

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом головного руху кліті прокатного стану», містить 116 сторінки, 45 рисунків, 56 найменування літературних посилань.

*Об'єктом дослідження* є математична модель електроприводу головного руху прокатної кліті та підвищення показників якості його роботи (мінімізація статичної й динамічної помилок відпрацювання швидкості).

*Предметом дослідження* є електропривод постійного струму головного руху чорнової кліті «Кварто» товстолистового стану з оптимальною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

*Методи досліджень.* При рішенні поставлених завдань використовувалися загальні методи автоматичного керування, чисельного рішення систем диференціальних рівнянь, методи математичного аналізу і математичного моделювання, метод аналітичного конструювання регуляторів, метод найменших квадратів. Перевірка основних теоретичних положень і результатів виконувалася з використанням чисельного моделювання шляхом застосування пакетів розширення системи MATLAB / Simulink.

Розроблено електропривод за системою тиристорний перетворювач-двигун постійного струму. Розраховані параметри регуляторів двозонної системи регулювання. Синтезована релейна система оптимального керування електроприводом. В середовищі MATLAB розроблені моделі систем електропривода та програмні коди розрахунку параметрів регуляторів релейної системи.

ТИРИСТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА ДВОЗОННОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ГОЛОВНИЙ ПРИВОД КЛІТІ, РЕГУЛЯТОР СТРУМУ, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 6  |
| 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ. ЗАВДАННЯ<br>КЕРУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ.....        | 9  |
| 1.1 Стан і тенденції розвитку систем автоматизації станів прокатки .....                     | 9  |
| 1.2 Характеристики створення систем автоматичного управління станами<br>прокатки.....        | 13 |
| 1.3 Технологічні вимоги до системи автоматичного управління прокатним<br>станом.....         | 16 |
| 1.4 Функціональна схема та опис роботи механізму головного руху прокатної<br>кліті.....      | 17 |
| 1.5 Засоби управління процесом прокатки .....  | 22 |
| 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО<br>ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ.....                     | 25 |
| 2.1 Розрахунок потрібної потужності і вибір двигунів.....                                    | 25 |
| 3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ<br>КУРУВАННЯ .....                  | 40 |
| 3.1 Вибір тиристорних перетворювачів електродвигунів .....                                   | 40 |
| 3.2 Вибір перетворювачів обмоток збудження електродвигунів .....                             | 41 |
| 3.3 Резервування в силовій схемі та в ланцюзі збудження.....                                 | 41 |
| 3.4 Поворотна рама SIMOREG CM.....   | 42 |
| 3.5 Розрахунок і вибір силових трансформаторів .....   | 45 |
| 3.6 Розрахунок і вибір згладжуючих реакторів .....   | 52 |
| 3.7 Розрахунок силових параметрів якірного ланцюга двигуна .....                             | 53 |
| 3.8 Розрахунок параметрів трансформатора для живлення ланцюга обмотки<br>збудження .....     | 56 |
| 3.9 Розрахунок параметрів ланцюга збудження двигуна .....                                    | 59 |
| 4 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ ДВОЗОННОГО РЕГУЛЮВАННЯ<br>ШВИДКОСТІ У ДВОХ ФАЗОВИХ ПРОСТОРАХ ..... | 62 |
| 4.1 Синтез релейної системи керування в просторі природних координат.....                    | 64 |

|   |     |
|---|-----|
|   | 5   |
| 4.2 Синтез релейного контура регулювання швидкості в просторі канонічних координат..... | 81  |
| 5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ГОЛОВНОГО РУХУ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK.....           | 88  |
| ВИСНОВОК.....   | 110 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....   | 111 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні прокатні стани є високотехнологічними та потужними агрегатами металургійної галузі, що визначаються складністю їхнього обладнання. Конкурентоспроможність металургійної продукції напряму залежить від якості прокатки, що є ключовим етапом в обробці металу. Отже, дослідження енергоємного прокатного виробництва, аналіз процесів енергоперетворення та розробка ефективних систем управління з використанням передових технологій стає актуальним завданням.

Використання математичного експерименту через комп'ютерне моделювання визначається як перспективний напрямок досліджень. Цей підхід дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень, зменшити час і витрати під час введення обладнання в промислову експлуатацію. Інтенсивний розвиток математичних моделей електромеханічних систем (ЕМС) прокатних станів свідчить про зростаючий інтерес до цього напряму досліджень, зокрема, до моделювання багатомасових взаємопов'язаних процесів обробки металу та електроприводу "довгого валу".

Вимоги до бажаної динаміки розглянутого класу об'єктів визначаються загальними технологічними та економічними критеріями функціонування реального приводу, а також конкретними показниками якості системи управління. Найбільш універсальним підходом, особливо для багатовимірних об'єктів управління, є формалізація вимог до якості перехідних процесів через введення оптимального функціоналу якості.

Метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) має ряд переваг, таких як гранична формалізація та логічна завершеність, при тому, що він базується на принциповій математичній простоті.

Обмежена передвідома інформація про параметри та характеристики об'єкта управління, а також умови його функціонування, ускладнює використання класичних методів синтезу для створення керуючої частини електромеханічних систем (ЕМС). Ця ситуація вимагає особливого підходу, який дозволяє уникнути детального аналізу широкого спектру дестабілізуючих

факторів, що впливають на об'єкт управління. Різноманіття цих факторів можна умовно поділити на параметричні (внутрішні) і координатні (зовнішні) збурення.

Параметричні збурення включають в себе будь-які відхилення, результатом яких є зміна параметрів або структури об'єкта управління. Темп зміни цих параметрів залежить від природи впливаючих факторів. Наприклад, для багатьох промислових ЕМС характерно повільне змінювання постійних часу внаслідок зміни геометрії виконавчого органу в 4-6 разів або швидке змінювання тих же постійних часу в 5-10 разів внаслідок переміщення або перемикання механізмів.

Координатні збурення передусім включають сили опору, які подолані ЕП, а також шуми і перешкоди, які містяться в сигналах завдання і зворотніх зв'язків. Такий розподіл факторів дозволяє розглядати їх у контексті їх внутрішнього чи зовнішнього походження, враховуючи їхні можливі взаємовідносини з об'єктом управління.

Повне теоретичне вирішення завдання управління нестационарними об'єктами в умовах координатних збурень може бути досягнуте шляхом концепції створення систем, які залишаються стійкими при необмеженому збільшенні коефіцієнта посилення [1]. В контексті лінійних законів управління такий підхід може ефективно знизити чутливість системи до зовнішніх збурень і забезпечити значні можливості компенсації параметричних збурень [2]. Використання ковзних режимів нелінійних елементів [20-38,125-128] для досягнення нескінченно великих коефіцієнтів підсилення, за певних умов, дозволяє досягти нульової чутливості систем управління до параметричних і координатних збурень.

У відомих літературних джерелах процес синтезу розривних управлінь, як правило, базується лише на умові наявності стійкого змінного режиму [3-5,6-9], але це не гарантує оптимальності створених систем. Математичні засади алгоритмічного синтезу оптимальних систем управління, які є стійкими при необмеженому зростанні коефіцієнта посилення, представлені в роботах [10-25]. Ці дослідження присвячені методам математичного аналізу вихідних

алгоритмів управління з метою мінімізації інтегральних квадратичних критеріїв якості. Важливо зауважити, що отримані результати в цих роботах потребують подальшого розвитку і дослідження, зокрема, врахування особливостей об'єктів управління та умов їх функціонування.

**Об'єктом дослідження** є математична модель електроприводу головного руху прокатної кліті та підвищення показників якості його роботи (мінімізація статичної й динамічної помилок відпрацювання швидкості)

**Предметом дослідження** є електропривод постійного струму головного руху чорнової кліті «Кварто» товстолистового стану з оптимальною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

**Метою** роботи є розробка і дослідження релейної системи керування електроприводом головного руху, яка має необхідні (високі) показники якості в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- аналіз роботи електромеханічного обладнання з регулюючими електроприводами та дослідження особливостей електромеханічних процесів;
- синтезувати оптимальні регулятори, структура яких реалізована на доступних технічних засобах та забезпечують необхідні динамічні і статичні показники електропривода головного руху;
- провести аналіз роботи синтезованої оптимальної системи за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях у середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink;
- визначити залежності показників якості системи від параметрів системи методом найменших квадратів.

# 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ. ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ

## 1.1 Стан і тенденції розвитку систем автоматизації станів прокатки

Питання створення та оптимізації систем автоматичного керування (САК) для взаємопов'язаних електроприводів технологічних ліній належать до актуальних тем, які привертають широку увагу висококваліфікованих фахівців. Ці питання вже були предметом досліджень багатьох вчених, зокрема, М.М. Дружиніна [25, 27], Ю.М. Файнберга [28], Ю.А. Борцова, Г.Г. Соколовського [29, 30], В.М. Єгорова [31], А.Б. Зеленова [32-35], А.В. Башарина [36], В.А. Новікова [37], В.І. Ключева [38, 39], А.В. Садового [40, 41], Л.Г. Лимонова [42], В.Б. Клепікова [43], О.І. Толочко і П.Х. Коцегуба [44-50]. В їх досліджах вирішувалися різноманітні питання теорії взаємопов'язаних електромеханічних систем з пружними зв'язками, а також визначались основні напрямки аналізу і синтезу таких систем.

М.М. Дружинін у своїх роботах провів глибокий аналіз статичних і динамічних режимів багатодвигунного електроприводу безперервного стану, враховуючи вплив характеристик електроприводу, пружності механічної системи і параметрів технологічного процесу. Особливу увагу він приділив домінуючій ролі пружних властивостей системи валок-кліть. Також в його досліджах широко розглядалися фізичні процеси, пов'язані з намотуванням і розмотуванням смуги з барабана моталки. Використання введеного В.І. Ключевим коефіцієнта електромеханічного зв'язку спростило аналітичні дослідження і зробило їх більш наочними.

Ю.А. Борцов і Г.Г. Соколовський досліджували вплив пружних зв'язків на динаміку тиристорних систем електроприводу, побудованих за принципами підлеглого регулювання. З метою ефективного проектування і налагодження електроприводів прокатних станів, О.В. Слежановський, Н.П. Куницький робили вагомий внесок в цьому напрямку. А.Б. Зеленов розкривав принципи побудови систем електромашинного управління і регулювання. О.І. Толочко і

П.Х. Коцегуб приділяли увагу дослідженню систем підлеглого регулювання зі спостерігачами стану динамічного і статичного струмів, системам позиційного електроприводу з комбінованим управлінням по задаючому і збурюючих впливах.

У більшості випадків була вивчена двомасова система, що становить значний спрощений підхід до врахування взаємовпливу пружних зв'язків на електроприводи.

Ю.М. Файнберг презентував фізичне трактування та математичний опис законів, які визначають зв'язок електромеханічних параметрів з параметрами технологічного процесу. В його роботах подано математичний опис процесів намотування та корекції розчину валків.

При врахуванні аналізу літератури можна виділити кілька ключових тенденцій у розвитку прокату:

- Підвищення продуктивності станів: Це досягається завдяки комплексній автоматизації процесу прокатки.

- Поліпшення якісних характеристик прокату: Основні напрямки включають підвищення точності геометричних розмірів, удосконалення стану поверхні, рівномірність товщини, а також поліпшення фізико-математичних властивостей та однорідності структури металу.

- Оптимізація технологічних параметрів: Це включає в себе розробку оптимальних параметрів процесу прокатки.

- Зниження металоємності та енергоємності обладнання: Основною метою є ефективне використання ресурсів та зменшення витрат енергії.

- Переоснащення та модернізація систем управління ЕП: Зокрема, акцентується на впровадженні передових технологій та оптимізації управлінських процесів.

Автоматизація процесу прокатки передбачає впровадження складної системи автоматичного керування (САК), яка розв'язує ряд ключових завдань управління:

- 1 Формування керуючих впливів для приводів механізмів: Головна мета полягає в створенні керуючих впливів для основних та допоміжних механізмів,



які відповідають виробничій програмі та поточним параметрам прокатки.

2 Оцінка технологічних параметрів для регулювання: Це включає пряму чи непряму оцінку параметрів для регулювання натягу, контролю петель, руху прокату, а також надання стартових команд для ножиць, передач, штовхачів, охолоджуючих сопел тощо.

3 Представлення значень параметрів та координат: Реалізація системи, яка може уявляти та відображати настановні і поточні значення параметрів, таких як навантаження двигунів, розмір петель, натяг прокату, обертання двигунів, швидкість прокатки, довжина кінцевого обрізу смуги та інші виробничі параметри.

4 Діалог із обслуговуючим персоналом та системою управління: Впровадження ефективного взаємодіалогу між обслуговуючим персоналом і системою управління, а також забезпечення відображення і управління електроприводом прокатного стану та протоколювання основних даних процесу.

5 Використання результатів моніторингу: Використання результатів моніторингу для підтвердження адекватності створених імітаційних моделей системи автоматичного керування. Ці моделі будуть використовуватися при розробці нового обладнання та реконструкції існуючого прокатного устаткування.

Відповідно до концепції блочно-модульного виконання комплектних електроприводів, зазвичай передбачається можливість гнучкого варіювання силових та управлінських модулів, які входять до складу силових та управлінських блоків комплектного електроприводу. Це здійснюється з метою адаптації до різних режимів та умов експлуатації технологічного обладнання.

Багато існуючих прокатних станів проявляють наступні загальні риси:

Використання приводів постійного струму та аналогових систем управління: Більшість з них використовують приводи, що працюють на постійному струмі, а також аналогові системи управління.

1 Структура Систем Управління Електроприводами (СУ ЕП): Зазвичай вони мають СУ ЕП, побудовані на основі локальних контролерів і реле.

2 Надійність роботи силових випрямних секцій і двигунів: Робота силових випрямних секцій та двигунів є надійною, особливо за наявності достатньої кількості запасних частин і якісного обслуговування.

3 Висока жорсткість елементів електромеханічної системи головних приводів прокатних клітей: Забезпечується висока жорсткість елементів електромеханічної системи головних приводів, що визначає їх динамічні можливості.

4 Відсутність системи інформаційного супроводу: В більшості випадків відсутня система інформаційного супроводу роботи електроприводів, що може впливати на оперативність управління технологічним процесом прокатки.

В умовах, описаних вище, можна розглядати кілька етапів модернізації систем автоматичного управління (САУ) прокатних станів. Перший крок передбачає заміну аналогових та релейно-контактних систем управління цифровими, використовуючи промислові комп'ютери, технологічні контролери, логічні контролери, інтелектуальні модулі периферії та інші сучасні засоби, що відповідають високому рівню автоматизації.

Другий етап включає в себе доповнення цифровими контролерами силових блоків управління комплектних електроприводів постійного струму, зберігаючи при цьому справний стан силового випрямного обладнання. Це особливо доцільно, якщо тиристорні секції є функціональними і досі високоефективними, оскільки їх заміна може бути високо вартісною.

Після проведення таких модернізацій створюються оптимальні умови для впровадження багаторівневої автоматичної системи управління технологічним процесом (АСУТП). Головні приводи можуть легко інтегруватися на рівні управління, сприяючи впорядкуванню та ефективній координації виробничого процесу.

На третьому етапі модернізації виникає можливість заміни силових блоків комплектних електроприводів, при цьому електродвигуни та електромережі залишаються незмінними. Це дозволяє зберегти ефективність електроприводів, змінюючи лише технічні характеристики силових блоків.

Завершальний етап передбачає повну модернізацію автоматизованих

електроприводів через заміну електроприводів постійного струму на електроприводи змінного струму, що відповідає сучасним технологічним стандартам.

Сучасний підхід до модернізації прокатних виробництв насамперед спрямований на заміну двигунів постійного струму на більш сучасні двигуни змінного струму [51, 52]. Однак, незважаючи на цей технологічний крок уперед, надалі залишається ключовим завданням проведення модернізації на існуючому обладнанні. Це означає розумне поєднання заміни застарілої, фізично та морально зношеної електрообладнання новими системами, які відзначаються високою надійністю та якістю. При цьому максимально можливо зберігається діюче обладнання, яке технічно готове до тривалої подальшої експлуатації.

Для обґрунтування правильності такого підходу до модернізації вкрай важливою є можливість математичного експерименту через імітаційне моделювання. Цей метод дозволяє підвищити ефективність реконструкції, скоротити час і витрати на проведення натурних експериментів, а також впевнено впроваджувати нове обладнання в промислову експлуатацію.

Працездатність нових та високопродуктивних цехів гарячої прокатки безсумнівно вимагає використання автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП). Застосування таких систем вже показало позитивні результати, але особливо важливою є їхня ефективність на ключовому технологічному вузлі - прокатному стані. Якість випускаємої продукції в значній мірі залежить від точності та ефективності автоматичних систем, що керують процесом прокатки.

## **1.2 Характеристики створення систем автоматичного управління станами прокатки**

Виконання завдань управління в процесі прокатки включає обробку сталевих штаби на прокатних станах, де секції агрегатів із живильною силовою системою є нероздільним технологічним комплексом. В даному контексті

привідні вали двигунів з'єднані з механізмами шпинделю, що можна уявити як пружні механічні передачі першого роду. Секції, в свою чергу, зв'язані опрацьованим матеріалом, створюючи, у першому наближенні, пружні зв'язки другого роду.

Управління технологічними агрегатами, що взаємодіють через опрацьований матеріал, представляє собою складну багатозв'язну систему змінних параметрів, в якій електричні, механічні та технологічні компоненти взаємодіють між собою. Хоча кожен агрегат має свою систему управління, обов'язковою умовою є координація сигналів управління для забезпечення єдиної робочої системи.

Однією з ключових вимог до багатодвигунової системи електроприводу прокатного стану є забезпечення транспортування металу із заданою швидкістю на всіх етапах роботи та в усіх зонах агрегату. Це визначальний фактор для успішного ведення технологічного процесу та забезпечення якості і товщини транспортованого матеріалу, а також для ефективного змотування рулону та уникнення обривів смуги. Для досягнення цієї мети, один із механізмів агрегату або його частини визначається як провідний, а електропривід цього механізму регулюється системою автоматичного управління швидкістю електродвигуна.

Системи управління двигунами постійного струму впроваджуються за принципом підпорядкованого регулювання, орієнтованого на модульний або симетричний оптимум. Ці системи дозволяють легко створювати системи управління з необхідними показниками якості перехідних процесів. Для досягнення астатичного регулювання швидкості, системи часто модифікують, замінюючи пропорційний регулятор швидкості на пропорційно-інтегральний. У випадку однозвонових систем електроприводів постійного струму можна поліпшити якість перехідних процесів, введенням додаткового позитивного зворотного зв'язку по статичному току або заміною зворотного зв'язку по повному струму якірного ланцюга на зворотний зв'язок по його динамічній складовій, при цьому регулятор швидкості залишається структурою типу Р. Для поліпшення динаміки астатичних систем підпорядкованого регулювання

швидкості можна також використовувати замикання контуру струму через ідентифікований динамічний струм або додавати компенсаційний канал для управління впливом навантаження на статичні характеристики приводу, використовуючи для цього ідентифікований момент статичного опору.

Щодо аналізу варіантів систем управління, існують різні методи синтезу систем для багатовимірних об'єктів. Один із підходів базується на принципі автономності окремих систем. У цьому випадку використовується комбіноване управління. Спочатку, шляхом компенсації взаємозв'язків, які розглядаються як обурення, досягається інваріантність або автономність підсистем (окремих систем). Після цього проводиться синтез кожної підсистеми як одновимірної, щоб забезпечити високу якість управління.

Для розв'язання задачі управління багатовимірними об'єктами застосовується метод оптимального управління, що ґрунтується на мінімізації інтегрального квадратичного критерію. Цей метод дозволяє аналітично конструювати оптимальні регулятори [41, 53]. Внаслідок оптимізації створюється структура, в якій кожна підсистема має зворотні зв'язки щодо своїх змінних стану від інших підсистем.

У багатовимірних системах управління іноді необхідний скоординований рух підсистем, що передбачає певну взаємозалежність вихідних величин. Цю узгодженість можна досягти двома способами: формування узгоджених впливів з урахуванням автономності підсистем або використання взаємної залежності змінних стану підсистем. Отже, сигнал управління будь-якої підсистеми включає інформацію про всі змінні стану системи.

Аналіз багатовимірної системи, хоча і не має принципових відмінностей від аналізу одновимірної системи, виявляється в більш складному виконанні. Стійкість системи вивчається за допомогою повної багатоконтурної структурної схеми. Визначення точності та побудова перехідних процесів здійснюються окремо для кожної вихідної змінної за допомогою передавальної функції і відповідних частотних характеристик.

Точність і показники якості перехідних характеристик для кожної вихідної змінної визначаються відповідними рівняннями. Аналіз статички і

динаміки для кожної з вихідних змінних виконується так, як у випадку одновимірної системи, з урахуванням кількох зовнішніх впливів.

Щодо задачі синтезу багатовимірної системи, рішення її має істотну особливість - необхідність одночасного врахування вимог щодо точності та якості перехідних процесів для декількох вихідних змінних, які часто взаємно пов'язані і можуть потребувати протилежних корекційних втручань. Таким чином, необхідно знайти компромісне рішення, яке задовольняє вимоги до всіх вихідних змінних.

### **1.3 Технологічні вимоги до системи автоматичного управління прокатним станом**

Для забезпечення ефективного процесу прокатки необхідно виконувати послідовні технологічні операції, які включають в себе включення та відключення окремих двигунів та налаштування їхніх частот обертання. Автоматизація цих функцій та інших операцій є ключовим завданням. Крім того, системи управління та регулювання гарячої прокатки повинні включати елементи, що забезпечують надійну роботу пристроїв автоматики та захист системи від пошкоджень та аварійних режимів.

У випадку прокатки полоси на стані САК, головною лінією стану має бути передбачена можливість виконання різних операцій і функцій відповідно до конкретних умов. Деякі з основних вимог до системи управління прокатного стану включають:

1. Окреме управління двигунами кліті та механізмами, зокрема, окреме управління кожною кліткою для багатоклітового стану.

2. Можливість швидкої зупинки всього стану чи окремих клітей для багатоклітового стану.

3. Вимкнення двигуна будь-якої кліті повинно викликати відключення і зупинку всіх двигунів стану, щоб запобігти пошкодженням металу або поломкою валків.

4. Автоматичне відновлення роботи стану після перерви в роботі з

металом у валках.

5. Можливість реверсу валків кліті як у робочому режимі, так і в режимі вільного обертання.

6. Система повинна дозволяти роботу поштовхом, що передбачає короткочасне обертання або зміну частоти обертання двигунів.

7. Можливість інтенсивного прискорення для кожного з двигунів.

Для визначення вимог до системи автоматизованого управління прокатним станом, необхідно врахувати необхідність забезпечення величини прискорень двигунів у перехідних процесах регулювання. Ці вимоги залежать від швидкостей зміни основних технологічних параметрів, таких як товщина металу, що прокочується. Знання цих закономірностей дозволяє визначити необхідні закони зміни магнітного потоку збудження та напруги на затискачах двигунів, знаходити передавальні коефіцієнти для різних ланок системи регулювання та інші параметри.

#### **1.4 Функціональна схема та опис роботи механізму головного руху прокатної кліті**

Для прикладу наведемо найбільш часто зустрічаються САК кліті.

Функціональна електрична схема електроприводу кліті (рис. 1.1) представлена двохконтурна САК: внутрішній контур регулювання струму якірного ланцюга, зовнішній - напруга. На рисунку Т - трансформатор, L - струмообмежувальним реактор, VS1-VS12 - вентилі керованого реверсивного перетворювача, ДТ - датчик струму, ДН - датчик напруги, М - приводний двигун постійного струму, LM - обмотка збудження ДПТ, ДЕ - датчик ЕРС, РТ - регулятор струму, РЕ - регулятор ЕРС, БО - блок обмеження, ЗІ - задатчик інтенсивності, СІФУ - система імпульсно-фазового управління, КУ - командне пристрій, Ф - фільтр, ФП - функціональний перетворювач, ВУ - обчислювальний пристрій, ФБ - функціональний блок.

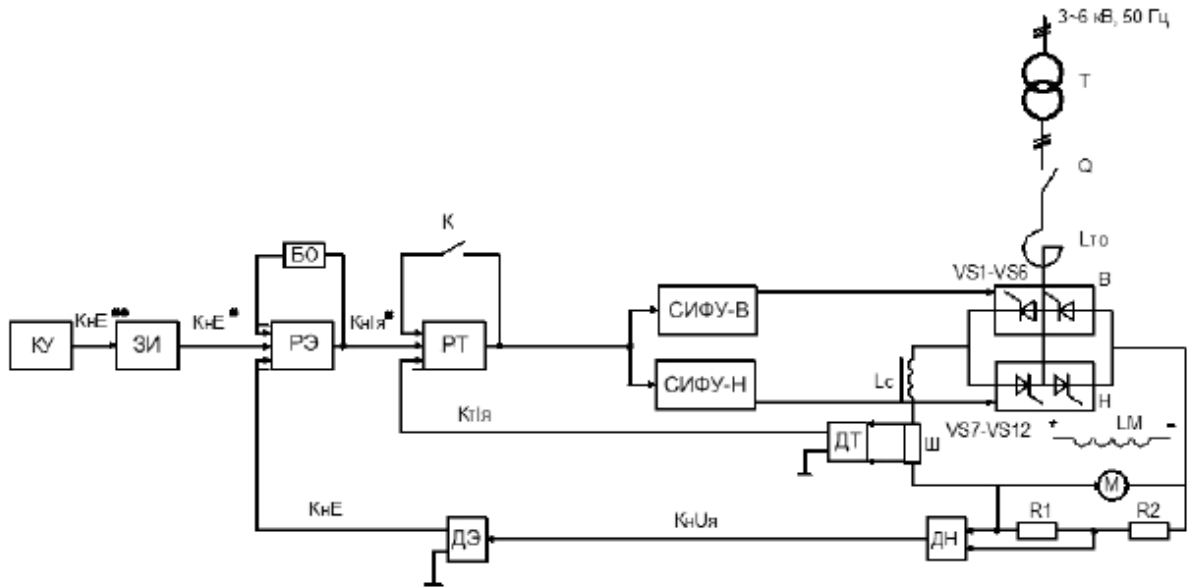


Рисунок 1.1 - Функціональна схема головного електроприводу прокатної кліти

Чорнова кліть «Кварто» містить два робочих валки і два опорних (рис. 1.2). Робочі валки (поз.1, рис. 1.2) виконуються із гладкою циліндровою бочкою.

Опорні валки (поз.2, рис. 1.1) - цільноковані. Ці валки спираються на чотирирядні роликопідшипники із циліндровими роликами, вбудованими в подушки із литої сталі.

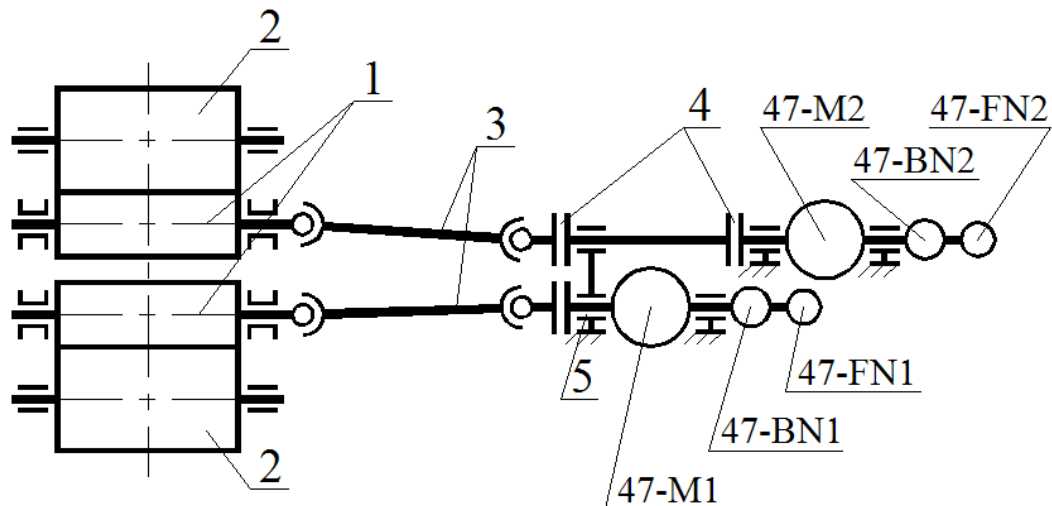


Рисунок 1.2- Спрощена кінематична схема лінії головного приводу

- 1 - робочі валки;
- 2 - опорні валки;



- 3 - шпindelьний пристрій;
- 4 - валкові муфти;
- M1, M2 - приводні електродвигуни;
- BN1, BN2 - імпульсні датчики швидкості;
- FN1, FN2 - реле швидкості.

