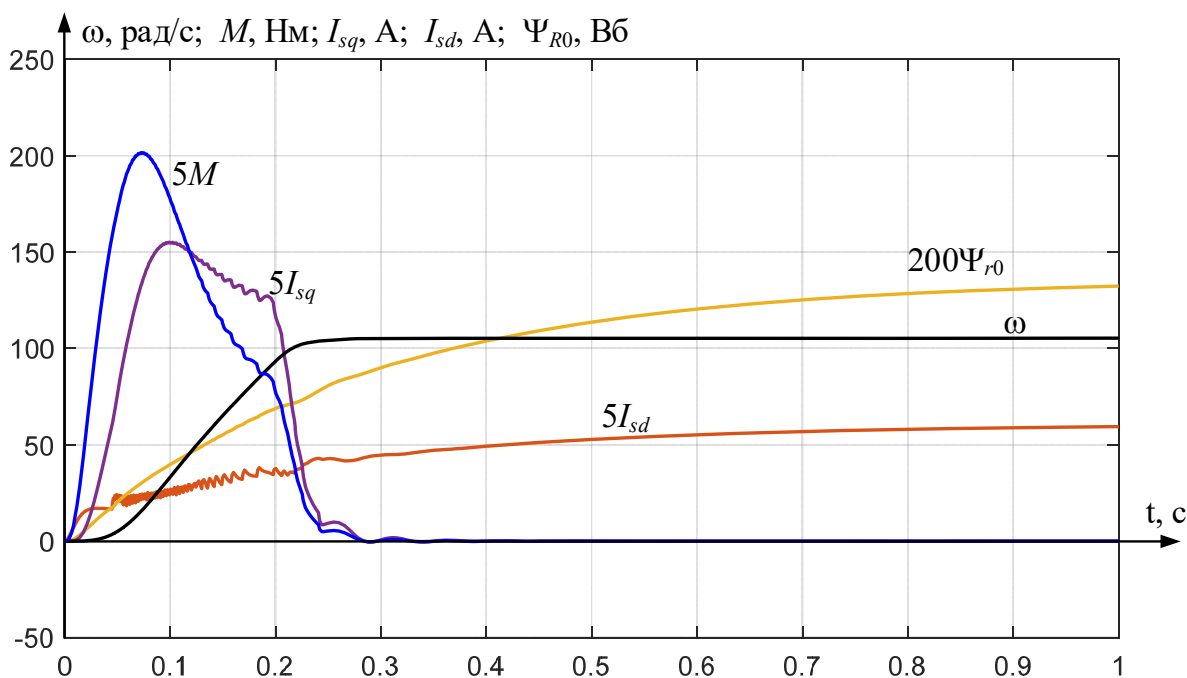


Рисунок 3.34 – Запуск без навантаження при $k_{pn} = k_{pn.onm} / 2 = 0,161$

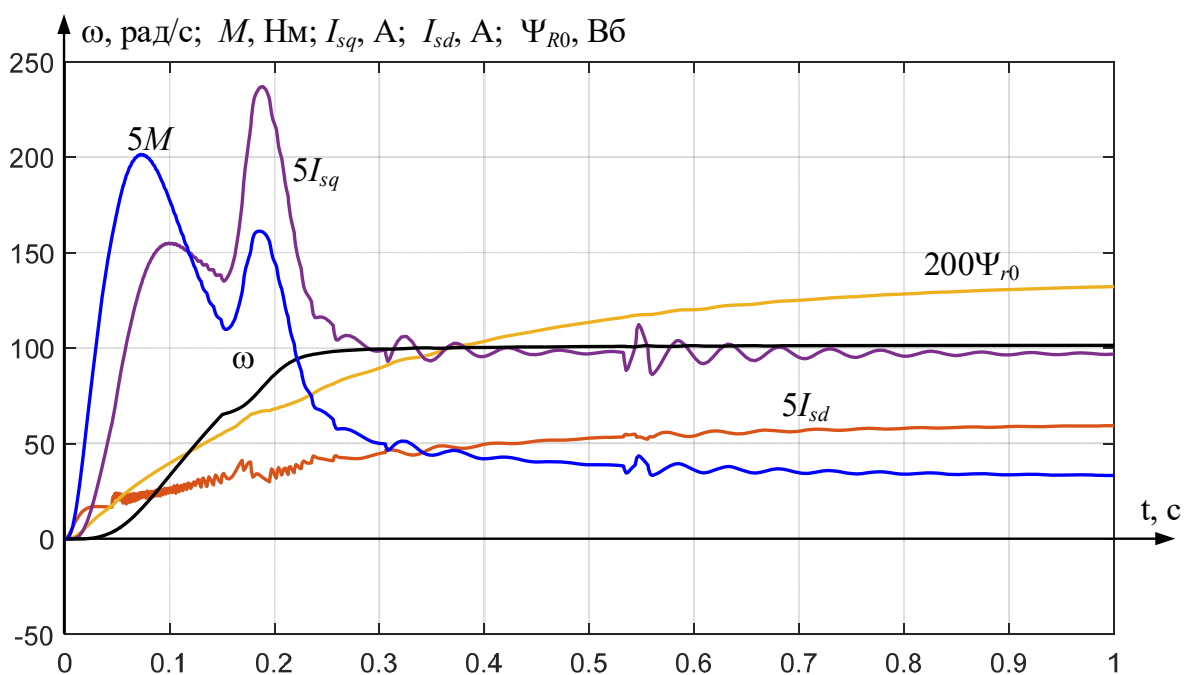


Рисунок 3.35 – Запуск з навантаженням при $k_{pn} = k_{pn.onm} / 2 = 0,161$

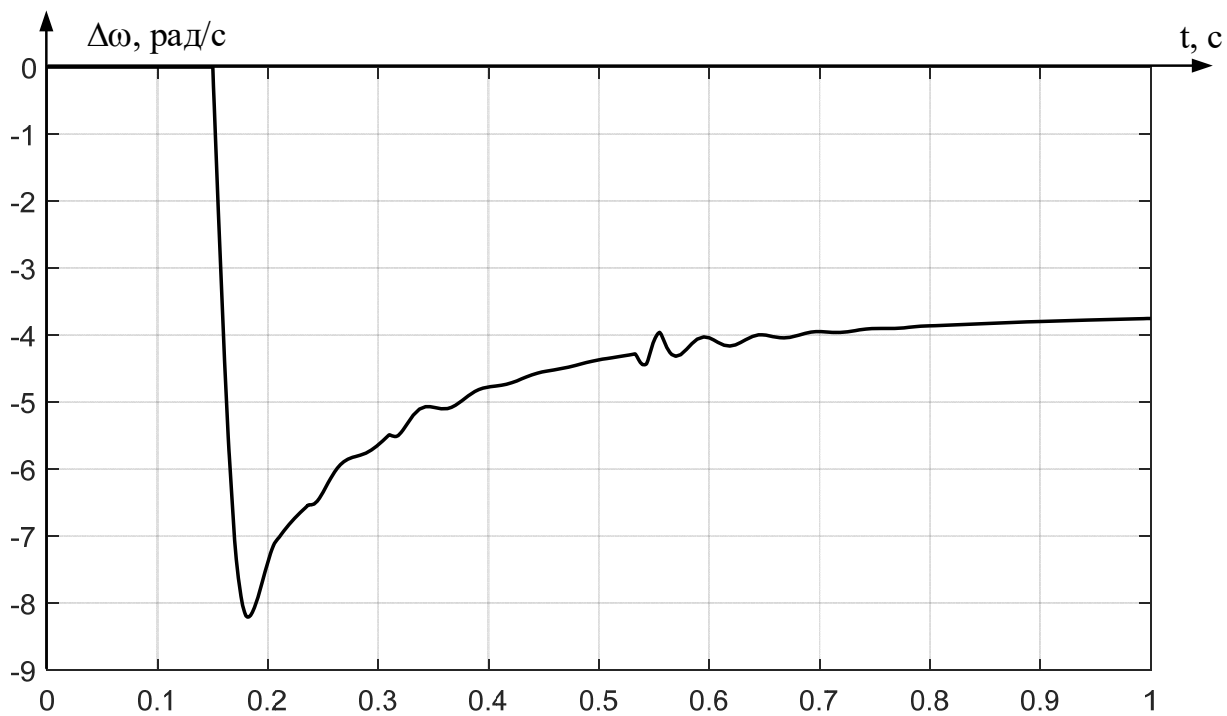


Рисунок 3.36 – Похибка системи електропривода при $k_{pn} = k_{pn.onm} / 2 = 0,161$

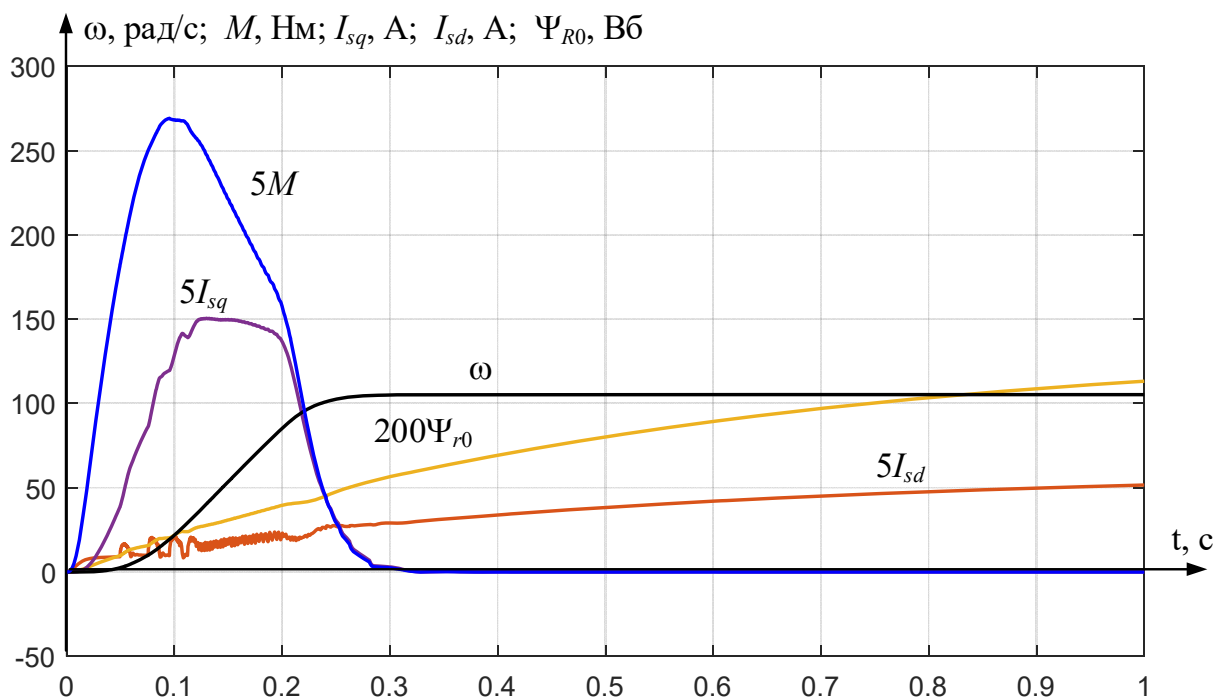


Рисунок 3.37 – Запуск без навантаження при $k_{pn} = k_{pn.onm} / 4 = 0,085$

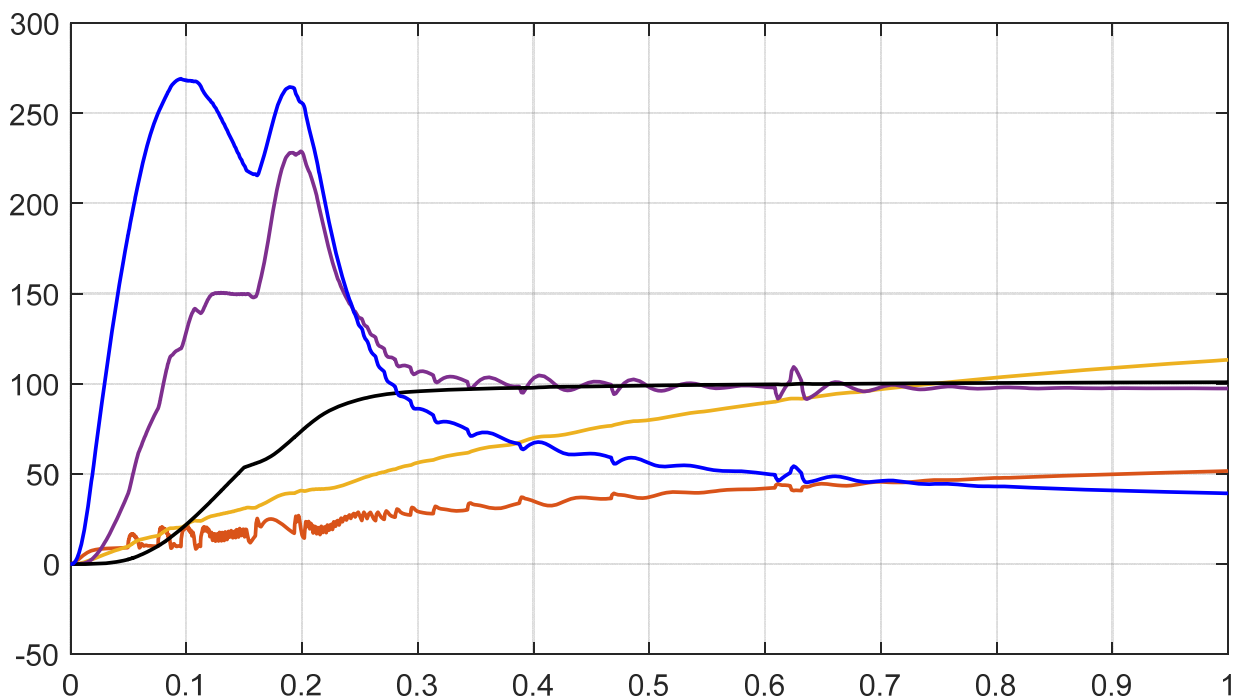


Рисунок 3.38 – Запуск з навантаженням при $k_{pn} = k_{pn.opt} / 4 = 0,085$

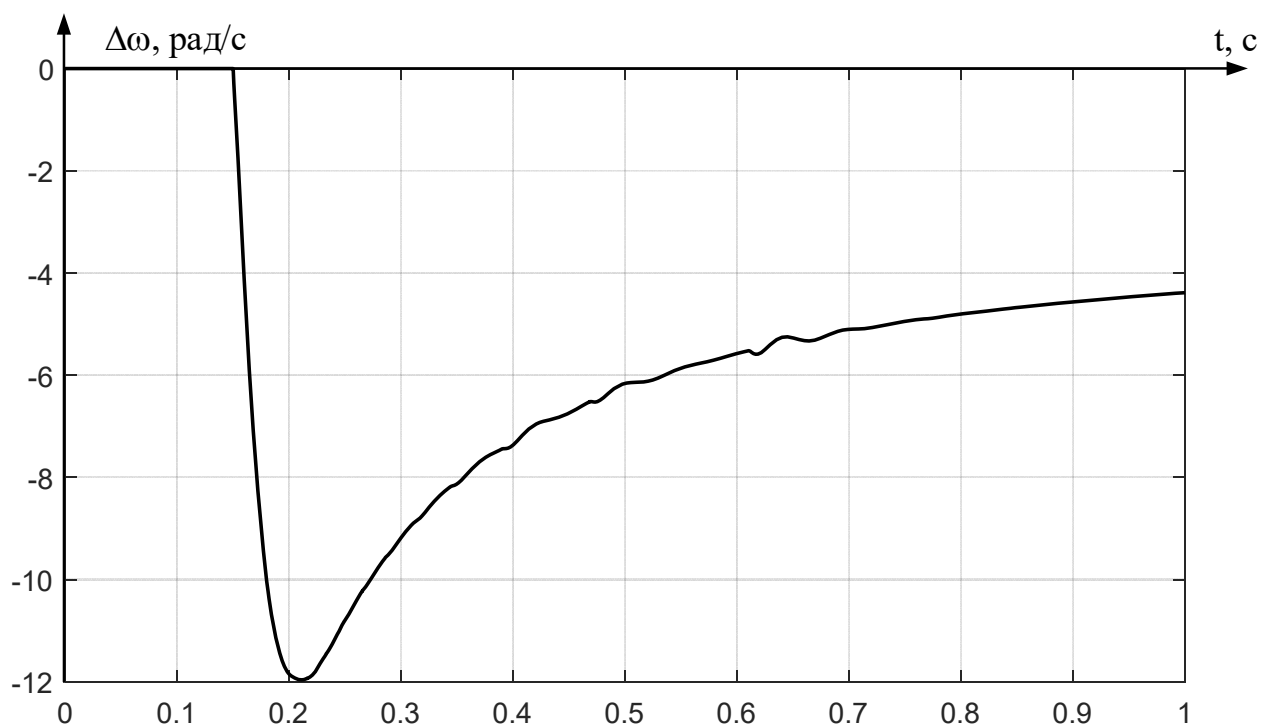


Рисунок 3.39 – Похибка системи електропривода при $k_{pn} = k_{pn.opt} / 4 = 0,085$