В процесі прокатки та в паузах між суміжними пропусками робочі валки охолоджуються водою.

Шпindelьний пристрій (поз.3, рис. 1.1) є складовою частиною лінії головного приводу кліті і слугує для передачі обертаючого моменту, який розвивається приводними двигунами (M1, M2) до робочих валків.

Шпindelьний пристрій містить:

- два ковані універсальні шпindelі;
- механізм врівноваження;
- дві валкові муфти;
- кожух.

Для приводу робочих валків застосовуються два електродвигуни постійного струму (M1, M2) з незалежною вентиляцією по замкнутому циклу типу: МП 2950-25 основні параметри яких приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Основні параметри прокатного електродвигуна головного приводу кліті «Кварто»

| № п/п | Найменування                    | Позначення         | Величина |
|-------|---------------------------------|--------------------|----------|
| 1     | Тип двигунів                    | МП 2950-25         |          |
| 2     | Потужність електродвигуна       | $P_{дв}, кВт$      | 2170     |
| 3     | Номінальна швидкість обертання  | $n_{дв}, об/мин$   | 25       |
| 4     | Максимальна швидкість обертання | $n_{макс}, об/мин$ | 60       |

|    |  |                       |          |
|----|--|-----------------------|----------|
| 5  | Номінальний струм якоря                          | $I_n, A$              | 3320     |
| 6  | Номінальна напруга на якорі                      | $U_n, B$              | 750      |
| 7  | Маховий момент інерції якоря                     | $GD^2, m \cdot m^2$   | 270      |
| 8  | Номінальний магнітний потік                      | $\Phi_{н.дв}, Bб$     | 0,58     |
| 9  | Конструкційна постійна на номінальний потік      | $C\Phi_{н.дв}$        | 257,23   |
| 10 | Кількість полюсів електродвигуна                 | $2p$                  | 18       |
| 11 | Кількість паралельних гілок/витків обмотки якоря | $a_{дв} / \omega_{д}$ | 18/77,50 |
| 12 | Кількість активних стрижнів якорної обмотки      | $N_{дв}$              | 2790     |
| 13 | Опір обмотки якоря електродвигуна при 20° С      | $R_{я}, Ом$           | 0,0108   |
| 14 | Опір додаткових полюсів при 20° С                | $R_{дв}, Ом$          | 0,0022   |

Продовження табл. 1.1

|    |  |               |         |
|----|--|---------------|---------|
| 15 | Опір компенсаційної обмотки при 20° С        | $R_{ко}, Ом$  | 0,006   |
| 16 | Номінальний струм збудження електродвигуна   | $I_{зн}, A$   | 400/100 |
| 17 | Падіння напруги на обмотці збудження двигуна | $U_{зн}, B$   | 137/35  |
| 18 | Опір обмотки збудження двигуна при 20° С     | $r_3, Ом$     | 0,38    |
| 19 | Кількість витків обмотки збудження на полюс  | $\omega_{вд}$ | 44      |
| 20 | Збудження двигуна - незалежне                |               |         |
| 21 | Кількість двигунів - 2                       |               |         |

Примітка: параметри збудження двигуна відповідають: в чисельнику - повному магнітному потоку двигуна, в знаменнику - максимально послабленому.

Основні параметри чорнової кліті «Кварто», необхідні для подальших розрахунків приведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.4 - Основні параметри чорнової кліті «Кварто» стана 3000

| № п/п | Найменування  | Позначення        | Величина  |
|-------|---|-------------------|-----------|
| 1     | Швидкість захвату та вибросу метала валка-ми, м/сек | $V_{з/в}$         | 0,9       |
| 2     | Діаметр тертя в опорних валках, м                   | $d_{оп}$          | 0,69      |
| 3     | Діаметр робочих та опорних валків, мм               | $D_{рв} / D_{ов}$ | 1000/1650 |
| 4     | ККД передачі  | $\eta_n$          | 0,93      |

Продовження табл. 1.4

|   |   |                      |       |
|---|---|----------------------|-------|
| 5 | Сумарний момент інерції механічної частини, кг-м <sup>2</sup>   | $J_m$                | 15000 |
| 6 | Кутове прискорення приводу при розгоні, раді с <sup>2</sup>     | $\varepsilon_{розг}$ | 2,1   |
| 7 | Кутове прискорення приводу при гальмуванні, рад/ с <sup>2</sup> | $\varepsilon_{гал}$  | 4,2   |
| 8 | Матеріал валків - кована сталь марок 50, 55                     |                      |       |
| 9 | Підшипники ковзання із текстолітовими вкладниками               |                      |       |

## 1.5 Засоби управління процесом прокатки

Сучасні засоби автоматизації технологічного процесу прокатки включають різні типи обчислювальних засобів, такі як промислові комп'ютери (ПК), спеціалізовані контролери, однокристальні мікросхеми, вбудовані одноплатні комп'ютери та інші обчислювальні комплекси. У системах автоматизації технологічних об'єктів ці обчислювальні засоби виконують різноманітні організаційні та прикладні функції.

Організаційні функції спрямовані на управління внутрішніми процесами в обчислювальних засобах і служать для підтримки структури системи в необхідному стані та управління конфігурацією пристроїв.

Прикладні функції визначаються конкретними завданнями контролю технологічного об'єкта та управління ним. До них належать збір і первинна обробка даних, контроль процесу, управління процесом, його стабілізація та оптимізація, а також інші допоміжні функції.

Збір, первинна обробка даних і контроль процесу прокатки відповідають групі інформаційних функцій обчислювальних засобів. Детальніше ці функції можна розглядати як здійснення збирання та зберігання інформації про стан технологічного процесу і пристроїв системи управління, безперервний контроль відповідності параметрів прокатки і системи управління допустимим значенням, надання інформації оператору про невідповідність параметрів допустимим значенням, постійна або періодична реєстрація значень контрольованих параметрів, сигналізація при наближенні до аварійного стану, а також оперативний зв'язок з іншими обчислювальними засобами на різних рівнях інфраструктури та інші.

Управління, стабілізація та оптимізація відповідають групі функцій управління обчислювальних засобів. Ці функції включають в себе запуск та зупинку прокатного комплексу або його ділянок, формування керуючих впливів для забезпечення необхідного режиму прокатки, виконання розрахунків для визначення різних технологічних параметрів, автоматичну оптимізацію процесу відповідно до критерію якості та інші функції.

У світлі цього виникають дві основні вимоги: по-перше, щодо обрання обчислювального пристрою, і, по-друге, щодо чисельних методів і алгоритмів, які використовуються для вирішення конкретних завдань. Хоча не завжди, ці вимоги, як правило, взаємопов'язані.

У відомостях про сучасні технології автоматизації технологічного процесу прокатки, програмовані контролери та інформаційно-керуючі комплекси, які включають різноманітні інтелектуальні модулі, широко застосовуються. Вони базуються на мікропроцесорній техніці, яка має ряд характеристик, що визначають її функціональні можливості.

Сучасні мікропроцесори (МП) відрізняються розвиненою реєстровою структурою, конвеєрним принципом виконання команд з попередньою вибіркою, що збільшує пропускну здатність каналу, та розподіленою апаратно-мікропрограмною системою управління, що сприяє підвищенню швидкодії. Вони також володіють рядом характеристик, таких як мультиплексуємість узагальненим каналом адреса/дані, розвинені засоби побудови мультипроцесорних систем, багатфункціональність використання виводів великої інтегральної схеми.

Програмовані контролери обладнані різноманітними функціональними модулями, мережевими можливостями, засобами відображення інформації про технологічний процес, а також засобами програмування і дистанційного керування, такими як переносні пульті. Модулі вводу/виводу аналогової та дискретної інформації включають елементи гальванічного поділу сигналів, мультиплексор аналогових входних сигналів і перетворювачі: аналого-цифровий (АЦП), цифро-аналоговий (ЦАП), дискретно-цифровий (ДЦП) та цифро-дискретний (ЦДП).

Конфігурація контролера визначає систему зв'язку каналів з входами і виходами контролера, а також варіанти взаємодії каналів. Взагалі, входи каналів можуть бути пов'язані не тільки з входами контролера, але і з виходами інших каналів. Це дає можливість реалізувати багатозв'язкову (взаємопов'язану) структуру, в якій формуються сигнали корекції, організуються каскадні схеми, виконуються логічні перемикання та програмне керування.

У сучасних промислових комп'ютерах архітектура аналогічна ПК, але вони також мають широкий асортимент цифрових і аналогових модулів введення/виведення, комунікаційних плат, плат розширення та комплектуючих. Висока продуктивність, різноманіття модулів та ефективні програмні засоби дозволяють промисловим комп'ютерам вирішувати різноманітні завдання автоматизації.

## 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ

### 2.1 Розрахунок потрібної потужності і вибір двигунів

Від того, наскільки правильно вибрана потужність електродвигунів, залежить надійність і економічність роботи виробничого механізму. Вибрана потужність повинна відповідати передбачуваному або розрахованому навантаженню. Завищена потужність двигуна невиправдано збільшує габарити і первинну вартість електроприводу, а так само погіршує його економічні показники (знижує ККД і коефіцієнт потужності), що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках системи цехового і заводського електропостачання. Занижена потужність електродвигуна викликає перегрів окремих його частин, що прискорює вихід установки з ладу. Крім того, при перевантаженні двигуна також знижується ККД і коефіцієнт потужності.

Для розрахунку потужності і вибору електродвигунів головного приводу чорнової кліті «КВАРТО» товстолистового стану 3000 скористаємося методом еквівалентних величин. Способом послідовного наближення задалегідь вибираються електродвигуни з подальшими їх перевірками. Якщо електродвигуни задовольняють умовам перевірок, то вони остаточно приймаються для установки як приводні. Інакше вибираються нові електродвигуни і перевіряються до тих пір, поки не виконуватимуться умови перевірок.

Згідно рекомендаціям [54] попередній вибір потужності виконується або за допомогою інформації про встановлену потужність на аналогічних механізмах, або по заданій, або розрахованій діаграмі навантаження, сталій швидкості і коефіцієнту динамічності, що враховує нагрів двигуна в пуско-гальмівних режимах.

Основні параметри встановлених електродвигунів приведені в табл. 1.1.

Головними силовими параметрами процесу прокатки є середній контактний тиск металу на валки і момент прокатки. Для розрахунків цих параметрів існує безліч теоретичних і емпіричних формул, а так само велике

число експериментальних даних, одержаних при дослідженні різних станів. Правильний розрахунок цих параметрів передбачає облік безлічі чинників, таких як швидкість, ступінь і рід деформації та міцності властивості прокатуваного металу.

Для перевірки вибраних електродвигунів необхідно розрахувати моменти прокатки для проходів всіх режимів прокатки і перевірити двигуни для найбільш важкого режиму.

Момент прокатки, що згідно [55] прикладається до валків з боку їх приводу і необхідний для деформації металу, можна визначити по тиску металу на валки, знаючи плече додатку рівнодіючої цього тиску або по витраті енергії при прокатці. Перший спосіб має меншу похибку.

Для розрахунку середнього контактного тиску й зусилля прокатки будемо використовувати методики А.А. Корольова, А.І. Целікова, М.Я. Бровмана тому що вони найбільше підходять для даного сортаменту товстих листів. Залежно від відношення довжини дуги контакту до середньої товщини розкату підбираємо формулу для розрахунку середнього тиску металу на валки для кожного проходу.

Вихідні дані для розрахунку середнього контактного тиску й зусилля прокатки представлено в таблиці 1.2.

Розрахуємо енергосилові параметри для першого проходу.

Відносне обтиснення, тобто відношення абсолютного обтиснення до вихідної товщини смуги:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}, \quad (2.1)$$

де  $h_0$  - вихідна товщина смуги, мм;

$h_1$  - товщина аркуша після одного проходу, мм.

$$\varepsilon = \frac{220 - 196}{220} \cdot 100 = 10,909 \%$$

Коефіцієнт контактної тертя по формулі Эжелунда:

$$\mu = n_1(1,05 - 0,0005T)n_2, \quad (2.2)$$



де  $T$  - температура металу при прокатці,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$n_1$  - коефіцієнт, що характеризує стан поверхні валків;

для сталевих валків із грубою поверхнею  $n_1 = 1$ ,

для чавунних валків із загартованою поверхнею  $n_1 = 0,8$ ;

$n_2$  - коефіцієнт, що враховує швидкість прокатки, при  $V_{np} = 1,5; 10; 15$ ; і  $20$  м/с можна приймати відповідно  $n_2 = 1,0; 0,9; 0,8; 0,75$  і  $0,7$ .

$$\mu = 1 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1085) \cdot 1 = 0,508$$

Довжина зони деформації (довжина контакту металу з валком):

$$l = \sqrt{R \cdot (h_0 - h_1)} \quad (2.3)$$

де  $R = 500$  мм - радіус робочого валка.

$$l = \sqrt{500 \cdot (220 - 196)} = 109,545 \text{ і і}$$

Середнє обтиснення (середня товщина розкату):

$$h_{\bar{n}\delta} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{220 + 196}{2} = 208 \text{ і і} \quad (2.4)$$

Середній тиск металу на валки визначимо по формулі М.Я. Бровмана, відношення  $0,5 < l/h_{cp} < 2,0$ :

$$\frac{l}{h_{\bar{n}\delta}} = \frac{109,545}{208} = 0,527 \quad (2.5)$$

$$p_{cp} = \frac{1,15 \cdot \sigma}{2} \cdot \left( \frac{l}{h_{cp}} + \frac{h_{cp}}{l} \right) \quad (2.6)$$

де  $\sigma$  - границя текучості металу, прокочуємого, у кожному проході, Мпа.

$$p_{\bar{n}\delta} = \frac{1,15 \cdot 60,5}{2} \cdot \left( \frac{109,545}{208} + \frac{208}{109,545} \right) = 84,39 \text{ і і}$$

Повне зусилля прокатки:

$$P = p_{\bar{n}\delta} l b \quad (2.7)$$

де  $b$  - ширина перетину листа, що прокочуємого, у кожному проході, мм.

$$P = 84,39 \cdot 109,545 \cdot 1,25 \cdot 10^3 = 11,57 \text{ і і}$$

Коефіцієнт нейтрального перетину:

$$m = \mu \cdot \frac{l}{h_{\tilde{n}\delta}} = 0,508 \cdot \frac{109,545}{208} = 0,267 \quad (2.8)$$

Коефіцієнт плеча додатка рівнодіючої сили:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{1}{(2 - \varepsilon)} \cdot \left[ 1 - \varepsilon \cdot \left( \frac{e^m}{e^m - 1} - \frac{1}{m} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{(2 - 0,109)} \cdot \left[ 1 - 0,109 \cdot \left( \frac{e^{0,267}}{e^{0,267} - 1} - \frac{1}{0,267} \right) \right] = 0,499 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Момент прокатки одного двигуна:

$$M_{i\delta} = P\psi l = 11,57 \cdot 10^6 \cdot 0,499 \cdot 0,109 = 0,631 \text{ } \dot{I} \dot{I} \dot{I} \quad (2.10)$$

Окружна швидкість прокатки:

$$\omega_{i\delta} = \frac{V_{i\delta}}{R} 10^3, \quad (2.11)$$

де:  $V_{np}$  - лінійна швидкість прокатки, м/с.

$$\omega_{i\delta} = \frac{1,5}{500} 10^3 = 3 \text{ } 1/c$$

Потужність прокатки для одного двигуна:

$$P_{i\delta} = M_{i\delta} \omega_{i\delta} = 0,631 \cdot 10^6 \cdot 3 = 1,894 \text{ } \dot{I} \dot{A} \dot{\delta} \quad (2.12)$$

Кутове прискорення привода при розгоні стану  $\varepsilon_{\delta\dot{a}\dot{c}\dot{a}} = 4,2 \text{ } \delta\dot{a}\dot{a}/c$

Динамічний момент:

$$\dot{I}_{\dot{a}\dot{e}\dot{i}1} = J_{\tilde{n}\dot{o}\dot{i}} \cdot \varepsilon_{\delta\dot{a}\dot{c}\dot{a}} = 87,36 \cdot 10^3 \cdot 4,2 = 366,912 \text{ } \dot{e}\dot{I} \dot{I} \quad (2.13)$$

Момент інерції злитка, якщо маса злитка  $m_{\tilde{n}} = 4340 \text{ } \dot{e}\dot{\tilde{a}}$ , прикладена на окружність валка, що має діаметр  $D = 1000 \text{ } мм$ :

$$J_{\tilde{n}} = \frac{m_{\tilde{n}} D^2}{4} = \frac{4340 \cdot 1000^2}{4} = 1085 \text{ } \dot{e}\dot{\tilde{a}} \cdot \dot{i}^2 \quad (2.14)$$

Динамічний момент при прискоренні стану після захвата металу валками:

$$\dot{I}_{\dot{a}\dot{e}\dot{i}2} = (J_{\tilde{n}\dot{o}\dot{i}} + J_c) \cdot \varepsilon_{\delta\dot{a}\dot{c}\dot{a}} = (87,36 \cdot 10^3 + 1085) \cdot 4,2 = 371,469 \text{ } \dot{e}\dot{I} \dot{I} \quad (2.15)$$

Момент тертя в підшипниках, наведений до осі обертання приводних робочих валків визначимо за наступним даними:

$$M_{mp} = P \mu_n d_n \left( \frac{D}{D_{on}} \right) \quad (2.16)$$

де:  $\mu_n = 0,01$  - коефіцієнт тертя для підшипників ковзання з текстолітовими вкладишами;

$d_n = 0,95$  м - діаметр тертя в підшипниках опорних валків;

$D_{on} = 1,65$  м - діаметр опорного валка.

$$M_{mp} = 11.57 \cdot 10^6 \cdot 0,01 \cdot 0,95 \cdot \left( \frac{1}{1,65} \right) = 66.54 \text{ кНм} \quad (2.17)$$

Статичний момент ( без врахування динамічного моменту):

$$M_{cm} = \frac{(M_{np} + M_{mp})}{\eta}, \quad (2.18)$$

де:  $\eta = 0,92$  - ККД кліті

$$M_{cm} = \frac{(0,631 \cdot 10^6 + 66.54 \cdot 10^3)}{0.92} = 758.55 \text{ кНм}$$

Момент холостого ходу становить 2% від номінального моменту двигуна:

$$M_{xx} = 0,02 M_{\text{дн}} = 0.02 \cdot 828,879 = 16.578 \text{ кНм} \quad (2.19)$$

Момент двигуна при розгоні стану в холосту ( без злитка):

$$M_1 = M_{xx} + M_{\text{дин1}} = 16.578 + 366.912 = 383.49 \text{ кНм} \quad (2.20)$$

Момент двигуна при роботі стану із прискоренням після захвата металу валками (прискорення зі злитком):

$$M_2 = M_{cm} + M_{\text{дин2}} = 758.55 + 371.469 = 1.13 \text{ МНм} \quad (2.21)$$

Діапазон швидкості, тобто відношення окружної швидкості прокатки до номінальної швидкості електродвигуна:

$$D_\omega = \frac{\omega_{np}}{\omega_{\text{нд}}} = \frac{3}{2,618} = 1,146 \quad (2.22)$$

Момент двигуна (фіктивний) при роботі стану із прискоренням після захвата металу валками (розгін вище номінальної швидкості):

$$M_{2\phi} = M_2 \cdot D_\omega = 1.087 \cdot 10^6 \cdot 1,375 = 1.494 \text{ МНм} \quad (2.23)$$

Момент двигуна при прокатці металу зі швидкістю, що встановилася

(верхня горизонталь трапеції швидкості валків), коли  $M_{\text{дин}} = 0$ :

$$M_3 = M_{\text{cm}} = 758.55 \text{ кНм} \quad (2.24)$$

Момент двигуна (фіктивний) при прокатці металу зі швидкістю, що встановилася (верхня горизонталь трапеції швидкості валків),  $M_{\text{дин}} = 0$  коли :

$$M_{3\phi} = M_{\text{cm}} D_{\omega} = 758.55 \cdot 1.146 = 869.236 \text{ кНм} \quad (2.25)$$

Момент двигуна при затримці (гальмуванні) стану з металом у валках (гальмування від номінальної швидкості до швидкості викиду):

$$M_4 = M_{\text{cm}} - M_{\text{дин}2} = 758.55 - 371.469 = 387.083 \text{ кНм} \quad (2.26)$$

Момент двигуна (фіктивний) при затримці (гальмуванні) стану з металом у валках (гальмування до номінальної швидкості):

$$M_{4\phi} = M_4 D_{\omega} = 387.083 \cdot 1.146 = 4.436 \text{ МНм} \quad (2.27)$$

Момент двигуна при гальмуванні стану після викиду металу з валків (перед реверсуванням):

$$M_5 = M_{\text{xx}} - M_{\text{дин}1} = 16.578 - 366.912 = -350.334 \text{ кНм} \quad (2.28)$$

Далі підрахуємо тривалість періодів часу: розгону стану до моменту захвата металу валками  $t_1$ ; прокатка металу із прискоренням  $t_2$ ; прокатка до швидкості, що встановилася, з урахуванням виходу в другу зону (фіктивний час), при різних швидкостях прокатки  $t_{2\phi}$ ; прокатка металу при швидкості, що встановилася  $t_3$ ; прокатка при затримці стану (від, що встановилася до номінальної  $t_{4\phi}$ ); прокатка при затримці стану відбувається при швидкості викиду металу, швидкість захвата дорівнює швидкості викиду металу  $t_4$ ; гальмування стану перед реверсом  $t_5$ .

Захват металу валками здійснюється при частоті обертання  $\omega_{\text{захв}} = 1,4 \text{ 1/с}$  й прискоренні  $\varepsilon_{\text{разг}} = 4.2 \text{ рад/с}$ :

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{захв}}}{\varepsilon_{\text{разг}}} = \frac{1,4}{4.2} = 0,333 \text{ с} \quad (2.29)$$

Прокатка металу із прискоренням до номінальної швидкості:

$$t_2 = \frac{\omega_{нд} - \omega_{захв}}{\varepsilon_{разг}} = \frac{2,618 - 1,4}{4.2} = 0,29 \text{ с} \quad (2.30)$$

Прокатка від номінальної до швидкості, що встановилася, з урахуванням виходу в другу зону (фіктивний час), при різних швидкостях прокатки:

$$t_{2\phi} = \frac{\omega_{np} - \omega_{нд}}{\varepsilon_{разг}} = \frac{3 - 2,618}{4.2} = 0,091 \text{ с} \quad (2.31)$$

Прокатка при затримці стану (від, що встановилася до номінальної швидкості) при прискоренні  $\varepsilon_{торм} = 4.2 \text{ рад} / \text{с}$ :

$$t_{4\phi} = \frac{\omega_{np} - \omega_{нд}}{\varepsilon_{торм}} = \frac{3 - 2,618}{4.2} = 0,091 \text{ с} \quad (2.32)$$

Прокатка при затримці стану відбувається при швидкості викиду металу, швидкість захвата дорівнює швидкості викиду металу  $\omega_{захв} = \omega_{выбр} = 1,4 \text{ 1/с}$ :

$$t_4 = \frac{\omega_{нд} - \omega_{выбр}}{\varepsilon_{торм}} = \frac{2,618 - 1,4}{4.2} = 0,29 \text{ с} \quad (2.33)$$

Час гальмування стану після викиду металу з валків (до зупинки для наступного реверсу):

$$t_5 = \frac{\omega_{выбр}}{\varepsilon_{торм}} = \frac{1,4}{4.2} = 0,333 \text{ с} \quad (2.34)$$

Тривалість прокатки при, швидкості що встановилася (постійної) залежить від довжини злитка, прокатуваного (сляба  $L$ ) і визначається:

$$t_3 = \frac{L}{V_{np}} - \left[ \frac{\omega_{np} + \omega_{захв}}{2\omega_{np}} \cdot (t_2 + t_{2\phi}) + \frac{\omega_{np} + \omega_{выбр}}{2\omega_{np}} \cdot (t_4 + t_{4\phi}) \right] \quad (2.35)$$

де  $L$  - довжина листа у відповідному проході, м;

$V_{np}$  - лінійна швидкість прокатки у відповідному проході, м/с.

$$t_3 = \frac{2,245}{1,5} - \left[ \frac{3+1,4}{2 \cdot 3} \cdot (0,29 + 0,234) + \frac{3+1,4}{2 \cdot 3} \cdot (0,29 + 0,234) \right] = 0,938 \text{ с}$$

Розрахунок енергосилових параметрів прокатки наведений для першого проходу й одного сортаменту, прокатуваного листа, розрахунок для інших режимів зведено в таблицю 2.1.

Перехідні процеси в електродвигунах головного руху чорнової кліті

«Кварто» товстолистового стану 3000 (моменти, струми, лінійна й окружна швидкість прокатки) наведено на рисунках 2.1-2.2.

Усі моменти і якірні струми розраховані для одного електродвигуна.

Таблиця 2.1 - Режим прокатки листів 12/2250/18000 мм (сляб 220/1250/2000 мм, сталь 13Г1С-У, температура нагріву 1100 С°

| $\sigma, \text{МПа}$ |         | $\varepsilon, \%$ |        | $\omega_{np}, 1/c$ |     | $p_{cp}, \text{МПа}$ |         | $P, \text{Н}$ |                    |
|----------------------|---------|-------------------|--------|--------------------|-----|----------------------|---------|---------------|--------------------|
|                      | 1       |                   | 1      |                    | 1   |                      | 1       |               | 1                  |
| 1                    | 60.514  | 1                 | 10.909 | 1                  | 3   | 1                    | 84.394  | 1             | $1.156 \cdot 10^7$ |
| 2                    | 62.202  | 2                 | 10.204 | 2                  | 3.4 | 2                    | 85.755  | 2             | $1.072 \cdot 10^7$ |
| 3                    | 59.75   | 3                 | 8.523  | 3                  | 3   | 3                    | 84.504  | 3             | $1.83 \cdot 10^7$  |
| 4                    | 63.311  | 4                 | 9.317  | 4                  | 3   | 4                    | 85.063  | 4             | $1.842 \cdot 10^7$ |
| 5                    | 66.231  | 5                 | 9.589  | 5                  | 3.4 | 5                    | 86.192  | 5             | $1.803 \cdot 10^7$ |
| 6                    | 70.038  | 6                 | 10.606 | 6                  | 3.4 | 6                    | 87.123  | 6             | $1.822 \cdot 10^7$ |
| 7                    | 75.111  | 7                 | 11.864 | 7                  | 3.4 | 7                    | 89.853  | 7             | $1.879 \cdot 10^7$ |
| 8                    | 78.36   | 8                 | 11.538 | 8                  | 4   | 8                    | 92.618  | 8             | $1.794 \cdot 10^7$ |
| 9                    | 82.16   | 9                 | 10.87  | 9                  | 4.2 | 9                    | 96.521  | 9             | $1.624 \cdot 10^7$ |
| 10                   | 89.87   | 10                | 13.415 | 10                 | 4.2 | 10                   | 103.4   | 10            | $1.825 \cdot 10^7$ |
| 11                   | 95.21   | 11                | 13.38  | 11                 | 4.8 | 11                   | 128.475 | 11            | $2.107 \cdot 10^7$ |
| 12                   | 99.068  | 12                | 13.008 | 12                 | 5.2 | 12                   | 134.814 | 12            | $2.029 \cdot 10^7$ |
| 13                   | 107.664 | 13                | 14.019 | 13                 | 5.2 | 13                   | 149.214 | 13            | $2.175 \cdot 10^7$ |

Продовження таблиці 2.1 - Режим прокатки листів 12/2250/18000 мм (сляб 220/1250/2000 мм, сталь 13Г1С-У, температура нагріву 1100 С°

| $M_{np}, \text{Нм}$ |                      | $P_{np}, \text{Вт}$ |                    | $t_1, c$ |       | $t_2, c$ |      | $t_{2\phi}, c$ |       |
|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------|-------|----------|------|----------------|-------|
|                     | 1                    |                     | 1                  |          | 1     |          | 1    |                | 1     |
| 1                   | $631.332 \cdot 10^3$ | 1                   | $1.894 \cdot 10^6$ | 1        | 0.333 | 1        | 0.29 | 1              | 0.091 |
| 2                   | $534.649 \cdot 10^3$ | 2                   | $1.818 \cdot 10^6$ | 2        | 0.333 | 2        | 0.29 | 2              | 0.186 |
| 3                   | $790.673 \cdot 10^3$ | 3                   | $2.372 \cdot 10^6$ | 3        | 0.333 | 3        | 0.29 | 3              | 0.091 |
| 4                   | $795.564 \cdot 10^3$ | 4                   | $2.387 \cdot 10^6$ | 4        | 0.333 | 4        | 0.29 | 4              | 0.091 |
| 5                   | $752.2 \cdot 10^3$   | 5                   | $2.557 \cdot 10^6$ | 5        | 0.333 | 5        | 0.29 | 5              | 0.186 |
| 6                   | $759.84 \cdot 10^3$  | 6                   | $2.583 \cdot 10^6$ | 6        | 0.333 | 6        | 0.29 | 6              | 0.186 |
| 7                   | $782.931 \cdot 10^3$ | 7                   | $2.662 \cdot 10^6$ | 7        | 0.333 | 7        | 0.29 | 7              | 0.186 |
| 8                   | $691.67 \cdot 10^3$  | 8                   | $2.767 \cdot 10^6$ | 8        | 0.333 | 8        | 0.29 | 8              | 0.329 |
| 9                   | $571.903 \cdot 10^3$ | 9                   | $2.402 \cdot 10^6$ | 9        | 0.333 | 9        | 0.29 | 9              | 0.377 |
| 10                  | $672.515 \cdot 10^3$ | 10                  | $2.825 \cdot 10^6$ | 10       | 0.333 | 10       | 0.29 | 10             | 0.377 |
| 11                  | $721.303 \cdot 10^3$ | 11                  | $3.462 \cdot 10^6$ | 11       | 0.333 | 11       | 0.29 | 11             | 0.52  |
| 12                  | $637.24 \cdot 10^3$  | 12                  | $3.314 \cdot 10^6$ | 12       | 0.333 | 12       | 0.29 | 12             | 0.615 |
| 13                  | $660.174 \cdot 10^3$ | 13                  | $3.433 \cdot 10^6$ | 13       | 0.333 | 13       | 0.29 | 13             | 0.615 |

| $t_3, C$            |                    | $t_{4\phi}, C$            |                    | $t_4, C$            |                    | $t_5, C$                  |                    | $M_1, H\mathcal{M}$  |                     |                      |
|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
|                     | 1                  |                           | 1                  |                     | 1                  |                           | 1                  | $383.49 \cdot 10^3$  |                     |                      |
| 1                   | 0.938              | 1                         | 0.091              | 1                   | 0.29               | 1                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 2                   | 0.798              | 2                         | 0.186              | 2                   | 0.29               | 2                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 3                   | 0.352              | 3                         | 0.091              | 3                   | 0.29               | 3                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 4                   | 0.446              | 4                         | 0.091              | 4                   | 0.29               | 4                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 5                   | 0.308              | 5                         | 0.186              | 5                   | 0.29               | 5                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 6                   | 0.424              | 6                         | 0.186              | 6                   | 0.29               | 6                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 7                   | 0.572              | 7                         | 0.186              | 7                   | 0.29               | 7                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 8                   | 0.36               | 8                         | 0.329              | 8                   | 0.29               | 8                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 9                   | 0.453              | 9                         | 0.377              | 9                   | 0.29               | 9                         | 0.333              |                      |                     |                      |
| 10                  | 0.661              | 10                        | 0.377              | 10                  | 0.29               | 10                        | 0.333              |                      |                     |                      |
| 11                  | 0.52               | 11                        | 0.52               | 11                  | 0.29               | 11                        | 0.333              |                      |                     |                      |
| 12                  | 0.513              | 12                        | 0.615              | 12                  | 0.29               | 12                        | 0.333              |                      |                     |                      |
| 13                  | 0.784              | 13                        | 0.615              | 13                  | 0.29               | 13                        | 0.333              |                      |                     |                      |
| $M_2, H\mathcal{M}$ |                    | $M_{2\phi}, H\mathcal{M}$ |                    | $M_3, H\mathcal{M}$ |                    | $M_{4\phi}, H\mathcal{M}$ |                    | $M_4, H\mathcal{M}$  |                     |                      |
|                     | 1                  |                           | 1                  |                     | 1                  |                           | 1                  | $350.334 \cdot 10^3$ |                     |                      |
| 1                   | $1.13 \cdot 10^6$  | 1                         | $1.295 \cdot 10^6$ | 1                   | $7.586 \cdot 10^5$ | 1                         | $4.436 \cdot 10^5$ |                      | 1                   | $387.083 \cdot 10^3$ |
| 2                   | $1.02 \cdot 10^6$  | 2                         | $1.324 \cdot 10^6$ | 2                   | $6.482 \cdot 10^5$ | 2                         | $3.594 \cdot 10^5$ |                      | 2                   | $276.755 \cdot 10^3$ |
| 3                   | $1.345 \cdot 10^6$ | 3                         | $1.542 \cdot 10^6$ | 3                   | $9.739 \cdot 10^5$ | 3                         | $6.904 \cdot 10^5$ |                      | 3                   | $602.457 \cdot 10^3$ |
| 4                   | $1.351 \cdot 10^6$ | 4                         | $1.549 \cdot 10^6$ | 4                   | $9.8 \cdot 10^5$   | 4                         | $6.973 \cdot 10^5$ |                      | 4                   | $608.53 \cdot 10^3$  |
| 5                   | $1.302 \cdot 10^6$ | 5                         | $1.691 \cdot 10^6$ | 5                   | $9.304 \cdot 10^5$ | 5                         | $7.259 \cdot 10^5$ |                      | 5                   | $558.965 \cdot 10^3$ |
| 6                   | $1.311 \cdot 10^6$ | 6                         | $1.703 \cdot 10^6$ | 6                   | $9.4 \cdot 10^5$   | 6                         | $7.383 \cdot 10^5$ |                      | 6                   | $568.489 \cdot 10^3$ |
| 7                   | $1.34 \cdot 10^6$  | 7                         | $1.74 \cdot 10^6$  | 7                   | $9.686 \cdot 10^5$ | 7                         | $7.755 \cdot 10^5$ |                      | 7                   | $597.161 \cdot 10^3$ |
| 8                   | $1.236 \cdot 10^6$ | 8                         | $1.888 \cdot 10^6$ | 8                   | $8.641 \cdot 10^5$ | 8                         | $7.526 \cdot 10^5$ |                      | 8                   | $492.59 \cdot 10^3$  |
| 9                   | $1.095 \cdot 10^6$ | 9                         | $1.756 \cdot 10^6$ | 9                   | $7.233 \cdot 10^5$ | 9                         | $5.644 \cdot 10^5$ |                      | 9                   | $351.822 \cdot 10^3$ |
| 10                  | $1.217 \cdot 10^6$ | 10                        | $1.952 \cdot 10^6$ | 10                  | $8.452 \cdot 10^5$ | 10                        | $7.6 \cdot 10^5$   |                      | 10                  | $473.743 \cdot 10^3$ |
| 11                  | $1.287 \cdot 10^6$ | 11                        | $2.36 \cdot 10^6$  | 11                  | $9.159 \cdot 10^5$ | 11                        | $9.982 \cdot 10^5$ |                      | 11                  | $544.441 \cdot 10^3$ |
| 12                  | $1.191 \cdot 10^6$ | 12                        | $2.366 \cdot 10^6$ | 12                  | $8.196 \cdot 10^5$ | 12                        | $8.902 \cdot 10^5$ |                      | 12                  | $448.179 \cdot 10^3$ |
| 13                  | $1.225 \cdot 10^6$ | 13                        | $2.433 \cdot 10^6$ | 13                  | $8.537 \cdot 10^5$ | 13                        | $9.578 \cdot 10^5$ | 13                   | $482.21 \cdot 10^3$ |                      |

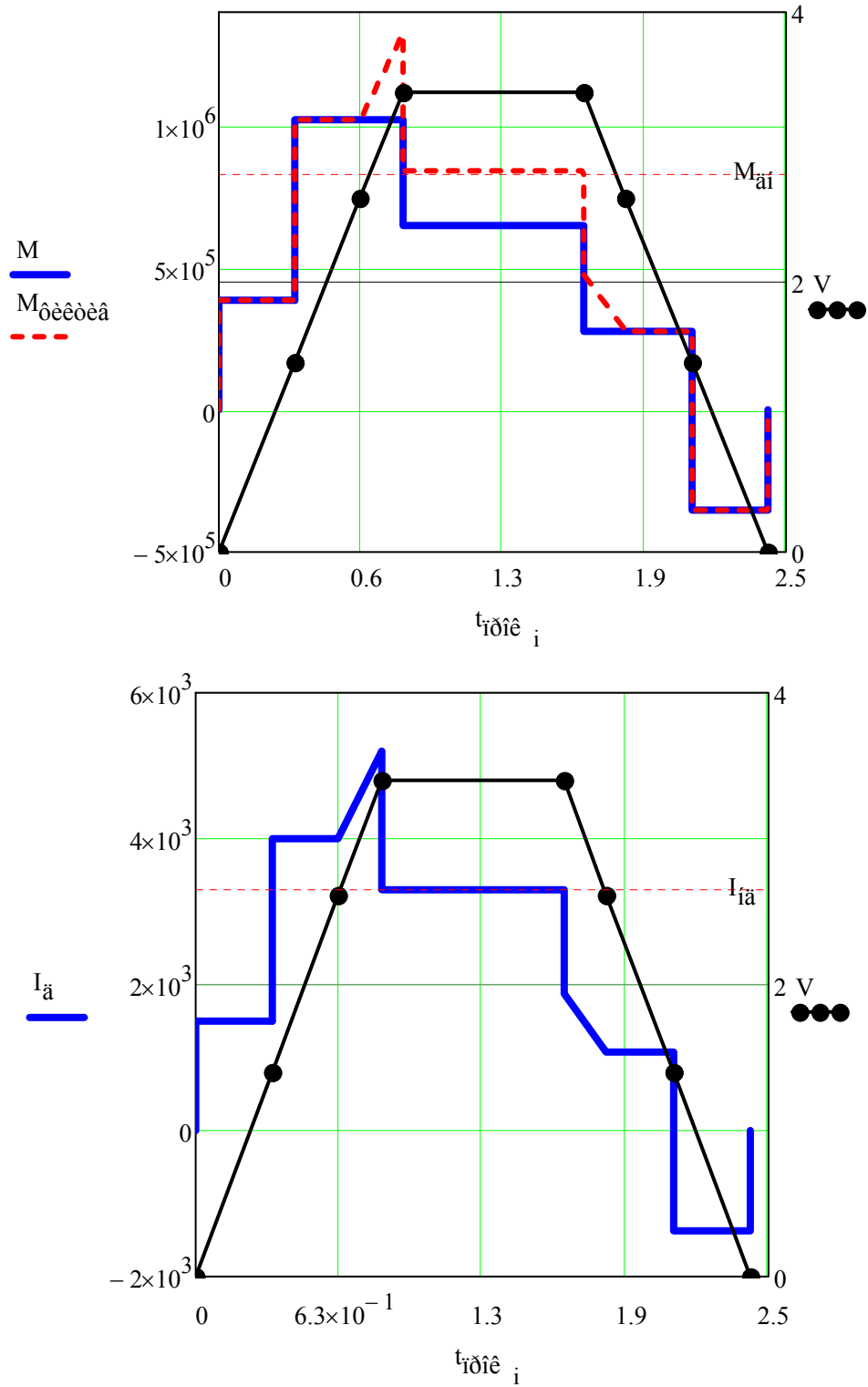


Рисунок 2.1 – Другий прохід перехідні процеси в електродвигуні головного руху чорнової кліті «Кварто» товстолистого стану 3000 (моменти, струми, лінійна й окружна швидкість прокатки)



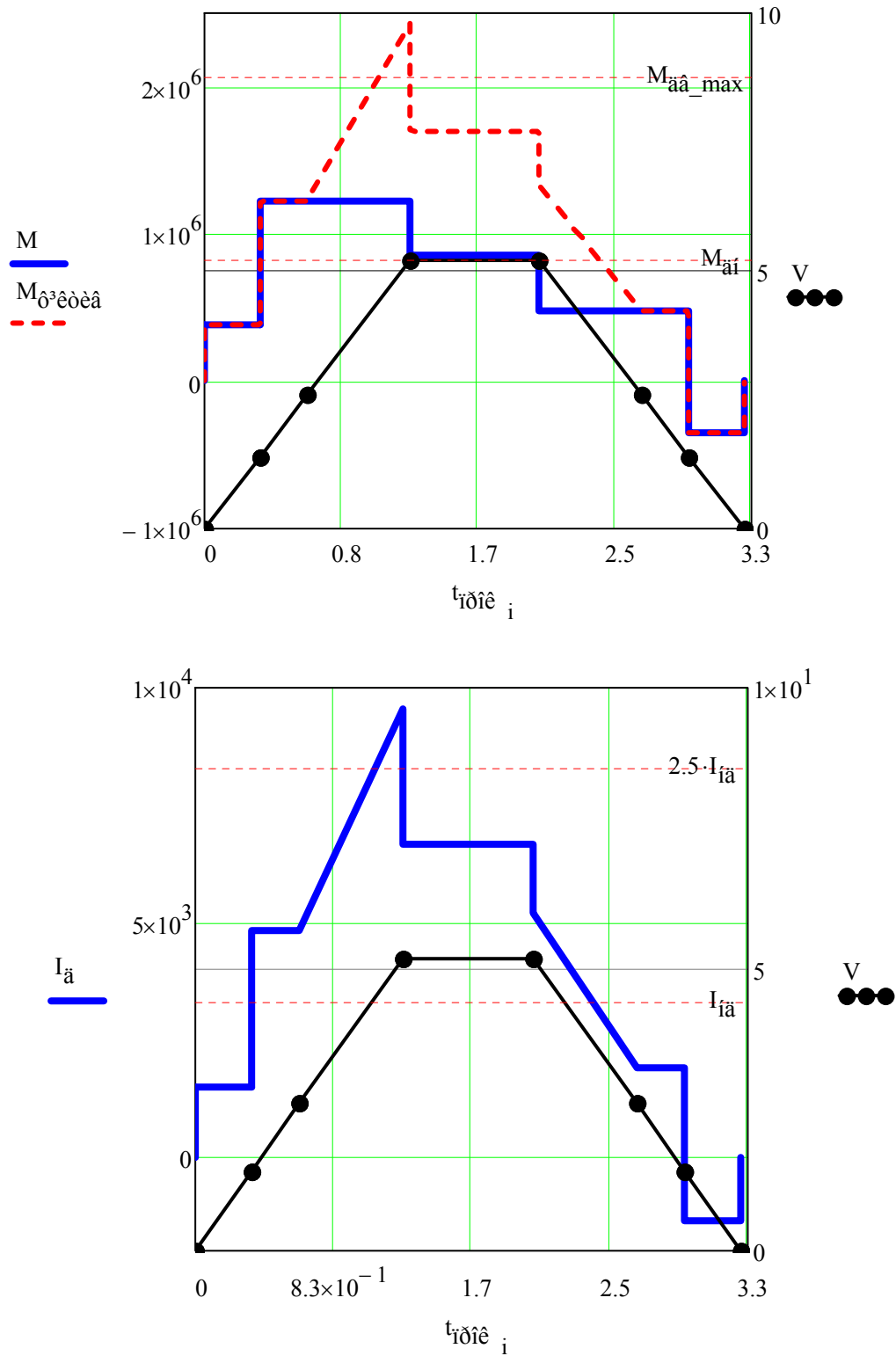


Рисунок 2.2 – Тринадцятий прохід перехідні процеси в електродвигуні головного руху чорнової кліті «Кварто» товстолистового стану 3000 (моменти, струми, лінійна й окружна швидкість прокатки)

Перевірка приводного електродвигуна на нагрів й перевантажувальну здатності.

Для перевірки моменту двигуна по середньоквадратичному (еквівалентному) моменту (струму) підраховуємо значення добутків  $M^2t$  для кожного періоду окремо. Для першого проходу, що й прокочується аркуша  $12 \times 2250 \times 18000$  мм:

$$M_1^2 t_1 = (383.49 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,33 = 4,9 \cdot 10^{10} (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.36)$$

$$M_2^2 t_2 = (1,087 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,29 = 370,31 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.37)$$

$$M_{2\phi}^2 t_{2\phi} = (1.494 \cdot 10^6)^2 \cdot 0.234 = 152,151 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.38)$$

$$M_3^2 t_3 = (7.153 \cdot 10^6)^2 \cdot 0.572 = 539,7 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.39)$$

$$M_{4\phi}^2 t_{4\phi} = (472.855 \cdot 10^3)^2 \cdot 0.234 = 43,45 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.40)$$

$$M_4^2 t_4 = (343.87 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,29 = 34,291 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.41)$$

$$M_5^2 t_5 = (-350.334 \cdot 10^3)^2 \cdot 0.333 = 40,911 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.42)$$

Підраховуємо суму добутків  $M^2t$  усіх проходів металу через валки для кожного періоду ( $t_1, t_2, t_{2\phi}, t_3, t_{4\phi}, t_4, t_5$ ) окремо. Одержимо для періодів:

$$\sum M_1^2 t_1 = 637.278 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.43)$$

$$\sum M_2^2 t_2 = 5.784 \cdot 10^{12} (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.44)$$

$$\sum M_3^2 t_3 = 5.146 \cdot 10^{12} (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.45)$$

$$\sum M_4^2 t_4 = 949.042 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.46)$$

$$\sum M_5^2 t_5 = 531.848 \cdot 10^9 (\dot{I} \dot{i})^2 \cdot \tilde{n} \quad (2.47)$$

Тривалість циклу (ритму) прокатки одного злитка становить (час холостого ходу без кантування 2 сек з кантуванням 3):

$$t_u = (t_1 + t_2 + t_4 + t_5) \cdot n + \sum t_{2\phi} + \sum t_3 + \sum t_{4\phi} + \sum t_{xx} \quad (2.48)$$

де  $n = 13$  - кількість проходів

$$t_{\text{д}} := \sum_i t_1 + \sum_i t_2 + \sum_i t_4 + \sum_i t_5 + \sum_{i=1}^n t_{3_i} + \sum_i t_{\text{xx}} + t_{\text{зап}} + t_{\text{дн}}$$

$$t_{\text{д}} = 55.33 \text{ с}$$

Перевірка двигуна на перегрів його обмоток по середньоквадратичному моменту (еквівалентному струму в якорі):

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M^2 t}{t_{\text{д}}}} = \sqrt{\frac{31.79 \cdot 10^{12}}{55.33}} = 757.99 \text{ кНм} \quad (2.49)$$

Таким чином,  $M_{\text{екв}} = 757.99 \text{ кНм} < M_{\text{дн}} = 828.879 \text{ кНм}$ , і двигун не буде перегріватися.

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$k_{\text{завп}} = \frac{M_{\text{екв}}}{M_{\text{дн}}} = \frac{757.99 \cdot 10^3}{828,879 \cdot 10^3} \cdot 100 = 91 \% \quad (2.68)$$

Наведений розрахунок для першого проходів, для інших проходів добутоків  $M^2 t$ , суми  $\sum M^2 t$ , часу циклу  $t_{\text{д}}$ , представлено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.2 – Режим прокатки листів 12/2250/18000 мм (сляб  
220/1250/2000 мм, сталь 13Г1С-У, температура нагріву 1100 С°

| $M_1^2 \cdot t_1$             |                       | $M_2^2 \cdot t_2$             |                      | $M_3^2 \cdot t_3$                   |                       | $M_4^2 \cdot t_4$  |                      | $M_5^2 \cdot t_5$ |                     |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
|                               | 1                     |                               | 1                    |                                     | 1                     |                    | 1                    |                   | 1                   |
| 1                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 1                             | $370.313 \cdot 10^9$ | 1                                   | $5.397 \cdot 10^{11}$ | 1                  | $43.451 \cdot 10^9$  | 1                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 2                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 2                             | $301.533 \cdot 10^9$ | 2                                   | $3.354 \cdot 10^{11}$ | 2                  | $22.212 \cdot 10^9$  | 2                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 3                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 3                             | $524.923 \cdot 10^9$ | 3                                   | $3.338 \cdot 10^{11}$ | 3                  | $105.256 \cdot 10^9$ | 3                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 4                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 4                             | $529.672 \cdot 10^9$ | 4                                   | $4.283 \cdot 10^{11}$ | 4                  | $107.389 \cdot 10^9$ | 4                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 5                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 5                             | $491.533 \cdot 10^9$ | 5                                   | $2.669 \cdot 10^{11}$ | 5                  | $90.608 \cdot 10^9$  | 5                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 6                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 6                             | $498.751 \cdot 10^9$ | 6                                   | $3.748 \cdot 10^{11}$ | 6                  | $93.722 \cdot 10^9$  | 6                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 7                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 7                             | $520.798 \cdot 10^9$ | 7                                   | $5.365 \cdot 10^{11}$ | 7                  | $103.414 \cdot 10^9$ | 7                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 8                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 8                             | $442.691 \cdot 10^9$ | 8                                   | $2.686 \cdot 10^{11}$ | 8                  | $70.367 \cdot 10^9$  | 8                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 9                             | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 9                             | $347.563 \cdot 10^9$ | 9                                   | $2.37 \cdot 10^{11}$  | 9                  | $35.896 \cdot 10^9$  | 9                 | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 10                            | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 10                            | $429.288 \cdot 10^9$ | 10                                  | $4.723 \cdot 10^{11}$ | 10                 | $65.085 \cdot 10^9$  | 10                | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 11                            | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 11                            | $480.627 \cdot 10^9$ | 11                                  | $4.364 \cdot 10^{11}$ | 11                 | $85.96 \cdot 10^9$   | 11                | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 12                            | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 12                            | $411.439 \cdot 10^9$ | 12                                  | $3.445 \cdot 10^{11}$ | 12                 | $58.251 \cdot 10^9$  | 12                | $40.911 \cdot 10^9$ |
| 13                            | $4.902 \cdot 10^{10}$ | 13                            | $435.284 \cdot 10^9$ | 13                                  | $5.713 \cdot 10^{11}$ | 13                 | $67.432 \cdot 10^9$  | 13                | $40.911 \cdot 10^9$ |
| $M_{2\phi}^2 \cdot t_{2\phi}$ |                       | $M_{4\phi}^2 \cdot t_{4\phi}$ |                      | $\dot{I}_{3\phi}^2 \cdot t_{3\phi}$ |                       |                    |                      |                   |                     |
|                               | 1                     |                               | 1                    |                                     | 1                     |                    |                      |                   |                     |
| 1                             | $152.51 \cdot 10^9$   | 1                             | $17.895 \cdot 10^9$  | 1                                   | $7.087 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 2                             | $326.528 \cdot 10^9$  | 2                             | $24.053 \cdot 10^9$  | 2                                   | $5.658 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 3                             | $216.185 \cdot 10^9$  | 3                             | $43.349 \cdot 10^9$  | 3                                   | $4.384 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 4                             | $218.141 \cdot 10^9$  | 4                             | $44.227 \cdot 10^9$  | 4                                   | $5.624 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 5                             | $532.278 \cdot 10^9$  | 5                             | $98.118 \cdot 10^9$  | 5                                   | $4.502 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 6                             | $540.095 \cdot 10^9$  | 6                             | $101.491 \cdot 10^9$ | 6                                   | $6.321 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 7                             | $563.969 \cdot 10^9$  | 7                             | $111.986 \cdot 10^9$ | 7                                   | $9.049 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 8                             | $1.173 \cdot 10^{12}$ | 8                             | $186.386 \cdot 10^9$ | 8                                   | $6.271 \cdot 10^{11}$ |                    |                      |                   |                     |
| 9                             | $1.162 \cdot 10^{12}$ | 9                             | $119.996 \cdot 10^9$ | 9                                   | $6.1 \cdot 10^{11}$   |                    |                      |                   |                     |
| 10                            | $1.435 \cdot 10^{12}$ | 10                            | $217.573 \cdot 10^9$ | 10                                  | $1.216 \cdot 10^{12}$ |                    |                      |                   |                     |
| 11                            | $2.894 \cdot 10^{12}$ | 11                            | $517.671 \cdot 10^9$ | 11                                  | $1.467 \cdot 10^{12}$ |                    |                      |                   |                     |
| 12                            | $3.441 \cdot 10^{12}$ | 12                            | $487.171 \cdot 10^9$ | 12                                  | $1.359 \cdot 10^{12}$ |                    |                      |                   |                     |
| 13                            | $3.64 \cdot 10^{12}$  | 13                            | $563.962 \cdot 10^9$ | 13                                  | $2.254 \cdot 10^{12}$ |                    |                      |                   |                     |
|                               |                       |                               |                      |                                     |                       | $t_y = 52.942$     | с                    |                   |                     |
|                               |                       |                               |                      |                                     |                       | $M_{экс} = 757.99$ | кНм                  |                   |                     |
|                               |                       |                               |                      |                                     |                       | $M_{дн} = 828.879$ | кНм                  |                   |                     |
|                               |                       |                               |                      |                                     |                       | $k_{загр} = 91$    | %                    |                   |                     |

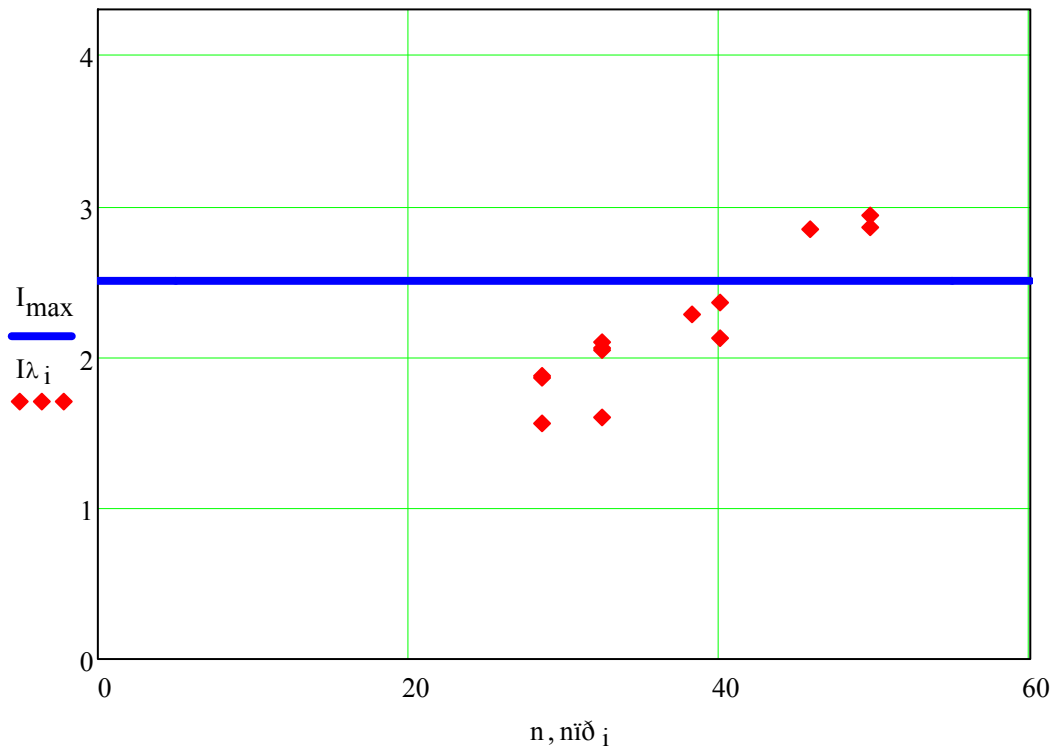
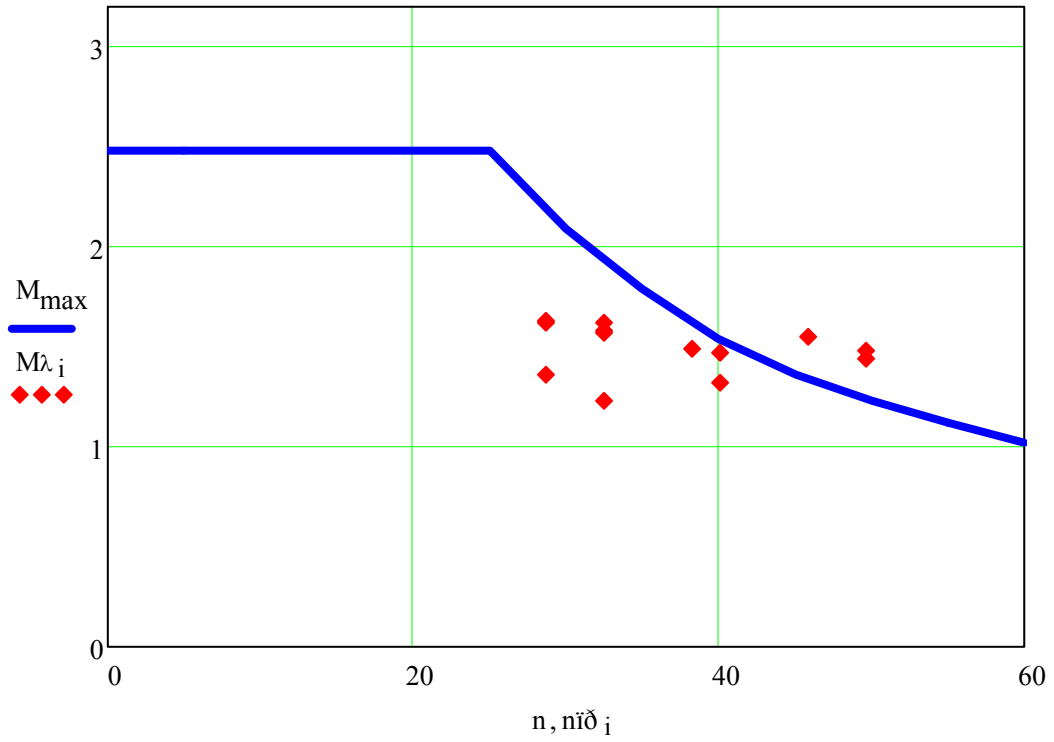


Рисунок 2.3 - Розрахункові величини максимальних моментів і струмів  
головного привода

## 3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ

### 3.1 Вибір тиристорних перетворювачів електродвигунів

Основні технічні дані комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм  $I_H$  і номінальна напруга  $U_H$ . Номінальний струм електроприводу вибирається згідно струму ТП та може бути більше номінального струму двигуна. При виборі електроприводу слід перевірити, щоб максимальний струм двигуна не перевищував максимально припустимий струм електропривода.