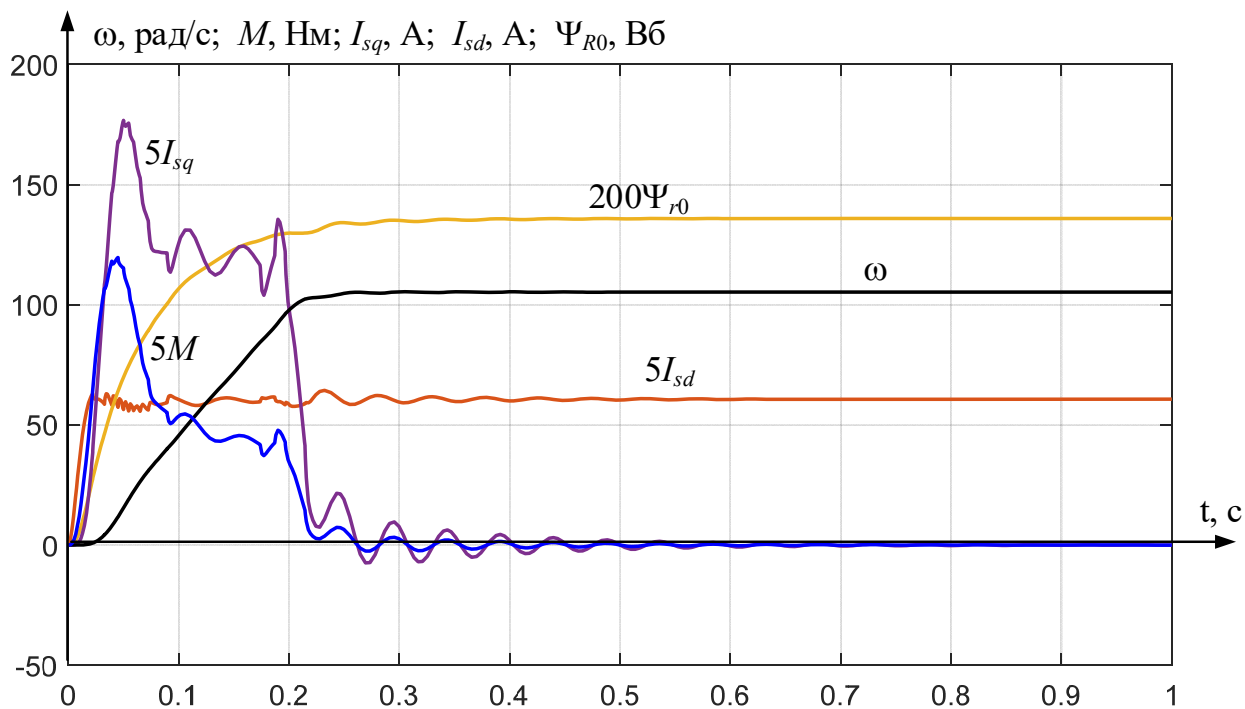


Рисунок 3.40 – Запуск без навантаження при $k_{pn} = 2k_{pn.opt} = 0,644$

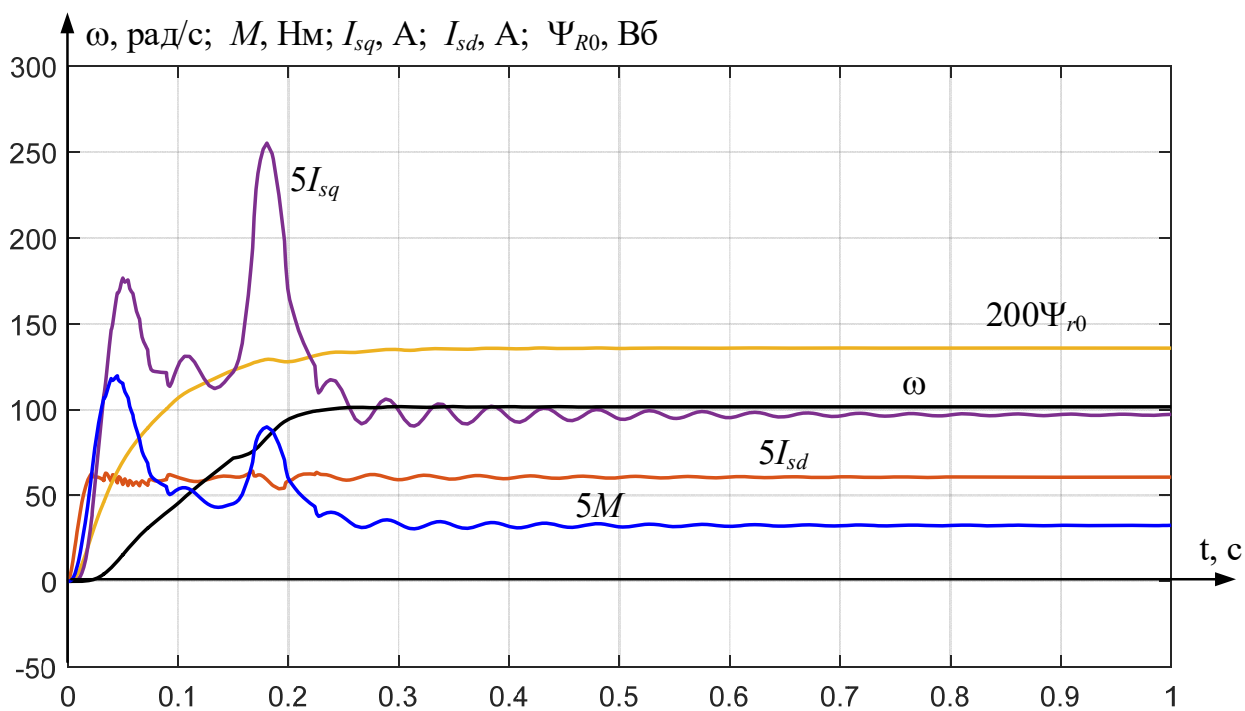


Рисунок 3.41 – Запуск з навантаженням при $k_{pn} = 2k_{pn.opt} = 0,644$

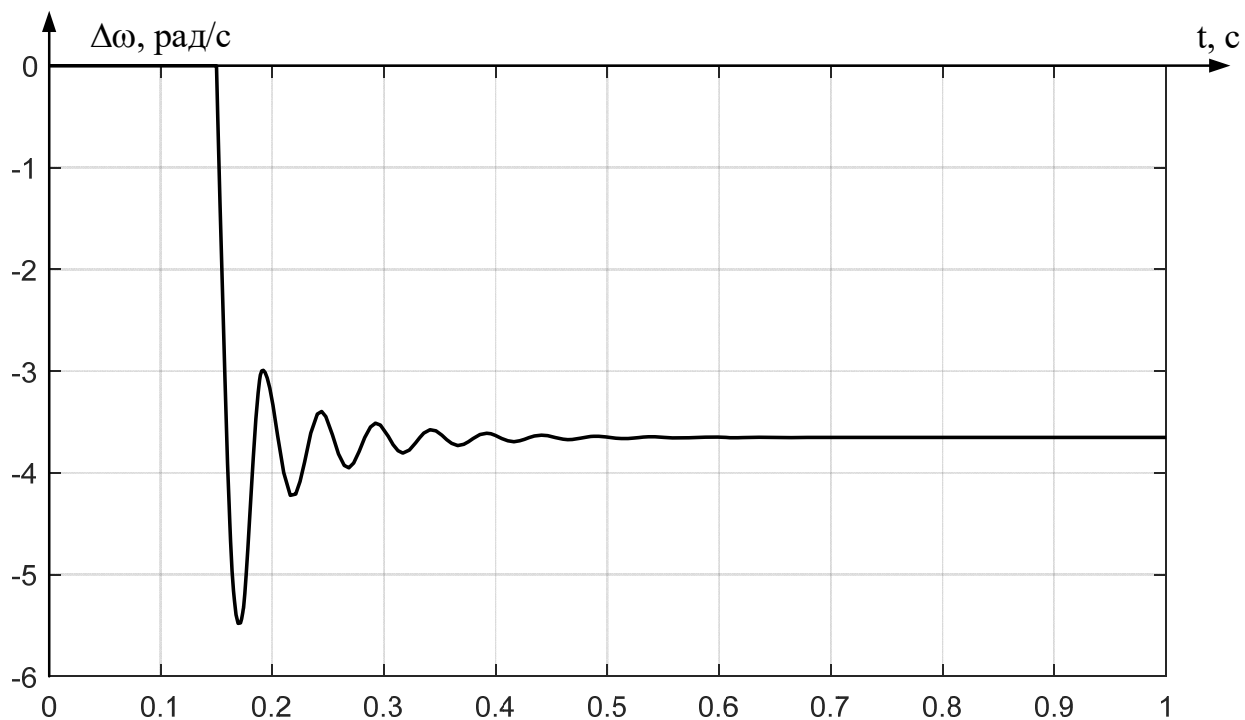


Рисунок 3.42 – Похибка системи електропривода при $k_{pn} = 2k_{pn.onm} = 0,644$

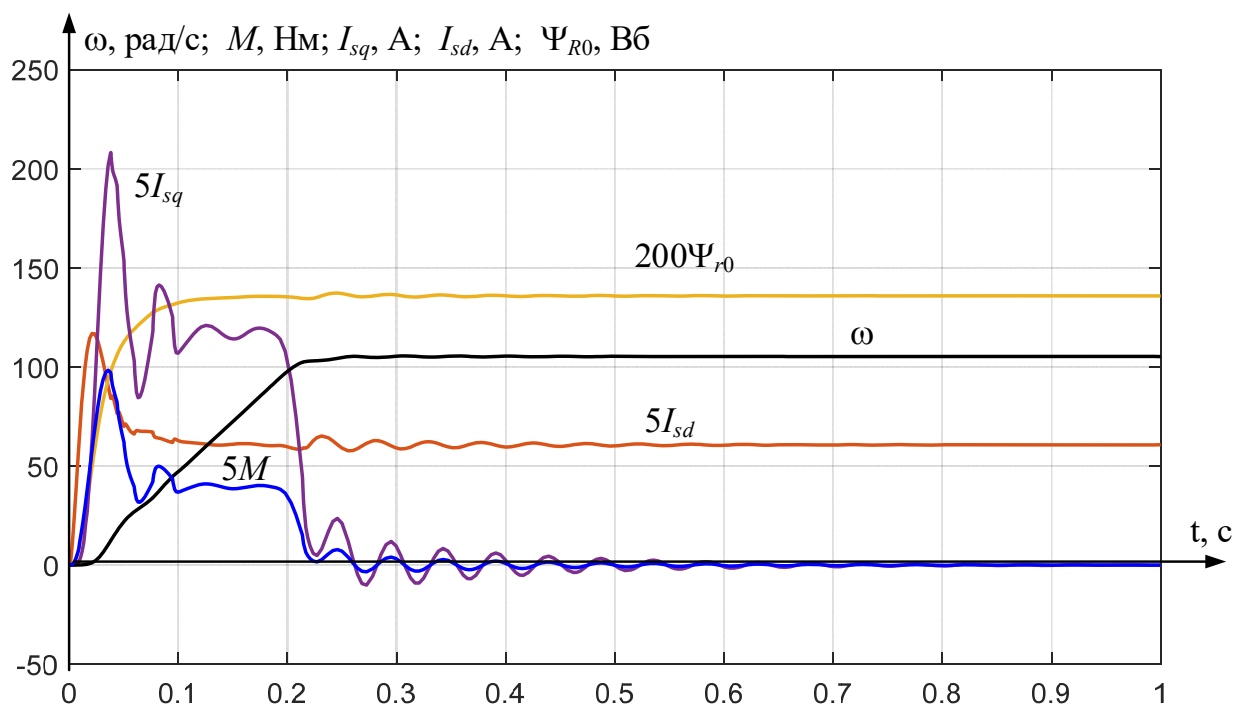


Рисунок 3.43 – Запуск без навантаження при $k_{pn} = 4k_{pn.onm} = 1,288$

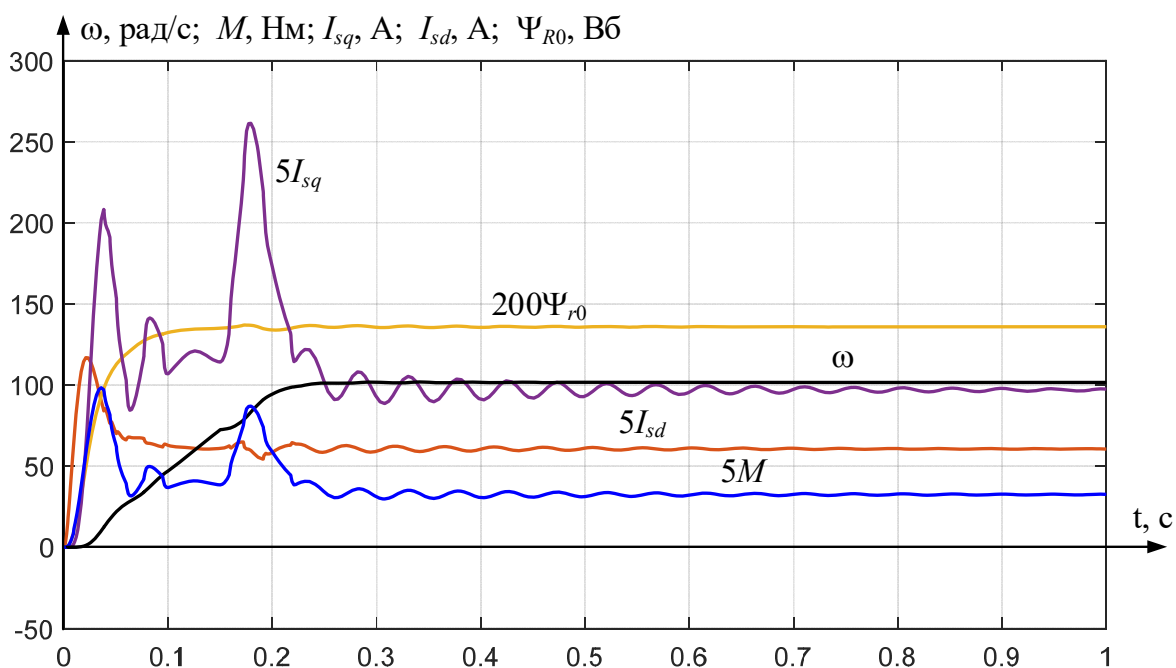


Рисунок 3.44 – Запуск з навантаженням при $k_{pn} = 4k_{pn.onm} = 1,288$

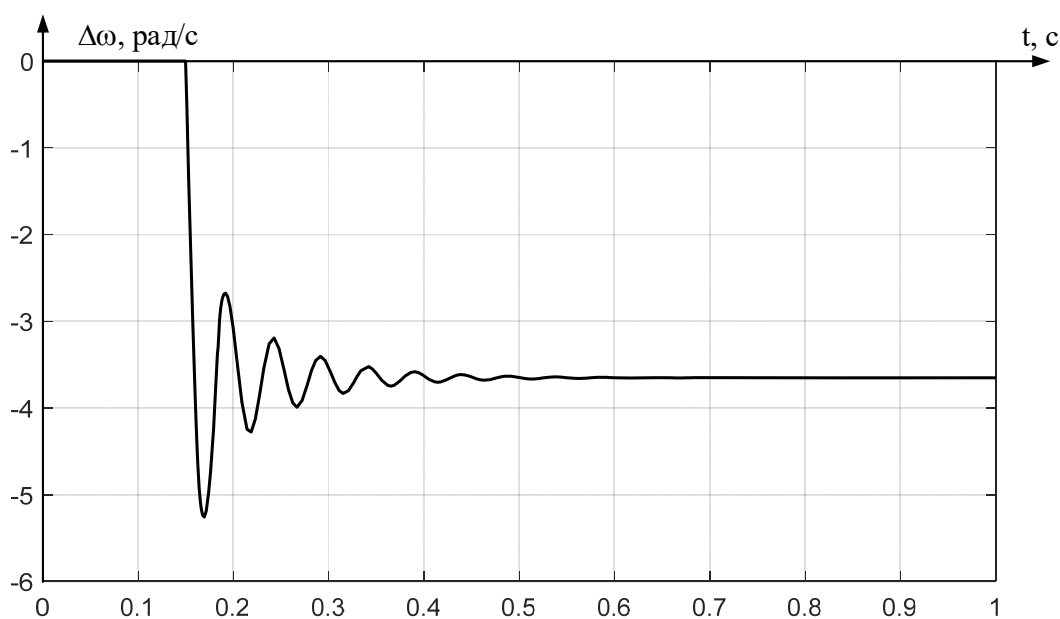


Рисунок 3.45 – Похибка системи електропривода при $k_{pn} = 4k_{pn.onm} = 1,288$

При зменшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку збільшується час пуску та похибка системи електропривода з незначним коливальним характером перехідних процесів. При збільшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку час виходу швидкості на усталене значення не збільшується, похибка зменшується, однак спостерігається коливальний характер перехідних процесів.

Результати дослідження системи електропривода при зміні сталої часу контуру потоку й при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості приведені на рисунках 3.46 – 3.57.

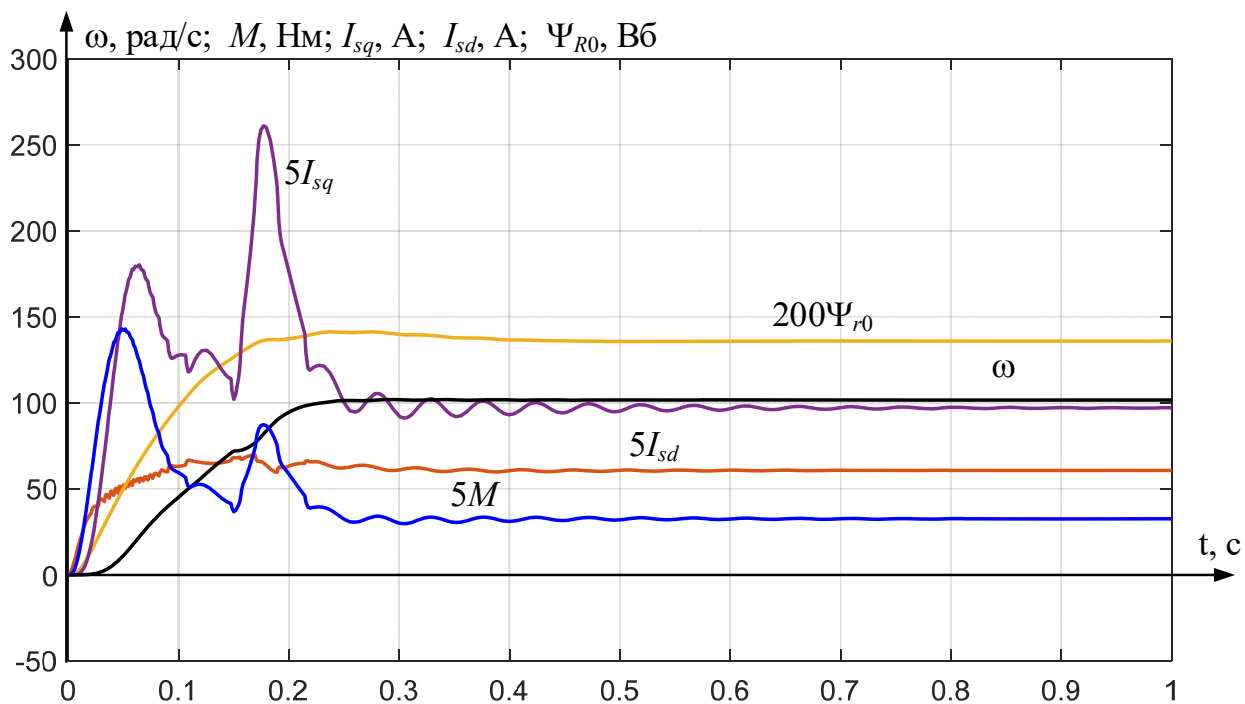


Рисунок 3.46 – Запуск без навантаження при $T_r = T_{r.onm} / 2 = 0,028$ с

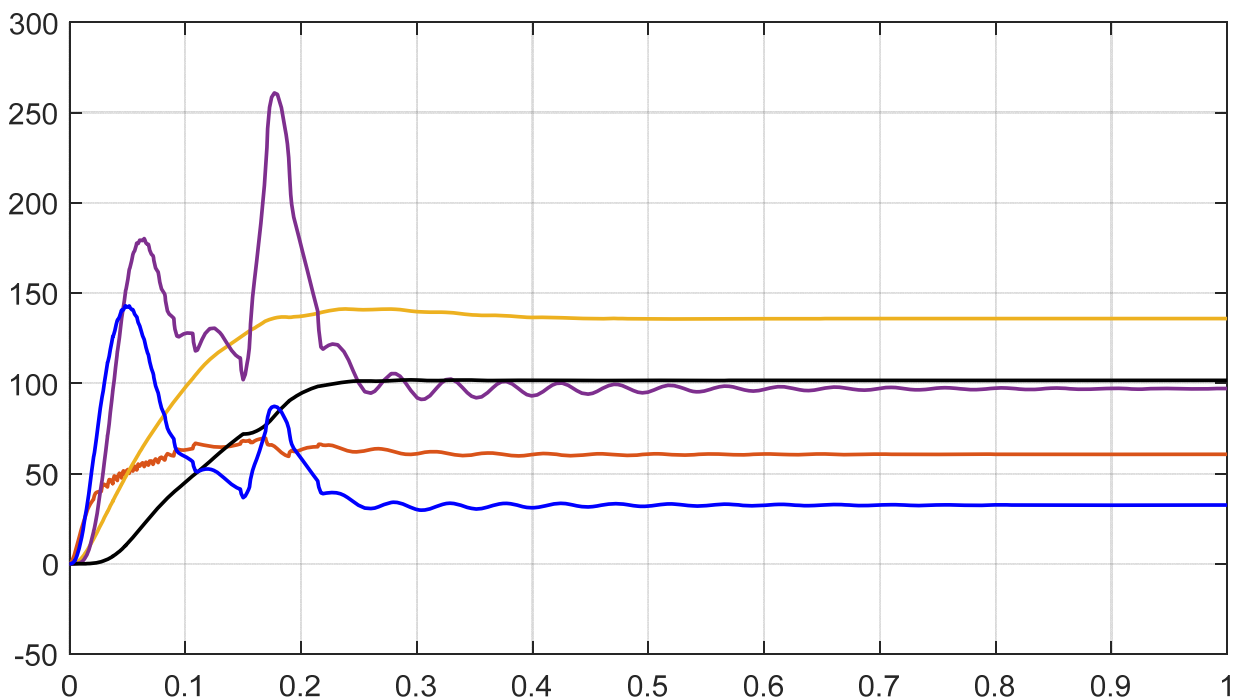


Рисунок 3.47 – Запуск з навантаженням при $T_r = T_{r.onm} / 2 = 0,028$ с

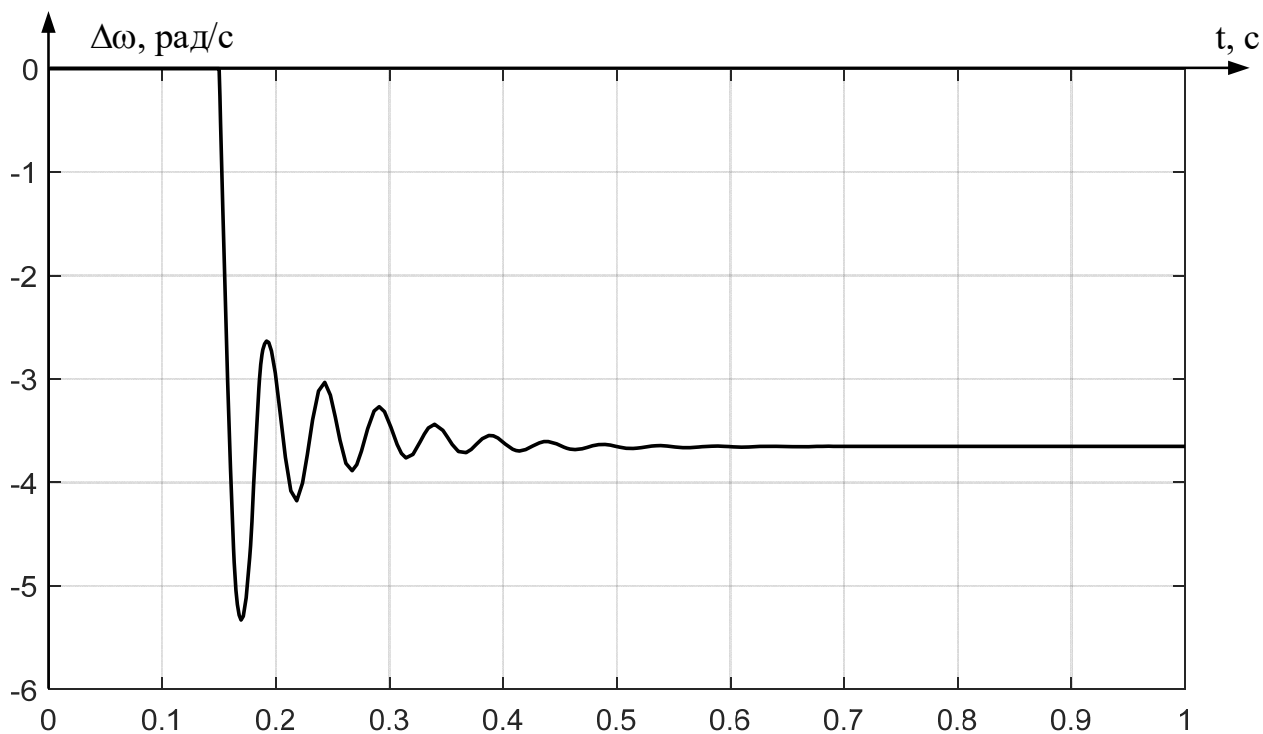


Рисунок 3.48 – Похибка системи електропривода при $T_r = T_{r.onm} / 2 = 0,028$ с

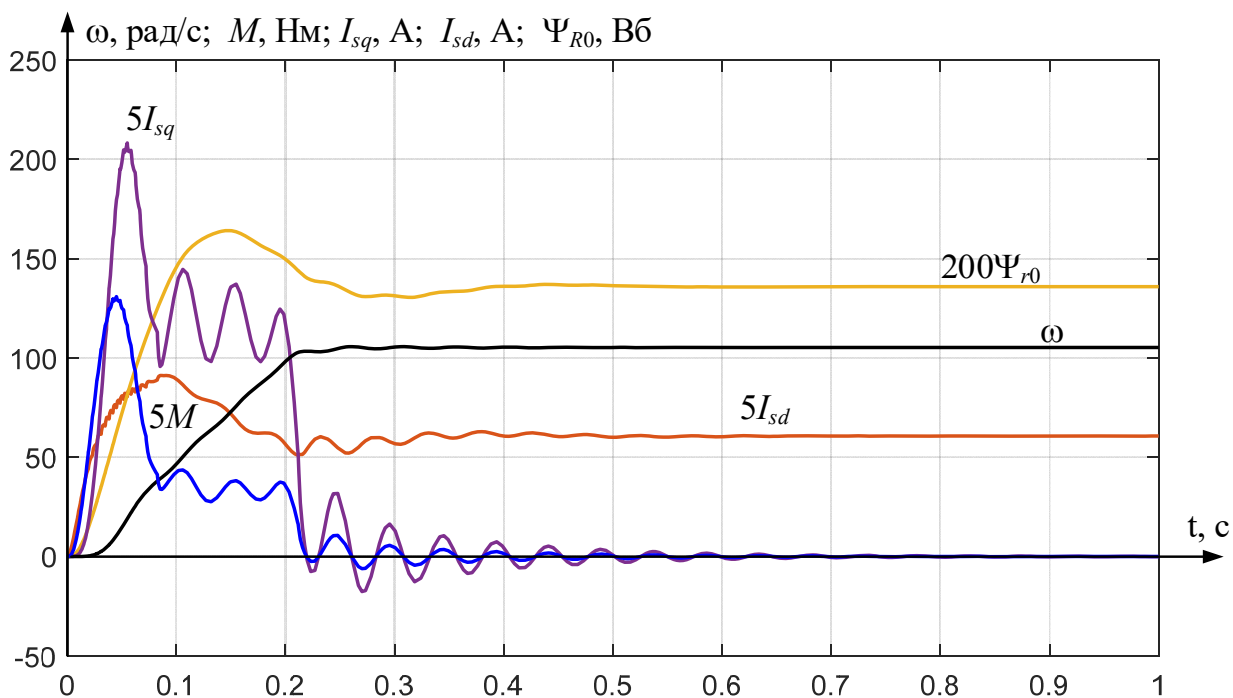


Рисунок 3.49 – Запуск без навантаження при $T_r = T_{r.onm} / 4 = 0,014$ с

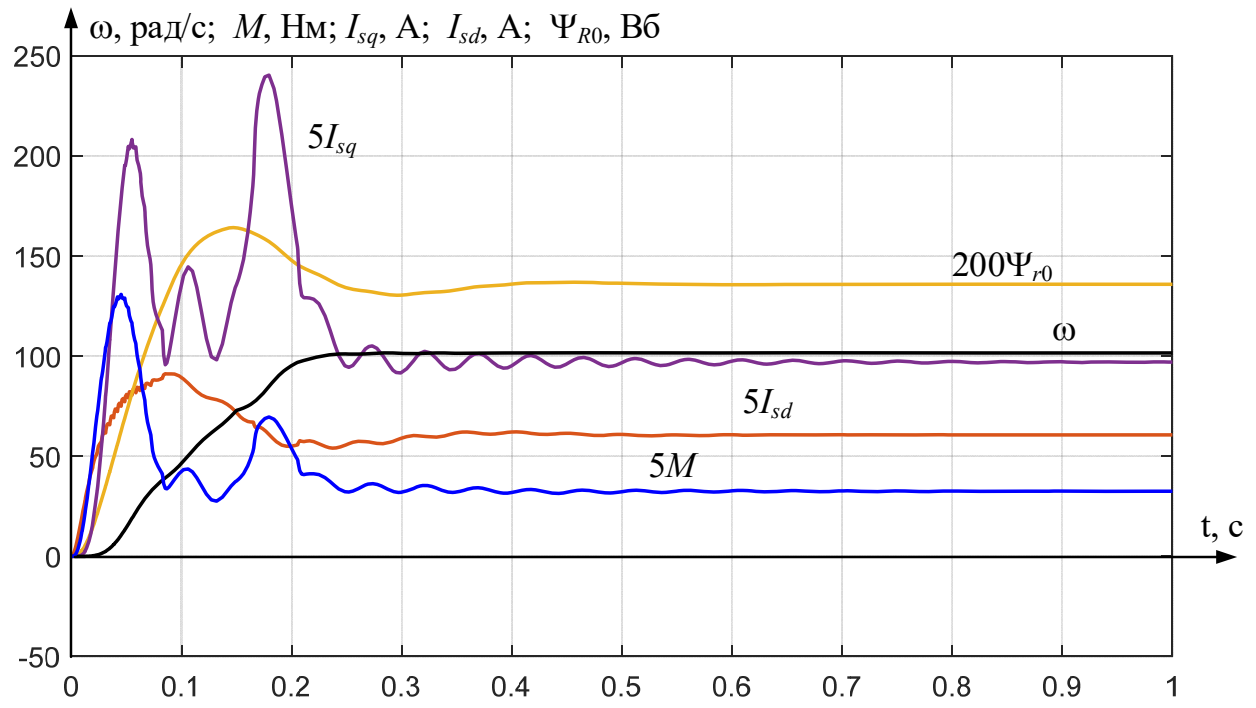


Рисунок 3.50 – Запуск з навантаженням при $T_r = T_{r.onm} / 4 = 0,014$ с

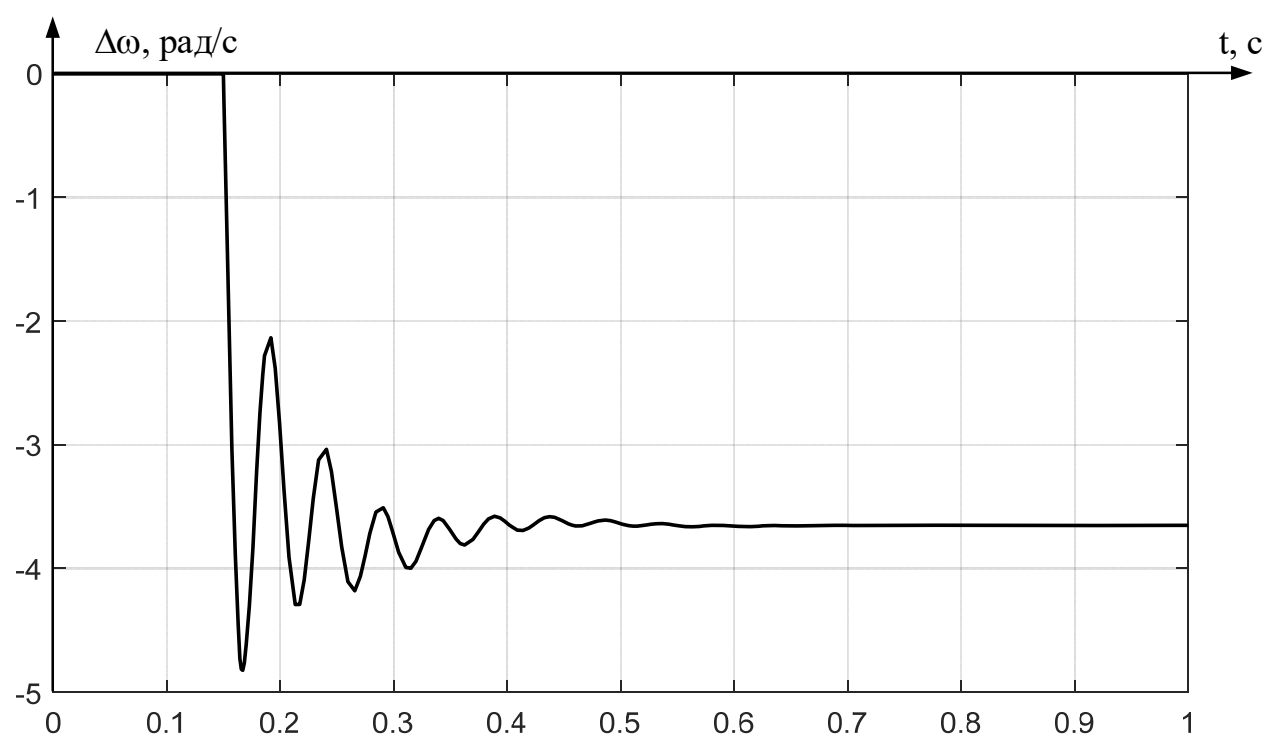


Рисунок 3.51 – Похибка системи електропривода при $T_r = T_{r.onm} / 4 = 0,014$ с