Враховуючи всі вимоги до системи автоматизації для живлення якорів електродвигунів головного руху чорнової кліті «КВАРТО» залишаємо встановленні на реальному стані комплектні реверсивні тиристорні електроприводи четвертого покоління 47UZ1 і 47UZ2 типу КТЕ 6300/750-0121-00-П262 (залишаємо тільки силову частину), на номінальний випрямлений струм 6300 А, номінальну випрямлену напругу 750 В, 12-пульсна схема випрямлення, електродвигунові, з реверсом струму в якірному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, без лінійного контактора і пристрою динамічного гальмування, без вбудованих пристроїв збудження двигунів, тахогенератора і управління електромеханічним гальмом; з програмованими засобами керування, з двозонною системою регулювання швидкості із зворотнім зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості FGH 6 КК-5000G-90G-NG-V-J/50P фірми «Хюбнер» (Німеччина), з мережевими зв'язками PROFIBUS і CAN.

Охолодження силових шаф примусове, з вбудованими вентиляторами.

Комутація якірних ланцюгів електродвигунів здійснюється за допомогою автоматів постійного струму типу ВАТИ 48-4000/10, номінальний робочий струм 6300 А, номінальна напруга 1050 В, номінальна напруга ланцюгів керування 220 В змінного струму, частота 50 Гц.

### **3.2 Вибір перетворювачів обмоток збудження електродвигунів**

Для живлення обмоток збудження електродвигунів встановлюємо на комплектні тиристорні збудники 47UZV1 і 47UZV2 типу КТЕВ-500/460-0011-00-П247, номінальний випрямлений струм 500 А, номінальна випрямлена напруга 460 В, нереверсивні, трансформаторного виконання з програмованими засобами керування, з системою регулювання струму, з мережевим зв'язком CAN.

Тиристорні збудники КТЕВ-500/460-0011-00-П247 живляться від шафи високовольтного вводу 6 кВ, через трансформатори.

Обґрунтування вибору трансформаторів для живлення силової схеми і ланцюгів збудження буде розглянуто пізніше.

### **3.3 Резервування в силовій схемі та в ланцюзі збудження**

В якості резервного тиристорного перетворювача для живлення якірних ланцюгів електродвигунів головного руху чорнової кліті «Кварто» застосовуємо комплектний реверсивний тиристорний електропривод четвертого покоління 47UZR типу КТЕ 6300/750-0121-00-П263, на номінальний випрямлений струм 6300 А, номінальну випрямлену напругу 750 В, 12-пульсна схема випрямлення, однодвигуновий, з реверсом струму в якірному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, без лінійного контактора і пристрою динамічного гальмування, без вбудованих пристроїв збудження двигуна, тахогенератора і управління електромеханічним гальмом; з програмованими засобами управління, з двозонною системою регулювання швидкості із зворотним зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості FGH 6 KK-5000G-90G-NG-V-J/50P фірми «Хюбнер» (Німеччина), з мережевими зв'язками PROFIBUS і CAN.

В якості резервного тиристорного збудника для живлення обмоток збудження електродвигунів застосовуємо комплектний тиристорний збудник

47UZVR типу КТЕВ-500/460-0011-00-П247, номінальний випрямлений струм 500 А, номінальна випрямлена напруга 460 В, нереверсивний, трансформаторного виконання з програмованими засобами керування, з системою регулювання струму, з мережевим зв'язком CAN.

Тиристорний збудник КТЕВ-500/460-0011-00-П247 живиться від шафи високовольтного вводу 6 кВ.

Принципова схема живлення якірних ланцюгів електродвигунів зображена на рисунку 3.1.

### **3.4 Поворотна рама SIMOREG CM**

Тиристорні перетворювачі КТЕ 6300/750-0121-00-П262 комплектуються пристроями SIMOREG CM. Основна сфера застосування пристрою SIMOREG CM це оснащення і модернізація приводів із постійним струмом в існуючих установках.

У сучасній техніці із постійним струмом існують установки, виготовлені 5-10 років тому, в яких використовується аналогова техніка.

При оснащенні або модернізації таких установок двигун, механічна частина і силові частини залишаються незмінними (як в нашому випадку). Замінюється тільки частина, керована через блок керування 6RA70. Внаслідок цього виходить економічний сучасний привод постійного струму з повним набором функцій повністю випробуваного аналогово-цифрового приладу з серії SIMOREG DC MASTER 6RA70.

Пристосування до конфігурації вже наявних компонентів проводиться за допомогою простого параметрування.

Блок керування 6RA70 містить силові частини для живлення обмотки збудження з розрахунковим струмом до 40 А.



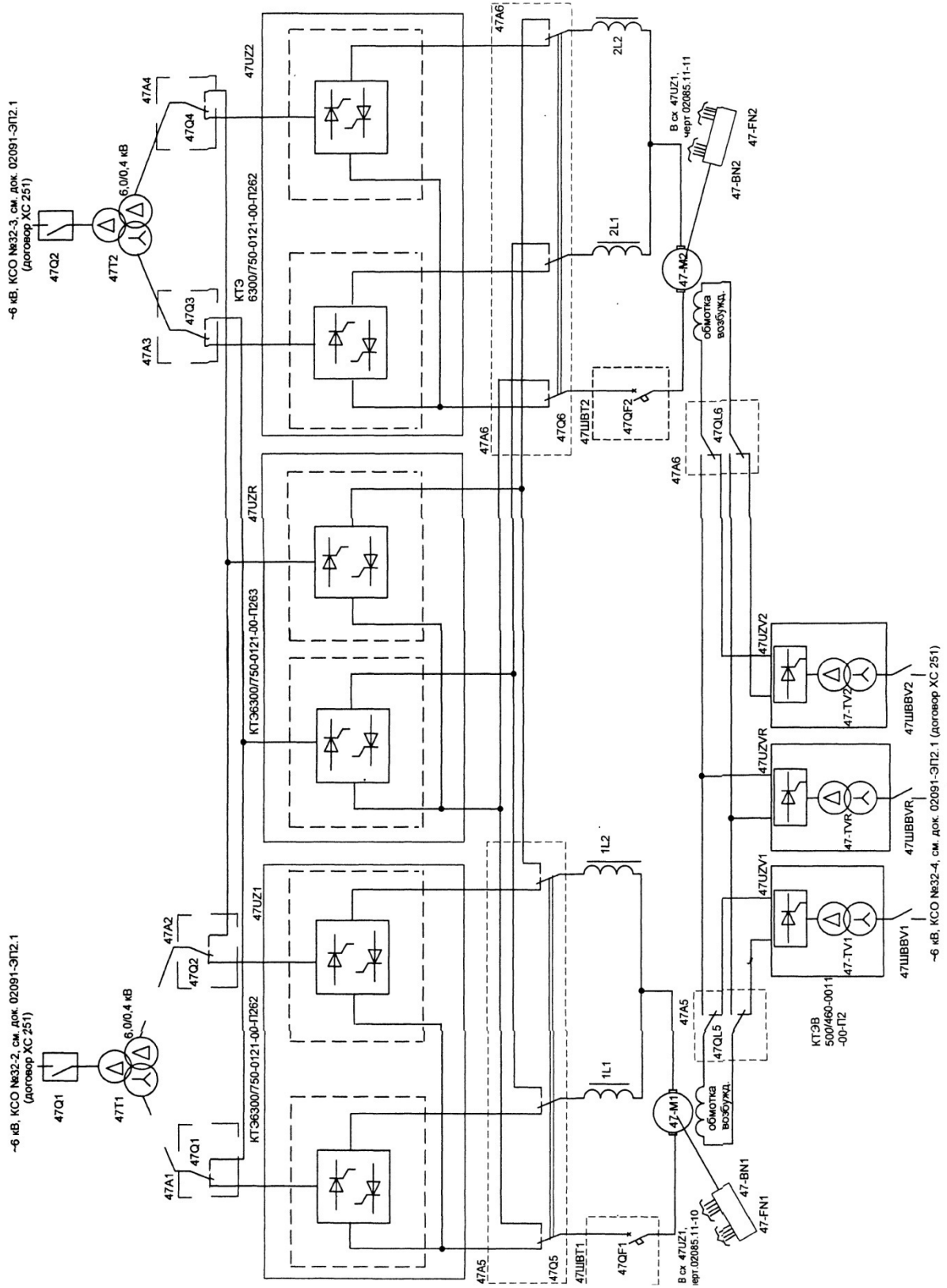


Рисунок 3.1 – Принципова схема живлення якірного ланцюга

Параметри вибраних елементів силової частини схеми, а також схеми обмотки збудження зведені в таблиці 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 - Параметри перетворювачів КТЕ 6300/750-0121-00-П262

| № п/п | Найменування параметру  | Значення |
|-------|---|----------|
| 1     | Номінальна випрямлена напруга, В  | 750      |
| 2     | Номінальний випрямлений струм, А  | 6300     |
| 3     | Максимальний припустимий струм, А   | 12600    |
| 4     | 12-пульсна схема випрямлення  |          |
| 5     | Укомплектовані поворотними рамами (для 12-пульсних схем) SIMOREG DC MASTER 6RA70                        |          |
| 6     | Укомплектовані імпульсними датчиками швидкості FGH 6 КК-5000G-90G-NG-V-J/50P фірми «Хюбнер» (Німеччина) |          |
| 7     | Маса перетворювача, кг  | 525      |
| 8     | Охолодження силових шаф примусове, з вбудованими вентиляторами.   |          |

Таблиця 3.2 - Параметри збудників КТЕВ-500/460-0011-00-П247

| № п/п | Найменування параметру  | Значення |
|-------|---|----------|
| 1     | Номінальна випрямлена напруга, В                                | 460      |
| 2     | Номінальний випрямлений струм, А                                | 500      |
| 3     | нереверсивні  |          |
| 4     | трансформаторного виконання                                     |          |
| 5     | з програмованими засобами керування системою регулювання струму |          |
| 6     | Маса перетворювача, кг  | 75       |

Таким чином, умова вибору перетворювачів для живлення якорів електродвигунів виконується:

$$U_{н.п} = 750 \text{ В} = U_{н.дв} = 750 \text{ В}$$

$$I_{н.п} = 6300 \text{ А} > I_{н.дв} = 3320 \text{ А}$$

Умова вибору перетворювачів для живлення обмоток збудження електродвигунів теж виконується:

$$U_{н.пр} = 460 \text{ В} > U_{н.в} = 137 \text{ В}$$

$$I_{н.пр} = 500 \text{ А} = I_{н.в} = 400 \text{ А}$$

Після вибору перетворювачів слід перейти до вибору трансформаторів для живлення як силової частини схеми, так і ланцюга збудження.

### 3.5 Розрахунок і вибір силових трансформаторів

Силовий трансформатор для живлення РТП вибирається по розрахункових значеннях фазних струмів в первинній  $I_1$ , і вторинній  $I_2$  обмотках. Вторинна напруга  $U_{2\phi}$  силового трансформатора, який живить перетворювач з навантаженням на якір електродвигуна з номінальною напругою  $U_H$  і струмом, визначається по формулі:

$$U_{2\phi} = K_{он} \cdot K_u \cdot K_c \cdot K_{\alpha} \cdot K_{\Gamma} \cdot K_H \cdot U_H \text{ (В)}, \quad (3.1)$$

де:  $U_H = 750 \text{ В}$  - номінальна напруга двигуна;

$K_{он} = 1,2$  - коефіцієнт, що враховує запас по напрузі, необхідний для виконання умов оптимальної настройки контуру струму на модульний і симетричний оптимум;

$K_u = 0,428$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення напруг  $U_{2\phi}/U_{до}$  в реальному випрямлячі і залежить від схеми випрямляча [56];

$K_c = 1,08$  - коефіцієнт запасу по напрузі, який враховує можливе зниження напруги живлячої мережі, відповідний зниженню напруги на 10% від номінального значення [7, стор. 48];

$K_{\alpha} = 1,1$  - коефіцієнт, що враховує неповне відкриття тиристорів при максимальному керуючому сигналі [7, стор. 48];

$K_T=1,05$  - коефіцієнт, що враховує падіння напруги в обмотках трансформатора і вентилях за рахунок комутації [7, стор. 48]. Таким чином, вираз (3.1) приймає вигляд:

$$U_{2\phi} = 1.2 \cdot 0.428 \cdot 1.08 \cdot 1.1 \cdot 1.05 \cdot 750 = 480.498 \text{ В}$$

Розрахункове діючі значення струму фази вторинної обмотки [7, (2.2)]:

$$I_{2\text{расч}} = k_1 k'_1 I_d \text{ (А)} \quad (3.2)$$

де:  $I_d / I_n = 3320 \text{ А}$  - номінальний струм двигуна;

$k_1=0,815$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення в ідеальному  $\delta$  в ідеальному випрямлячі [7, табл. 2.1];

$k'_1 = 1,1$  - коефіцієнт, що враховує відхилення форми анодного струму вентиля від прямокутної;

Тоді, вираз (3.2) приймає вигляд:

$$I_{2\text{расч}} = 0,815 \cdot 1,1 \cdot 3320 = 2976,38 \text{ А}$$

$$k'_{\text{тр}} = \frac{U_c}{U_{2\text{л}}} \quad (3.3)$$

Приймаємо напругу живлячої мережі рівною:  $U_c = 6000 \text{ В}$ , тоді коефіцієнт трансформації дорівнює:

$$k'_{\text{тр}} = \frac{6000}{832,25} = 7,2$$

де:  $U_{2\text{л}}$  - лінійна вторинна напруга:

$$U_{2\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot 480,498 = 832,25 \text{ В} \quad (3.4)$$

Діюче розрахункове значення струму в первинній обмотці [7, (2.3)]:

$$I_1 = \frac{I_{2\text{расч}}}{k'_{\text{тр}}} = \frac{2976,38}{7,2} = 413,386 \text{ А} \quad (3.5)$$

Розрахункова питома потужність трансформатора з двома вторинними обмотками [7, (2.5)]:

$$P_{\text{тр.расч}} = 1,3 \cdot K_{\text{тр.расч}} \cdot K_{\text{он}} \cdot K_c \cdot K_\alpha \cdot K_i \cdot U_n \cdot I_n \text{ (кВА)}, \quad (3.6)$$

де  $K_{\text{тр.расч}}$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення  $P_{\text{тр}} / (I_n U_n)$  для

ідеального випрямляча з навантаженням на проти ЕРС [56].

$$P_{\text{тр.расч}} = 1,3 \cdot 1,045 \cdot 1,2 \cdot 1,08 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 1,1 \cdot 750 \cdot 3320 = 5570 \text{ кВА}$$

В моменти прокатування металу напруга живлячої мережі 6 кВ знижується на 10-15 %. Ці висновки зроблені в ході експериментальних досліджень показників якості мережі 6 кВ другої секції п/ст №15 стана 3000. Діаграми змін діючих та миттєвих значень мережевих напруг представлені нижче на рисунках 3.6-3.8. Спад амплітуди живлячої напруги на 10-15 % викликає зниження максимальної вихідної напруги ТП до величини 816 В, замість теоретичних 960 В, тобто різниця дорівнює 140 В. Це призводить до невикористання, а точніше до неможливості повного використання заявленої потужності приводних електродвигунів та відсутності «форсування» перетворювача, необхідного для гарантованої реалізації запропонованих режимів обтискання. Від цієї мережі отримують живлення інші споживачі - головні приводи прокатних клітей обтискного стану та стану 2250. Кардинально змінити ситуацію найкраще (збільшити жорсткість мережі) без додаткових капітальних вкладень неможливо. Один з варіантів вибрати живлячі трансформатори з більшим значенням  $U_{2л}$ . Це, перш за все дозволить покращити гармонічний склад мережевої напруги та дещо збільшить діюче значення напруги, однак повною мірою не забезпечить утримування амплітуд на рівні  $U_M = 6000\sqrt{2} = 8,485 \text{ кВ}$  в моменти прокатування металу.

Тож, для живлення дванадцятипульсних РТП вибираємо два трансформатора TV1, TV2 типу ТРДТП - 12500/10У2, основні технічні параметри яких зведені в таблицю 3.3.

Вибрані трансформатори, типу ТРДТП - 12500/10У2 задовольняють всім умовам перевірки, а саме [7, стр.50]:

$$P_{\text{н.тр.выбор}} = 8036 \text{ кВ} \cdot A > P_{\text{тр.расч}} = 5570 \text{ кВ} \cdot A, U_{2л.\text{выбор}} = 1000 \text{ В} > U_{2л} = 832,25 \text{ В}$$

$$I_{2.\text{выбор}} = 3800 \text{ А} > I_{2.\text{расч}} = 2976,38 \text{ А}, U_{1л} = 6000 \text{ В} = U_{\text{сети.л}} = 6000 \text{ В}$$

Отже, трансформатори TV1, TV2 вибрані вірно.