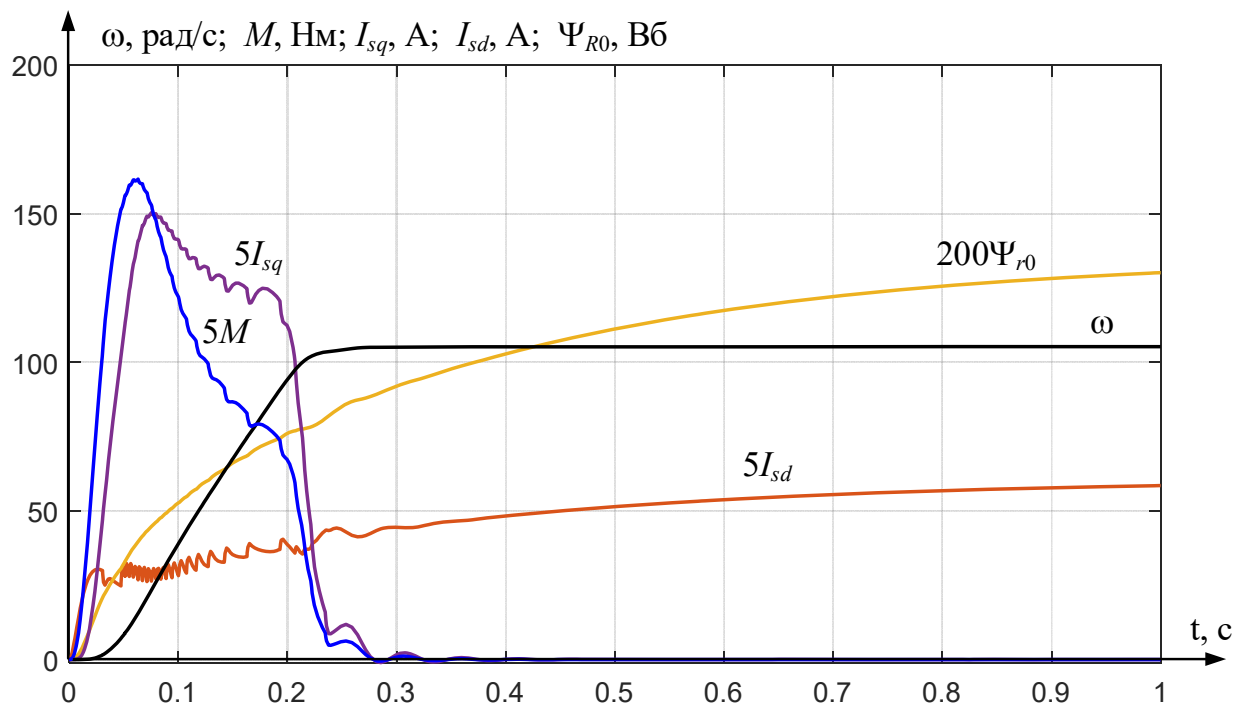


Рисунок 3.52 – Запуск без навантаження при $T_r = 2T_{r.onm} = 0,112$ с

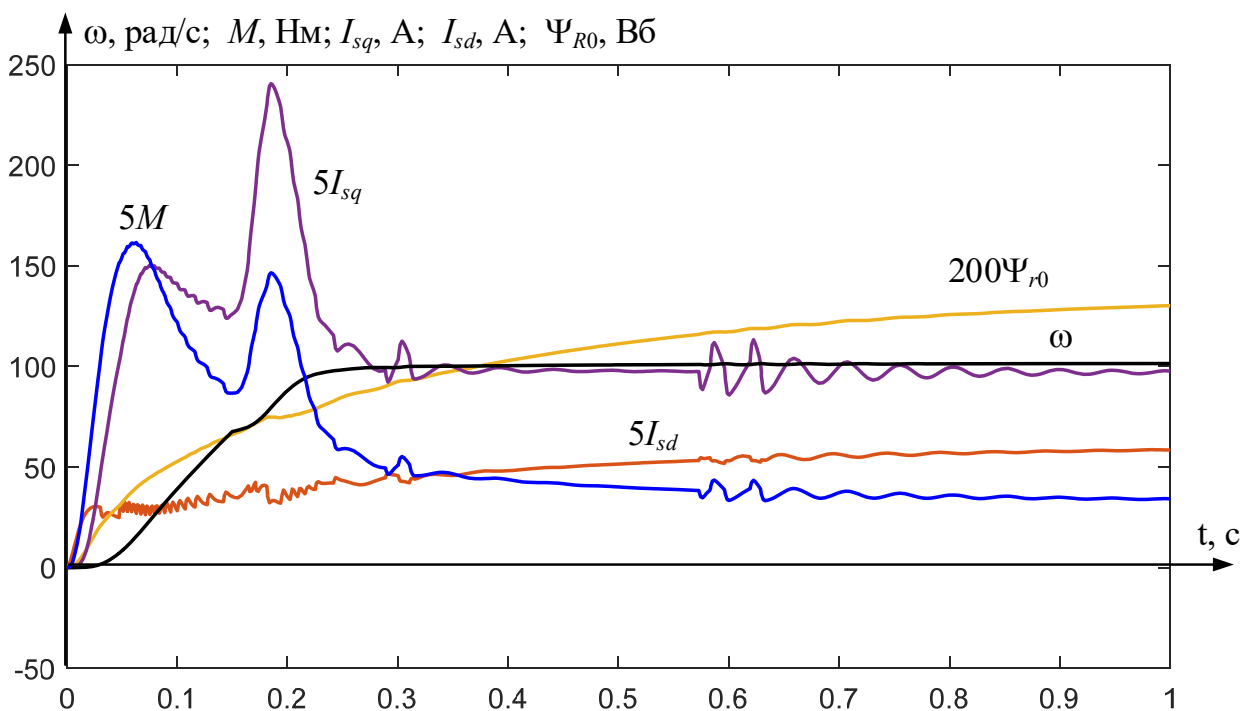


Рисунок 3.53 – Запуск з навантаженням при $T_r = 2T_{r.onm} = 0,112$ с

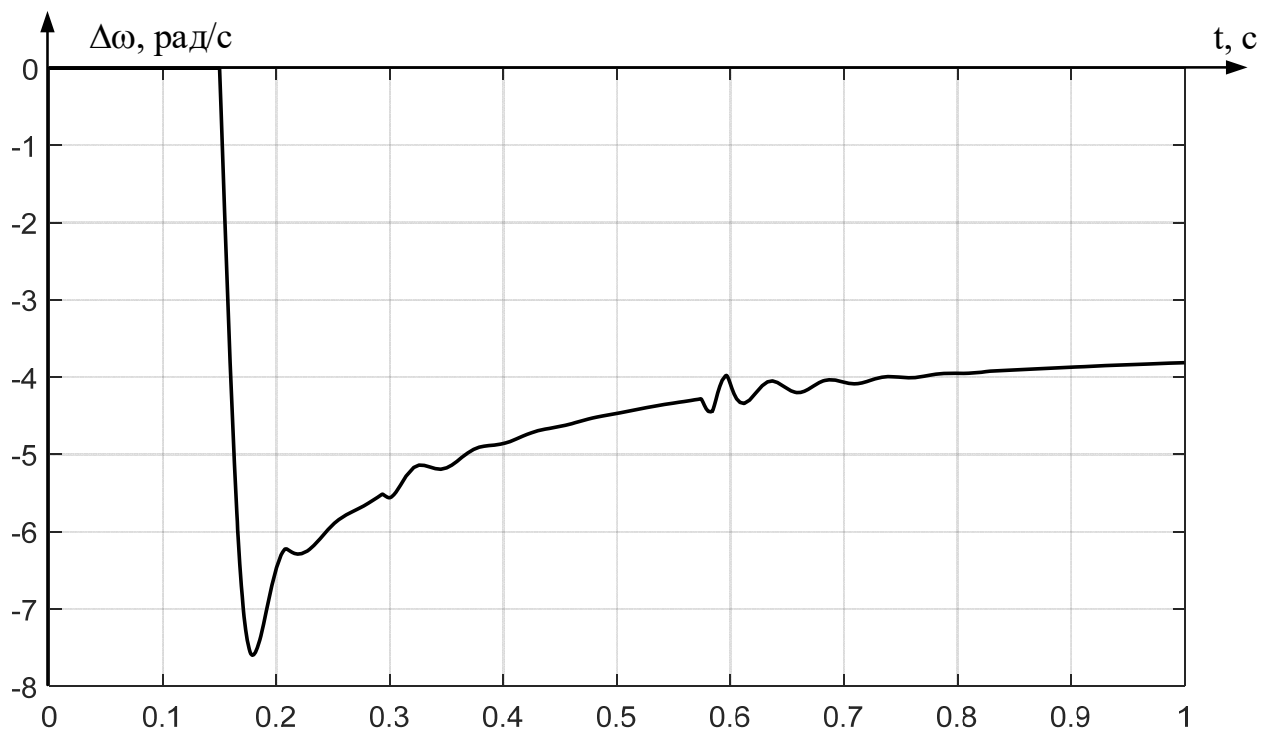


Рисунок 3.54 – Похибка системи електропривода при $T_r = 2T_{r.onm} = 0,112$ с

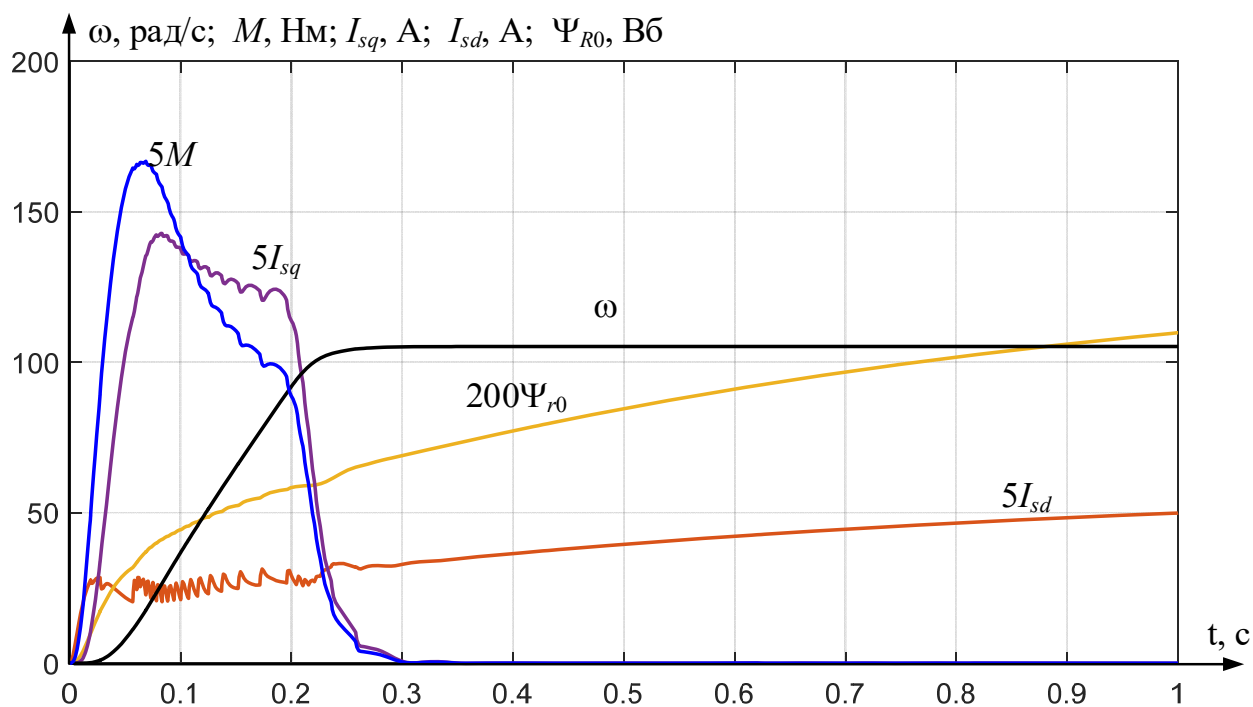


Рисунок 3.55 – Запуск без навантаження при $T_r = 4T_{r.onm} = 0,224$ с

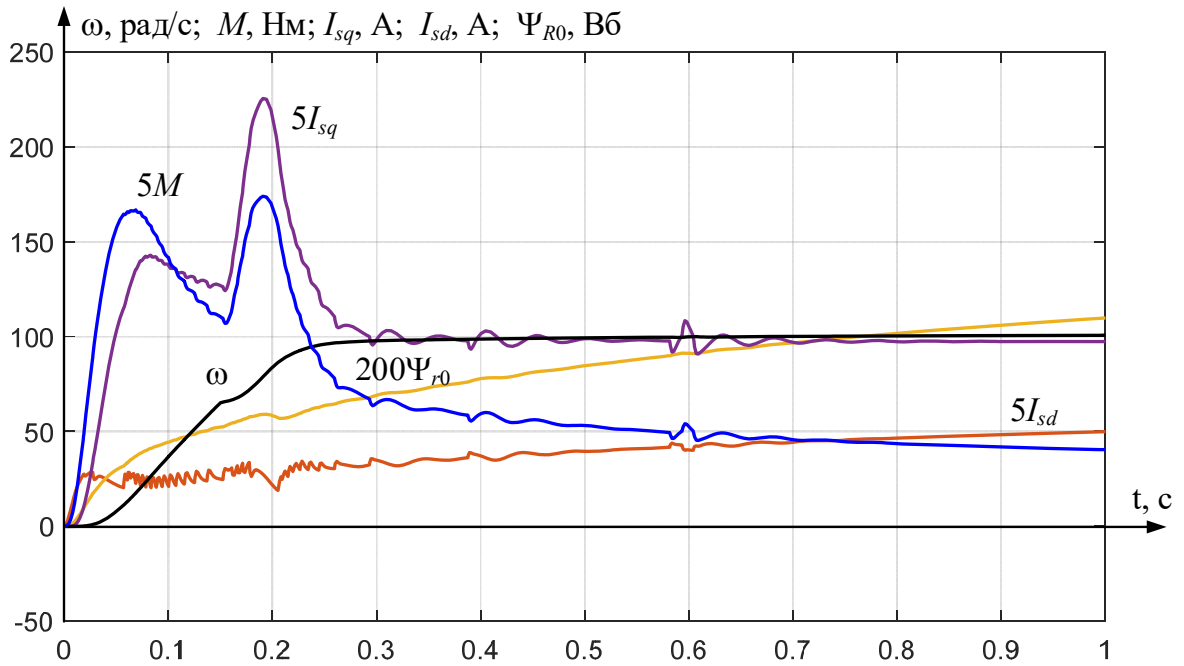


Рисунок 3.56 – Запуск з навантаженням при $T_r = 4T_{r.onm} = 0,224$ с

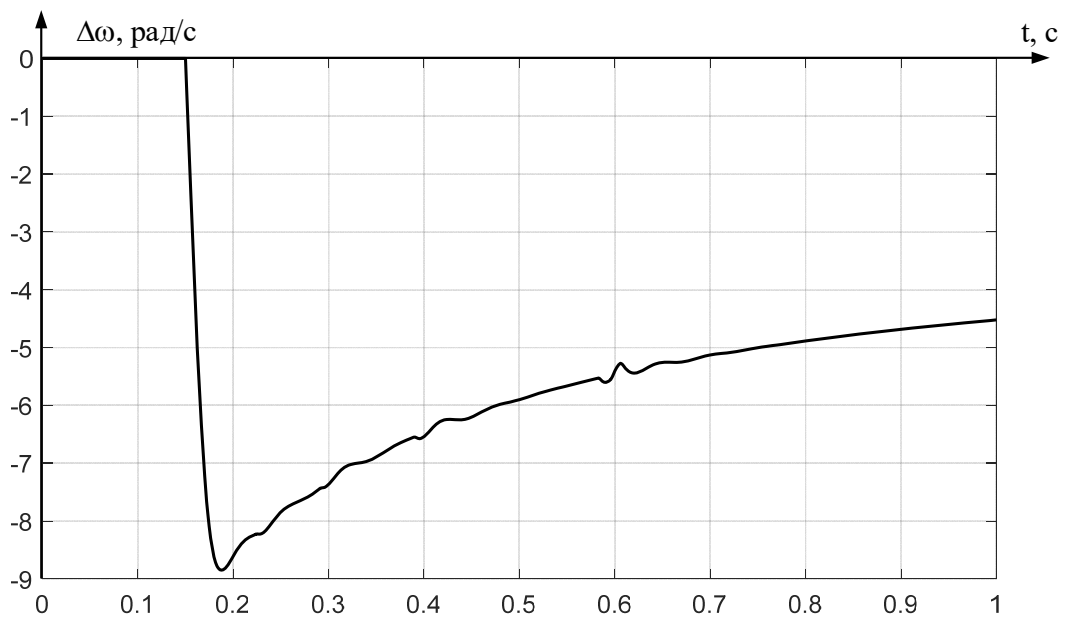


Рисунок 3.57 – Похибка системи електропривода при $T_r = 4T_{r.onm} = 0,224$ с

При зменшенні сталої часу контуру потоку спостерігається збільшення потокозчеплення при пуску з подальшим затухаючим характером до усталеного номінального значення, зменшення похибки та з деяким коливальним характером перехідних процесів. При збільшенні сталої часу контуру потоку спостерігається повільне збільшення потокозчеплення, збільшення похибки та незначний коливальний характер перехідних процесів.

3.2.3 Неоптимальні параметри контуру швидкості при оптимальних параметрах контурів струму та потоку

Результати дослідження системи електропривода при зміні коефіцієнта підсилення контуру швидкості і при оптимальних параметрах контурів струму та потоку приведені на рисунках 3.58 – 3.69.

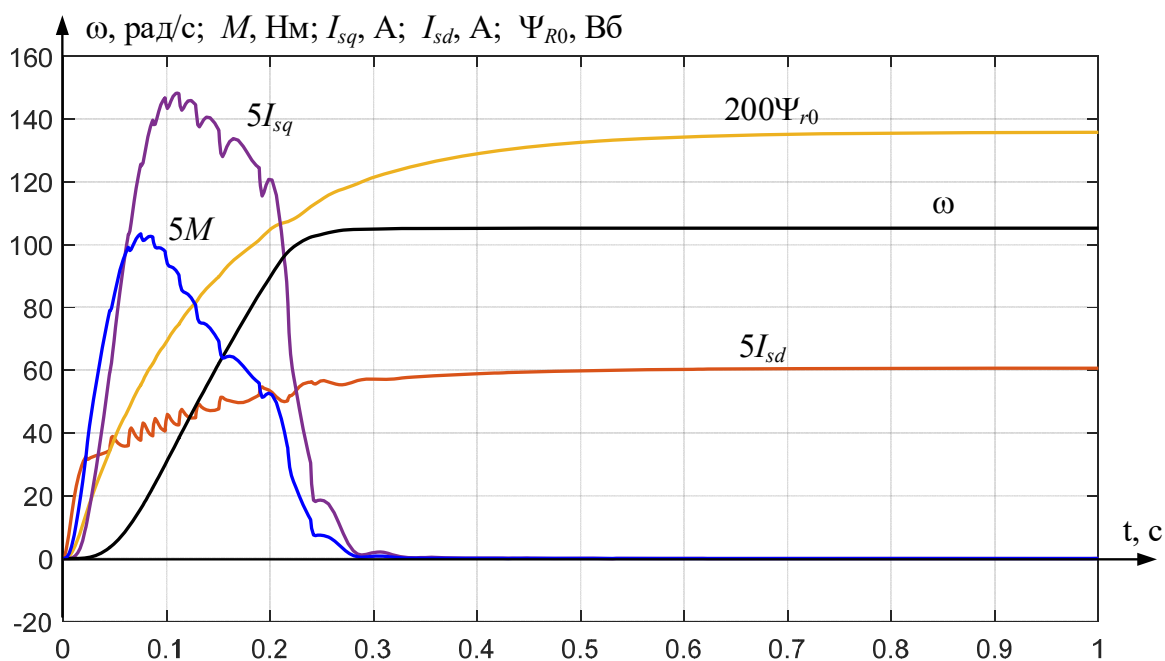


Рисунок 3.58 – Запуск без навантаження при $k_{p\omega} = k_{p\omega.onm} / 2 = 6,25$

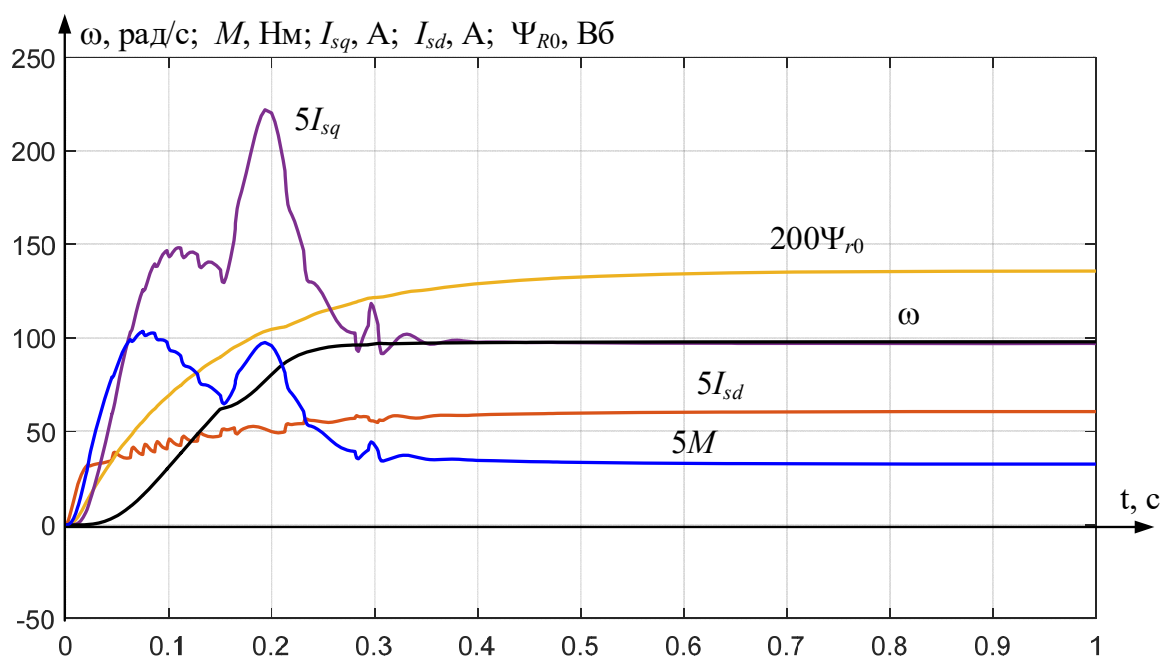


Рисунок 3.59 – Запуск з навантаженням при $k_{p\omega} = k_{p\omega.onm} / 2 = 6,25$

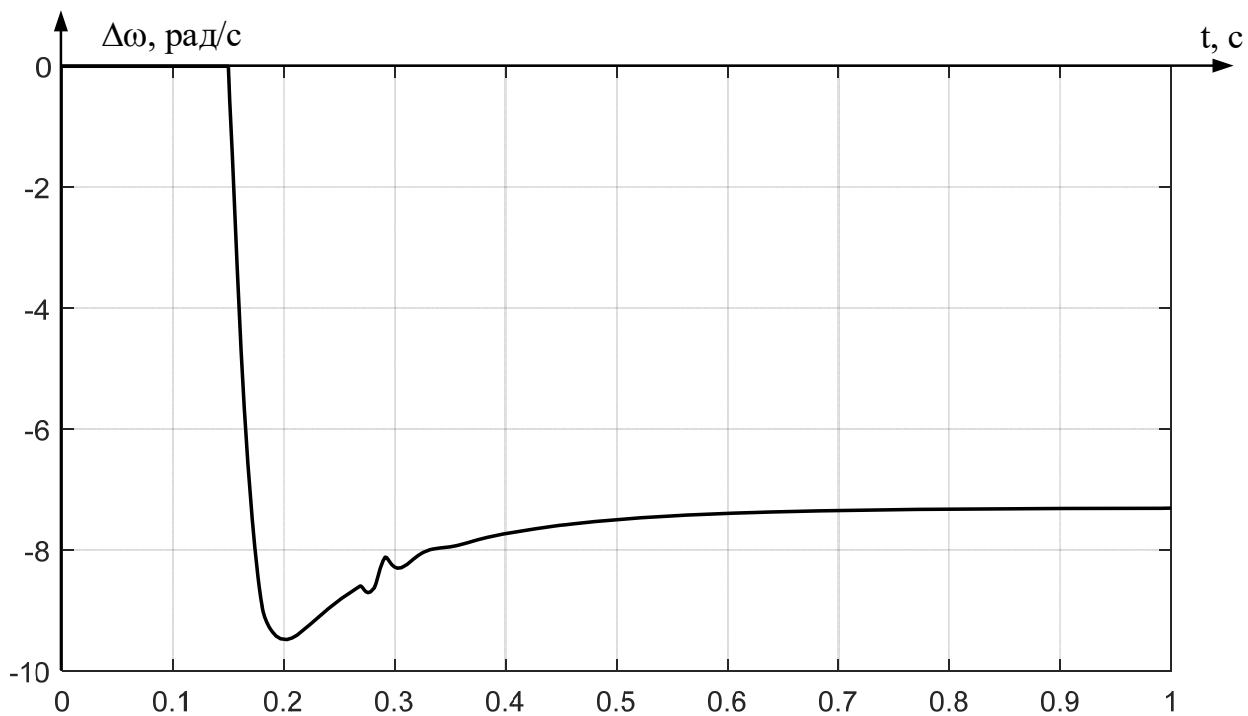


Рисунок 3.60 – Похибка системи електропривода при $k_{pm} = k_{pm.onm} / 2 = 6,25$

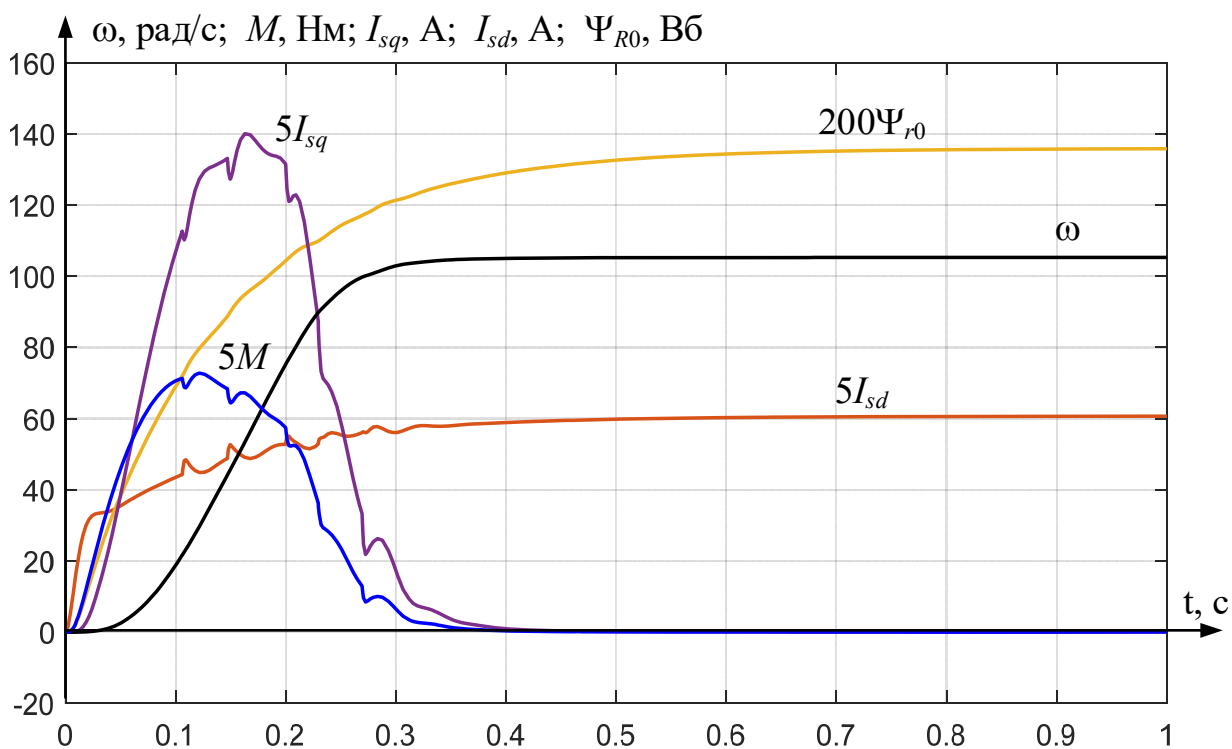


Рисунок 3.61 – Запуск без навантаження при $k_{pm} = k_{pm.onm} / 4 = 3,125$

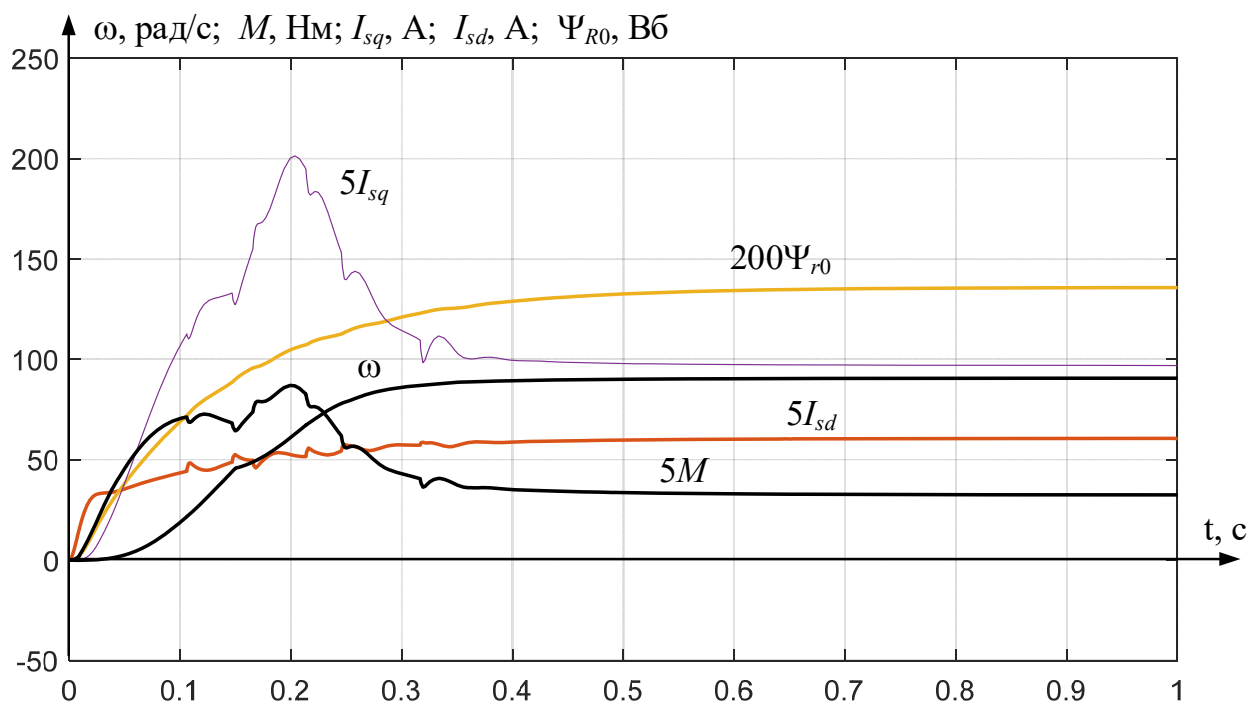


Рисунок 3.62 – Запуск з навантаженням при $k_{pu} = k_{pu.onm} / 4 = 3,125$

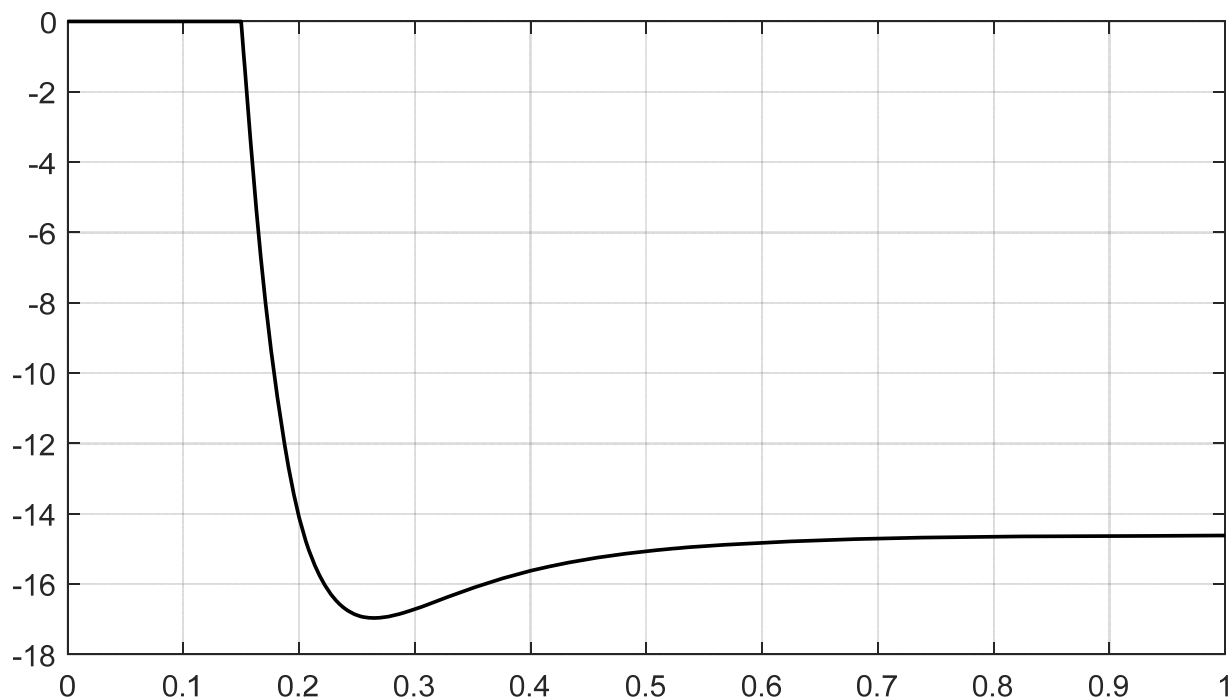


Рисунок 3.63 – Похибка системи електропривода при $k_{pu} = k_{pu.onm} / 4 = 3,125$

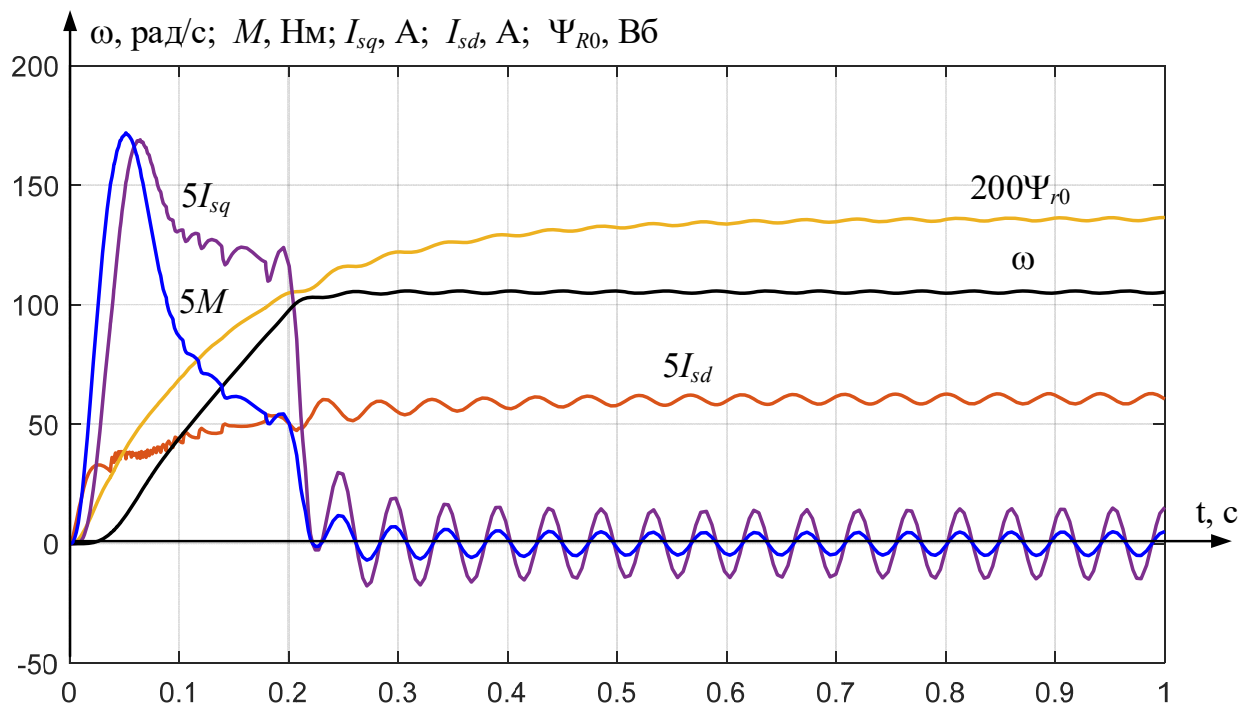


Рисунок 3.64 – Запуск без навантаження при $k_{pu} = 1,2k_{pu.onm} = 15$

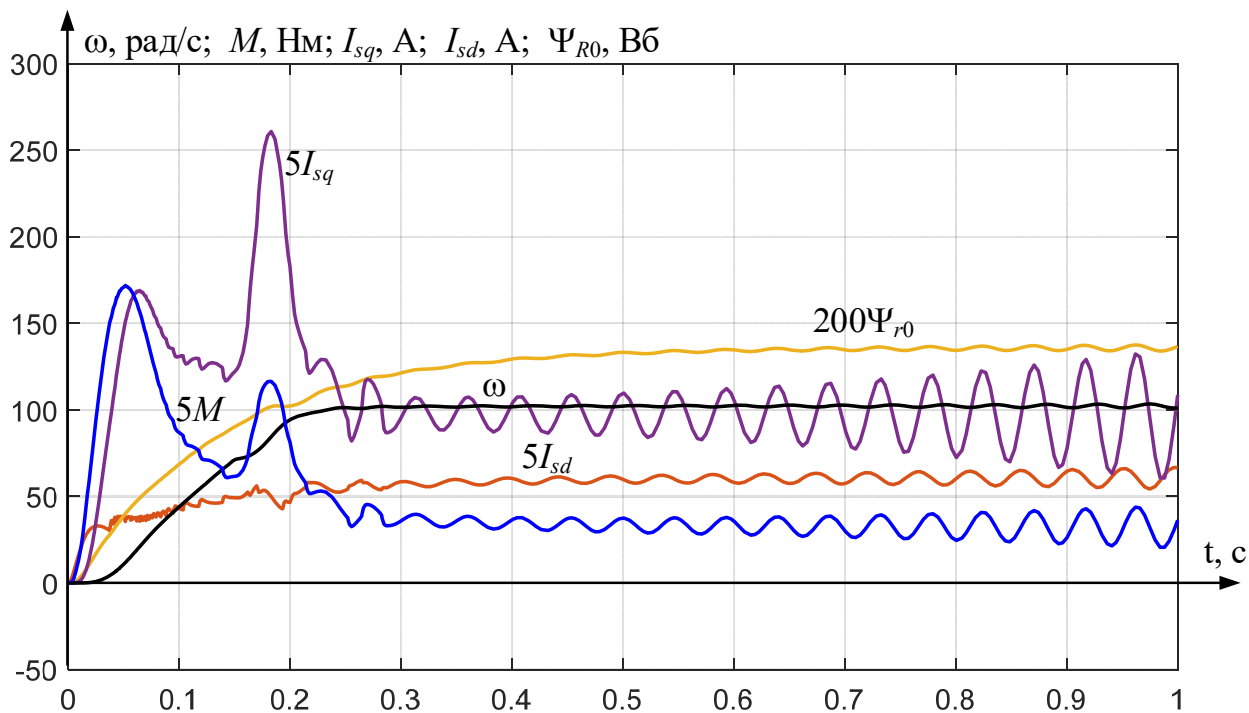


Рисунок 3.65 – Запуск з навантаженням при $k_{pu} = 1,2k_{pu.onm} = 15$

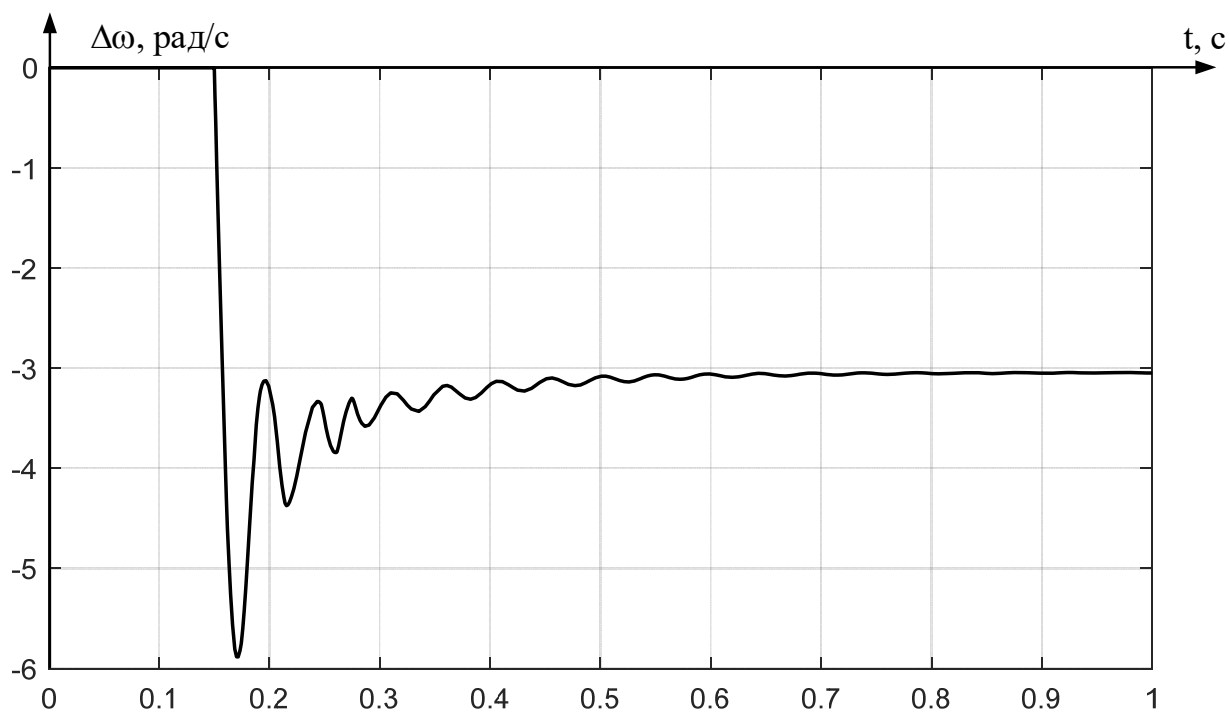


Рисунок 3.66 – Похибка системи електропривода при $k_{pm} = 1,2k_{pm.opt} = 15$

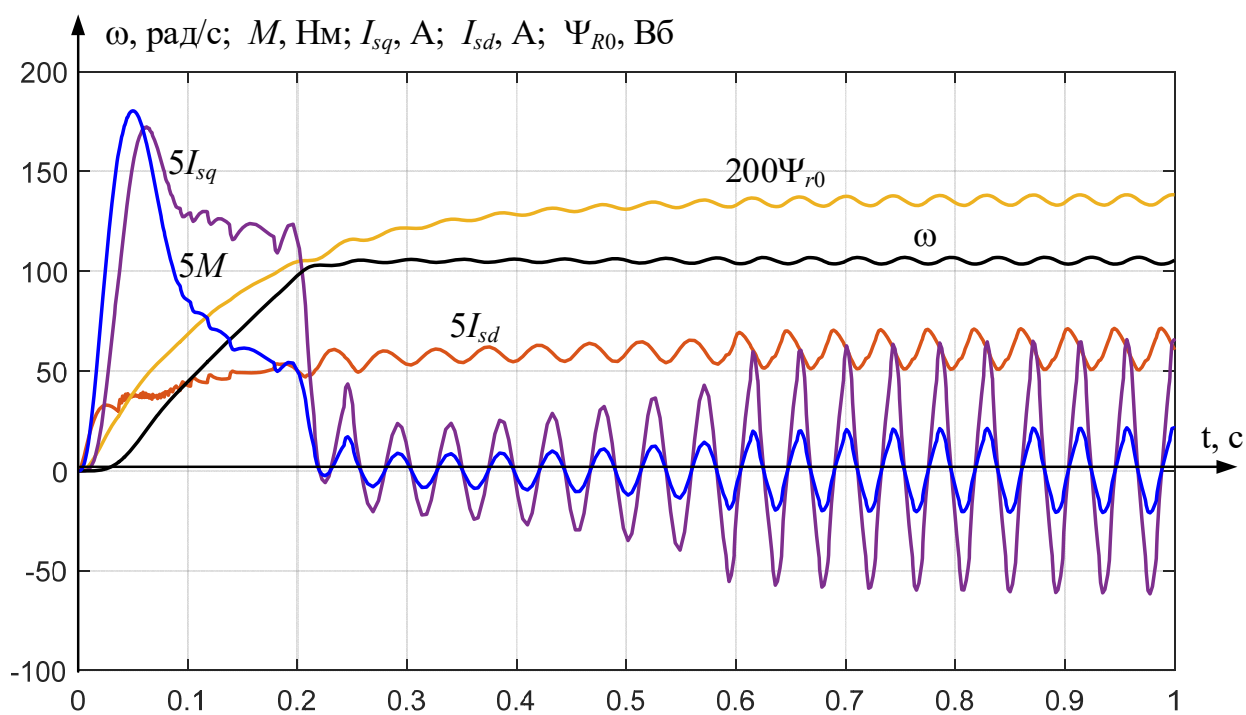


Рисунок 3.67 – Запуск без навантаження при $k_{pm} = 1,3k_{pm.opt} = 16,5$

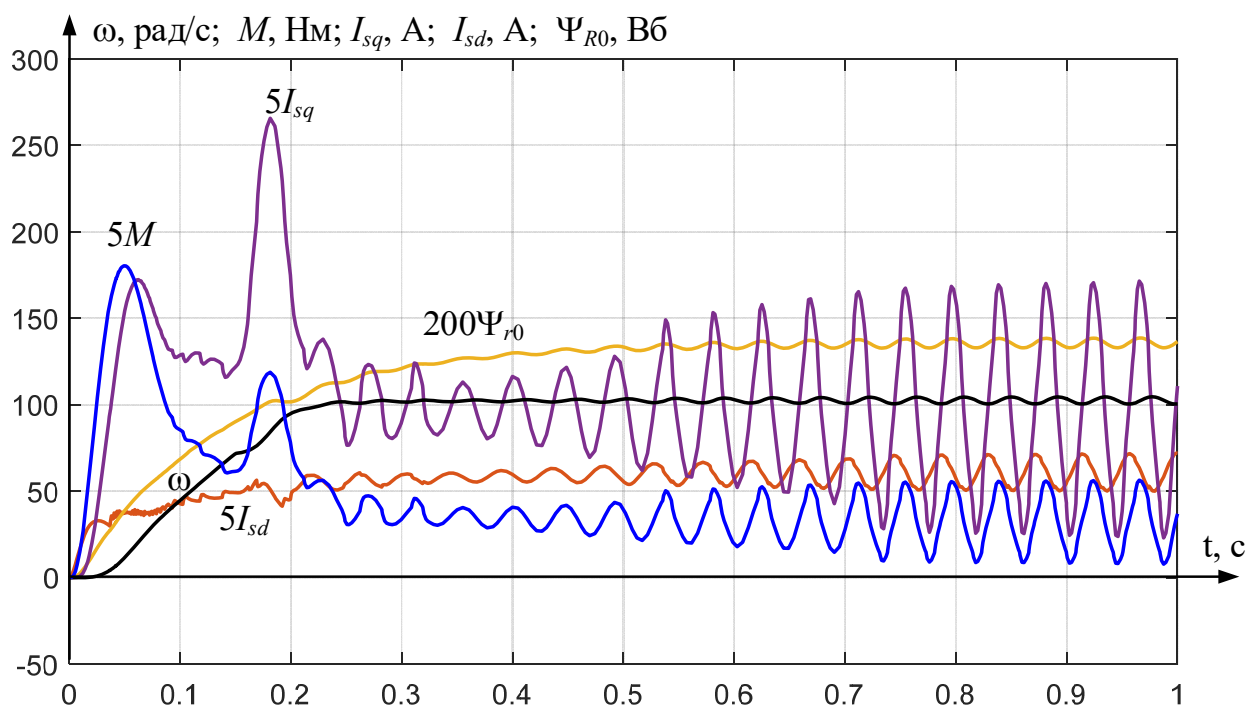


Рисунок 3.68 – Запуск з навантаженням при $k_{pui} = 1,3k_{pui.onm} = 16,5$

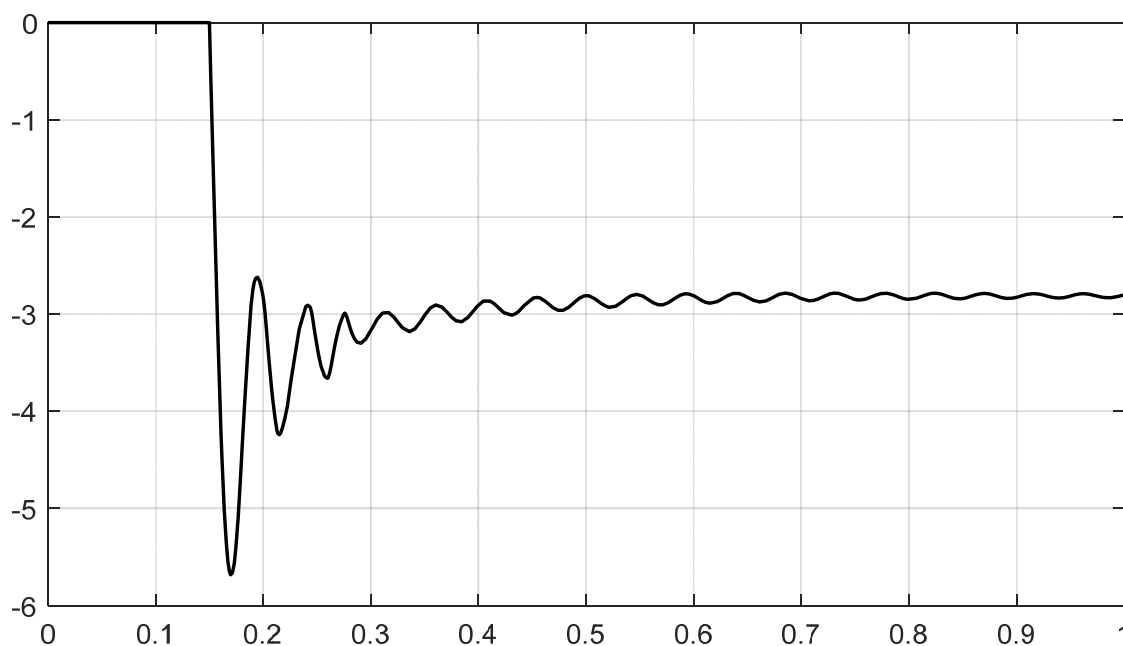


Рисунок 3.69 – Похибка системи електропривода при $k_{pui} = 1,3k_{pui.onm} = 16,5$

При зменшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості збільшується час перехідного процесу та похибка. При збільшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості різко зростає коливальний розбіжний характер перехідних процесів [22].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На персонал, який здійснює експлуатацію системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода, впливають такі шкідливі виробничі фактори [23], [24].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, переважно аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи [25].

4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

4.1.1 Технічні рішення щодо обладнання робочого місця

Основні вимоги до виробничого приміщення:

- воно не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;
- приміщення повинно мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2006;
- в наявності мають бути шафи для зберігання документів, магнітних дисків, полиці, стелажі, тумби тощо, з урахуванням вимог до площі приміщення;
- слід щоденно проводити вологе прибирання.

Приміщення, в якому знаходиться робоче місце має загальну площу $15,75 \text{ м}^2$, і висотою стелі $3,2 \text{ м}$. У приміщенні знаходиться 3 робочих місця обладнаних ПК. Схема робочого приміщення зображена на рисунку 4.1.