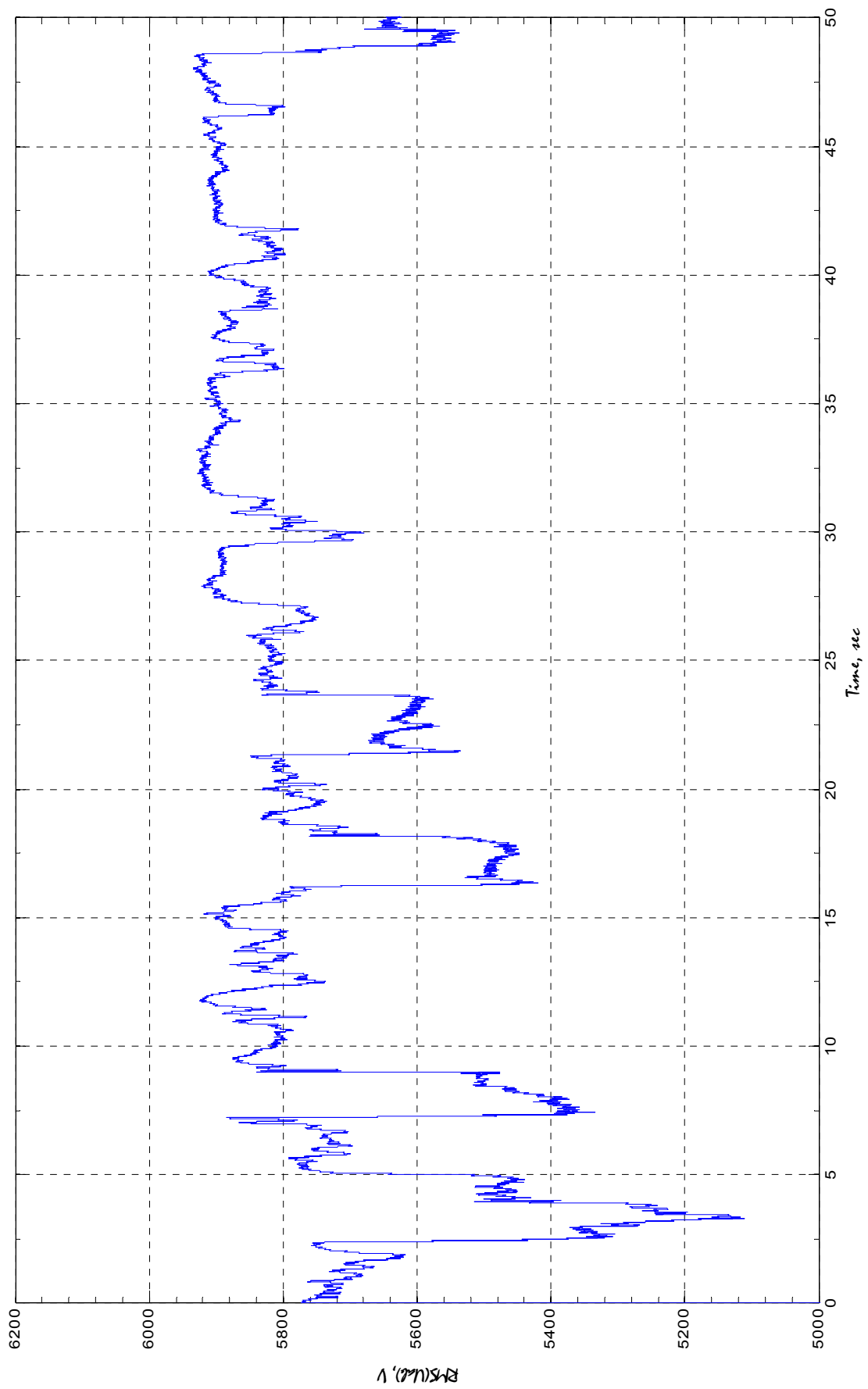


Рисунок 3.3 - Стан мережі 6 кВ другої секції п/ст №15 стана 3000

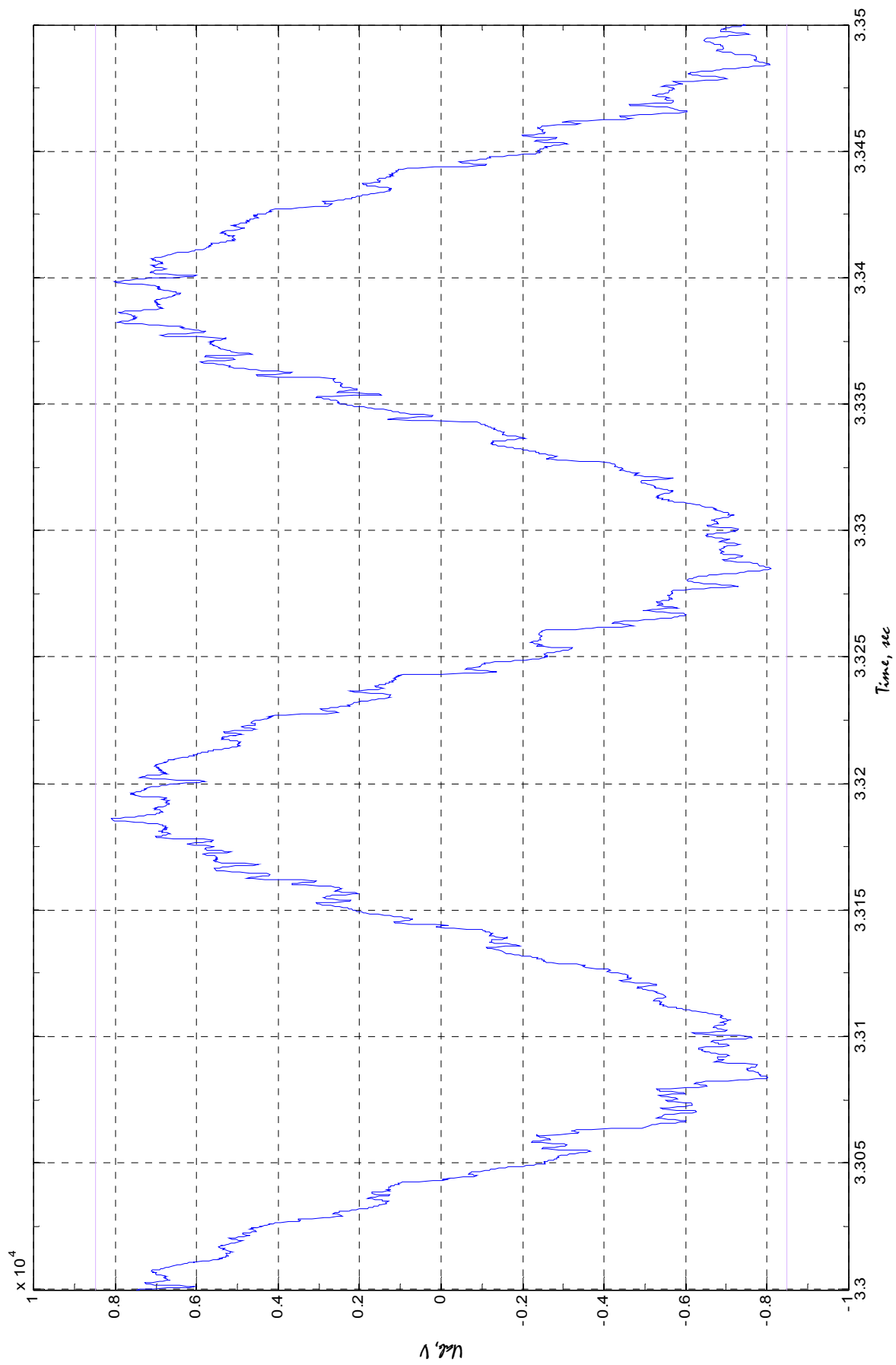


Рисунок 3.4 - Стан мережі 6 кВ другої секції п/ст №15 стана 3000

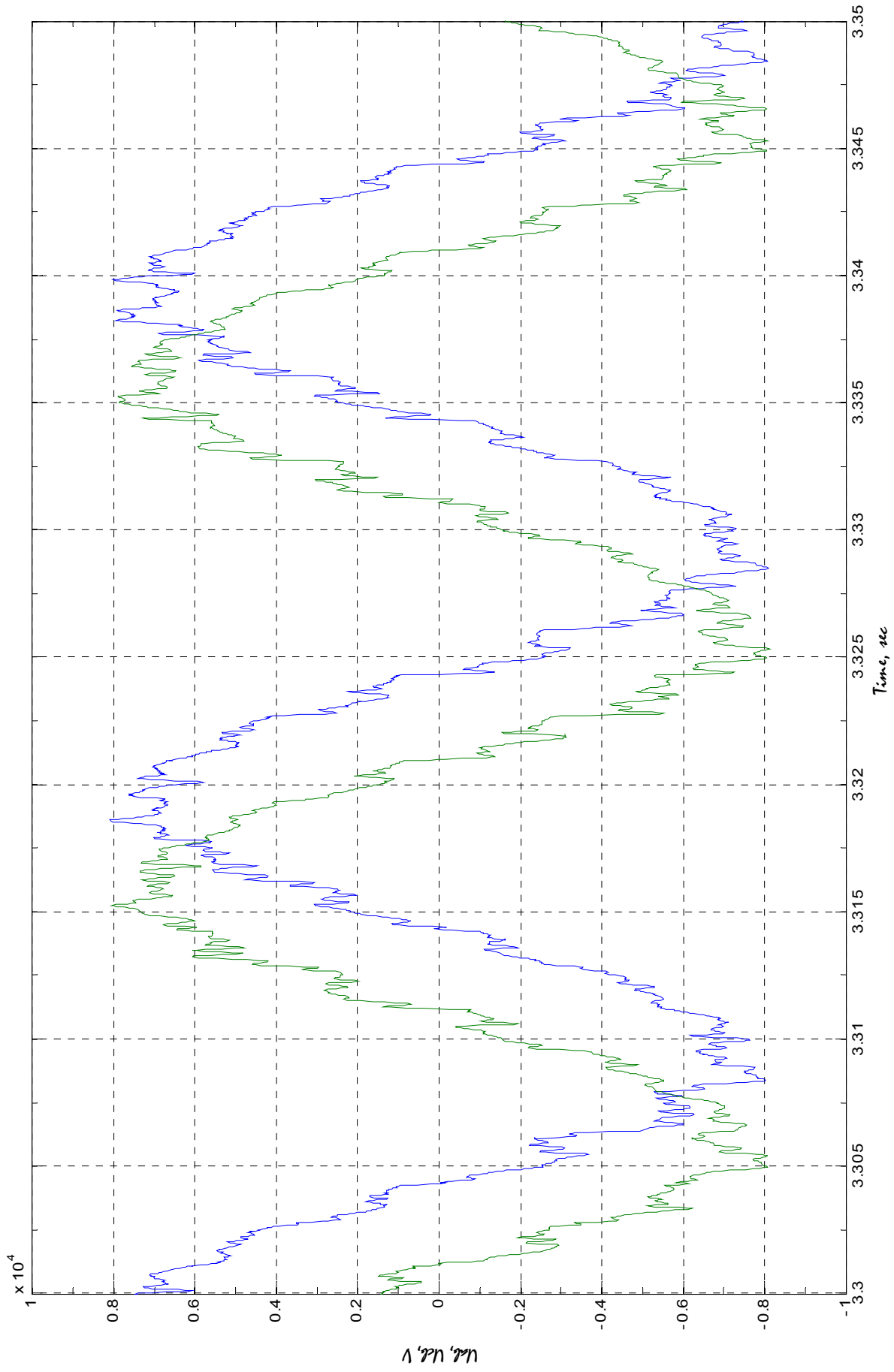


Рисунок 3.5 - Стан мережі 6 кВ другої секції п/ст №15 стана 3000



Таблиця 3.3 - Основні параметри силових трансформаторів типу ТРДТП - 12500/10У2

| Параметр                           | Позначення                             | Значення |
|------------------------------------|--|----------|
| Потужність трансформатора          | $P_{н.тр}, кВ \cdot А$                 | 7160     |
| Первинна лінійна напруга           | $U_{1л}, кВ$                           | 6        |
| Напруга на вентиляційній обмотці   | $U_{2л}, кВ$                           | 1050     |
| Втрати к.з. трансформатора         | $\Delta P_{кз}, кВт$                   | 73       |
| Втрати х.х. трансформатора         | $\Delta P_{хх}, кВт$                   | 11       |
| Напруга крізного к.з.              | $U_{кз}, \%$                           | 5,9      |
| Струм холостої ходи                | $I_{хх}, \%$                           | 0,8      |
| Ідеальна випрямлена напруга        | $U_{до} = 1.35 \cdot U_{2\text{л}}, В$ | 1417     |
| Струм трансформатора               | $I_{тр}, А$                            | 2·2500   |
| Виконання 3                        |  |          |
| Габаритні розміри 3800/3540/4750 м |  |          |
| Повна маса 28.6 т                  |  |          |

Проведемо розрахунок додаткових параметрів, необхідних для комплексного проектування.

Активний опір фази трансформатора, приведений до ланцюга постійного струму [56]:

$$R_{\text{фТ}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \times U_{2л}^2}{P_{н.тр}^2} = \frac{73000 \cdot 1050^2}{7160000^2} = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.7)$$

Повний опір фази трансформатора

$$Z_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}, \%} \cdot U_{2л}}{100 \cdot I_2} = \frac{5,9 \cdot 1050}{100 \cdot 2500} = 0,025 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{тр}}^2 - R_{\text{фТ}}^2} = \sqrt{(0,025)^2 - (2,91 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6 \quad (3.9)$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = \frac{X_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{0,6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,91 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.10)$$

де  $f_c = 50$  Гц - частота живлячої мережі.

Трансформатори типу ТРДТП - 12500/10У2 кожних РТП якірного ланцюга мають одну первинну (мережеву) обмотку і дві вторинні (вентильні) обмотки, схему і групу з'єднання яких -  $Y/\Delta Y$  -0-11.

### 3.6 Розрахунок і вибір згладжуючих реакторів

Згладжуючий реактор, що включається послідовно із якорем двигуна необхідний для:

- забезпечення безперервності струму двигуна в певному діапазоні навантажень і частот його обертання;
- обмеження амплітуди змінної складової струму якоря двигуна до допустимої величини;

Розрахунок індуктивності згладжуючого реактора проводимо по методиці, згідно рекомендаціям [56]. Для забезпечення безперервності струму при мінімальному навантаженні РТП та куті регулювання, індуктивність згладжуючого реактора визначається, згідно [56]:

$$L_{\text{ср.расч}} = \frac{e_H \cdot \sqrt{2} \cdot E_{\text{до}}}{i_e \cdot \omega_1 \cdot I_{\text{мин}}} - L_{\text{яд}} - b \cdot L_{\text{тр}} - L_{\text{ур}} \text{ (Гн)} \quad (3.11)$$

де  $E_{\text{до}}$  - ЕРС умовної холостої ходи ТП при  $\alpha = 0$  [7, (2.14)]:

$$E_{\text{до}} = U_{2л} \cdot 1.35 = 1269 \text{ В} \quad (3.12)$$

$e_H$  - коефіцієнт, який визначається залежністю  $e_H = f(\alpha_{\text{макс}})$ .

Згідно [7, рис. 2.2]:  $e_H = 0,24$ ;

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot m = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12 = 3768 \text{ 1/с} \quad (3.13)$$

$I_{\text{мин}}$  - мінімальний струм якоря;

$L_{\text{яд}}$  - індуктивність якоря двигуна:

$$L_{\text{яд}} = k \frac{U_{\text{нд}}}{I_{\text{нд}} \cdot \omega_{\text{нд}} \cdot p_{\text{д}}} = 0.1 \frac{750}{3320 \cdot 2,6189} = 958,765 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.14)$$

$B=2$  - коефіцієнт для трифазної мостової схеми;

$i_e = 0,03$  - відносна величина ефективного значення першої гармоніки випрямленого струму.

Вираз (3.11) приймає вигляд:

$$L_{\text{ср.расч}} = \frac{0,24 \cdot \sqrt{2} \cdot 1269}{0,0337683320} - 958,765 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3} = -5,776 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Для згладжування пульсацій випрямленого струму кожен вибраний перетворювач комплектується двома згладжуючими реакторами типу СРОСЗ - 2000М (номінальний випрямлений струм 3200 А, індуктивність 0,32 мГн, втрати в міді 4000 Вт, габаритні розміри 1000/1200/2350 мм, маса 2500 кг) - всього 4 шт.

Згладжуючі реактори СРОСЗ-2000 виконують функції згладжування випрямленого струму в ланцюгах якорів електродвигунів, а так само знижують швидкість наростання струму в аварійних режимах, тим самим забезпечуючи селективність дії захисту на стороні постійного струму.

$$L_{\text{ср.выбор}} = 0,32 \text{ мГн}$$

$$R_{\text{ср}} = 0,35 \text{ мОм}$$

### 3.7 Розрахунок силових параметрів якорного ланцюга двигуна

Об'єктом регулювання виступає система ТП-Д. Передаточна функція тиристорного перетворювача, що живить якорний ланцюг двигуна:

$$W_{\text{тп}}(p) = \frac{K_{\text{тп}}}{T_{\mu} p + 1}, \quad (3.15)$$

де  $K_{\text{тп}}$  - статичний коефіцієнт підсилення ТП:

$$K_{\text{тп}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{E_{\text{до}}}{U_{\text{у.макс}}} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right), \quad (3.16)$$

де  $E_{\text{до}} = 1269 \text{ В}$  - ЕРС умовної холостої ходи ТП;

$U_{\text{у.макс}} = 10 \text{ В}$  - максимальний керуючий сигнал:

$$K_{\text{тп}} = 199.334$$

$T_{\mu} = 0,0025 \text{ с}$  - сума всіх малих постійних часу контура.

Отже, ТП структурно можна представити у наступному вигляді:

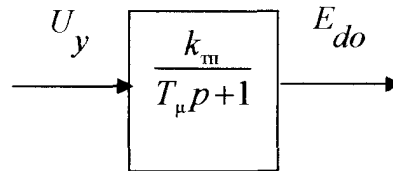


Рисунок 3.6 - Структурне представлення ТП

Повний активний опір якірного ланцюга:

$$R_{\text{я}} = R_{\text{я,дв}} + 2 \cdot R_{\text{фт}} + R_{\text{ср}} + R_0 \text{ (Ом)}, \quad (3.17)$$

де  $R_{\text{я,дв}}$  - активний опір якірного ланцюга, приведений до робочої температури:

$$R_{\text{я,дв}} = 1,24 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}) \text{ (Ом)}, \quad (3.18)$$

де  $R_{\text{я}}, R_{\text{дп}}, R_{\text{ко}}$  - активні опори якірного ланцюга, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки відповідно при  $20^{\circ}\text{C}$  (табл.1.5);

1,24 - коефіцієнт приведення до робочої температури.

$$R_{\text{я,дв}} = 1,24 \cdot (0,0108 + 0,0022 + 0,006) = 0,0236 \text{ Ом}$$

$R_{\text{фт}}$  - активний опір фази трансформатора, приведений до ланцюга постійного струму (3.7);

$R_{\text{ср}} = 0,35 \text{ мОм}$  - активний опір згладжуючого реактора;

$R_0 = 0,023 \text{ Ом}$  - активний опір ошиновки ланцюгів. Вираз (3.17) приймає вигляд:

$$R_0 = 0,0236 + 2 \cdot 1,0065 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} + 0,023 = 0,049 \text{ Ом}$$

Індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{\text{я}} = L_{\text{я}} + 2 \cdot L_{\text{фт}} + L_{\text{ср}}, \quad (3.19)$$

$$L_{\text{я}} = 2,395 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 4,78 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 10^{-5} = 3,09 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Постійна часу якірного ланцюга буде:

$$T_{\text{е}} = \frac{L_{\text{е}}}{R_{\text{е}}}, \quad (3.20)$$

Якірний ланцюг двигуна можна представити у вигляді блоку:

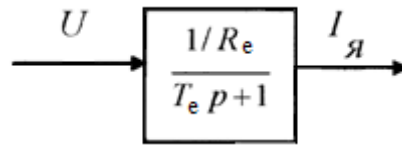


Рисунок 3.7 - Структурне представлення якірного ланцюга двигуна

Рівняння руху в операторній формі має наступний вигляд:

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c} = \frac{1}{Jp} \quad (3.20)$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{I_я(p) - I_c(p)} = \frac{C\Phi}{Jp} \quad (3.21a)$$

Досить часто вираз (3.21) записується через постійну механічну часу, яка визначається:

$$T_M = \frac{\Sigma J \cdot R_2}{(C\Phi)^2} \quad (c), \quad (3.22)$$

де:  $U = 82500 \text{ кгм}^2$  - сумарний момент інерції електроприводу.

Визначається

сумою моментів інерції двигуна і механізму, приведеного до валу двигуна (2.21);

$C\Phi$  - добуток конструкційної постійної двигуна на номінальний потік;

Конструкційна постійна:

$$C_{дв} = \frac{2p \cdot N_{дв}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_{дв}}, \quad (3.23)$$

де:  $2p$  - число пар полюсів двигуна (табл.1.5);

$N_{дв}$  - число активних стрижнів якірної обмотки двигуна (табл. 1.5);

$\alpha_{дв}$  - число паралельних гілок якірної обмотки двигуна (табл. 1.5).

$$C_{дв} = \frac{18 \cdot 2790}{2 \cdot 3,14 \cdot 18} = 444,27$$

Номінальний потік двигуна:

$$\Phi_{н.дв} = \frac{E_n}{C_{дв} \cdot \omega_n} \quad (Вб), \quad (3.24)$$

де  $E_n$  - номінальна ЕРС двигуна:

$$E_H = U_H - I_H \cdot R_{я.дв} - \Delta U_{щ} \text{ (В)}, \quad (3.25)$$

де  $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$  - падіння напруги на щітковому контакті.

$$E_H = 750 - 3320 - 0,0236 \cdot 2 = 673,65 \text{ В}$$

Вираз (3.24) приймає вигляд:

$$\Phi_{н.дв} = \frac{673,65}{444,27 \cdot 2,62} = 0,579 \text{ Вб}$$

Таким чином, добуток конструкційної постійної двигуна на номінальний потік:

$$C\Phi_{н.дв} = 444,27 \cdot 0,579 = 253,91 \text{ В} \quad (3.26)$$

Вираз (3.23) приймає вигляд:

$$T_M = \frac{82500 \cdot 0,049}{257,23^2} = 0,061 \text{ с},$$

Механічну частину електроприводу можна представити структурною схемою (рис. 3.8).

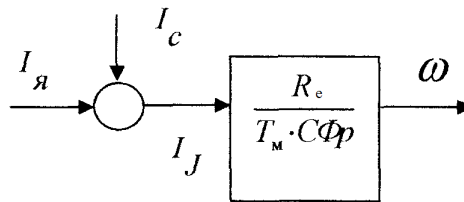


Рисунок 3.8- Структурне представлення механічної частини ЕП

### 3.8 Розрахунок параметрів трансформатора для живлення ланцюга обмотки збудження

Розрахунок проводимо аналогічно пункту 3.9. Вторинна напруга  $U_{2ф}$  силового трансформатора, який живить перетворювач обмотки збудження двигуна:

$$U_{2ф} = K_{он} K_u K_c K_\alpha K_\Gamma U_{в.н} \text{ (В)}, \quad (3.27)$$

де  $U_{в.н} = 137 \text{ В}$  - падіння напруги на обмотці збудження двигуна;

$K_{он} = 1,2$  - коефіцієнт, що враховує запас по напрузі, необхідний для виконання умов оптимальної настройки контуру струму на модульний і симетричний оптимум;

$K_u = 0,428$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення напруг  $U_{2\phi} / U_{d0}$  В

реальному випрямлячі і залежний від схеми випрямляча [56];

$K_c = 1,08$  - коефіцієнт запасу по напрузі, який враховує можливе зниження напруги живлячої мережі, відповідний зниженню напруги на 8% від номінального значення [56];

$K_\alpha = 1,1$  - коефіцієнт, що враховує неповне відкриття тиристорів при максимальному керуючому сигналі [56];

$K_r = 1,05$  - коефіцієнт, що враховує падіння напруги в обмотках трансформатора і вентилях за рахунок комутації. Вираз (3.27) приймає вигляд:

$$U_{2\phi} = 1,2 \cdot 0,428 \cdot 1,08 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 137 = 87,77 \text{ В}$$

Розрахункове діючі значення струму фази вторинної обмотки [56]:

$$I_{2\text{расч}} = k_1 k_1' I_{d.v} \quad (\text{А}) \quad , \quad (3.28)$$

де  $I_{d.v} = I_{BH} - 400 \text{ А}$  - номінальний струм збудження двигуна;

$k_1 = 0,815$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення  $I_{2\phi} / I_n$  в ідеальному випрямлячі;

$k_1' = 1,1$  - коефіцієнт, що враховує відхилення форми анодного струму вентиля від прямокутної;

Тоді, вираз (3.2) приймає вигляд:

$$I_{2\text{расч}} = 0,815 \cdot 1,1 \cdot 400 = 358,6 \text{ А}$$

Приймаємо напругу живлячої мережі рівною  $U_c = 6000 \text{ В}$ , тоді коефіцієнт трансформації:

$$k'_{\text{тр}} = \frac{U_c}{U'_{2л}}, \quad (3.29)$$

де  $U'_{2л}$  - лінійна вторинна напруга:

$$U'_{2л} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot 87,77 = 152,022 \text{ В} \quad (3.30)$$

Вираз (3.29) приймає вигляд:

$$k'_{\text{тр}} = \frac{6000}{152,022} = 39,468,$$

Діюче розрахункове значення струму в первинній обмотці:

$$I_1' = \frac{I_{2\text{расч}}}{k_{\text{тр}}} = \frac{358,6}{39,468} = 9,086 \text{ А} \quad (3.31)$$

Розрахункова типова потужність трансформатора з двома вторинними обмотками:

$$P_{\text{тр.расч}} = 1,3 \cdot K_{\text{тр.расч}} \cdot K_{\text{он}} \cdot K_c \cdot K_\alpha \cdot K_\Gamma \cdot K_i \cdot U_{\text{в.н}} \cdot I_{\text{в.н}} \text{ (кВА)}, \quad (3.32)$$

де  $K_{\text{тр.расч}}$  - коефіцієнт, що характеризує співвідношення  $P_{\text{тр}} / (I_{\text{н}} U_{\text{н}})$  для ідеального випрямляча з навантаженням на проти ЕДС [56].

$$P_{\text{тр.расч}} = 1,3 \cdot 1,045 \cdot 1,2 \cdot 1,08 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 1,37 \cdot 400 = 122,58 \text{ кВА}$$

Таким чином для живлення обмоток збудження вибираємо трансформатори TV3 - TV5 типу ТСЗП - 400/10УЗ, основні технічні дані яких зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 - Основні параметри трансформаторів типу ТСЗП - 400/10УЗ

| Параметр                         | Позначення                                  | Значення |
|----------------------------------|---|----------|
| Потужність трансформатора        | $P_{\text{н.тр}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$ | 364      |
| Первинна лінійна напруга         | $U_{1\text{л}}, \text{кВ}$                  | 6        |
| Напруга на вентиляційній обмотці | $U_{2\text{л}}, \text{кВ}$                  | 409      |
| Втрати к.з. трансформатора       | $\Delta P_{\text{кз}}, \text{кВт}$          | 4,7      |
| Втрати х.х. трансформатора       | $\Delta P_{\text{хх}}, \text{кВт}$          | 1,6      |
| Напруга крізного к.з.            | $U_{\text{кз}}, \%$                         | 5,6      |
| Струм холостого ходу             | $I_{\text{хх}}, \%$                         | 2,6      |
| Ідеальна випрямлена напруга      | $U_{\text{до}} = 1,35 \cdot U_{2\text{л}}$  | 552,15   |
| Струм трансформатора             | $I_{\text{тр}}, \text{А}$                   | 630      |
| Виконання - 3                    |   |          |

Вибрані трансформатори, типу ТСЗП - 400/10УЗ задовольняють всім умовам перевірки, а саме [56]:

$$P_{\text{н.тр.вибр}} = 364 \text{ кВ} \cdot \text{А} > P_{\text{тр.роз}} = 122,58 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$U_{2\text{л.вибр}} = 409 \text{ В} > U_{2\text{л}} = 155,022 \text{ В}$$

$$I_{2\text{.вибр}} = 653 \text{ А} > I_{2\text{.роз}} = 358,6 \text{ А}$$



Отже, трансформатори TV3 - TV5 вибрані вірно.

Проведемо розрахунок додаткових параметрів, необхідних для комплексного проектування.

Активний опір фази трансформатора, приведений до ланцюга постійного струму:

$$R_{\text{ф.в}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U'_{2\text{л}}{}^2}{P_{\text{н.треб}}^2} = \frac{1600 \cdot 155,022^2}{351000^2} = 3,121 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (3.33)$$

Повний опір фази трансформатора:

$$Z_{\text{тр.в}} = \frac{U_{\text{кз}} \cdot U'_{2\text{л}}}{100 \cdot I_2} = \frac{5,6 \cdot 310}{100 \cdot 630} = 0,0266 \text{ Ом} \quad (3.34)$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_{\text{тр.в}} = \sqrt{Z_{\text{тр.в}}^2 - R_{\text{ф.в}}^2} = \sqrt{(0,0266)^2 - (3,121 \cdot 10^{-4})^2} = 0,026 \text{ Ом} \quad (3.35)$$

Індуктивність фази трансформатора:

$$L_{\text{тр.в}} = \frac{X_{\text{тр.в}}}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{0,026}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 8,28 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \quad (3.36)$$

де  $f_c = 50$  Гц - частота живлячої мережі.

### 3.9 Розрахунок параметрів ланцюга збудження двигуна

Передаточна функція тиристорного збудника:

$$W_{\text{тп.з}}(p) = \frac{K_{\text{тп.з}}}{T_{\mu} p + 1}, \quad (3.37)$$

де:  $K_{\text{тп.з}}$  - статичний коефіцієнт підсилення ТП:

$$K_{\text{тп}} = \frac{E_{\text{до.в}}}{U_{\text{у.макс}}} \quad (3.38)$$

де  $E_{\text{до.в}} = 418,5$  В - ЕДС умовної холостої ходи перетворювача;

$U_{\text{у.макс}} = 10$  У - максимальний керуючий сигнал.

$$K_{\text{тп.з}} = \frac{552,15}{10} = 55,215$$

$T_{\mu} = 0,0025$  с - сума всіх малих постійних часу контура.

Таким чином, ТП структурно можна представити у наступному вигляді:

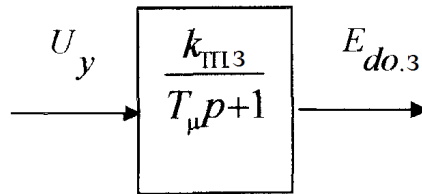


Рисунок 3.9 Структурне представлення ТП

Передаточна функція ланцюга збудження двигуна представлена на рис.

3.10

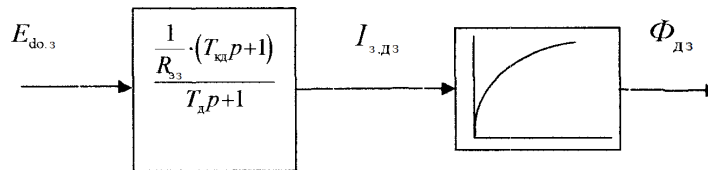


Рисунок 3.10 Передаточна функція ланцюга збудження

На рис. 3.10 у вигляді позначень представлені:

- $R_{\Sigma}$  - еквівалентний опір ланцюга збудження двигуна;
- $T_{кд}$  - постійна часу ланцюга контура вихрових струмів;
- $T_{д}$  - електромагнітна постійна часу ланцюга збудження двигуна.

Опір обмотки збудження, приведений до робочої температури визначається виразом:

$$R_{\Sigma} = 1,24 \cdot r_{\Sigma} = 1,24 \cdot 0,38 = 0,471 \text{ Ом} \quad (3.39)$$

Еквівалентний опір ланцюга збудження двигуна:

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma} + R_{\text{ф.т.в}} = 0,471 + 3,121 \cdot 10^{-4} = 0,4713 \text{ Ом} \quad (3.40)$$

Електромагнітна постійна часу ланцюга обмотки збудження:

$$T_{д} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{1,188}{0,4713} = 2,52 \text{ с} \quad (3.41)$$

де  $L_{\Sigma}$  - еквівалентна індуктивність ланцюга обмотки збудження:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{дв.в}} + L_{\text{тр.в}} = 1,188 + 8,28 \cdot 10^{-5} = 1,188 \text{ Гн} \quad (3.42)$$

де  $L_{\text{дв.в}}$  - індуктивність обмотки збудження двигуна:

$$L_{\text{дв.в}} = 2p \cdot w_{\Sigma} \cdot K_{\text{ф}} \text{ (Гн)}, \quad (3.43)$$

де  $2p = 18$  - кількість полюсів двигуна;

$w_b = 44$  - кількість витків обмотки збудження;

$K_\phi$  - коефіцієнт посилення магнітної системи визначається по кривій намагнічування двигуна:

$$K_\phi = \frac{\Delta\Phi_{дв}}{\Delta I_{дв.в}}, \quad (3.44)$$

де  $\Delta\Phi_{дв}$ ,  $\Delta I_{дв.в}$  - приріст потоку і струму збудження в прямолінійній зоні кривої намагнічування в зоні номінальних величин.

$$K_\phi = \frac{0,036}{24} = 1,5 \cdot 10^{-3}, \frac{B \cdot c}{A}$$

Тоді індуктивність обмотки збудження (3.44):

$$\Delta I_{дв.в} = 18 \cdot 44 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,188 \text{ Гн}$$

Постійна часу ланцюга контура вихрових струмів визначається виразом:

$$T_{кд} = \frac{0,03 \cdot 2p \cdot w_n \cdot \Phi_{дв}}{I_{в.н} R_{эв}} = \frac{0,03 \cdot 18 \cdot 44 \cdot 0,58}{400 \cdot 0,4713} = 0,073 \text{ с} \quad (3.45)$$

## 4 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ ДВОЗОННОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ У ДВОХ ФАЗОВИХ ПРОСТОРАХ

Для підтримки системою заданих параметрів на заданому рівні вони, як правило, будуються замкнутими, а підвищення якісних показників їх роботи досягається введенням спеціальних корегуючих ланок (системи з послідовною, паралельною і змішаною корекцією) або організацією ковзаючих режимів. Системи з паралельною, послідовною і змішаною корекцією звичайно є багатоконтурними системами регулювання. Кожна з цих систем має свої переваги і недоліки.

При застосуванні паралельної корекції підвищується стабільність характеристик за рахунок ланок охоплених зворотним зв'язком. Вплив перешкод на корегуючий пристрій, включений в ланцюг зворотного зв'язку, значно менше, ніж при включенні його в прямий канал системи, оскільки сигнал знімається з виходу системи, що є фільтром низьких частот. Основними недоліками паралельної корекції є відносна складність розрахунку системи і велика трудомісткість настройки. Контур утворений місцевим зворотним зв'язком, може сам по собі виявитися нестійким: виникає також трудність з підсумовуванням сигналів. Крім того, цю систему слід завжди розглядати як єдине ціле, оскільки в більшості випадків зміна одного з параметра вимагає перерахунку і перенастрою всієї системи.