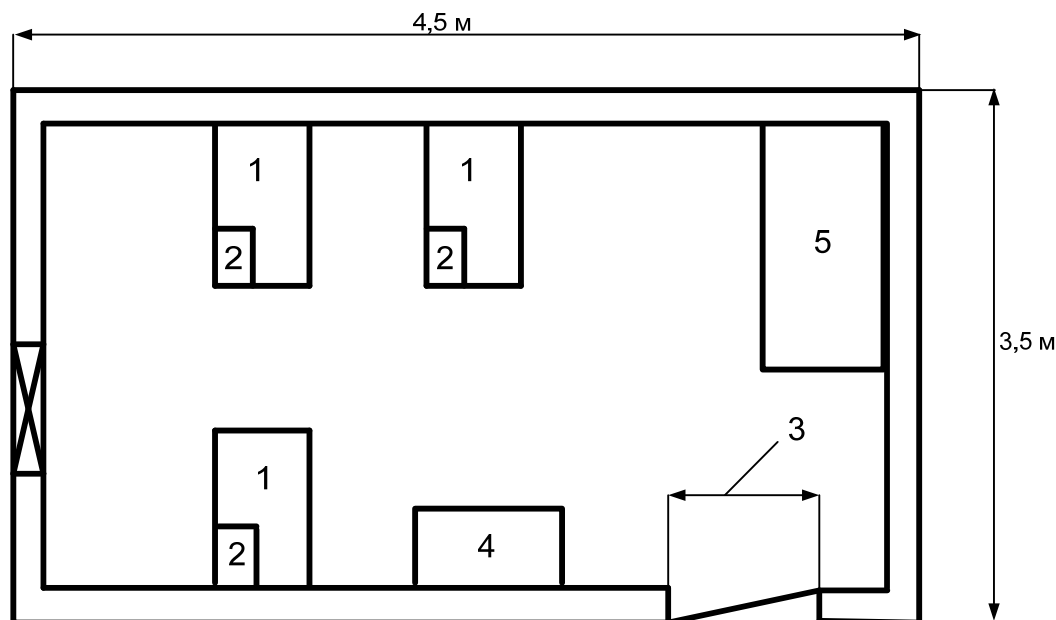


Рисунок 4.1 – Схема робочого приміщення

Умовні позначення ра рисунку 4.1: 1 – робочі місця (столи); 2 – персональні комп'ютери; 3 – дверний отвір; 4 – шафа для одягу; 5 – шафа для паперів.

Слід відзначити, що площа одного робочого місця працівника, який використовує під час роботи ПК не повинна бути меншою за 6 м^2 , а об'єм не менший за 20 м^3 . Площа даного приміщення становить $15,75 \text{ м}^2$, відповідно на одного працівника припадає $5,25 \text{ м}^2$, що менше за допустиму норму згідно НПАОП 0.00-1.28-10 [25]. Об'єм даного приміщення становить $50,4 \text{ м}^3$, відповідно на одного працівника припадає $16,8 \text{ м}^3$, що також не відповідає допустимій нормі.

При розташуванні елементів робочого місця слід враховувати: робочу позу користувача, простір для розміщення користувача, можливість огляду елементів робочого місця, можливість ведення записів, розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

Конструкція робочого місця дослідника має забезпечити підтримання оптимальної робочої пози. Робочі місця з ПК слід так розташовувати відносно вікон, щоб природне світло падало збоку переважно зліва. Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін – на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90° (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано закрити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

4.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення приміщення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380x220 В (фазна напруга (фаза – "0") – 220 В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380 В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності такого фактору як можливість одночасного дотику до металевих корпусів електрообладнання та механізмів, що мають контакт з землею, приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки [26].

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [27]. Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмовідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізольовані струмовідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах;
- використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;

– підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин, необхідно вимкнути його і повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Розшиновку або від'єднання кабеля при підготовці робочого місця може виконати ремонтний робітник, який має третю групу. Під наглядом чергового або оперативно-ремонтного робітника. З найближчих до робочого міста струмоведучих частин до наступних доторканню повинна бути знята напруга або вони повинні бути огорожені.

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами. В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізольованим проводом) повинні бути заземлені.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Виробничим мікрокліматом називається фізичний стан повітряного середовища приміщень, який визначається параметрами – температурою, вологістю, рухом повітря та тепловим випромінюванням нагрітих поверхонь, які в сукупності впливають на тепловий стан організму людини [28].

У відповідності до вимог системи стандартів безпеки праці метеорологічні умови визначаються для робочої зони на висоті 2 метри над рівнем підлоги або площі обслуговування. Мікроклімат виробничих приміщень на відміну від мікроклімату житла та громадських споруд характеризується

великою сукупністю комбінацій температури, вологості, руху повітря, інтенсивності та спектрального складу тепла, що виділяється. Виробничий мікроклімат відрізняється динамічністю, залежить від коливань зовнішніх метеорологічних умов, часу доби та пори року, характеру виробничого процесу, умов обміну повітря з довкіллям та ін.

Дослідження системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с). Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії згідно ДСН 3.3.6.042-99 [28] наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для створення і автоматичної підтримки в приміщенні незалежно від зовнішніх умов допустимих значень температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря, в холодну пору року використовується водяне опалення, в теплу пору року застосовується кондиціонування повітря. Кондиціонер являє собою вентиляційну установку, яка за допомогою приладів автоматичного регулювання підтримує в приміщенні задані параметри повітряного середовища.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів,

утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [29].

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно щодня протирати гарячі поверхні. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку.

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам, що представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування та систематичного вологого прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [29] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г» [30].

Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	1	0,6

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури

оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального.

4.2.4 Виробничий шум

Шум – це безладне поєднання звуків різної частоти та інтенсивності. Джерелами виробничого шуму являється вентилятори, електродвигуни, транспортні засоби тощо.

Вплив шуму на організм умовно поділяють на специфічний, що викликає зміни в органі слуху, і неспецифічний, який викликає зміни в інших органах і системах. Шум є однією з найчастіших причин зниження слуху нейросенсорного характеру, приглухуватості – поширеного виду патології [31].

Нормування виробничого шуму виконується з врахуванням тих особливостей, що в залежності від частоти організм людини по-різному реагує на шум однакової інтенсивності. Допустимі норми шумів для цього класу наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску, дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								
	1,5	3	25	50	500	1000	2000	4000	8000
На постійному робочому місці	107	95	87	82	78	73	73	71	69

Як заходи щодо зниження шуму можна запропонувати наступне [32]:

- установка в комп'ютерних приміщеннях обладнання, що виробляє мінімальний шум;
- раціональна планування приміщення.
- облицювання стелі та стін звукопоглинальним матеріалом.

4.2.5 Психофізіологічні фактори

Психологічні фактори:

1. Фізичні перевантаження:

– при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 15 000;

Статичне навантаження (кг/с):

– однією рукою (чоловіки) – до 5 000;

– за участю м'язів тулуба та ніг – до 15 000.

Робоча поза.

Періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба:

Вимушені нахили протягом зміни – до 50 разів;

Переміщення у просторі(переходи задля технологічного процесу) – менше 10.

2. Нервово-психічні перевантаження.

Інтелектуальні навантаження.

Зміст роботи - рішення складних завдань згідно інструкції;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження:

– зосередження (% за зміну) – до 75;

– спостереження за екранами відео-терміналів, годин на зміну – до 2 год;

Емоційне навантаження.

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи [33].

4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Дія радіації на матеріали і деталі апаратури залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи опромінюваної речовини та умов навколишнього середовища. В системі керування електропривода постійного струму використовують такі матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та ін. серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв. Внаслідок дії радіації виникають оборотні і необоротні процеси, що спричиняють порушення роботи елементів схеми та пошкодження апаратури.

Електромагнітний імпульс – сукупність короткочасних електричних та магнітних полів, що виникають в результаті взаємодії гамма – і нейтронного випромінювання з атомами і молекулами навколишнього середовища. Велику негативну дію ЕМІ проявляє безпосередньо на об'єкти, що проводять електричний струм: лінії зв'язку, електропередачі, металічні конструкції і т.д.

Результатом такого впливу може бути вихід із ладу різних пристроїв та елементи. Особливо негативний вплив ЕМІ на обладнання, яке не має спеціального захисту.

У системі векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода найбільш чутливими до дії іонізуючого випромінювання є частотний перетворювач. Опромінення системи призводить до зміни струму та коефіцієнтів підсилення; в конденсаторах, зміниться провідність і внутрішнє нагрівання. В ізоляційних і діелектричних матеріалах зміняться такі параметри: електрична провідність та діелектрична провідність і тангенс кута витрат.

Дія електромагнітного імпульсу може призвести до загорання чутливих електричних та електронних елементів. ЕМІ пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню впливу цього фактору на електричне та електронне обладнання.

4.3.1 Дослідження стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах дії іонізуючих випромінювань

Визначаємо граничні значення дози опромінення D_{gr} , для елементної бази системи, при яких виникають незворотні зміни [34]. Отримані дані заносимо в таблицю 4.6.

Таблиця 4.6 – Граничні значення експозиційних доз елементів системи

Блоки системи	Елементи системи електропривода	$D_{gr}, (P)$	$D_{gr}, (P)$
Блок управління	Мікросхема L293D	10^5	10^4
	Мікросхема АТmega8	10^5	
Блок живлення	Мікросхема MC33063A	10^5	
	Діод 1N58192	10^4	
	Конденсатори К53	10^7	
	Резистори С2-33М	10^7	

Проаналізувавши дані таблиці 4.6, визначили, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою $D_{gr} = 10^4 P$ є діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{осл}}, \quad (4.1)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації ($P_1 = 9,91 P/\text{год}$);

t_k – час кінця опромінення ($t_k = 131400$ год (15 років));

t_n – час початку опромінення ($t_n = 1$ рік).

$K_{осл}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{осл} = 1$).

$$D_m = \frac{2 \cdot 9,91 (\sqrt{131400} - \sqrt{1})}{2} = 2249,87 (P).$$

Оскільки $D_{gr} > D_m$ ($10^4 > 2249,87$) то дана система стійка до дії радіації.

Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах за формулою:

$$t_{\delta} = \frac{D_{zp} \cdot K_{ocл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (4.2)$$

$$t_{\delta} = \frac{10^4 \cdot 2 + 2 \cdot 9,91 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 9,91} = 1008,1 \text{ (год)}.$$

Отже, можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 2249,87\text{Р}$, а допустима -10^4Р . Отже, система керування електропривода постійного струму є стійкою в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи системи в заданих умовах становить всього 42 доби, при рівні радіації 9,91 Р/год, що цілком не достатньо для роботи системи керування електропривода постійного струму.

4.3.2 Дослідження стійкості роботи системи керування електропривода постійного струму в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи системи у цих умовах приймаємо коефіцієнт безпеки:

$$K_{\delta} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\delta}}{U_{z(\delta)}} \geq 40 \text{ (дБ)}, \quad (4.3)$$

де U_{δ} – допустиме коливання напруги живлення;

U_z – напруга наведення в горизонтальній струмоведучій частині.

Початковими даними оцінки є:

1. Вертикальна складова напруженості електромагнітного поля:
 $E_B = 10,84 \text{ (кВ/м)}$;

2. Напруга живлення: $U_{ж} = 30 \text{ (В)}$;

3. Напруга управління: $U_{у} = 5 \text{ (В)}$.

Напруга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині:

$$U_2 = E_6 \cdot L_2, \quad (4.4)$$

де E_6 – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля
($E_6 = 10,84 \cdot 10^3$ В/м);

L_2 – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи ($L_2 = 0,5$ м).

$$U_2 = 10,84 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 5420 \text{ (В)}.$$

$$U_6 = E_2 \cdot L_6, \quad (4.5)$$

де E_2 – величина вертикальної складової напруженості електромагнітного поля;

L_6 – довжина вертикальної струмопровідної частини системи ($L_6 = 0,2$ м).

$$U_6 = 10,84 \cdot 0,2 = 2,14 \text{ (В)}.$$

Визначаємо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля:

$$E_2 = E_6 \cdot 10^{-3}, \quad (4.6)$$

$$E_2 = 10,84 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 10,84 \text{ (В/м)}.$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення для різних блоків:

$$U_{\text{дон}} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (4.7)$$

де N – відсоток допуску ($N = 10\%$).

Для силового кола ($U_{\text{жс}} = 30$ В):

$$U_{\text{дон}} = 30 + \frac{30}{100} \cdot 10 = 33 \text{ (В)}.$$

Для кола управління ($U_y = 5$ В):

$$U_{\text{дон}} = 5 + \frac{5}{100} \cdot 10 = 5,5 \text{ (В)}.$$

Коефіцієнт безпеки визначається за формулою:

$$K\bar{b}_{z(\theta)} = 20 \lg \cdot \frac{U_{\text{дон}}}{U_{z(\theta)}} \geq 40 \text{ [дБ]}. \quad (4.8)$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки:

$$K\bar{b}_e^{\text{жс}} = 20 \lg \cdot \frac{33}{2,14} = 23,76 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_e^y = 20 \lg \cdot \frac{5,5}{2,04} = 8,61 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_z^{\text{жс}} = 20 \lg \cdot \frac{33}{5420} = -44,19 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_z^y = 20 \lg \cdot \frac{5,5}{5420} = -59,75 \text{ (дБ)}.$$

Отримані дані заносимо в таблицю 4.7.

Таблиця 4.7 – Значення коефіцієнтів безпеки системи керування електропривода постійного струму

Найменування підсистем	$K\bar{b}_e$, дБ	$K\bar{b}_z$, дБ	Результат дії
Коло живлення, 30 В	23,76	-44,19	Нестійке
Коло управління, 5 В	8,61	-59,75	Нестійке

Отже система керування електропривода постійного струму є нестійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу. Тож необхідним є розробка низки заходів по підвищенню стійкості роботи системи керування в умовах надзвичайних ситуацій.

4.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в умовах надзвичайних ситуацій

Для підвищення стійкості роботи системи векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода від дії ЕМІ слід застосувати екранування. Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо перехідне затухання екрану:

$$A = K\bar{b}_{ном} - K\bar{b}_{min}, \quad (4.9)$$

де $K\bar{b}_{ном}$ – номінальний коефіцієнт безпеки ($K\bar{b}_{ном} = 40$ дБ);

$K\bar{b}_{min}$ – мінімальний коефіцієнт безпеки отриманий під час розрахунків.

Для кола живлення ($U_{жс} = 30$ В):

$$A_{30В} = 40 + 44,19 = 84,19 \text{ (дБ)}.$$

Для силового кола ($U_{жс} = 5$ В):

$$A_{5В} = 40 + 59,75 = 99,75 \text{ (дБ)}.$$

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (4.10)$$

де A – перехідне затухання екрану;

f – найбільш характерна частота ($f = 15$ кГц).

Отже для обладнання силового кола товщина екрану:

$$t_{30В} = \frac{99,75}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,156 \text{ (см)}.$$

Отже після проведених розрахунків визначено, що робота системи керування електропривода постійного струму стійка при заданому рівні радіації

9,91 P/год. До дії ЕМІ система керування виявилась нестійкою. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує її стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів система буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 10,84 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості системи до дії випромінювання є зменшення струмопровідних провідників (їх довжини). Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосувати прилади, які б вимикали радіотехнічні схеми на період впливу радіації чи ЕМІ.

При екрануванні блоку живлення та блоку керування з використанням екрану товщиною не менше 1,6 мм зі сталі, система керування та силові елементи будуть стійкими в умовах дії електромагнітного імпульсу.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Ефективність науки – досить широке поняття. Воно включає високий науковий рівень отриманих результатів, які суттєво впливають на розвиток природи, суспільства і людини. За характером впливу на суспільний розвиток виділяють: науково-технічний, економічний, оборонний та соціальний ефекти.

Під науково-технічним ефектом розуміють розширення знань про навколишній світ: виявлення нових фактів, зв'язків, закономірностей, відкриття законів, розробка нових матеріалів, обладнання, технологій.

Суть економічного ефекту в отриманні додаткових економічних результатів: зростання національного доходу, продуктивності праці, ресурсозбереження.

Оборонний ефект – створення нових технічних систем, що забезпечують безпеку держави.

Соціальний ефект проявляється в зміні змісту, характеру і умов праці, підвищення рівня і якості життя народу, підвищення загальноосвітнього і професійного рівня людських ресурсів. Залежно від цілей, які ставляться перед дослідженням, при оцінці НДР, визначальним може бути будь-який із перелічених ефектів, а інші виступатимуть як додаткові.

Для прикладних наук, як правило, визначальним є економічний ефект.

Економічний ефект наукових досліджень впливу умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода визначається зменшенням сукупних затрат на обслуговування даного електропривода при оптимальних налаштуваннях.

Фактичну річну економію сукупної праці (живої і неживої) у вартісному виразі називають річним економічним ефектом. Він може бути, залежно від стадії закінчення роботи, попереднім, очікуваним, фактичним і потенціальним.

Попередній економічний ефект визначається на стадії техніко-економічного обґрунтування доцільності дослідження, в загальних показниках

на очікувальний об'єкт впровадження.

Очікуваний економічний ефект визначається в процесі проведення наукового дослідження на основі прогнозування термінів впровадження отриманих результатів у виробництво. Очікуваний ефект розраховується для визначення періоду використання отриманих результатів, які можуть бути від 5-ти до 10-ти років від початку їх впровадження у виробництво.

Попередній і очікуваний економічний ефекти є певною мірою прогнозними. Це обумовлено тим, що наукові дослідження використовуються протягом певного часу (3-5 років) і початково результати, які будуть одержані, точно визначити неможливо.

Попередній і очікуваний ефект розраховують і при виборі перспективних тем досліджень.

Перспективність теми визначається двома методами –математичним і експертних оцінок.

Математичний метод ґрунтується на використанні системи показників, що визначають перспективність дослідження.

У прикладних темах застосовують показник перспективності (Π), в основу якого покладено економічні показники:

$$\Pi = \frac{V \cdot C \cdot P_n \cdot P_e \cdot \sqrt{T}}{Z_n + Z_d + Z_p}, \quad (5.1)$$

де V – обсяг продукції після впровадження результатів теми;

C – вартість одиниці продукції, грн;

P_n – імовірність наукового успіху в розробці теми;

P_e – імовірність впровадження наукових розробок;

T – тривалість виробничого впровадження в роках;

Z_n – затрати на наукове дослідження, грн;

Z_d – затрати на дослідне і промислове освоєння;

Z_p – щорічні затрати на виробництво продукції, грн.

Чим вищий показник перспективності (Π), тим перспективніша тема, що

планується до розробки.

Показник перспективності теми можна визначити і за такою формулою:

$$\Pi = \frac{E_0}{3_n \cdot (1 - P_p)}, \quad (5.2)$$

де E_0 – загальний очікувальний економічний ефект;

P_p – імовірність ризику.

У формулах (1) і (2) P_n , P_v і P_p – величини прогностні. Вони встановлюються на основі наукових прогнозів.

Суть методу експертних оцінок у тому, що тему оцінюють спеціалісти-експерти. Кожному із них видається оцінювальна бальна шкала, з допомогою якої встановлюються бали за напрямками (актуальність, тривалість розробки, можливість впровадження, очікуваний ефект у грн), надають перевагу тій темі, яка набрала найвищій сумарний бал.

Фактичний ефект визначається після впровадження наукових результатів у виробництво і має конкретний характер. Розрахунок економічного ефекту ведеться за фактичними витратами на дослідження і впровадження з урахуванням економічних показників галузі, де ці результати впроваджено.

Потенціальний економічний ефект – це сума, визначена за загальними показниками на можливий обсяг впровадження. Цей ефект виступає як інформація і обґрунтування доцільності широкого впровадження результатів у виробництво. Ефективність закінчених наукових досліджень оцінюється науковою значимістю, економічним результатом і соціальним ефектом.

У випадку продажу матеріалів НДР іншим закордонним країнам і фірмам може бути отриманий річний економічний ефект від їх реалізації. Цей ефект виражається в гривнях доходу, отриманого державою протягом року.

Фундаментальні дослідження починають давати корисний ефект лише після певного періоду початку робіт, їхні результати застосовують у різних галузях народного господарства, іноді в тих, де їх зовсім не очікували. Тому нелегко планувати очікувані результати й ефективність таких досліджень.

Про ефективність будь-яких досліджень можна судити лише після їхнього впровадження, тобто тоді, коли вони починають давати віддачу для народного господарства, через певний період великого значення набуває чинник часу. В зв'язку з цим тривалість розробки прикладних тем по можливості повинна бути оптимальною.

Фундаментальні (теоретичні) дослідження дають віддачу через певний проміжок часу, і економічний їх ефект у багатьох випадках важко оцінити загальноприйнятими економічними показниками. Наприклад, між відкриттям електрики та практичним її використанням пройшло майже 100 років, а нині без електрики життя практично неможливе.

Оцінка фундаментальних досліджень проводиться на основі якісних показників:

- можливістю широкого застосування результатів досліджень у різних галузях народного господарства;
- новизна явищ, які сприяють проведенню принципово актуальних досліджень;
- вклад у безпеку, обороноздатність країни, збереження навколишнього середовища;
- пріоритет вітчизняної науки і міжнародне її визнання;
- фундаментальні монографії з тем і їх цитування видатними вченими світу.

Ефективність прикладних досліджень визначається сукупністю загальних і конкретних кількісних показників.

До загальних належать основні, які характеризують ефективність всього дослідження в цілому з врахуванням результатів у процесі створення, виробництва, споживання (експлуатації) об'єктів нової техніки, технології, матеріалів.

До них належать:

- співвідношення корисного ефекту у вартісному виразі від впровадження результатів (проекування, виробництво, експлуатація) і затрат

на виконання, освоєння в сфері виробництва і експлуатацію;

– співвідношення тривалості періоду ефективної роботи і періоду розробки, освоєння і експлуатації;

– суспільна значимість результатів, тобто рівень поширення і застосування цих результатів у народному господарстві.

Група конкретних показників досить різноманітна, сюди входять показники, які характеризують ефективність розробок у певних сферах, етапах використання.

Існує багато методик визначення економічної ефективності в різних галузях, але всі вони зводяться до того, що основною оцінкою реальної економічної ефективності НДР за рік виступає коефіцієнт економічної ефективності, який визначається за формулою:

$$K_{ef} = \frac{E}{B}, \quad (5.3)$$

де E – сума реального економічного ефекту від впровадження результатів НДР за рік, тис. грн.;

B – загальна сума затрат на НДР за цей же період, тис. грн.

Максимальний економічний ефект, який може бути отриманий від впровадження наукових досліджень у виробництво за розрахунковий період при встановленому обсязі впровадження, називають економічним потенціалом НДР.

Якщо наукове дослідження пов'язане з певним ризиком отримання від'ємного результату, економічний потенціал НДР визначається за формулою (при $p=1$):

$$E = E_i p - Bd, \quad (5.4)$$

де E_i – розрахунковий економічний потенціал за i років;

p – ймовірність одержання позитивного результату;

B – зростання затрат у випадку від'ємного результату;

d – ймовірність від'ємного результату дослідження.

Економічний ефект розраховується при проведенні наукових досліджень за такими напрямками:

- створення нових технологій, засобів виробництва, комплексу машин для галузей народного господарства;
- удосконалення рівня організації виробництва і управління;
- вивчення соціальних проблем.

Особливо велике значення при визначенні економічного ефекту наукових досліджень має чинник часу. Тривалість проведення наукового дослідження, потреба певного періоду освоєння і виробничого використання його результатів і визначає фактичний і потенціальний ефект.

Швидке освоєння і розповсюдження результатів наукових досліджень - основа ефективного використання наукових розробок і важлива умова зниження витрат внаслідок морального їх старіння.

Ефективність науково-дослідної роботи колективу (відділу, кафедри, НД], КБ) і окремого працівника оцінюють по-різному.

Ефективність науково-дослідної роботи колективу, організації оцінюється кількома показниками:

- кількістю впроваджених тем;
- кількістю отриманих авторських свідоцтв і патентів;
- кількістю проданих ліцензій або валютної виручки;
- економічною ефективністю від впровадження результатів НДР, яка визначається як відношення фактичної отриманої економії від реалізації розробок до середньорічних витрат на НДР, які розраховуються за даними поточного року і трьох попередніх;
- показником продуктивності праці, який визначається відношенням кошторисної вартості НДР за рік до середньоспискового числа працівників основного та допоміжного персоналу.

Слід зазначити, що ефективність науки не варто зводити тільки до впровадження, і тим більше до одержаного ефекту. Ефективність науки - це

дещо більше. Це визнання держави в світі.

Наука є найбільш ефективною сферою капіталовкладень. У світовій практиці вважається, що прибуток від капіталовкладень у науку зростає до 200%. За даними зарубіжних учених, один долар витрат на науку забезпечує 5-7 доларів прибутку.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи отримано такі результати:

1. Проаналізовані принципи побудов структур векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода. Встановлено, що найбільш зручними у використанні та з точки зору формування бажаних характеристик є системи з орієнтацією моменту за потокозчепленням ротора.

2. Математично описано частотно-регульований асинхронний електропривод як об'єкт управління та здійснено розрахунок його параметрів.

3. Для дослідження динаміки векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода використано програмне середовище Simulink (Matlab).

Встановлено, що:

– зменшення коефіцієнту підсилення контуру струму по відношенню до його оптимального значення призводить до затяжного пуску з коливальним збіжним характером перехідних процесів, а при збільшенні коефіцієнту підсилення контуру струму відбувається «розвал» системи з коливальним розбіжним характером перехідних процесів;

– при зменшенні сталої часу контуру струму відбувається «розвал» системи з коливальним розбіжним характером перехідних процесів, а при її збільшенні – збільшується час пуску зі збільшенням коливальності перехідних процесів;

– при зменшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку збільшується час пуску та похибка системи електропривода з незначним коливальним характером перехідних процесів, а при збільшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку час виходу швидкості на усталене значення не збільшується, похибка зменшується, однак спостерігається коливальний характер перехідних процесів;

– при зменшенні сталої часу контуру потоку спостерігається збільшення потокозчепленні при пуску з подальшим затухаючим характером до усталеного номінального значення, зменшення похибки та з деяким коливальним характером перехідних процесів. При збільшенні сталої часу контуру потоку спостерігається повільне збільшення потокозчеплення, збільшення похибки та незначний коливальний характер перехідних процесів;

– при зменшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості збільшується час перехідного процесу та похибка, а при збільшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості різко зростає коливальний розбіжний характер перехідних процесів.

4. Розглянуті питання з охорони праці та економіки.

Результати досліджень опубліковані в роботі [22].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Векторне керування асинхронними двигунами. [Електронний ресурс]. URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36026>
2. Система векторного керування асинхронним електроприводом без датчика швидкості. [Електронний ресурс]. URL: https://stud.com.ua/90480/tehnika/sistema_vektornogo_keruvannya_asinhronnim_el_ektroprivodom_datchika_shvidkosti
3. Паламар М., Хом'як А. Моделювання схеми векторного керування асинхронного електроприводу антенної системи супроводу низькоорбітальних космічних апаратів. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2008. Том 13. № 1. [Електронний ресурс]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/186563359.pdf>
4. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 – „Енергетика та електротехнічні системи в АПК”. – Ніжин, 2011. 98 с.
5. Векторні перетворювачі частоти. [Електронний ресурс]. URL: <https://gellion-trade.com.ua/novini/vektorn-peretvoryuvach-chastoti/>
6. Островерхов М.Я., Бурик М.П. Система прямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна на основі мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху. [Електронний ресурс]. URL: <https://epa.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/06/609-SISTEMA-PRYAMOGO-VEKTORNOGO-KERUVANNYA.pdf>
7. Частотний перетворювач, як інструмент управління асинхронним електродвигуном. [Електронний ресурс]. URL: <https://k-r.com.ua/dovidnyk/item/113-chastotnyi-peretvoriuvach-iak-instrument-upravlinnia-asynkhronnym-elektrodvyhunom>
8. Система векторного керування асинхронним електроприводом без датчика швидкості [Електронний ресурс]. URL:

https://stud.com.ua/90480/tehnika/sistema_vektornogo_keruvannya_asinhronnim_el_ektroprivodom_datchika_shvidkosti

9. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Желінський М. М., Ніконенко Є. О., Райчук О. І. Стійкість систем векторного керування напругою асинхронного генератора». Вісник ВПІ. 2022. Вип. 1. С. 44-49.

10. Pacas M. Sensorless drives in industrial applications. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2011. Vol. 5. № 3. Pp. 16–23.

11. Burkhart B., and Brauer H.J., (2012), Design of a Switched Reluctance Traction Drive for Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, IE 44 EE, Seoul, 9-12 Oct. 2012. Pp. 204 – 209.

12. Півняк Г. Г., Волков О.О. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією. – Дніпропетровськ: НГУ. 2006. 470 с.

13. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ. 2007. 197 с.

14. Богаєнко І.М. Система керування асинхронного електропривода з векторним керуванням за магнітним потоком ротора без застосування датчика частоти обертання. Механіка та машинобудування. 2003. №1. С. 85-92.

15. Chen H., (2006), Switched Reluctance Motors Drive for the Electrical Traction in Shearer, Power Electronics and Motion Control Conference. CES/IEEE 5th International, Shanghai, 14-16 Aug. 2006. Vol. 2. Pp. 1 – 4.

16. Шеремет О.І. Синтез системи векторного керування електроприводом змінного струму на базі дискретного часового еквалайзера. Вісник НТУ «ХПІ». 2017. 27(1249). С. 112-117. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/1b137e79-57ac-42a7-93b8-67ab89d72e54/content>

17. Пересада С. М., Благодір В. О. Векторне керування моментом та реактивною потужністю асинхронної машини подвійного живлення.

[Електронний ресурс]. URL: <https://epa.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/02/33-Vektorne-keruvannya-momentom-ta-reaktivnoyu-potuzhnistyuu.pdf>

18. Пересада С.М., Коноплінський М.А., Трандафілов В.М. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора, побудоване на основі нелінійного принципу розділення. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2014. Вип. 39. С. 44-51. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_39_10

19. Розводюк М.П., Левицький С.М., Бомбик В.С. Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Курсове проектування: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ. 2018. 135 с.

20. Гурко О.Г., Єрьоменко І.Ф. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник. – Харків: ХНАДУ. 2011. 286 с.

21. Арсеньєва С.І. Використання програмних засобів MATLAB для розв'язання типових задач аналогової автоматизації: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». 2019. 118 с.

22. Розводюк М. П., Розводюк К.М., Корнелюк О.О. Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода. Тези доповідей регіональної науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2023), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 22 червня 2023 р. – [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/view/18160>

23. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. [Електронний ресурс]. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073

24. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. [Електронний ресурс]. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

25. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України. 2009. 116 с.

26. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>

27. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ». 2016. 109 с.

28. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. [Електронний ресурс]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

29. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України. 2013. 149 с.

30. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К.: Мінрегіонбуд України. 2018. 133 с.

31. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. [Електронний ресурс]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

32. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Постанова МОЗ № 39 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-

01]. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99#Text>

33. Методичні вказівки до виконання розділу з охорони праці в кваліфікацій-них роботах здобувачів освітнього ступеня магістра галузі знань 14 «Електрична інженерія» / уклад.: С.В. Дембіцька, І.М. Кобилянська, О.В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ. 2022. 52 с.

34. Кодекс Цивільного захисту України. Відомості Верховної Ради (ВВР). 2013. № 34-35. С. 458. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

Додаток А
(обов'язковий)

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ПОГОДЖЕНО

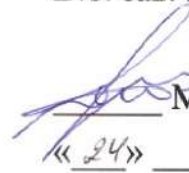
Заст. декана ФБЕЕМ


к.т.н., доц. Віра ТЕПТЯ
« 24 » 03 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.


Микола МОШНОРИЗ
« 24 » 03 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**ВПЛИВ УМОВ НАЛАШТУВАННЯ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ НА
РОБОТУ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНО-
РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

08-24.МКР.002.00.000 ТЗ

Керівник роботи

 Розвodyюк М.П., к.т.н., доцент

« 24 » 03 2023 р.

Виконавець: ст. гр. ЕПА-21мз

 Корнелюк О.О.

« 24 » 03 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 рік

1 Загальні відомості

Повне найменування дослідження – «Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода».

Скорочене найменування розробки – «Налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління ПЧ-АД».

Замовник – кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Дослідження призначені для налагодження контурів регулювання системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Можуть бути використані під час навчання студентів за напрямом 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

4 Вимоги до розробки

Результати досліджень повинні мати характеристику впливу коефіцієнтів підсилення та сталих часу контурів регулювання (струму та швидкості) на статику та динаміку системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Комплектація розробки

Пояснювальна записка, результати моделювання динамічних процесів електропривода при різних параметрах налагодження (коефіцієнтів підсилення та сталих часу) контурів струму, потоку та швидкості.

6 Технічні характеристики

Можливість досліджувати систему векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічних режимах.

7 Джерела розробки

8 Елементарна база

Персональний комп'ютер, Microsoft Office, Microsoft Visio, Mathcad, MatLab.

9 Конструктивне виконання

Математичні моделі для дослідження контурів регулювання повинні бути реалізовані в програмних середовищах MatLab, MathCAD.

10 Показники технологічності

При використанні розроблених математичних моделей в програмних середовищах MatLab, MathCAD повинне дотримуватися авторське право.

11 Технічне обслуговування

Технічне обслуговування здійснюється розробником або відповідними довіреними особами.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ВПЛИВ УМОВ НАЛАШТУВАННЯ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ НА
РОБОТУ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНО-
РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є ідентифікація поведінки системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода при зміні умов налаштування контурів регулювання шляхом комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- 1) здійснити аналіз структури векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода з точки зору формування бажаних характеристик;
- 2) математично описати частотно-регульований асинхронний електропривод як об'єкта управління та здійснити розрахунок його параметрів;
- 3) провести дослідження векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічному режимі.

Розв'язанню поставлених задач присвячена дана робота.

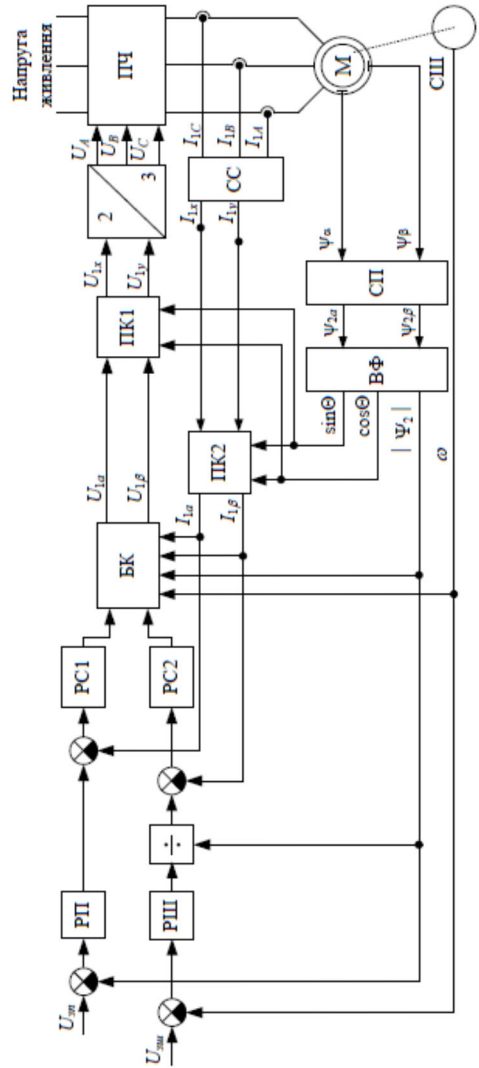
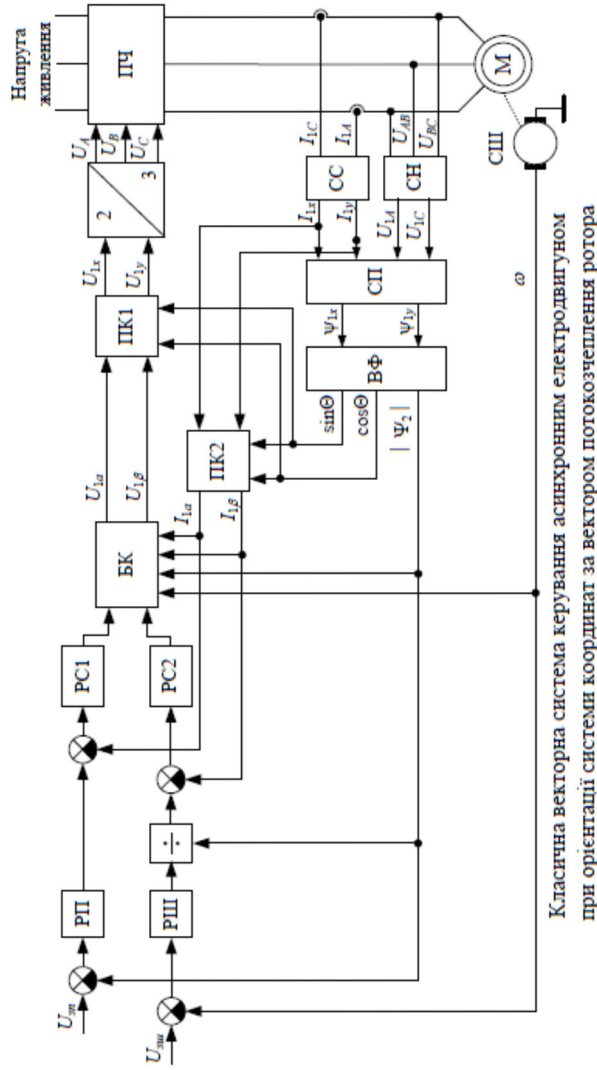
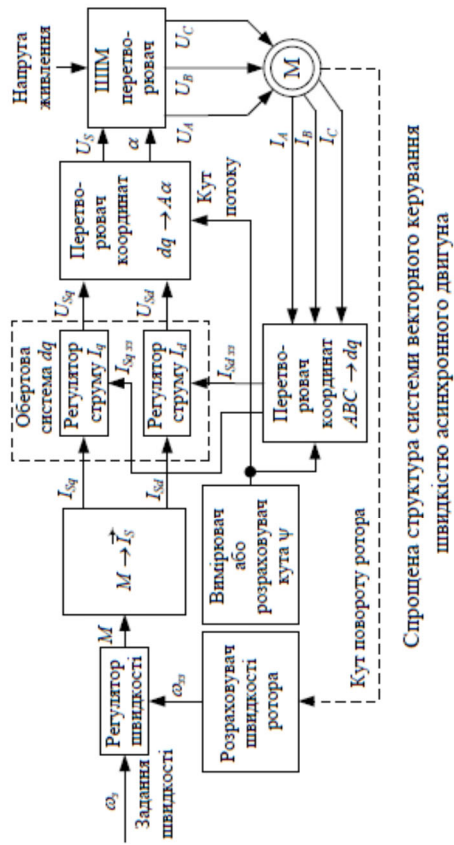
Об'єкт, предмет та методи дослідження

Об'єктом дослідження в роботі є процеси зміни поведінки векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода при різних параметрах налагодження контурів регулювання.

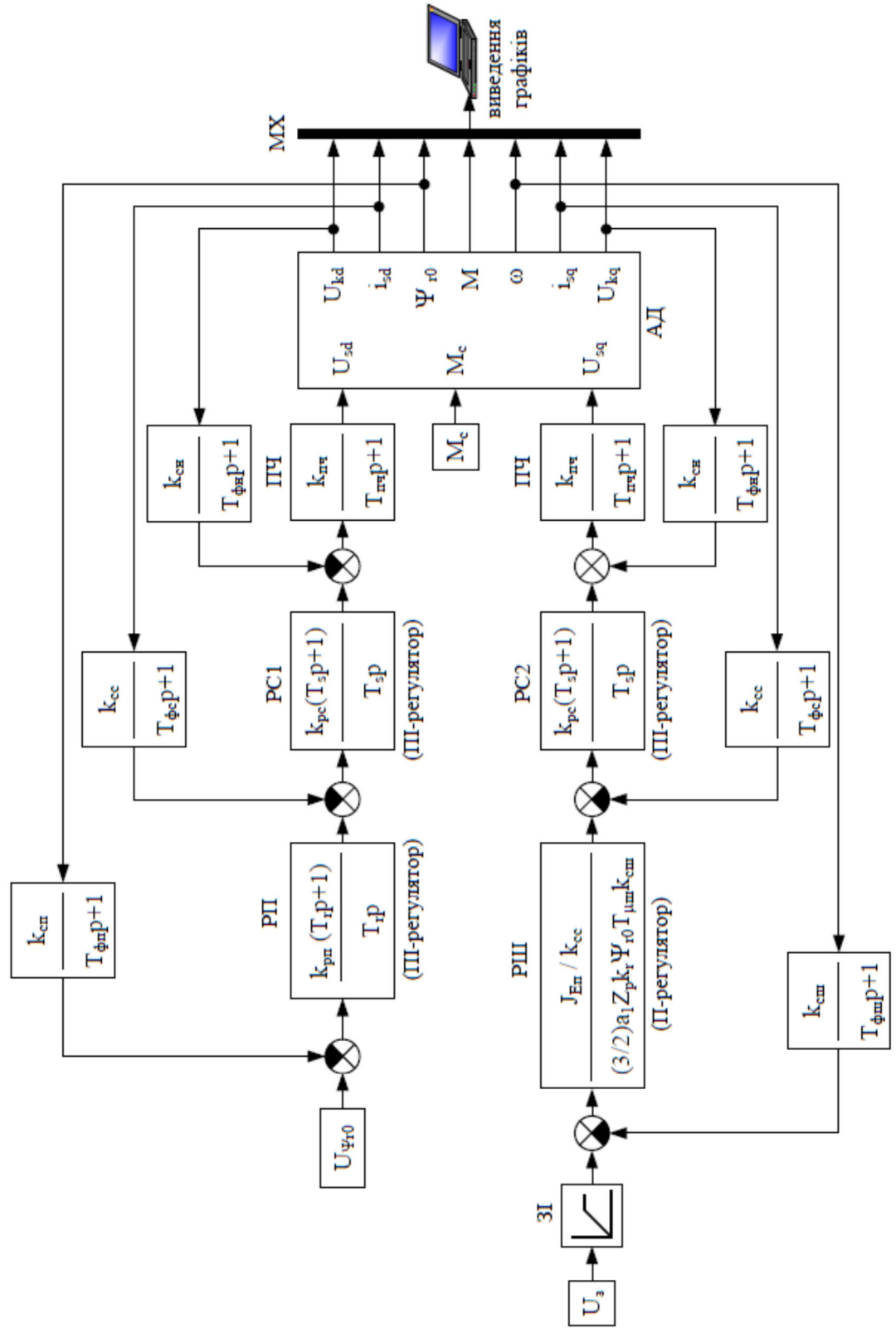
Предметом дослідження є математичні моделі контурів регулювання векторного частотно-регульованого асинхронного електропривода.

Методи дослідження. Для вирішення і аналізу поставлених задач використані методи: теорія автоматичного керування, теорія систем керування електроприводами, математичне моделювання.

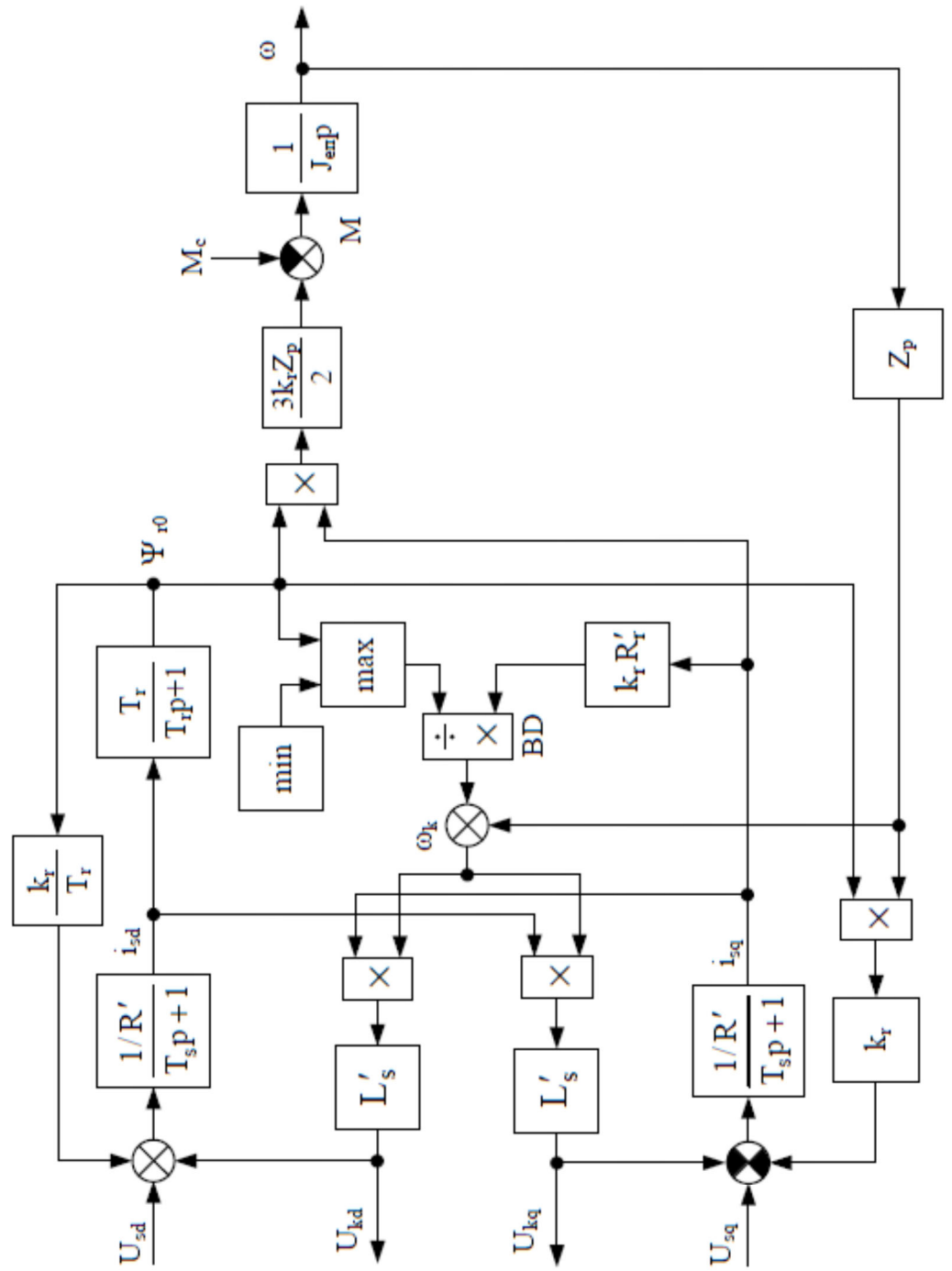
Структури системи векторного керування асинхронним двигуном



Структура системи ПЧ-АД при керуванні за потокозчепленням ротора



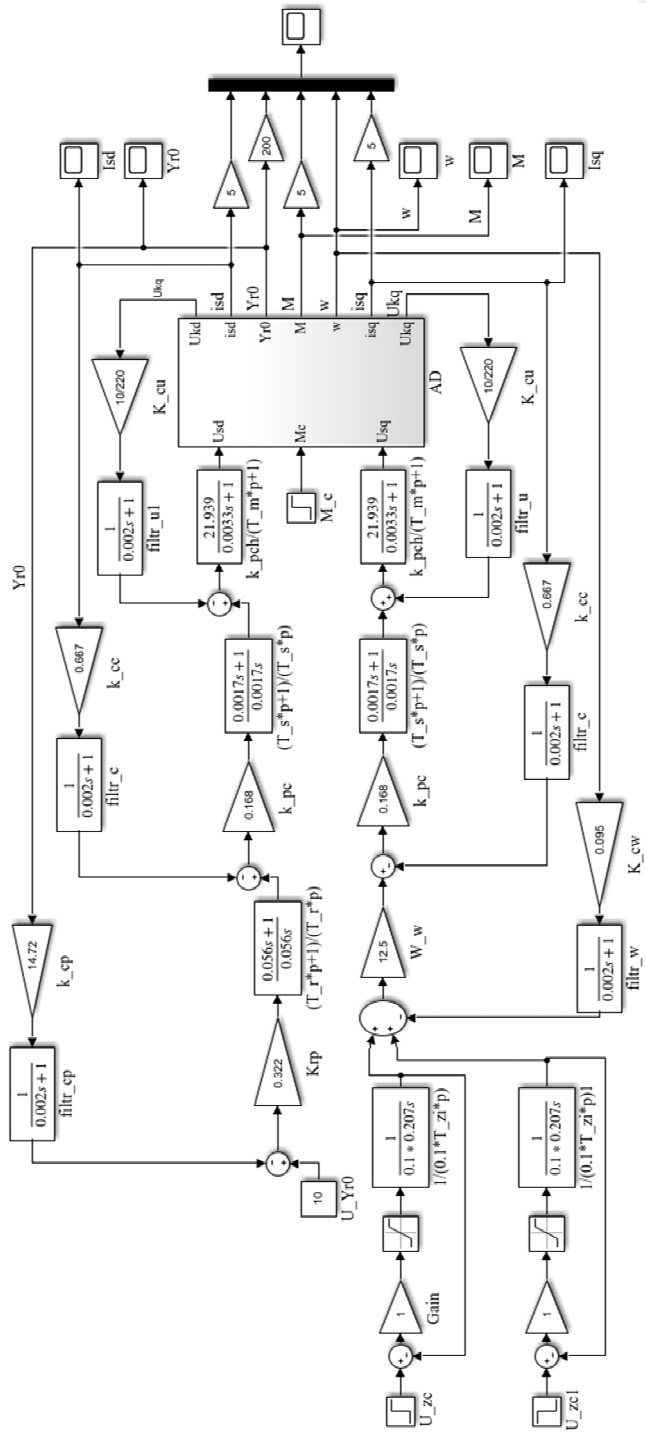
Структура асинхронного двигуна, орієнтована за потокомзчеленням ротора



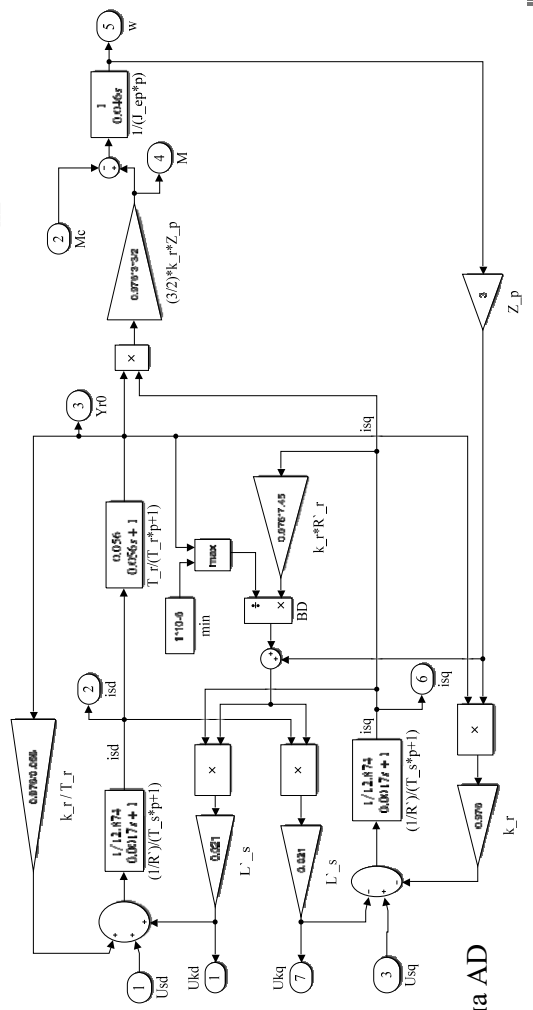
Узагальнені результати налаштування контурів регулювання