Система з послідовною корекцією вигідно відрізняється від систем з паралельною корекцією, особливо при складних структурах об'єкту регулювання, великому числі регульованих параметрів і високих вимогах до якості регулювання. Прості і зручні для практики способи розрахунку і настройки контурів системи з послідовною корекцією дозволяють навіть при значних погрішностях у визначенні динамічних параметрів об'єкту регулювання одержати цілком працездатну систему управління електроприводом, Такі системи вводять в експлуатацію методом послідовної настройки окремих контурів системи управління (на відміну від систем з паралельною корекцією). Великою перевагою систем з послідовною корекцією

є зручність обмеження будь-якого з регульованих параметрів на заданому рівні. САК з послідовною корекцією розбивається на ряд контурів, число яких вибирається виходячи з таких умов:

- необхідного числа контрольованих координат;
- наявність великих інерційностей в контурі, оскільки кожен внутрішній контур зменшує число великих постійних часу об'єкту регулювання у внутрішньому контурі;
- для простоти реалізації передаточної функції регулятора кожен контур повинен включати не більше двох постійних часу.

У такій системі регулювання головним параметром регулювання є той, який визначає основну мету автоматичного регулювання. Решта параметрів - допоміжні, вони підпорядковані головному параметру. Крім того, допоміжні параметри також знаходяться в підпорядкуванні один з іншим. Тому системи з послідовною корекцією називають також системами підлеглого регулювання.

При розробці системи керування електроприводом певного класу механізмів можливо успішне застосування аналітичного конструювання регуляторів, за допомогою якого синтезуються структурні схеми керування, що забезпечують рух електроприводу з виконанням заданого критерію якості.

Найбільш перспективним для вирішення завдань синтезу систем оптимального управління є метод динамічного програмування Р. Беллмана. Застосування цього методу з використанням як критерій оптимальності мінімуму інтегральної помилки дозволяє одержати алгоритм оптимального керування регулятора, не тільки оптимізуючи прийнятий функціонал якості, але і що забезпечує стійкість руху фазових координат об'єкту керування.

Якщо силові частини об'єкту керування описуються лінійними диференціальними рівняннями і як критерій оптимальності приймається мінімум інтегральної квадратичної помилки, за допомогою вказаної методики можна одержати алгоритми оптимальних керувань в функції фазових координат. Це забезпечує легку реалізацію такої системи керування, оскільки всі зворотні зв'язки виявляються жорсткими. Проте статична помилка в такій системі, що

виникає за наявності статичного моменту на валу, не рівна нулю і по своїй величині близька до помилки одноразово інтегруючої лінійної системи. У зв'язку з цим актуальним є створення системи з гнучким зворотним зв'язком по одній лише вихідній координаті. Статизм такої системи рівний нулю, що відповідає вимогам.

Застосування як регуляторів фазових координат релейних елементів, що працюють в ковзаючому режимі, дозволяє без втрат стійкості одержати дуже великі коефіцієнти посилення. Тим самим забезпечується не тільки оптимізація керування, але й інваріантність системи до параметричних обурень.

У роботі синтезована релейна система двозонного оптимального регулювання швидкості в двох фазових просторах, а саме: у просторі природних координат і в просторі канонічних координат. Після синтезування обох систем проведено їх моделювання при номінальних параметрах приводу і при варіації параметрів для комплексної оцінки системи релейного регулювання швидкості.

#### **4.1 Синтез релейної системи керування в просторі природних координат**

##### **4.1.1 Синтез регулятора струму (РТ) в просторі природних координат**

Контур струму синтезуємо лінійним, враховуючи обмеження, які накладаються на випрямляючу частину реального тиристорного перетворювача. Релейні елементи працюють на підвищених частотах, а в якості опорної напруги ТП використовується синусоїдальна напруга мережевої частоти 50 Гц. Оскільки тиристори не є повністю керованими вентилями використання релейного регулятора струму неприйнятно, оскільки це порушить нормальну подачу керуючих імпульсів на тиристорні групи.

При розгляді контуру регулювання струму вважаємо, що електромеханічна постійна часу  $T_m$  набагато більше електромагнітної постійної часу  $T_3$ . Можна також нехтувати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, приймаючи її обурюючою дією в контурі струму. Структурна схема контуру

регулювання струму приведена на рис.4.1.

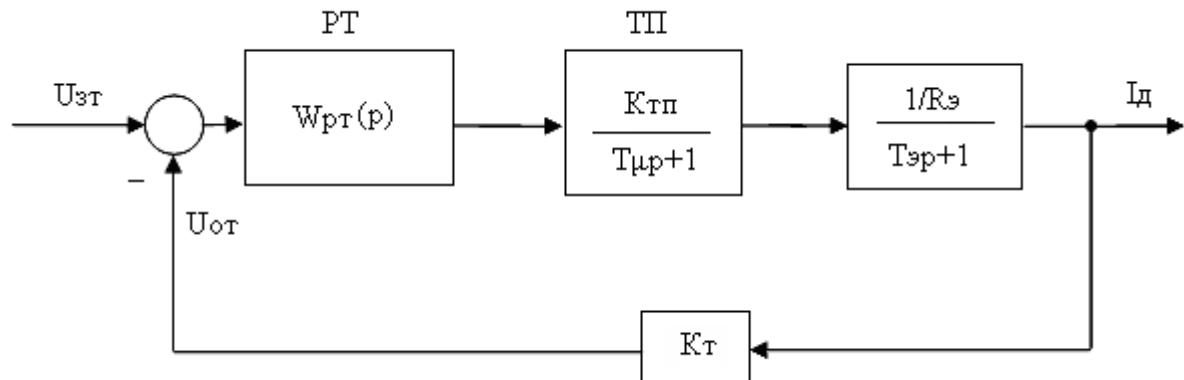


Рисунок 4.1 - Структурна схема контуру струму

Регулятор струму організований по пропорційно-інтегральному (ПІ) закону керування з настройкою на модульний оптимум (МО). Регулятор для забезпечення необхідних динамічних параметрів повинен компенсувати електромагнітну постійну часу, а також малу постійну контура струму  $T_{КС}$ .

Передаточна функція регулятора струму при оптимізації контура на модульний оптимум матиме вигляд:

$$W_{pc}(p) = K_{pc} \cdot \frac{T_э p + 1}{T_э p} = K_{pc\Pi} + K_{pc\Pi} \cdot \frac{1}{p} \quad (4.1)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$k_m = \frac{U_{\text{ом}}}{I_{\text{max}}} = \frac{10}{2,5 \cdot 3320} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ В / А} \quad (4.2)$$

де:  $U_{\text{ом}} = 10 \text{ В}$  - напруга завдання на струм;

$I_{\text{max}} = 2,5 I_{\text{дн}}$  - максимально припустимий струм у двигуні.

Коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора струму:

$$K_{pc\Pi} = \frac{R_э T_э}{K_{ПІ} K_{OT} T_{OT}} = \frac{0,075 \cdot 0,038}{199,33 \cdot 0,0012 \cdot 0,01} = 1,773 \quad (4.3)$$

де:  $T_{OT} = 2 \cdot T_μ = 0,01 \text{ с}$ .

Коефіцієнт передачі інтегральної частини регулятора струму:

$$K_{pсн} = \frac{R_3}{K_{ТП} K_{OT} T_{OT}} = \frac{0,075}{199,33 \cdot 0,0012 \cdot 0,01} = 62.382 \quad (4.4)$$

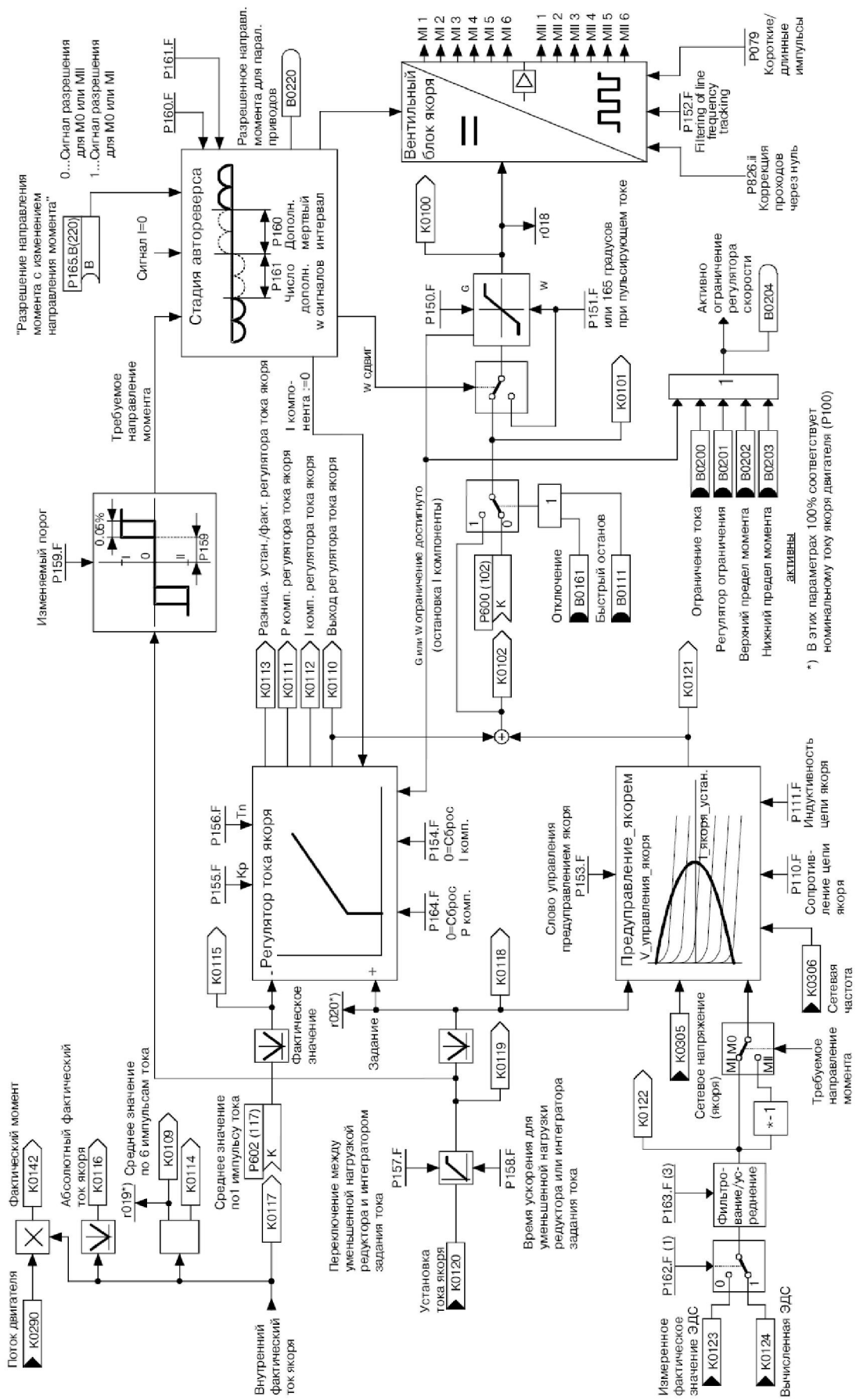
Передаюча функція замкнутого контура регулювання струму, синтезованого на МО, має наступний вигляд:

$$W_{кc}(p) = \frac{1/K_{OT}}{2T_{\mu}p + 1} \quad (4.4)$$

Регулятор струму в системі встроєної поворотної рами фірми SIEMENS Simoreg CM реалізується по функціональній схемі, представлений на рис.4.2.

Розраховані величини пропорційної та інтегральної частин регулятора струму при налагодженні електропривода необхідно встановити в параметрах P155.F та P156.F відповідно. Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якорів двигунів використовується сигнал аналогового входу (клеми XI 74.4 та XI74.5 на рисунку 4.3), на які подається напруга з датчика напруги, який підключений до вимірювального шунта. Далі сигнал фільтрується апаратним сглажуванням, цифрується аналогово-цифровим перетворювачем A/D, нормується по величині до 100% параметром P701 F та далі при необхідності інвертується за допомогою параметра P703, програмно фільтрується і на виході конектора K0011 отримуємо програмний сигнал, пропорційний реальному струму.





\*) В этих параметрах 100% соответствует номинальному току якоря двигателя (P100)

Рисунок 4.2 - Функціональна схема лінійного регулятора струму якоря із замкненнями 33 у

системі вбудованої поворотної рами фірми SIEMENS Simoreg CM

### АНАЛОГОВІ ВХОДИ І (1)

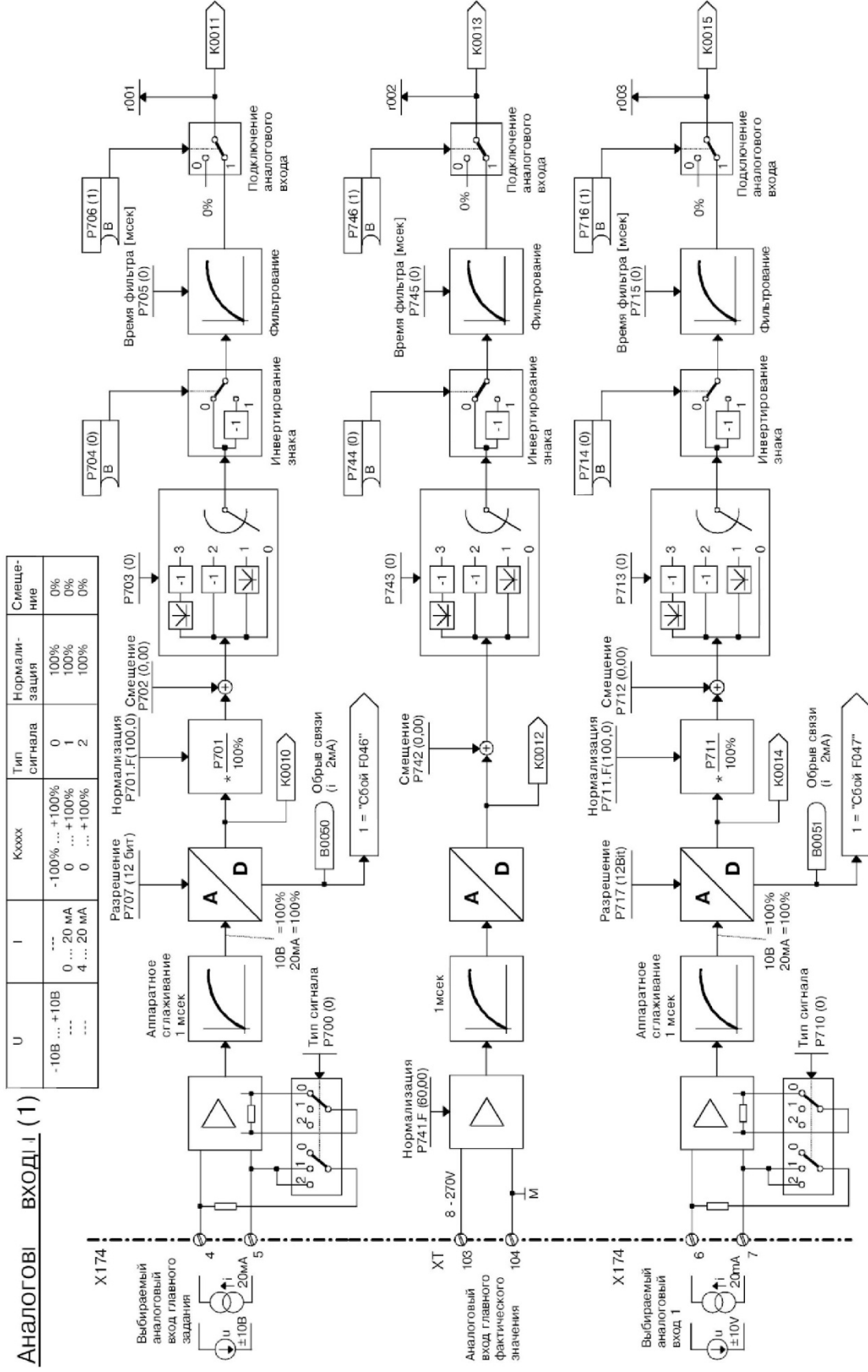


Рисунок 4.3 - Канал формування сигналу зворотного зв'язку по струму

#### 4.1.2 Синтез релейного контура регулювання швидкості в просторі природних координат

Синтез контуру швидкості (КШ) проведемо в просторі струму і швидкості. Для цього запишемо наступну систему рівнянь, що описує при відповідній ідеалізації об'єкт керування (ОК):

$$\begin{cases} p\omega = \frac{R_s}{T_M C \Phi_H} I \\ pI = -\frac{1}{T_O} I + \frac{1}{K_{OT} T_O} U_y \end{cases} \quad (4.6)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{I}{I_{\max}}; \quad x_2 = \frac{\omega}{\omega_{\max}}; \quad u = \frac{U_y}{U_{y\max}} \quad (4.7)$$

де:  $\omega_{\max} = 6.283 \text{ l/c}$  - максимальне значення швидкості двигуна.

З урахуванням (4.7) система (4.6) прийме вигляд:

$$\begin{cases} px_1 = a_{12}x_2 \\ px_2 = a_{22}x_2 + b_2u \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\text{де: } a_{12} = \frac{R_s I_{\max}}{T_M C \Phi_H \omega_{\max}} = \frac{0.075 \cdot 8300}{0.196 \cdot 253.91 \cdot 6.283} = 1.991 \approx 2 \text{ c}^{-1}$$

$$a_{22} = -\frac{1}{T_O} = -200 \text{ c}^{-1}$$

$$b_2 = \frac{U_{y\max}}{K_{OT} T_O I_{\max}} = 200 \text{ c}^{-1}$$

При структурно-алгоритмічному синтезі релейного регулятора швидкості (РШ) вважаємо, що математична модель об'єкту керування представлена системою лінійних диференціальних рівнянь у формі Коші в матричному уявленні:

$$p\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b}u, \quad (4.9)$$

де:  $\mathbf{y} = [\Delta\omega \quad \Delta I]^T$  - вектор координат стану системи;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & -200 \end{pmatrix} - \text{матриця динаміки системи;}$$

$\mathbf{b} = [0 \ b_2]^T = [0 \ 200]^T$  - вектор-стовпець коефіцієнтів керування.

Замінюючи на координати обуреного руху  $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{y} - \mathbf{y}^*$ , система (4.9) може бути приведена до вигляду:

$$p\boldsymbol{\eta} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{b}u, \quad (4.10)$$

де:  $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2]^T$  - вектор-стовпець координат збуреного стану системи.

При синтезі РШ як вихідна регульована змінна прийнята координата  $y_1$ . Скорочення процедури синтезу алгоритму керування можливо шляхом переходу від нормальної форми запису системи рівнянь (4.10) до канонічної. Математичну модель ОК в канонічному просторі обуреного руху представимо у вигляді:

$$p\mathbf{x} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{e}_n u, \quad \boldsymbol{\eta}_1 = \mathbf{f}^T \mathbf{x} \quad (4.11)$$

де:  $\mathbf{x}$  - вектор координат обуреного руху канонічної системи;

$$\mathbf{G} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ g_0 & g_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_n = [0 \ 1]^T$$

де:  $\mathbf{f}^T = [f_1 \ f_2] = \mathbf{e}_i^T \mathbf{M}$  - відповідно матриця динаміки і вектори коефіцієнтів входу і виходу цієї системи;

$g_0, g_1, g_2$  - коефіцієнти характеристичного полінома системи:

$$\det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}] = g_2 p^2 + g_1 p + g_0 \quad (4.12)$$

де:  $g_0 = 1, \ g_1 = 0, \ g_2 = a_{12} a_{22} = -400$ ;

$\mathbf{E}$  - одинична діагональна матриця розміру  $2 \times 2$ ;

$\mathbf{M}$  - перетворююча матриця, яка може бути визначена на основі матриці керуваності  $\mathbf{R} = [\mathbf{b} \ | \ \mathbf{A}\mathbf{b}]$ :

$$\mathbf{R} = [\mathbf{b} \ | \ \mathbf{A}\mathbf{b}] = \begin{pmatrix} 0 & a_{11}b_2 \\ b_2 & a_{22}b_2 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

і коефіцієнтів характеристичного полінома  $\det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}]$  у вигляді:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} g_1 & g_2 \\ g_2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a_{11}b_2 \\ b_2 & a_{22}b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} g_1 & g_2 \\ g_2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

де:  $m_{11} = a_{12}b_2 = 400, \ m_{22} = b_2 = 200$ ;

З (4.13) витікає, що  $\text{rang} \mathbf{R} = n = 2$ . Тому даний об'єкт по входу  $u(t)$

повністю керуємих, а це означає, що може бути знайдений регулятор, що реалізує необхідну динаміку.

Скористаємося результатами роботи, в якій відповідно до визначення Долголенко Ю.В. встановлений однозначний зв'язок коефіцієнтів алгоритму керування, що є знаковою функцією від лінійної комбінації координат керованого об'єкту, з коефіцієнтами характеристичного полінома замкненої системи керування.

Вимоги до обуреного руху системи керування задамо у вигляді характеристичного полінома:

$$H_{\sigma}(p) = p^{n-1} + d_{n-1}p^{n-2} + \dots + d_1p + d_0 \quad (4.15)$$

коефіцієнти якого вибираються з урахуванням заданих показників якості перехідних процесів в електроприводі. Це можуть бути прямі або непрямі показники. Як прямі показники при виборі траєкторії руху найчастіше використовують величину перерегулювання  $\sigma_x$  і часу регулювання  $t_p$ . Ці показники складають набір початкових даних для розрахунку коефіцієнтів характеристичного полінома, наприклад, по методиці, запропонованій А.П.Батенко. Як непрямі показники якості, у більшості випадків застосовується частотний показник - смуга пропускання  $\omega_0$ . Значення цього показника дозволяє перейти від нормованого полінома до бажаного характеристичного полінома системи. Нормований поліном має стандартний розподіл коріння. Існує близько 30 стандартних форм розподілів полюсів. Звичайно в інженерній практиці користуються розподілом коріння по Баттерворту.

Використовуючи лінійне перетворення заміни змінних, рівняння (4.11) приводиться до канонічного вигляду:

$$px = Gx + e_n u, \quad (4.16)$$

або в розгорненому вигляді:

$$\begin{cases} p x_1 = x_2 \\ p x_2 = x_3 \\ \dots \\ p x_{n-1} = x_n \\ p x_n = -g_0 x_1 - g_1 x_2 - \dots - g_{n-1} x_n \end{cases} \quad (4.17)$$

Вектор  $\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{y}} - \tilde{\mathbf{y}}^*$  представляє відхилення реального руху системи  $\tilde{\mathbf{y}}$  від заданого необуреного в канонічному просторі координат.

Алгоритм керування об'єктом (4.17) шукатимемо як знакову функцію від лінійної комбінації координат цього об'єкту:

$$u^*(x) = -\text{sign } k^T x = -\text{sign}(k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n) \quad (4.18)$$

Керування (4.18) задає рух замкненої системи вздовж гіперповерхні ковзання, визначеної рівнянням:

$$\Theta = k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n = 0 \quad (4.19)$$

відповідно до якого динаміка координати  $x_n$  може бути знайдена у вигляді:

$$x_n = -k_n^{-1} (k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_{n-1} x_{n-1}) \quad (4.20)$$

Виключивши з (4.17) останнє рівняння і підставивши в інші значення координати  $x_n$  згідно (4.20), одержимо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} p x_1 = x_2 \\ p x_2 = x_3 \\ \dots \\ p x_{n-2} = x_{n-1} \\ p x_{n-1} = -k_n^{-1} (k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_{n-1} x_{n-1}) \end{cases} \quad (4.21)$$

що описують ковзаючий рух даного керованого динамічного об'єкту. Виключивши у одержаних виразах всі змінні окрім  $x_1$ , дану систему рівнянь можна представити одним диференціальним рівнянням  $(n - 1)$ -ої ступені:

$$k_n p^{n-1} x_1 + k_{n-1} p^{n-2} x_1 + \dots + k_2 p x_1 + k_1 x_1 = 0 \quad (4.22)$$

якому відповідає характеристичний поліном вигляду:

$$H(p) = k_n p^{n-1} + k_{n-1} p^{n-2} + \dots + k_2 p + k_1 \quad (4.23)$$

Дорівнявши (4.15) і (4.23) одержимо систему рівнянь, що дозволяє знайти коефіцієнти зворотних зв'язків регулятора, що синтезується:

$$\begin{cases} k_n = 1; k_{n-1} = d_{n-2}; k_{n-2} = d_{n-3}, \\ \dots \\ k_2 = d_1; k_1 = d_0. \end{cases} \quad (4.24)$$

Використовуючи зворотні лінійні перетворення для векторів змінних в цілому, а також для окремих їх компонентів

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= M^{-1}y, \tilde{y}_i = e_i^T M^{-1}y = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T M^{-1}y \\ \tilde{y}^* &= M^{-1}y^*, \tilde{y}_i^* = e_i^T M^{-1}y^* = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T M^{-1}y^*. \end{aligned}$$

на основі (4.18) може бути одержаний ряд законів керування об'єктом (4.9) в різних координатних просторах.

Для даної динамічної системи (4.9) перетворення можуть бути виконані таким чином. Підсигнатурну функцію  $\Theta$  первинного алгоритму керування (4.18) розіб'ємо на дві складові, що представляють дійсний і заданий (незбурений) рухи об'єкту:

$$u^* = -\text{sign}(\Theta_d - \Theta_3) \quad (4.25)$$

де:

$$\Theta_d = k^T \tilde{y} = k_1 \tilde{y}_1 + k_1 \tilde{y}_2 + \dots + k_n \tilde{y}_n, \quad (4.26)$$

$$\Theta_3 = k^T \tilde{y}^* = k_1 \tilde{y}_1^* + k_1 \tilde{y}_2^* + \dots + k_n \tilde{y}_n^*. \quad (4.27)$$

Перетворимо спочатку вираз (4.26). Для чого, використовуючи зворотне перетворення координат, замінимо змінні:

$$\Theta_d = k^T \tilde{y} = k^T M^{-1}y \quad (4.28)$$

і, вводячи позначення:

$$k^T M^{-1} = \delta^T, \quad (4.29)$$

одержимо вираз, що дозволяє визначити складову  $\Theta_d$  через вектор реальних координат системи:

$$\Theta_d = \delta^T y = \delta_1 y_1 + \delta_2 y_2 \quad (4.30)$$

Виконаємо необхідні перетворення також для (4.27). Використовуючи властивість змінних канонічної математичної моделі, вектор незбуреного руху  $\tilde{y}^*$  представимо через заданий рух вихідної координати  $\tilde{y}_1^*$  таким чином:

$$\tilde{y}^* = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1^* & p\tilde{y}_1^* \end{bmatrix}^T = \tilde{y}_1^* \mathbf{p} \quad (4.31)$$

де:

$$\mathbf{p} = [1 \quad p]^T \quad (4.32)$$

Далі замінимо змінну  $\tilde{y}_1^*$  на  $y_1^*$  :

$$\tilde{y}_1^* = \tilde{m}_{11} y_1^* \rightarrow \tilde{y}^* = \tilde{m}_{11} y_1^* \mathbf{p}. \quad (4.33)$$

де  $\tilde{m}_{11} = \frac{1}{a_{12} b_2} = \frac{1}{2 \cdot 200} = 0.0025$  - перший компонент зворотної перетворюючої матриці  $M^{-1}$ . Тоді підставивши одержаний вираз у (4.27), визначимо другу (незбурену або задаючу) складову перемикальної функції:

$$\Theta_3 = \tilde{m}_{11} y_1^* k^T \mathbf{p}. \quad (4.34)$$

Підставляючи (4.30) і (4.34) у (4.25), одержимо наступний вираз алгоритму управління у фазовому просторі початкових координат:

$$u^* = -\text{sign}[\delta^T y - \tilde{m}_{11} y_1^* k^T \mathbf{p}], \quad (4.35)$$

або в розгорненому вигляді:

$$u^* = -\text{sign}[(\delta_1 y_1 + \delta_2 y_2) - \tilde{m}_{11} y_1^* (k_1 + k_2 p)], \quad (4.36)$$

Отже, з урахуванням заданих показників якості перехідних процесів в електроприводі і із смугою пропускання  $\omega_0 = 50 \text{ c}^{-1}$  вибираємо розподіл коріння по Баттерворту для  $(n - 1) = 1$  порядку.

Бажаний характеристичний поліном по Баттерворту:

$$H_a(\delta) = \delta + d_0 \omega_0$$

де  $d_1 = 1, d_0 = 1$ .



Дорівнюючи характеристичний поліном замкненої системи (зменшений на один порядок) з бажаним характеристичним поліномом по Батерворту одержимо систему рівнянь, що дозволяє знайти коефіцієнти зворотних зв'язків регулятора швидкості, що синтезується:

$$a_{12}a_{22} = \delta + d_0\omega_0 \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} k_2 = d_1; \\ k_1 = d_0 \cdot \omega_0; \end{cases} \rightarrow \begin{cases} k_2 = 1; \\ k_1 = 50; \end{cases}$$

З урахуванням (4.37) коефіцієнти зворотних зв'язків у алгоритмі керування (4.36) виразимо в аналітичній формі через параметри об'єкту керування:

$$\delta_1 = \frac{k_1}{a_{12}b_2} = 0.125 \quad \delta_2 = \frac{k_2}{b_2} = 0.01$$

Матрична схема релейного РС, в якій реалізується знайдений закон керування, приведена на рисунку 4.4.

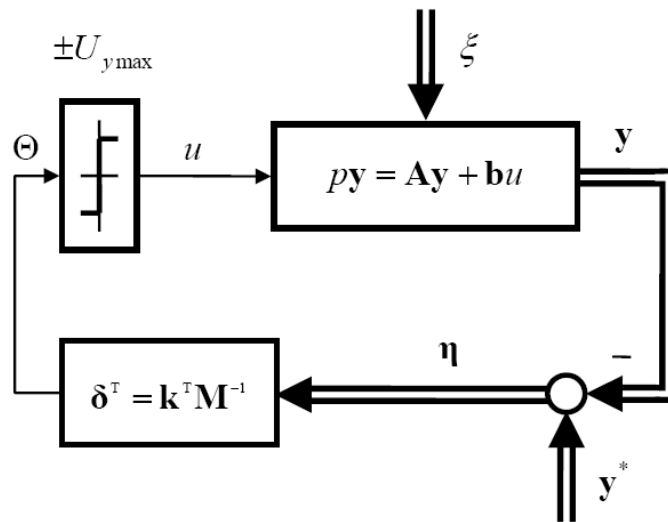


Рисунок 4.4 - Матрична структурна схема релейного регулятора у фазовому просторі початкових координат

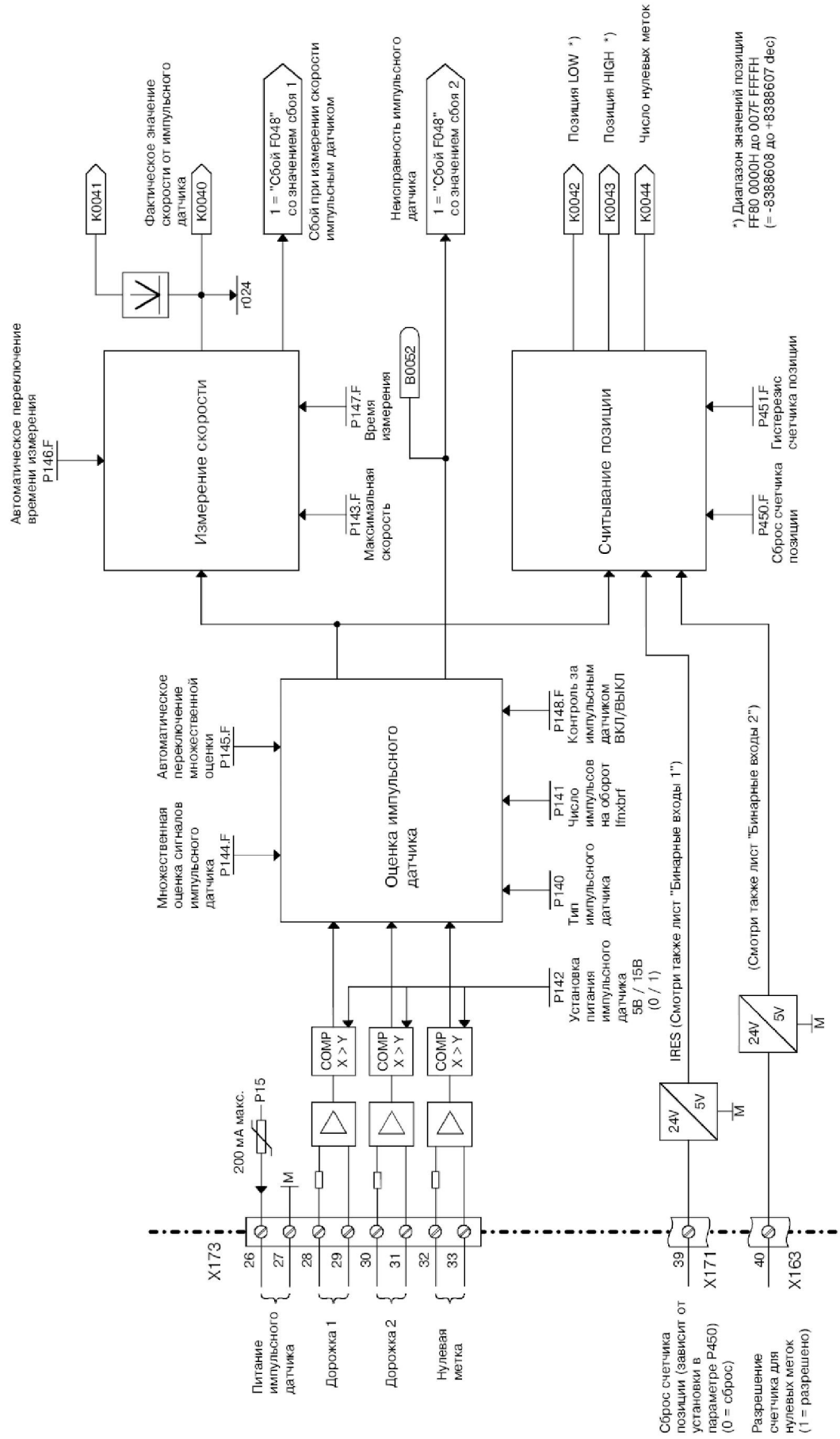


Рисунок 4.5 - Канал формирования сигнала зворотнього зв'язку по швидкості



### 4.1.3 Синтез регулятора струму збудження

При розгляді контуру регулювання струму збудження будемо вважати, що більша стала часу  $-T_1$ . У цьому випадку передатна функція навантаження (обмотки збудження):

$$W_n(p) = \frac{1/R_{\Sigma \epsilon \delta}}{T_1 p + 1} \quad (4.37)$$

Структурна схема контуру регулювання струму збудження наведена на рисунку 4.7.

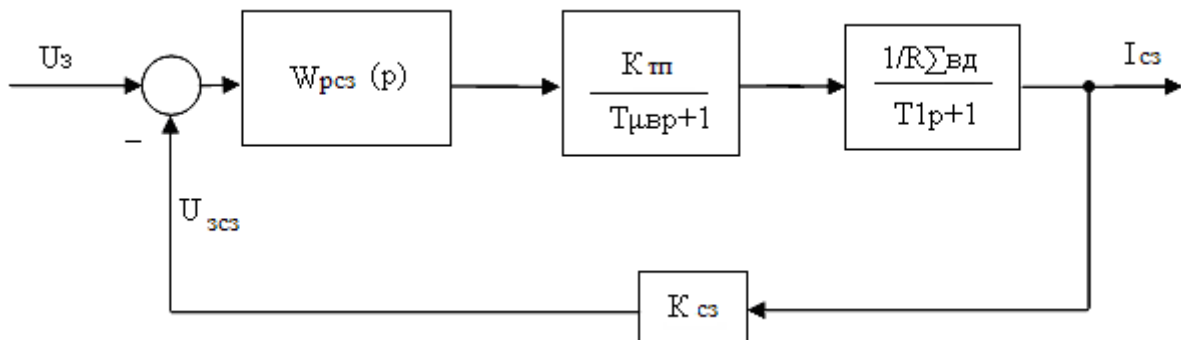


Рисунок 4.7 – Структурна схема контуру регулювання струму збудження

Для спрощення розрахункової частини й схемної реалізації, а також для збільшення швидкодії контуру регулювання струму, настроювання контуру буде зроблено на модульний оптимум.

Некомпенсовану малу постійну часу контуру струму збудження  $\dot{O}_{\mu\epsilon}$  приймаємо рівній 2,5 мс.

Типова оптимізована по модульному оптимуму передатна функція розімкнутого контуру буде мати вигляд:

$$W_{mo}^{poz}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\epsilon} p (T_{\mu\epsilon} p + 1)} \quad (4.38)$$

Передатна функція об'єкта регулювання контуру на підставі структурної схеми рис. 4.1:

$$W_o(p) = \frac{k_{zn} k_{m3} 1/R_{\Sigma \epsilon \delta}}{(T_{\mu3} p + 1)(T_1 p + 1)}, \quad (4.39)$$

де  $k_{\zeta r} = 55,215$  - коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача;

$$T_1 = \frac{T_k + T_s + T_e}{2} + \sqrt{\left(\frac{T_k + T_s + T_e}{2}\right)^2 + T_k \cdot T_s} = \frac{0,194 + 0,517 + 3,887}{2} +$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{0,194 + 0,517 + 3,887}{2}\right)^2 + 0,194 \cdot 0,517} = 4,62 \text{ с}$$

- стала часу ланцюга навантаження (для третьої точки);

$$k_{m3} = \frac{U_{\text{змз}}}{I_{\text{здн}}} = \frac{10}{400} = 0,025 \text{ В / А} - \text{ коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по}$$

струму збудження;

Дорівнюючи раніше отримані вираження, одержимо передатну функцію регулятора струму збудження. Регулятор струму збудження являє собою Пі-регулятор:

$$W_{pm}(p) = \frac{W_{mo}^{poz}(p)}{W_o(p)} = \frac{(T_1 p + 1)R_3}{2T_{\mu z} p k_{zn} k_{mz}} = k_{pmz} + \frac{k_{pmz}}{T_1 p}, \quad (4.40)$$

$$\text{де: } k_{pcz} = \frac{R_{\Sigma \text{од}} T_1}{2T_{\mu z} k_{zn} k_{mz}} = \frac{0,526 \cdot 4,47}{2 \cdot 0,0025 \cdot 55,215 \cdot 0,025} = 341,746 - \text{ пропорційна}$$

частина регулятора струму;

$$\frac{k_{pcz}}{T_1} = \frac{341,746}{4,47} = 76,453 - \text{ інтегральна частина регулятора струму.}$$

#### 4.1.4 Синтез регулятора ЕРС

Складовими частинами контуру регулювання ЕРС двигуна є об'єкт регулювання, у який входять оптимізований струмовий контур, датчик ЕРС і регулятор ЕРС.

Визначимо передатну функцію замкненого контуру струму збудження:

$$W_{кcz}(p) = \frac{\frac{1}{T_{\mu z} p + 1} \cdot \frac{1}{T_{зcz} p} \cdot \frac{1}{k_{cz}}}{1 + \frac{1}{T_{\mu z} p + 1} \cdot \frac{1}{T_{ocz} p}} = \frac{\frac{1}{k_{cz}}}{T_{ocz} T_{\mu z} p^2 + T_{зcz} + 1}, \quad (4.41)$$

оскільки  $T_{\mu z}$  - мала стала часу, то  $T_{зcz} T_{\mu z} p^2 = 2T_{\mu z}^2 p$  можна дорівняти нулю, тоді передатна функція контуру струму збудження прийме вид:

$$W_{кзз}(p) = \frac{1/k_{сз}}{T_{зсз}p + 1} \quad (4.42)$$

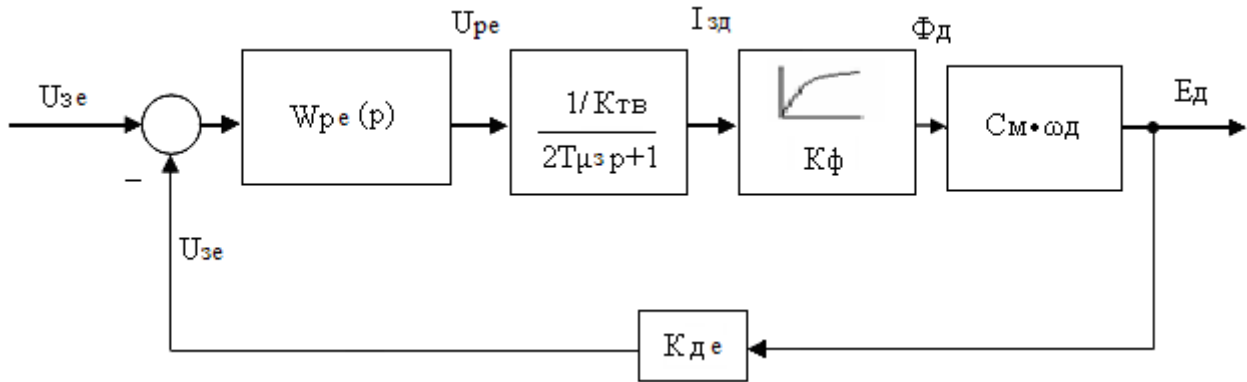


Рисунок 4.8 – Структурна схема контуру регулювання ЕРС двигуна

Враховуючи, що передатна функція об'єкта керування в контурі ЕРС визначається вираженням:

$$W_{oy}(p) = \frac{1/k_{сз}k_{\phi}c_{м}\omega_{дм}k_{дз}}{(2T_{\muз}p + 1)} \quad (4.43)$$

одержуємо:

$$W_{pe}(p) = \frac{1}{W_{oy}(p)} \cdot \frac{1}{4T_{\muз}p} \cdot \frac{1}{(2T_{\muз}p + 1)} = \frac{k_{сз}}{k_{\phi}c_{м}\omega_{дн}k_{дз}4T_{\muз}p} \quad (4.44)$$

де після перетворення одержимо:

$$k_{pe} = \frac{k_{сз}}{\frac{\Phi_{дн}}{I_{здн}}c_{м}\omega_{дм}k_{дз}4T_{\muз}} = \frac{0,0025}{\frac{0,572}{400} \cdot 444,042 \cdot 6,283 \cdot 0,015 \cdot 4 \cdot 0,0025} = 41,667$$

- коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора ЕРС;

$k_{pej} = \frac{k_{pe}}{8T_{зсз}}$  - інтегральна частина регулятора ЕРС;

$k_{де}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по ЕРС:

$$k_{де} = \frac{U_{зе}}{E_{дн}} = \frac{10}{664,734} = 0,015 \quad (4.45)$$

Функціональна схема контуру регулювання ЕРС, реалізованого в перетворювачі програмно на базі відповідних блоків поворотної рами, регулятор швидкості представлена на рис. 4.9

## 4.2 Синтез релейного контура регулювання швидкості в просторі канонічних координат

Релейні алгоритми керування можуть бути синтезовані в різних фазових просторах. Причому, незалежно від вибраного координатного базису, при початкових значеннях параметрів об'єкту керування і відсутності обурень алгоритми керування, синтезовані в будь-якому фазовому просторі, сформулюють в системі ідентичні траєкторії руху. Проте з погляду чутливості контура регулювання до обурень з одного боку, і складності технічної реалізації з іншою, ці алгоритми істотно відрізняються. Контроль похідних керованої координати дозволяє досягти найменшу ступінь чутливості до обурень, що діють на об'єкт, а також підвищує порядок астатизму системи як по задаючому, так і по обурюючих діях. Тому представляє інтерес синтез релейного РШ в канонічному просторі (фазовому просторі регульованої координати і її похідних).

При структурно-алгоритмічному синтезі релейного РШ скористаємося результатами 4.1.2, де математична модель об'єкту керування була представлена в канонічному просторі обуреного руху:  $\dot{x} = Gx + e_n u$ ,  $\eta_1 = f^T x$ .

Вважаємо, що вимоги до обуреного руху системи управління задаються характеристичним поліномом  $n$ -ої ступені:

$$H_{\text{ж}}(p) = p^{n-1} + d_{n-2}p^{n-2} + \dots + d_1 p + d_0 \quad (4.46)$$

Тоді у випадку, якщо алгоритм керування об'єктом шукати як знакову функцію від лінійної комбінації координат цього об'єкту:

## Регулирование тока возбуждения с замкнутой ОС, вентильный блок возбуждения

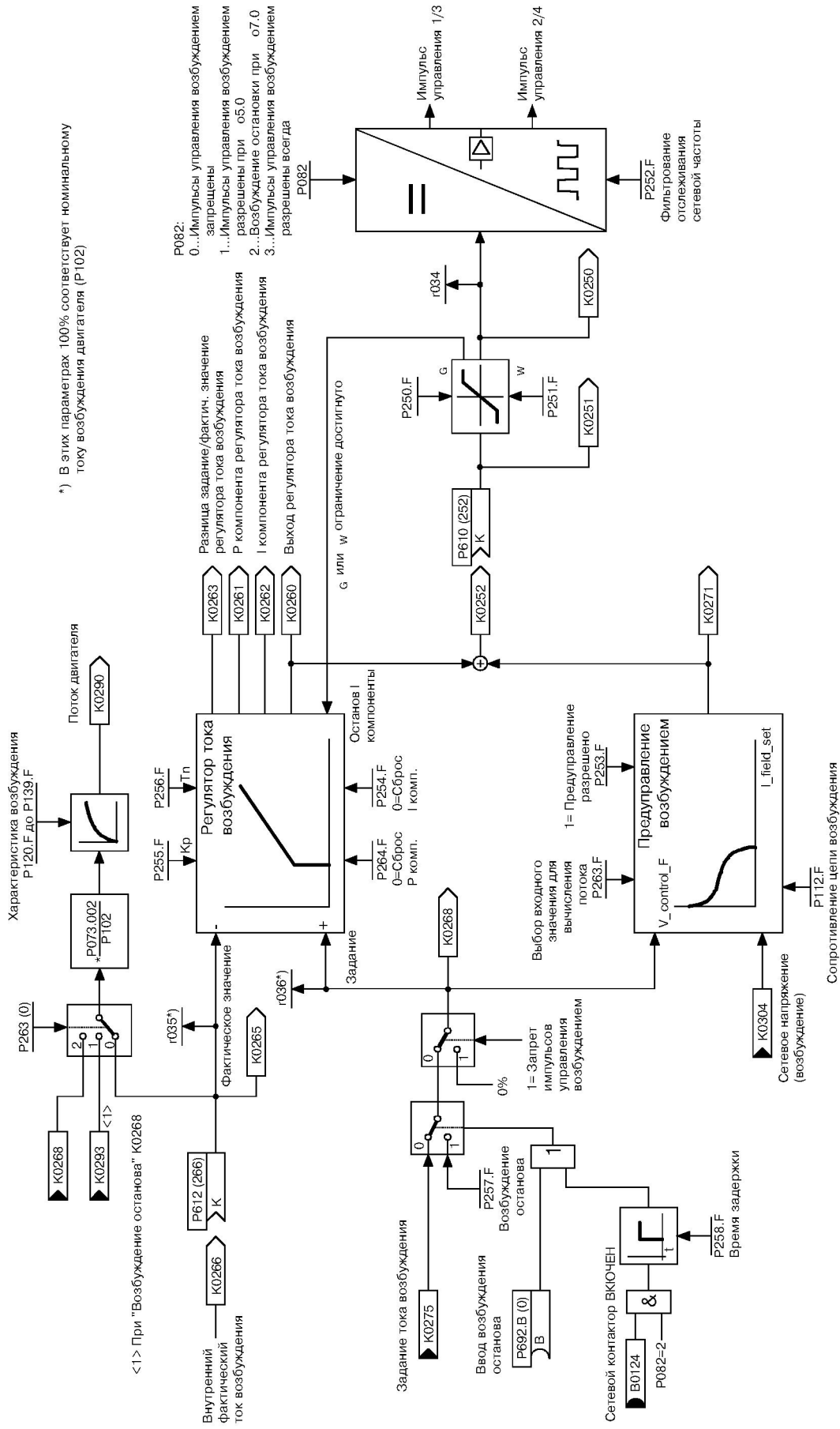


Рисунок 4.9 - Функциональна схема контура регулювання струма збудження реалізованого на базі встроєної

поворотної рами фірми SIEMENS Simoreg CM



$$u^*(x) = -\text{sign } k^T x = -\text{sign}(k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n) \quad (4.47)$$

відповідно до визначення Долголенко Ю.В. математичну модель об'єкту керування, в канонічному просторі обуреного руху, можна представити одним диференціальним рівнянням (n-1) -ої ступені:

$$k_n p^{n-1} x_1 + k_{n-1} p^{n-2} x_1 + \dots + k_2 p x_1 + k_1 x_1 = 0 \quad (4.48)$$

якому відповідає характеристичний поліном вигляду:

$$H(p) = k_n p^{n-1} + k_{n-1} p^{n-2} + \dots + k_2 p + k_1 \quad (4.49)$$

Дорівнявши (4.48) і (4.49) одержимо систему рівнянь, що дозволяє знайти коефіцієнти зворотних зв'язків регулятора, що синтезується:

$$\begin{cases} k_n = 1; k_{n-1} = d_{n-2}; k_{n-2} = d_{n-3}, \\ \dots \\ k_2 = d_1; k_1 = d_0. \end{cases} \quad (4.50)$$

Підсигнатурну функцію алгоритму керування (4.48) розіб'ємо на дві складові, що представляють дійсний і заданий (необурений) рухи об'єкту:

$$u^* = -\text{sign}(\Theta_D - \Theta_3) \quad (4.51)$$

де:

$$\Theta_D = k^T \tilde{y} = k_1 \tilde{y}_1 + k_1 \tilde{y}_2 + \dots + k_n \tilde{y}_n, \quad (4.52)$$

$$\Theta_3 = k^T \tilde{y}^* = k_1 \tilde{y}_1^* + k_1 \tilde{y}_2^* + \dots + k_n \tilde{y}_n^*. \quad (4.53)$$

Використовуючи зворотні лінійні перетворення для векторів змінних в цілому, а також для окремих їх компонентів:

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= M^{-1} y, \tilde{y}_1 = e_1^T M^{-1} y = [0 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T M^{-1} y \\ \tilde{y}^* &= M^{-1} y^*, \tilde{y}_1^T = M^{-1} y^* = [0 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T M^{-1} y^*. \end{aligned}$$

перетворимо вирази (4.48) (4.49).

Використовуючи властивість змінних канонічної математичної моделі, вектор обуреного руху  $\tilde{y}$  представимо через рух вихідної координати  $\tilde{y}_1$  таким чином:

$$\tilde{y} = [\tilde{y}_1 \quad p\tilde{y}_1 \quad p^2\tilde{y}_1 \quad p^3\tilde{y}_1]^T = \tilde{y}_1 p \quad (4.54)$$

де:

$$p = [1 \quad p \quad p^2 \quad p^3] \quad (4.55)$$

Далі замінимо змінну  $\tilde{y}_1$  на  $y_1$ :

$$\tilde{y}_1 = \tilde{m}_{11} y_1 \quad (4.56)$$

де  $m_{11}$  – перший компонент зворотної перетворюючої матриці  $\mathbf{M}$ .

Підставивши одержаний вираз в (4.52), визначимо складову перемикальної функції:

$$\Theta_d = \tilde{m}_{11} y_1 k^T p \quad (4.57)$$

Аналогічним чином визначимо необурену складову перемикальної функції:

$$\Theta_z = \tilde{m}_{11} y_1^* k^T p \quad (4.58)$$

Після цього, підставляючи (4.57) і (4.58) в (4.49), одержимо наступний вираз алгоритму керування:

$$u^* = -\text{sign}[(y_1 + y_1^*) \tilde{m}_{11} k^T p], \quad (4.59)$$

Коефіцієнти зворотних зв'язків релейного регулятора швидкості, що синтезується, розраховані за допомогою прикладної програми Mathcad, і відповідно дорівнюють:

$$\lambda_{1\omega} = 1, \quad \lambda_{2\omega} = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{100} = 0.01$$

Матрична структурна схема синтезованого релейного РШ, представленого лінійними диференціальними рівняннями вигляду  $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b}u$  з алгоритмом керування (4.59) приведена на рис.4.10. В одержаній структурній схемі вектор  $\mathbf{x}$  представлений твором векторного оператора диференціювання  $p = [1 \quad p \quad \dots \quad p^{n-1}]$  на керовану координату об'єкту.

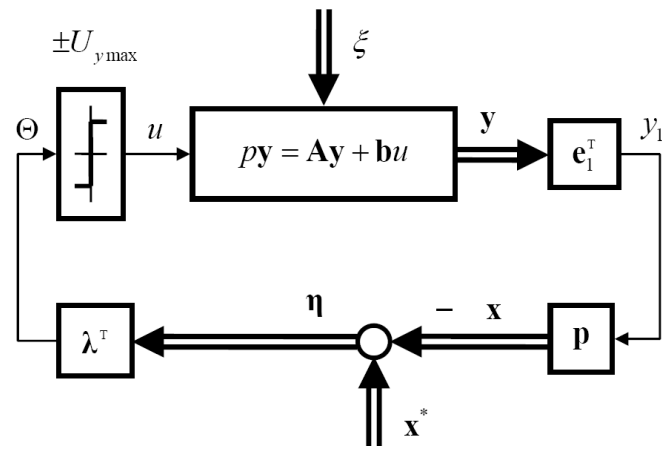


Рисунок 4.10 - Матрична структурна схема релейного РШ у фазовому просторі канонічних координат

Структурна схема системи регулювання частоти обертання із залежним керуванням потоком збудження, синтезована в просторі природних координат представлена на рисунку 4.11. Структурна схема системи регулювання частоти обертання із залежним керуванням потоком збудження, синтезована в просторі канонічних координат представлена на рисунку 4.12.