Кон-тур	Мала постійна часу контуру	Регулятор		Розрахункові вирази		Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру
		Тип	Передавальна функція	Коефіцієнт підсилення, постійна часу регулятора		
стру-му	$T_{\mu c} = T_{m1} + T_{\phi c}$ $T_{\mu c} = 8,867 \cdot 10^{-3} \text{ с}$	III	$\frac{k_{pc}(T_s p + 1)}{T_s p}$	$k_{pc} = \frac{T_s}{T_{\mu c} k_{m1} k_{cc}} \frac{1}{R'}$	$k_{pc} = 0,168$	$k_{cc} = k_{m1} k_{n,cc}$ $k_{cc} = 0,667$
				$T_s = \frac{L'_s}{R'}$	$T_s = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с}$	
ПОТОКУ	$T_{\mu r} = 2T_{\mu c} + T_{\phi r}$ $T_{\mu r} = 0,019 \text{ с}$	III	$\frac{k_{pn}(T_r p + 1)}{T_r p}$	$k_{pn} = \frac{T_r}{\frac{1}{k_{cc}} k_{c1r} T_{m1r}}$	$k_{pn} = 0,322$	$k_{cn} = \frac{U_{3,n}}{\Psi_{r0}}$ $k_{cn} = 14,722$
				$T_r = \frac{L'_r}{R'_r}$	$T_r = 0,056 \text{ с}$	
ШВИД-КОСТІ	$T_{\mu u} = 2T_{\mu c} + T_{\phi u}$ $T_{\mu u} = 0,019 \text{ с}$	II	$\frac{J_{en} \cdot \frac{1}{k_{cc}}}{\frac{3}{2} \cdot a_1 Z_p k_r \Psi_{r0} T_{\mu u} k_{cu}}$	$k_{pu} = \frac{J_{en} \cdot \frac{1}{k_{cc}}}{\frac{3}{2} \cdot a_1 Z_p k_r \Psi_{r0} T_{\mu u} k_{cu}}$	$k_{pu} = 12,5$	$k_{cu} = k_{m2} k_{o,m2} k_{n11}$ $k_{cu} = 0,095$

Схема системи електропривода та асинхронного двигуна в середовищі Simulink (Matlab)



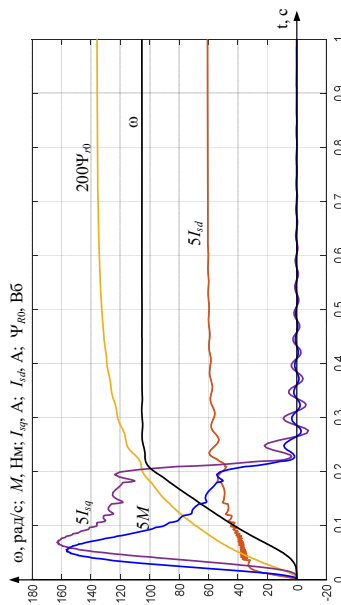
Структура система електропривода



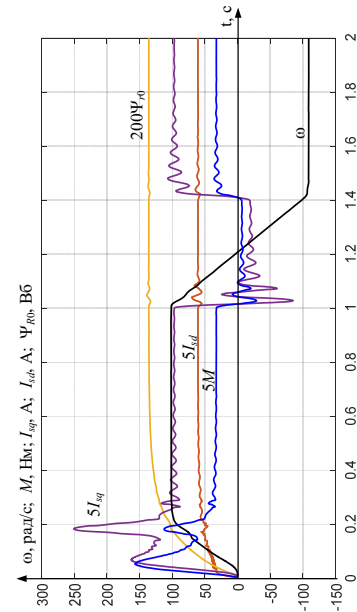
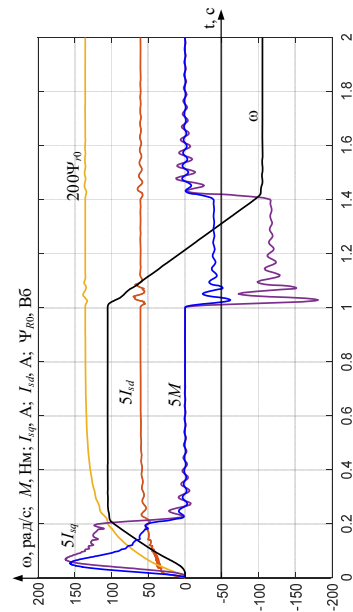
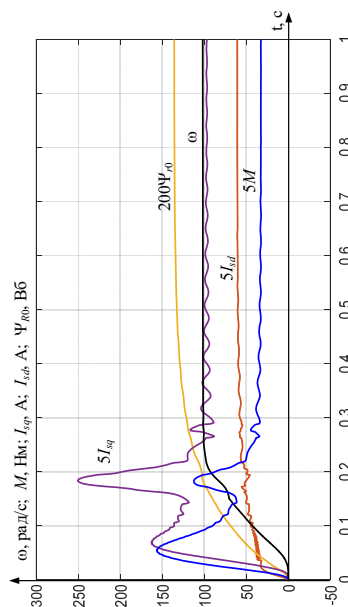
Структура асинхронного двигуна AD

Дослідження системи електропривода при оптимізованих параметрах

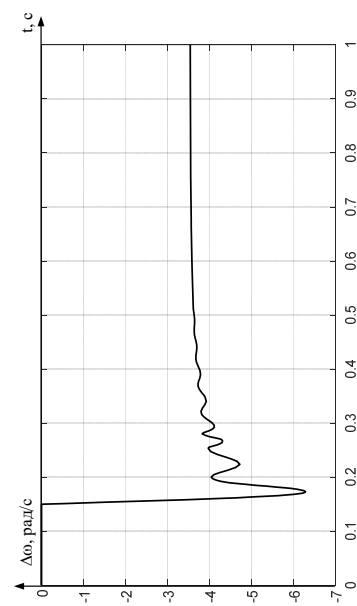
Запуск без навантаження



Запуск з номінальним навантаженням



Помилка системи



Оптимальні параметри контурів

$$k_{рн,опт} = 0,168$$

$$T_{s,опт} = 1,655 \cdot 10^{-2} \text{ с}$$

$$k_{рн,опт} = 0,322$$

$$T_{r,опт} = 0,056 \text{ с}$$

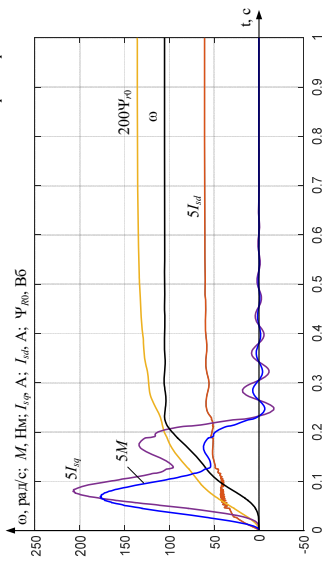
$$k_{рн,опт} = 12,5$$

Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах.

Неоптимальні параметри контуру струму (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості

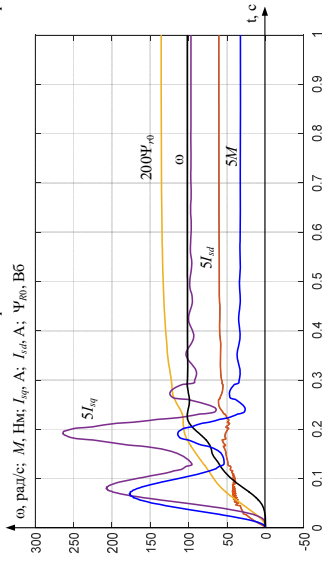
Запуск без навантаження

$k_{pc} = k_{рстст} / 2 = 0,084$; $T_{с.стст} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $k_{рстст} = 0,322$; $T_{г.стст} = 0,056$ с; $k_{рстст} = 12,5$

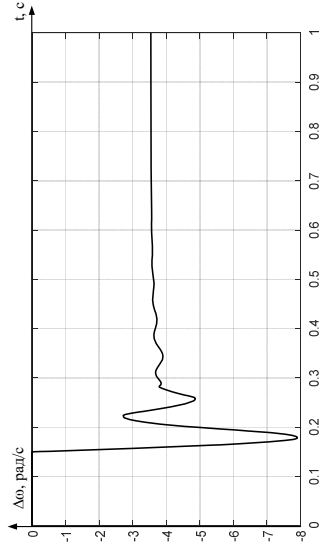


Запуск з номінальним навантаженням

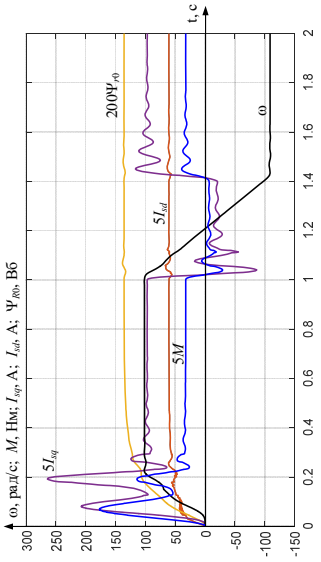
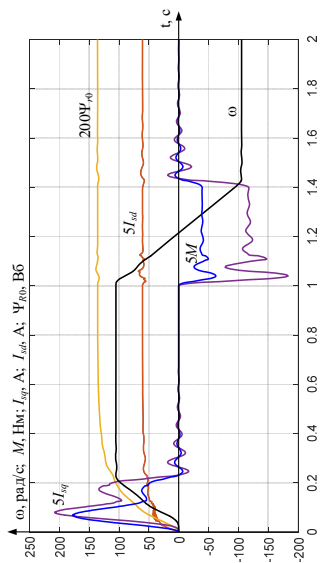
$k_{pc} = k_{рстст} / 2 = 0,084$; $T_{с.стст} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $k_{рстст} = 0,322$; $T_{г.стст} = 0,056$ с; $k_{рстст} = 12,5$



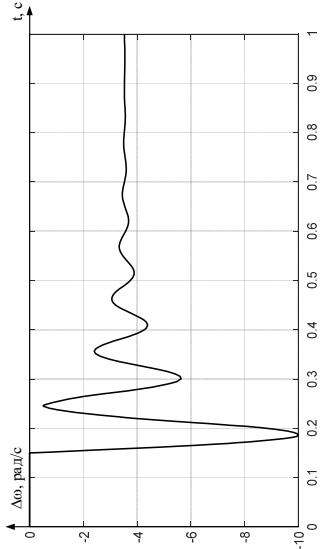
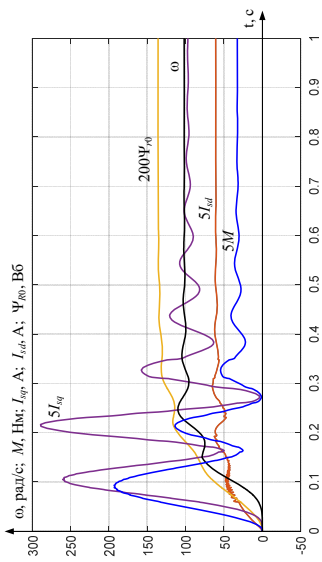
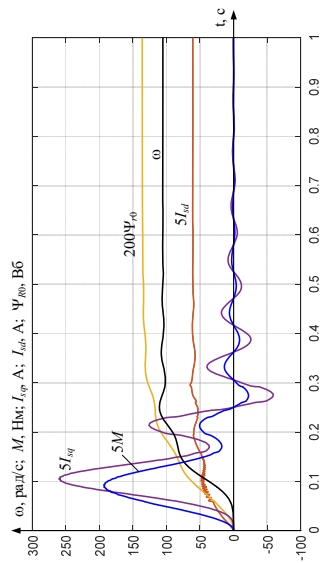
Помилка системи



$k_{pc} = k_{рстст} / 4 = 0,042$; $T_{с.стст} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $k_{рстст} = 0,322$; $T_{г.стст} = 0,056$ с; $k_{рстст} = 12,5$



$k_{pc} = k_{рстст} / 4 = 0,042$; $T_{с.стст} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $k_{рстст} = 0,322$; $T_{г.стст} = 0,056$ с; $k_{рстст} = 12,5$

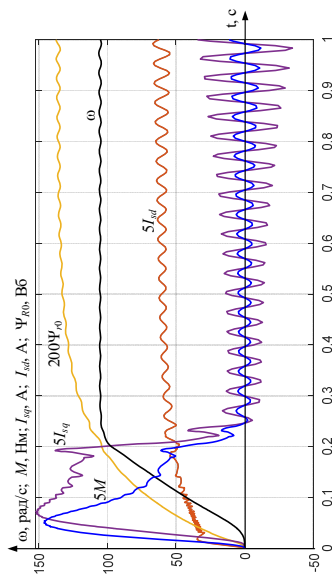


Зменшення коефіцієнту підсилення контуру струму призводить до затягнутого пуску з коливальним збійним характером перехідних процесів.

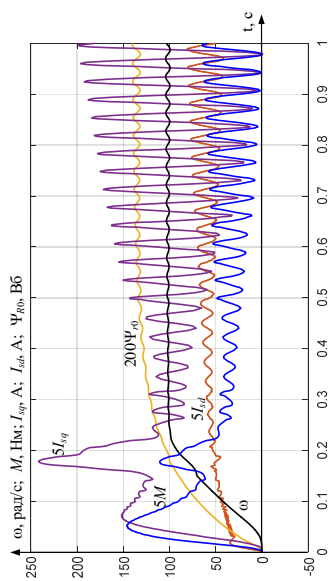
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах.

Неоптимальні параметри контуру струму (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах потоку та швидкості

Запуск без навантаження

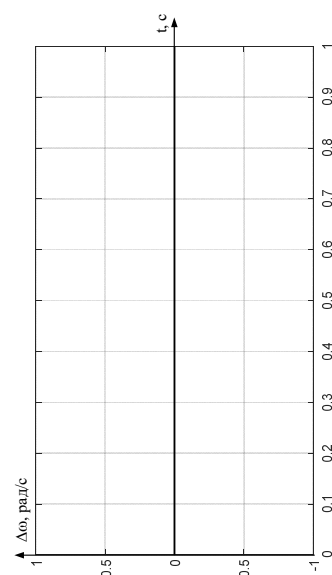


$$k_{pc} = 1,5; k_{rc, opt} = 0,252; T_{s, opt} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ c}; k_{rc, opt} = 0,322; T_{r, opt} = 0,056 \text{ c}; k_{rc, opt} = 12,5$$

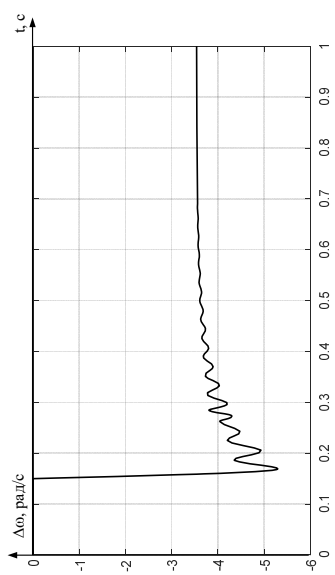
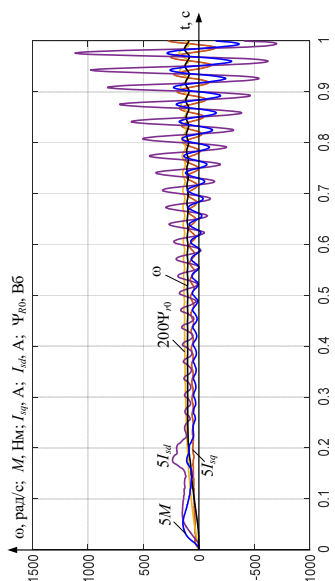
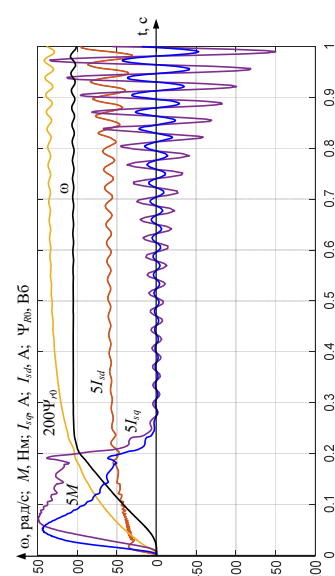


Запуск з номінальним навантаженням

Помилка системи

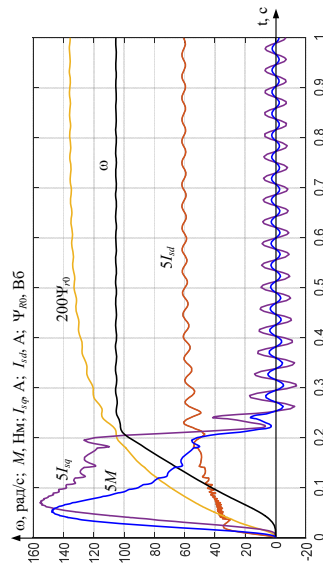


$$k_{pc} = 1,7; k_{rc, opt} = 0,2856; T_{s, opt} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ c}; k_{rc, opt} = 0,322; T_{r, opt} = 0,056 \text{ c}; k_{rc, opt} = 12,5$$



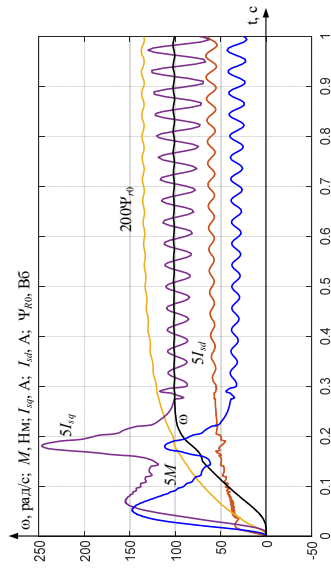
Дослідження системи електропривода при неоптимальних параметрах. Неоптимальні параметри контуру струму (стала часу) при оптимальних параметрах потоку та швидкості

Запуск без навантаження

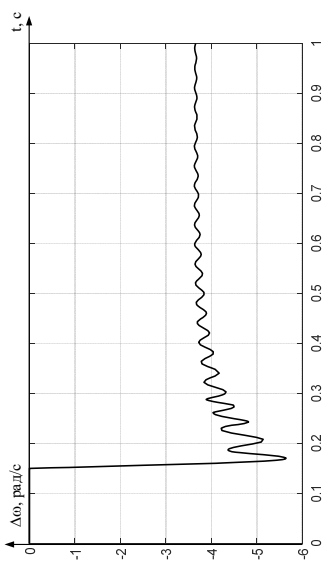
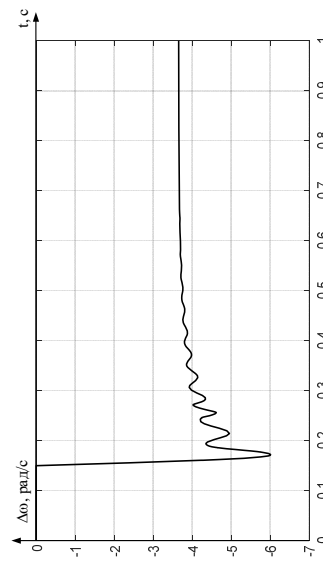
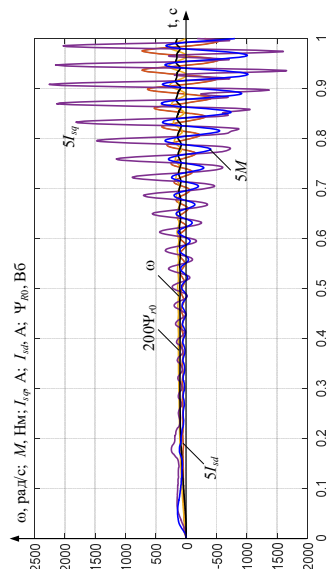
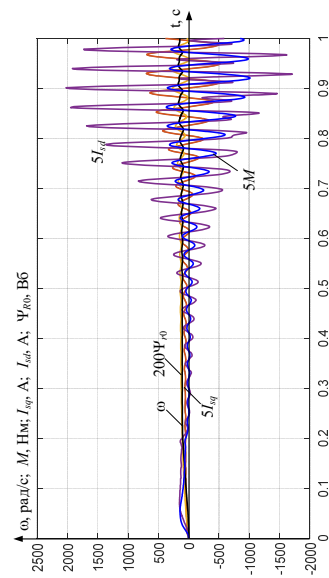


$K_{r, опт} = 0,168$; $T_s = T_{s, опт} / 1,2 = 1,38 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{r, опт} = 0,322$; $T_{r, опт} = 0,056$ с; $K_{r, опт} = 12,5$

Запуск з номінальним навантаженням



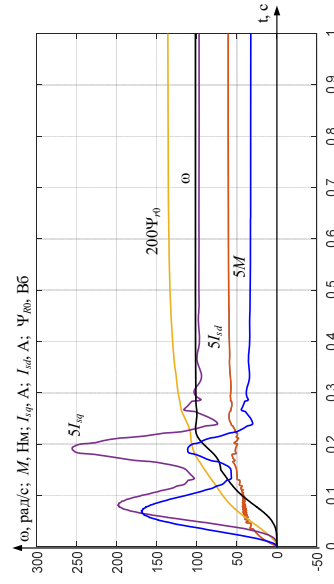
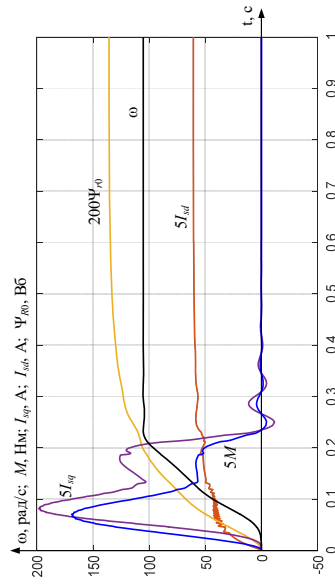
$K_{r, опт} = 0,168$; $T_s = T_{s, опт} / 1,5 = 0,0011$ с; $K_{r, опт} = 0,322$; $T_{r, опт} = 0,056$ с; $K_{r, опт} = 12,5$



При зменшенні сталої часу контуру струму відбувається «розвал» системи з коливальним розбіжним характером перехідних процесів.

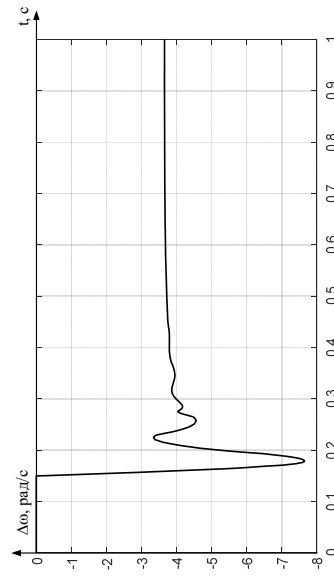
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру струму (стала часу) при оптимальних параметрах контурів потоку та швидкості

Запуск без навантаження

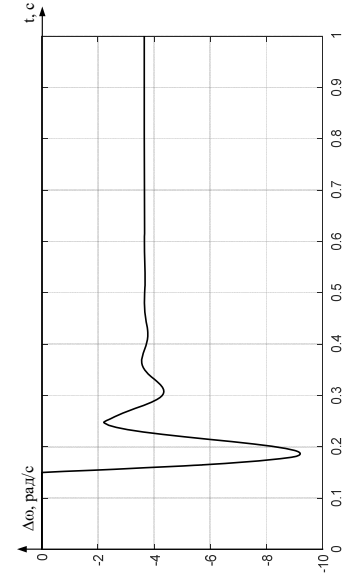
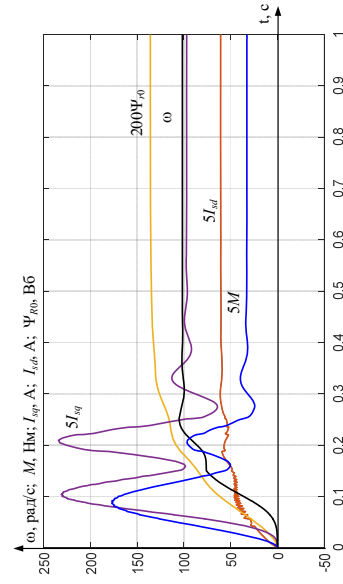
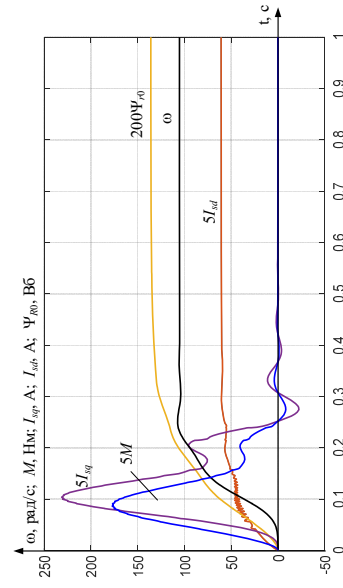


Запуск з номінальним навантаженням

$K_{р,опт} = 0,168$; $T_s = 2T_{s,опт} = 3,31 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{р,опт} = 0,322$; $T_{r,опт} = 0,056$ с; $K_{р,опт} = 12,5$



$K_{р,опт} = 0,168$; $T_s = 4T_{s,опт} = 6,62 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{р,опт} = 0,322$; $T_{r,опт} = 0,056$ с; $K_{р,опт} = 12,5$



При збільшенні сталої часу контуру струму збільшується час пуску зі збільшенням коливальності перехідних процесів.

Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах.

Неоптимальні параметри контуру потоку (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості

Запуск без навантаження

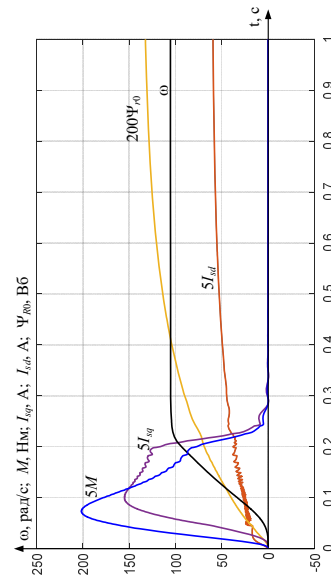
$$k_{rs,opt} = 0,168;$$

$$T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

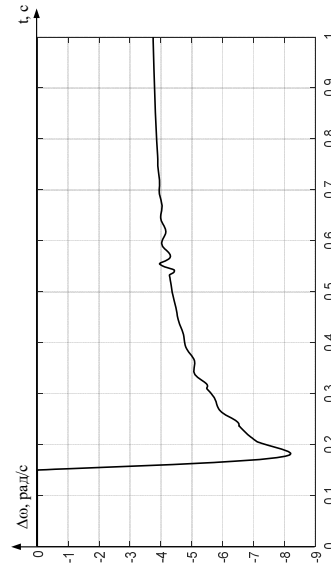
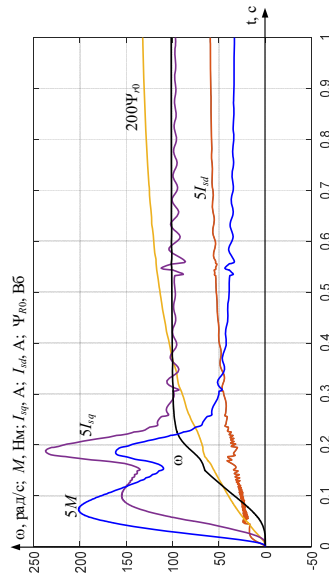
$$k_{rr} = k_{rs,opt} / 2 = 0,161;$$

$$T_{r,opt} = 0,056 \text{ с};$$

$$k_{rs,opt} = 12,5$$



Запуск з номінальним навантаженням



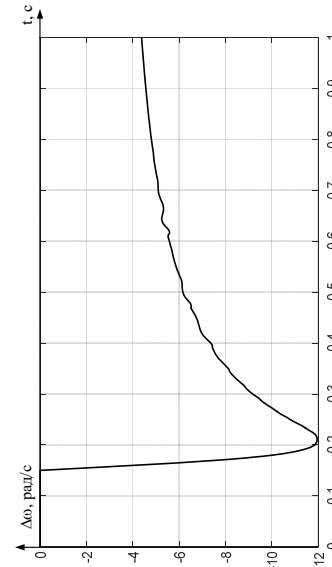
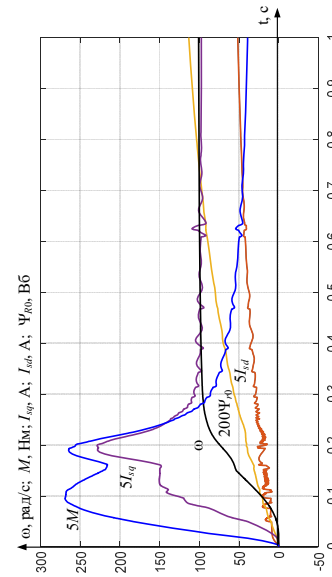
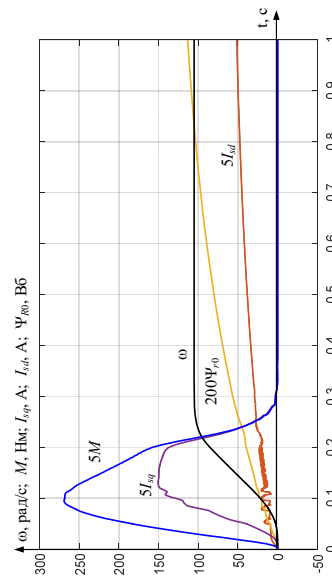
$$k_{rs,opt} = 0,168;$$

$$T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$k_{rr} = k_{rs,opt} / 4 = 0,085;$$

$$T_{r,opt} = 0,056 \text{ с};$$

$$k_{rs,opt} = 12,5$$

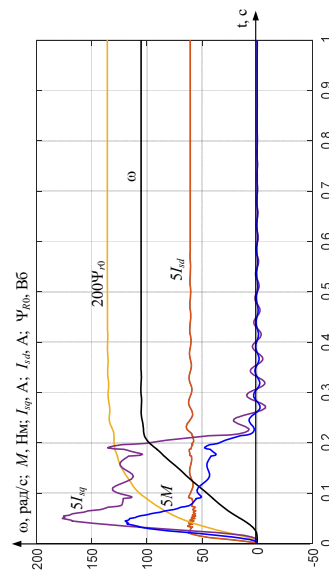


При зменшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку збільшується час пуску та похибка системи електропривода з незначним коливальним характером перехідних процесів.

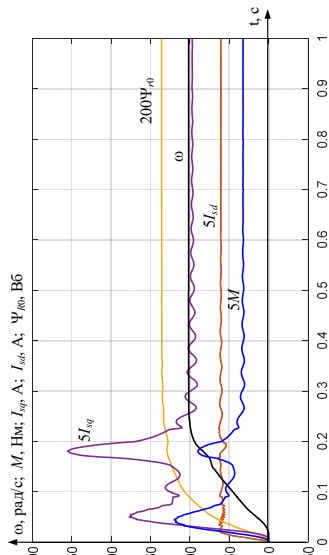
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах.

Неоптимальні параметри контуру потоку (коефіцієнт підсилення) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості

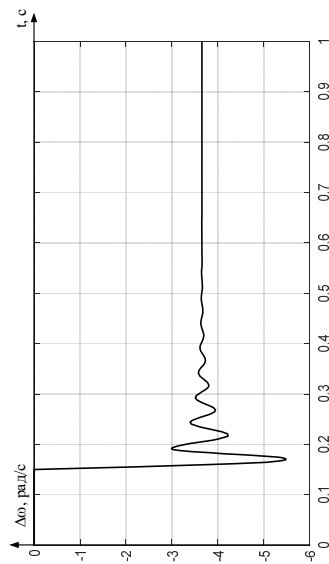
Запуск без навантаження



Запуск з номінальним навантаженням

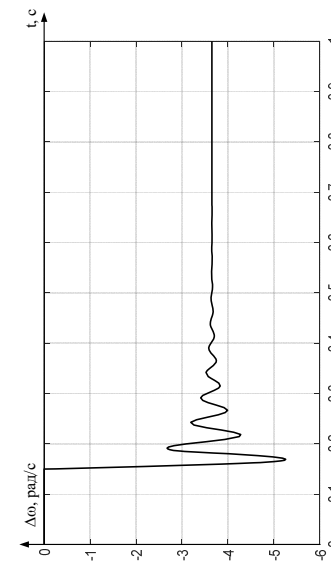
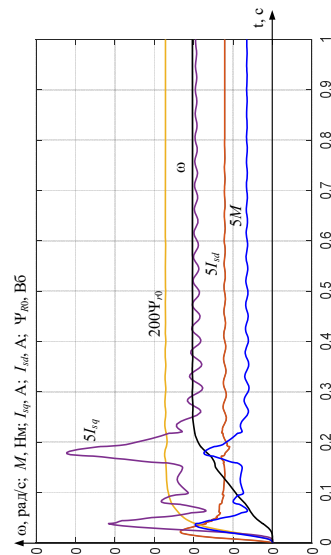
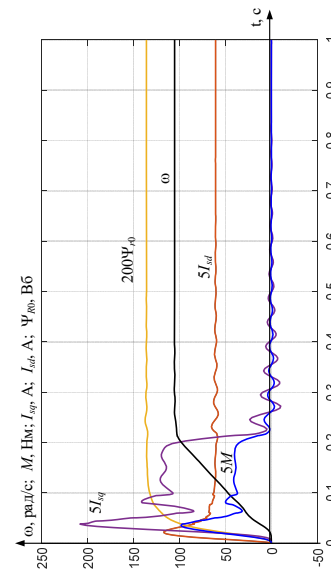


Помилка системи



$K_{rc,omt} = 0,168$; $T_{s,omt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{rn} = 2K_{rc,omt} = 0,644$; $T_{r,omt} = 0,056$ с; $K_{rc,omt} = 12,5$

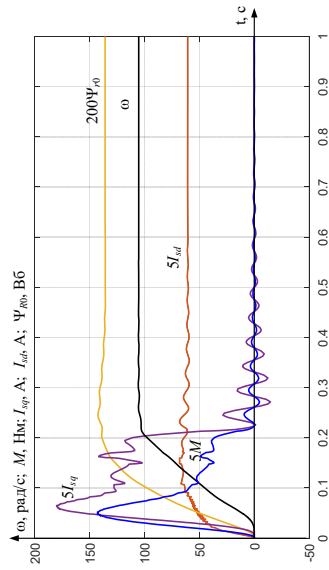
$K_{rc,omt} = 0,168$; $T_{s,omt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{rn} = 4K_{rc,omt} = 1,288$; $T_{r,omt} = 0,056$ с; $K_{rc,omt} = 12,5$



При збільшенні коефіцієнту підсилення контуру потоку час виходу швидкості на усталене значення не збільшується, похибка зменшується, однак спостерігається коливальний характер перехідних процесів.

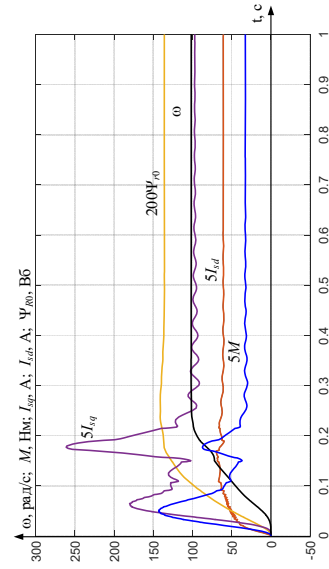
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру потоку (стала часу) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості

Запуск без навантаження

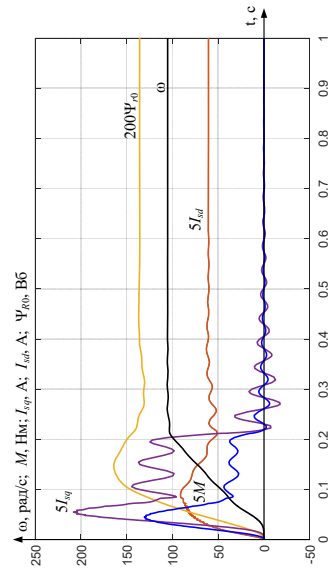


$K_{r, опт} = 0,168$; $T_{s, опт} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{r, опт} = 0,322$; $T_r = T_{r, опт} / 2 = 0,028$ с; $K_{r, опт} = 12,5$

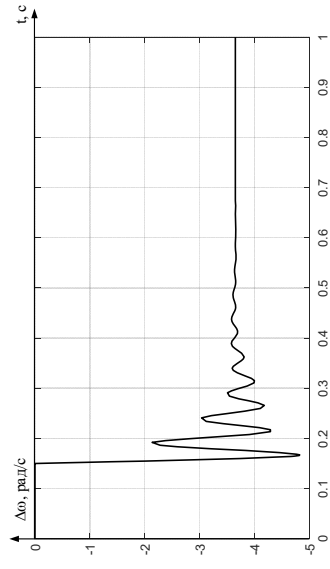
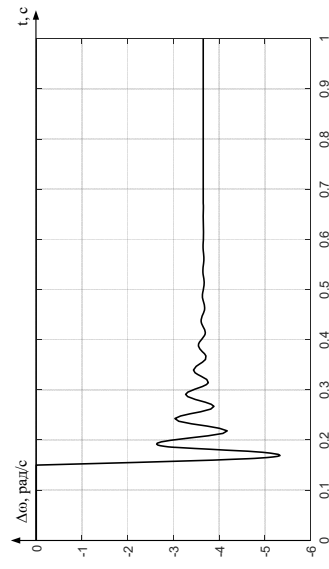
Запуск з номінальним навантаженням



$K_{r, опт} = 0,168$; $T_{s, опт} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{r, опт} = 0,322$; $T_r = T_{r, опт} / 4 = 0,014$ с; $K_{r, опт} = 12,5$



Помилка системи



При зменшенні сталої часу контуру потоку спостерігається збільшення погокозчепленні при пуску з подальшим затухаючим характером до усталеного номінального значення, зменшення похибки та з деяким коливальним характером перехідних процесів.

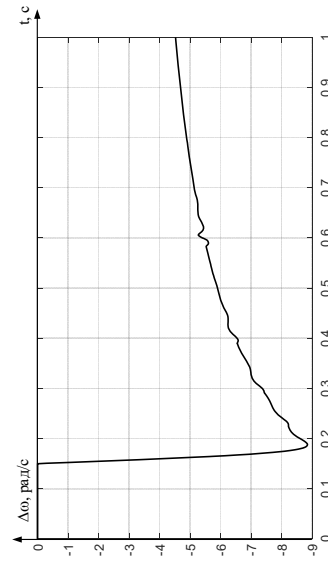
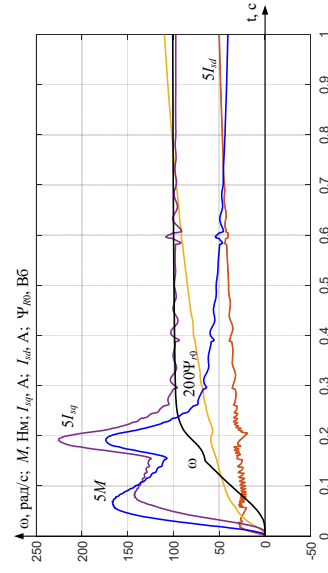
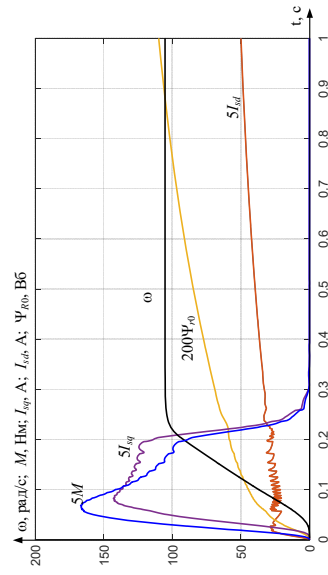
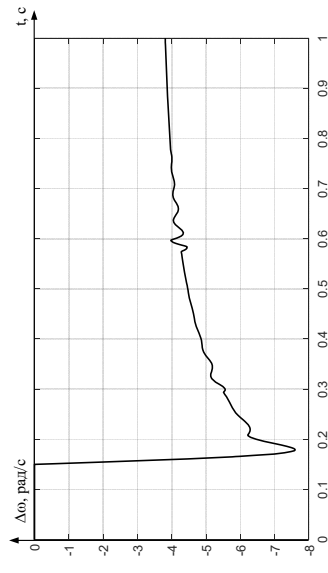
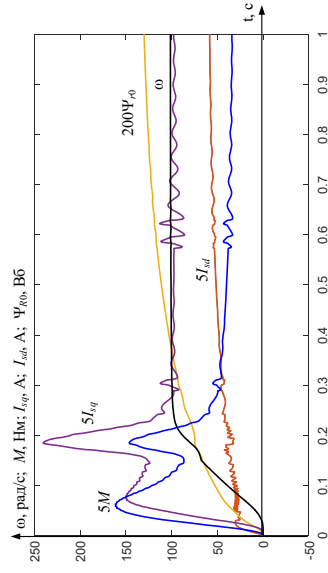
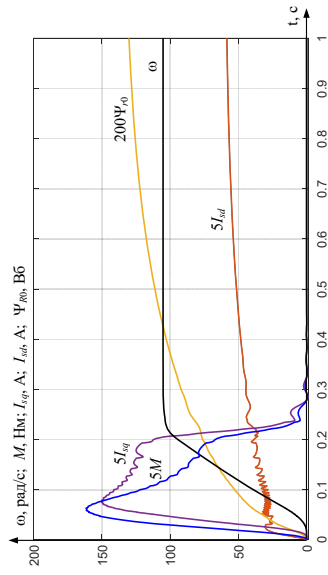
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру потоку (стала часу) при оптимальних параметрах контурів струму та швидкості

Запуск без навантаження

$K_{r,opt} = 0,168$; $T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{r,opt} = 0,322$; $T_r = 2T_{r,opt} = 0,112$ с; $K_{r,opt} = 12,5$

Запуск з номінальним навантаженням

$K_{r,opt} = 0,168$; $T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{r,opt} = 0,322$; $T_r = 4T_{r,opt} = 0,224$ с; $K_{r,opt} = 12,5$



При збільшенні сталої часу контуру потоку спостерігається повільне збільшення потужності, збільшення похибки та незначний коливальний характер перехідних процесів.

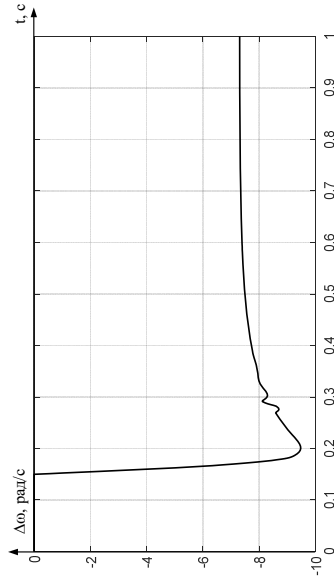
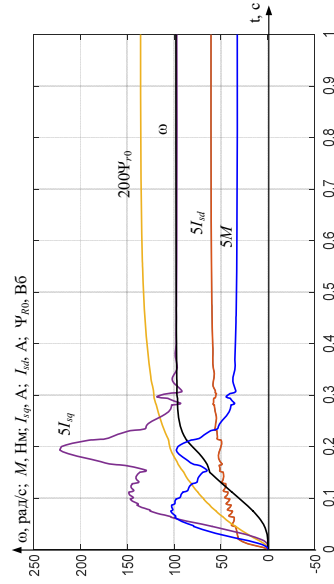
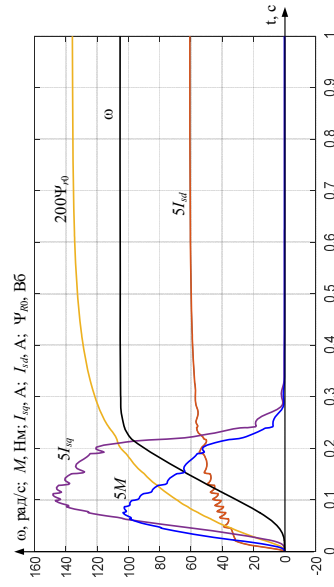
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру швидкості при оптимальних параметрах контурів струму та потоку

Запуск без навантаження

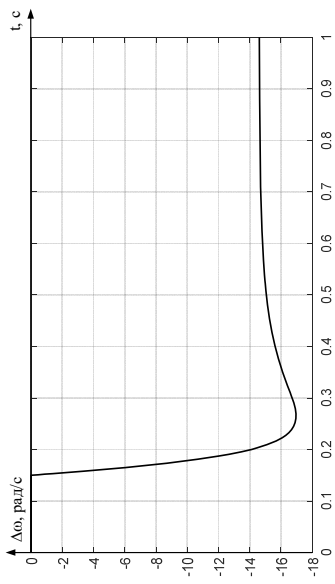
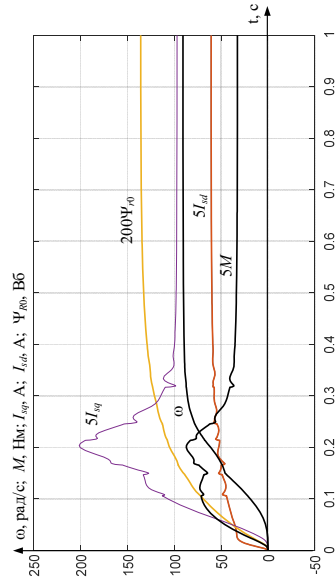
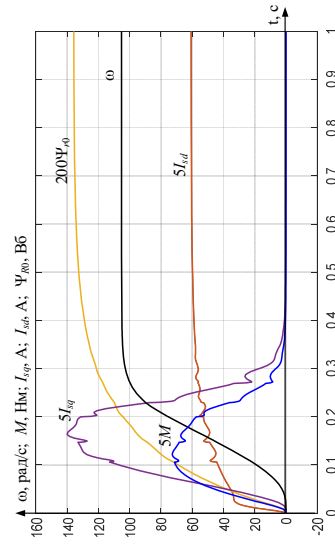
Запуск з номінальним навантаженням

Помилка системи

$$K_{r, опт} = 0,168; T_{s, опт} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с}; K_{r, опт} = 0,322; T_{r, опт} = 0,056 \text{ с}; K_{r,ri} = K_{r, опт} / 2 = 6,25$$



$$K_{r, опт} = 0,168; T_{s, опт} = 1,655 \cdot 10^{-3} \text{ с}; K_{r, опт} = 0,322; T_{r, опт} = 0,056 \text{ с}; K_{r,ri} = K_{r, опт} / 4 = 3,125$$



При зменшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості збільшується час перехідного процесу та похибка.

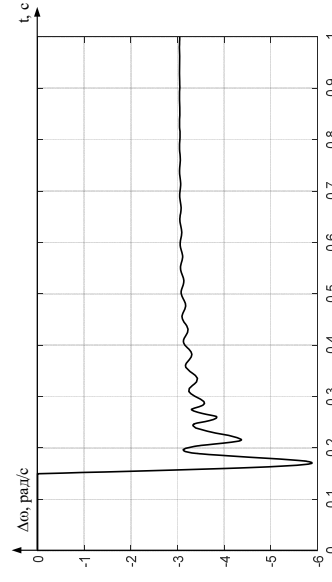
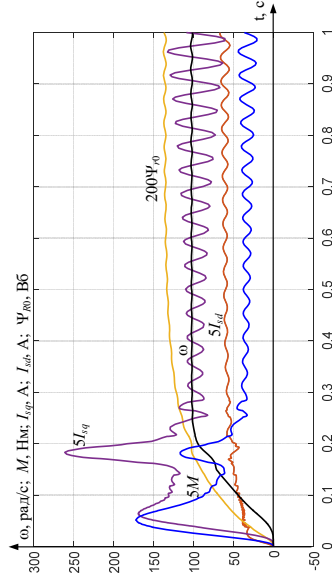
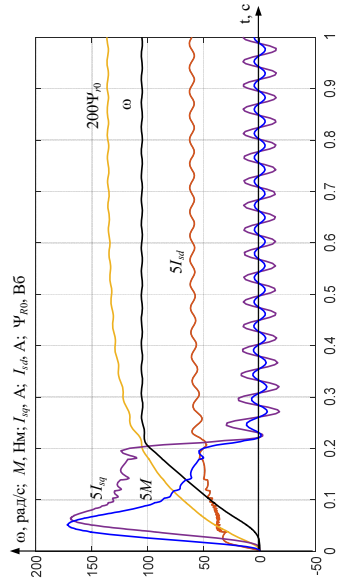
Дослідження системи електропривода при неоптимізованих параметрах. Неоптимальні параметри контуру швидкості при оптимальних параметрах контуру струму та потоку

Запуск без навантаження

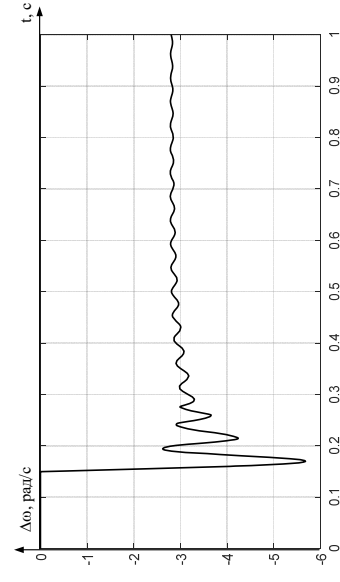
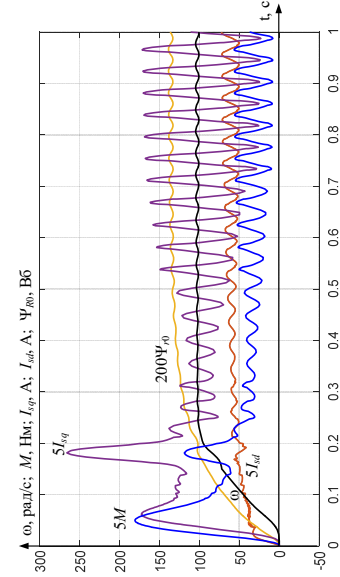
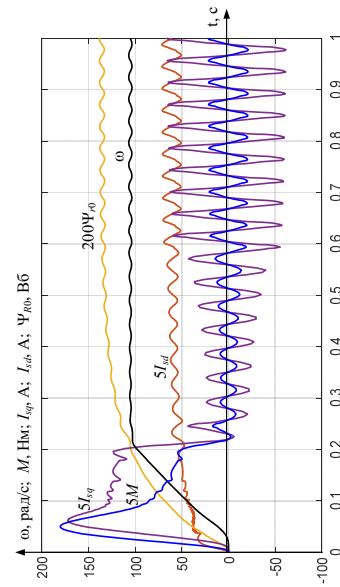
Запуск з номінальним навантаженням

Помилка системи

$K_{rs,opt} = 0,168$; $T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{rs,opt} = 0,322$; $T_{rs,opt} = 0,056$ с; $K_{rri} = 1,2$; $K_{rri,opt} = 1,5$



$K_{rs,opt} = 0,168$; $T_{s,opt} = 1,655 \cdot 10^{-3}$ с; $K_{rs,opt} = 0,322$; $T_{rs,opt} = 0,056$ с; $K_{rri} = 1,3$; $K_{rri,opt} = 16,5$



При збільшенні коефіцієнту підсилення контуру швидкості різко зростає коливальний розбіжний характер перехідних процесів.

Новизна та практичне значення одержаних результатів. Апробація результатів

Новизна одержаних результатів:

– здійснена ідентифікація поведінки системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода в динамічному режимі при зміні умов налаштування контурів регулювання, що дозволяє прогнозувати параметри пуску та тривалість виходу на установлений режим роботи електропривода.

Практичне значення одержаних результатів:

– використання одержаних результатів дозволить підвищити точність та якість керування системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода, що забезпечить підвищення енергоефективності та точності керування.

Апробація результатів:

– основні положення та результати, виконаних у магістерській кваліфікаційній роботі досліджень, доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 22 червня 2023 р.

Основний зміст роботи опубліковано в 1 тезі:

Розводюк М. П. Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода [Електронний ресурс] / М. П. Розводюк, К.М. Розводюк, О.О. Корнелюк // Тези доповідей регіональної науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2023), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 22 червня 2023 р. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/view/18160>

08-24.МКР.002.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода. Мета і задачі дослідження	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Корнелюк О.О.		05.06.23		у		
Перевірів		Розв одок М.П.		05.06.23	Аркуш 1	Аркушів		
Т. контр.					ВНТУ, гр. ЕПА-21			
Реценз.		Шуляк Ю.А.		05.06.23				
Норм.кон.		Бондик В.В.		05.06.23				
Затверд.		Мошворіз М.М.		05.06.23				

Додаток В

(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: Вплив умов налаштування контурів регулювання на роботу системи векторного управління частотно-регульованого асинхронного електропривода

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-21мз

Науковий керівник: к.т.н., доц. Розводюк М.П.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Unichesk

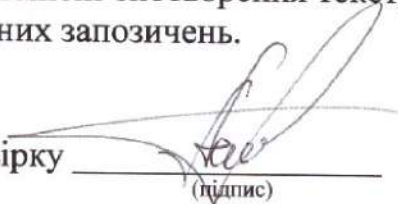
Оригінальність	84,2%
Схожість	15,8%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку  Паянок О.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи,

Автор роботи  Корнелюк О.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Розводюк М.П.
(підпис) (прізвище, ініціали)