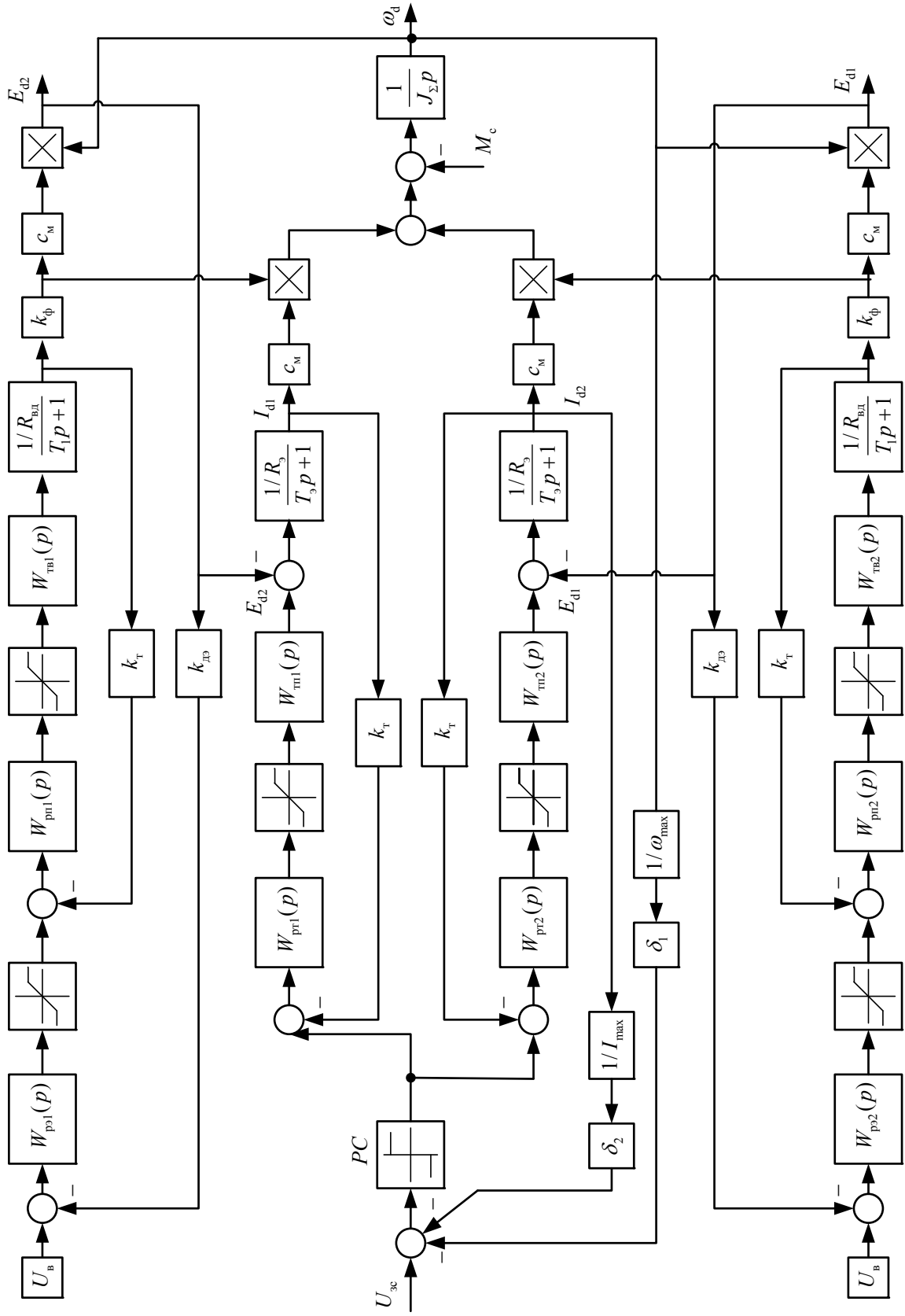


Рисунок 4.11 - Структурна схема системи регулювання частоти обертання із залежним керуванням потоком збудження,

синтезована у просторі природних координат

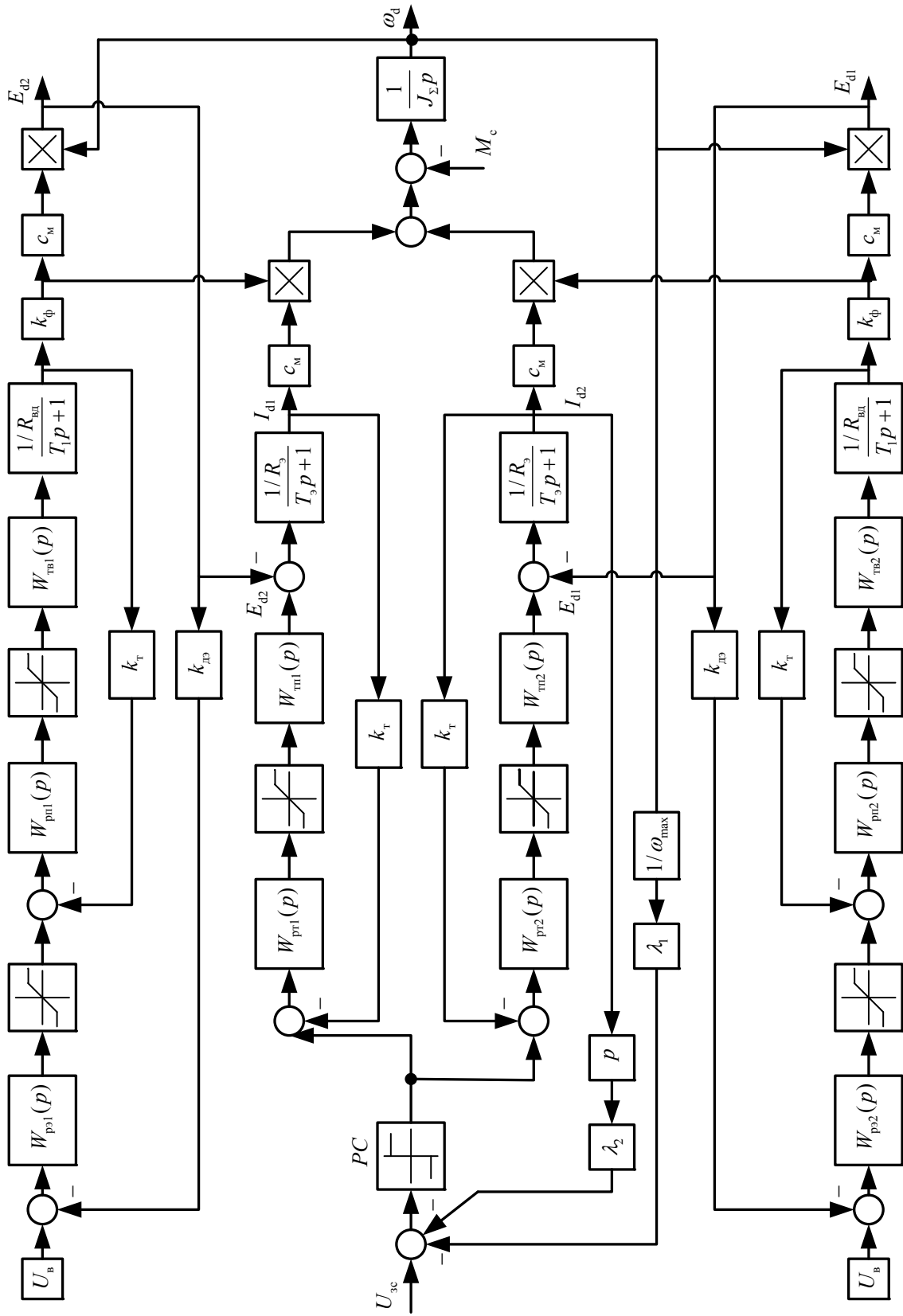


Рисунок 4.12 - Структурна схема системи регулювання частоти обертання із залежним керуванням потоком збудження,

синтезована у просторі канонічних координат

## **5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ГОЛОВНОГО РУХУ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK**

Моделювання перехідних процесів електроприводу головного руху чорнової кліті «Кварто» стана 3000 здійснено в середовищі MATLAB/Simulink, з кроком моделювання 0,0001 с. Моделювання проводиться згідно зібраної Simulink-моделі, побудованої на основі структурних схем (рисунок 4.11, 4.12). Математична модель системи представлена на рисунку 5.1.

Графіки перехідних процесів отримані як при початкових параметрах об'єкту керування, так і при їх варіації. В якості варіації приймаємо технологічне збільшення зусилля/моменту прокатки в 2 та 3 рази, а також варіація опору якірного ланцюга, оскільки саме зміна цих параметрів математично імітує реальні процеси в електроприводі. Варіація інших параметрів можлива, але просто недоцільна, оскільки максимально віддалена від реальних умов роботи системи електроприводу.

На рисунках 5.2-5.5 зображені графіки реакції на стрибок при налагодженні контурів струму та контурів потоку на МО. На рисунках 5.6-5.11 зображені графіки перехідних процесів при розгоні головного приводу вхолосту до номінальної швидкості. На рисунках 5.12-5.16 зображені графіки перехідних процесів при розгоні головного приводу вхолосту до максимальної швидкості. Графіки імітації прокатки першого проходу листа 12×2250×18000 мм сталі марки 13Г1С-У приведені на рисунках 5.17-5.21. Графіки варіацій параметрів системи приведені на рисунках 5.22-5.41.



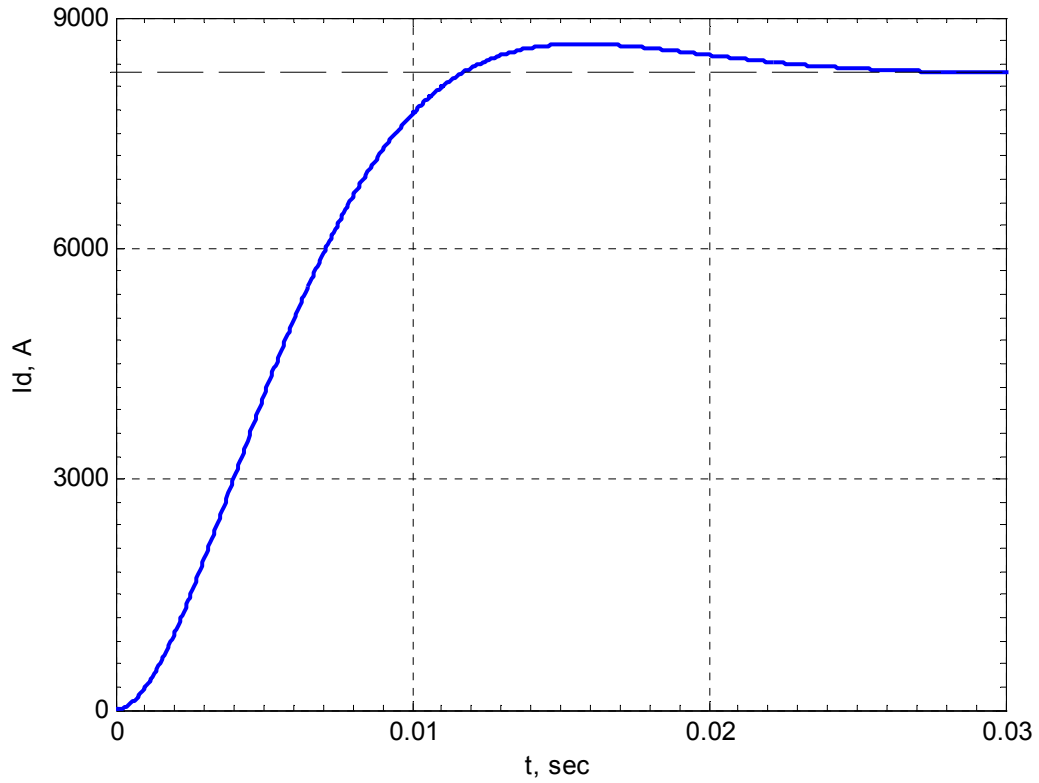


Рисунок 5.2 – Реакція на стрибок керування при налагоджуванні контуру струму якоря на модульний оптимум

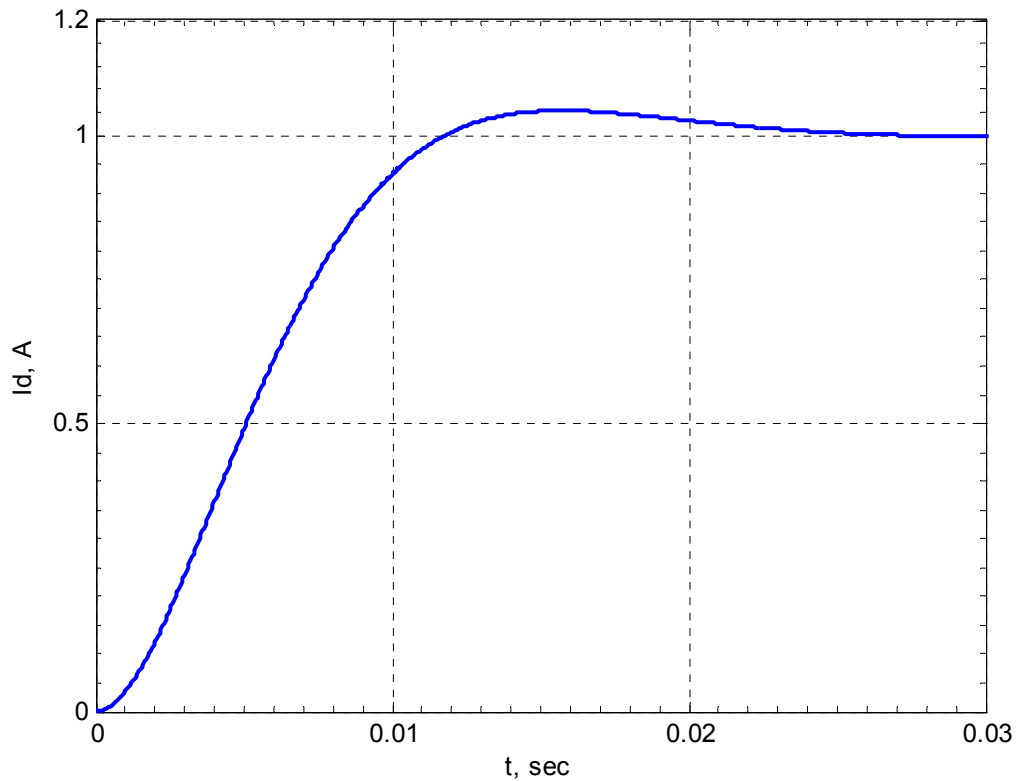


Рисунок 5.3 – Реакція на стрибок керування (в.о.) при налагоджуванні контуру струму якоря на модульний оптимум



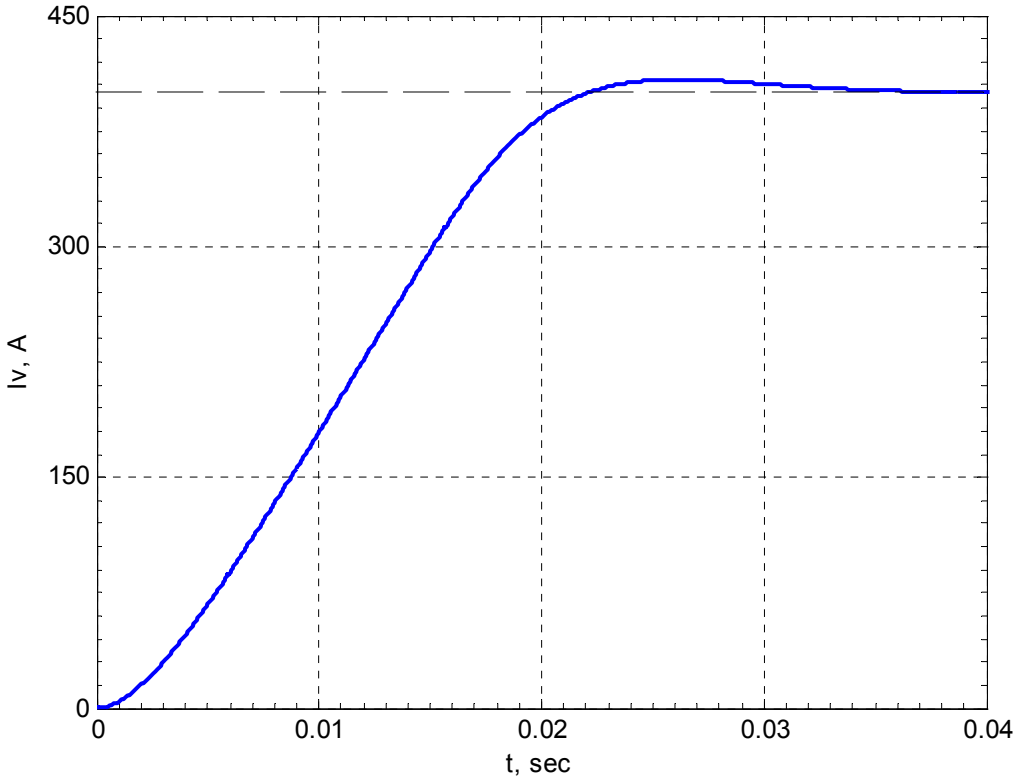


Рисунок 5.4 – Реакція на стрибок керування при налагоджуванні контуру потоку електродвигуна на модульний оптимум

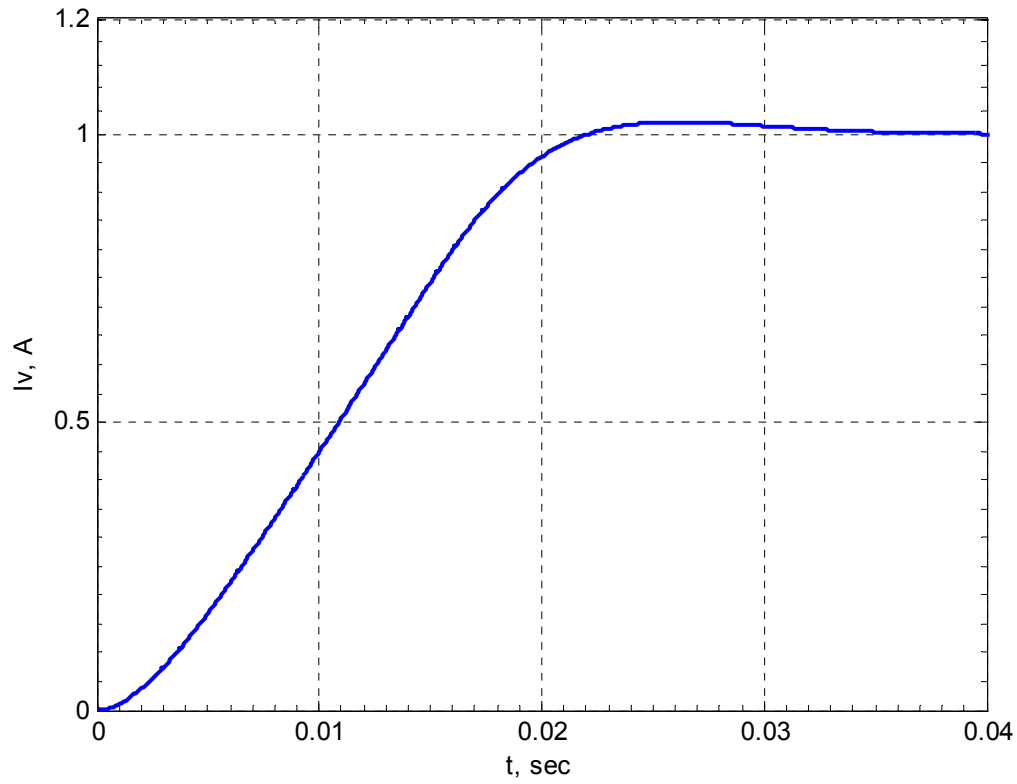


Рисунок 5.5 – Реакція на стрибок керування (в.о.) при налагоджуванні контуру потоку електродвигуна на модульний оптимум

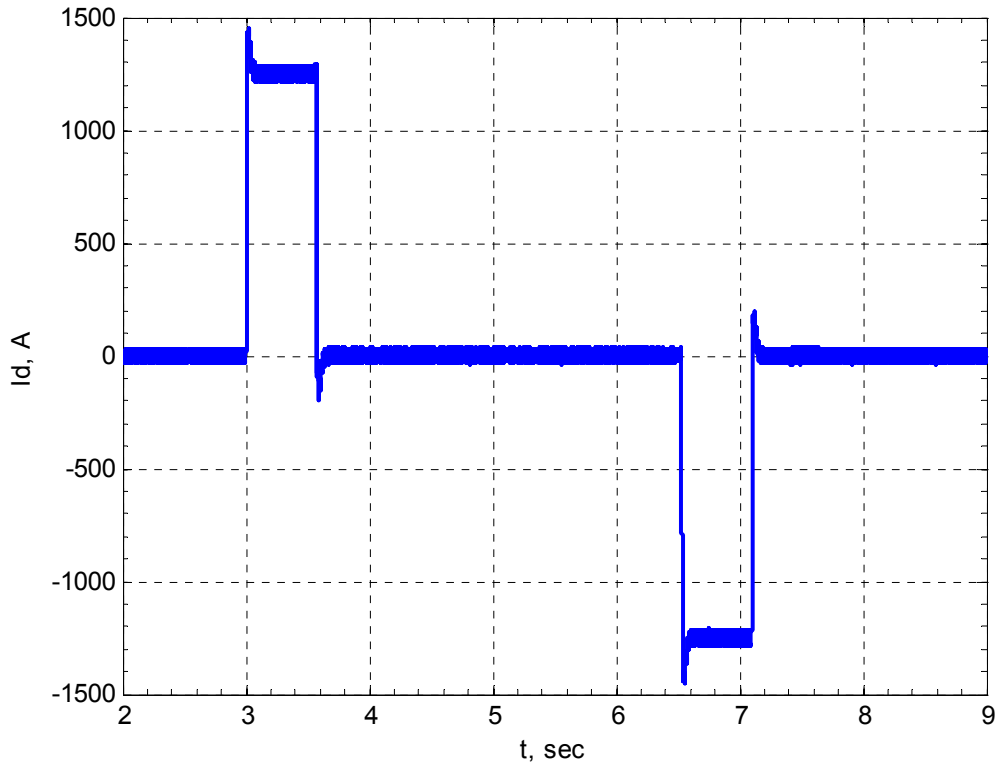


Рисунок 5.6 – Перехідний процес струму двигуна при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

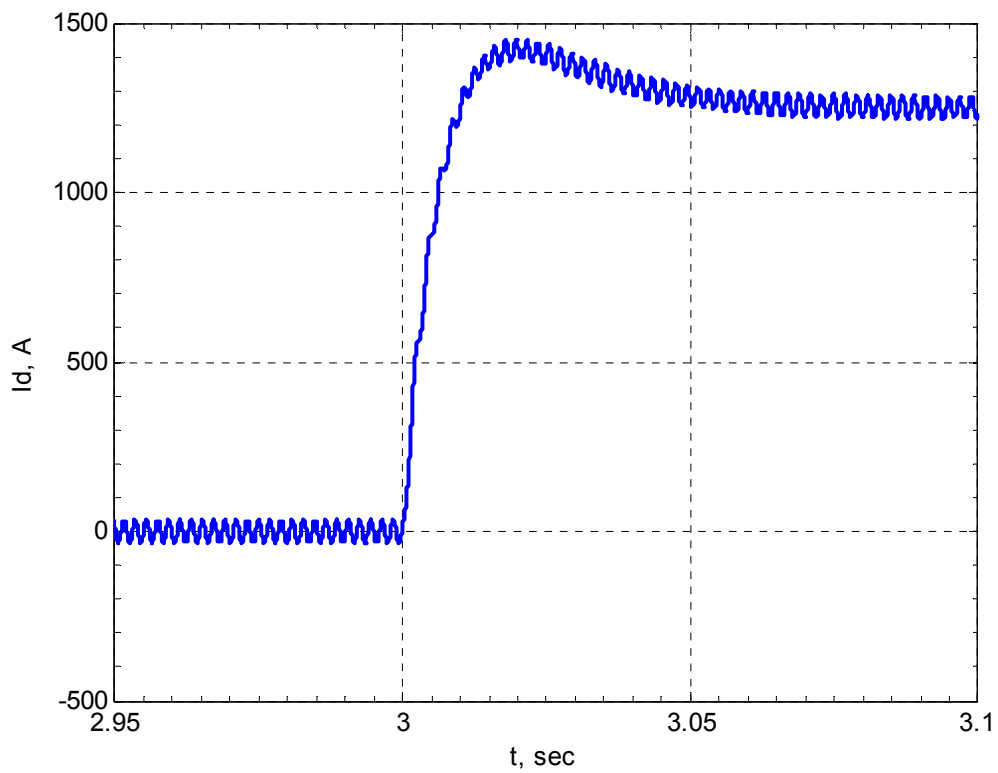


Рисунок 5.7 – Перехідний процес струму двигуна (збільшення) при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

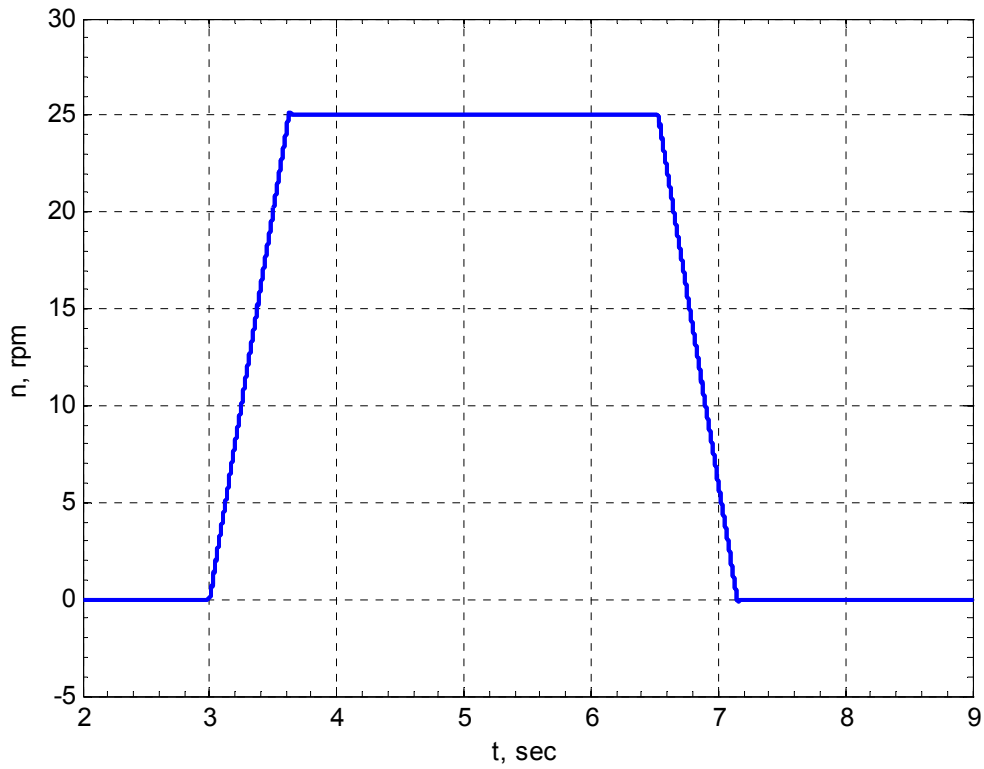


Рисунок 5.8 – Перехідний процес швидкості двигуна при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

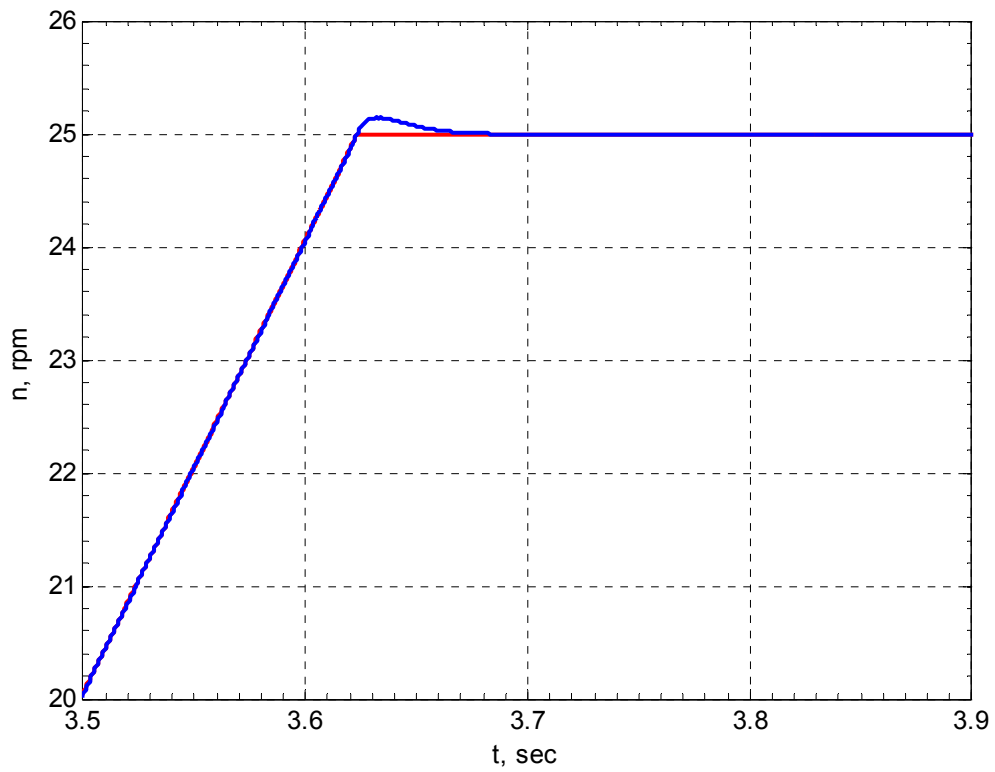


Рисунок 5.9 – Перехідний процес швидкості двигуна (збільшення) при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

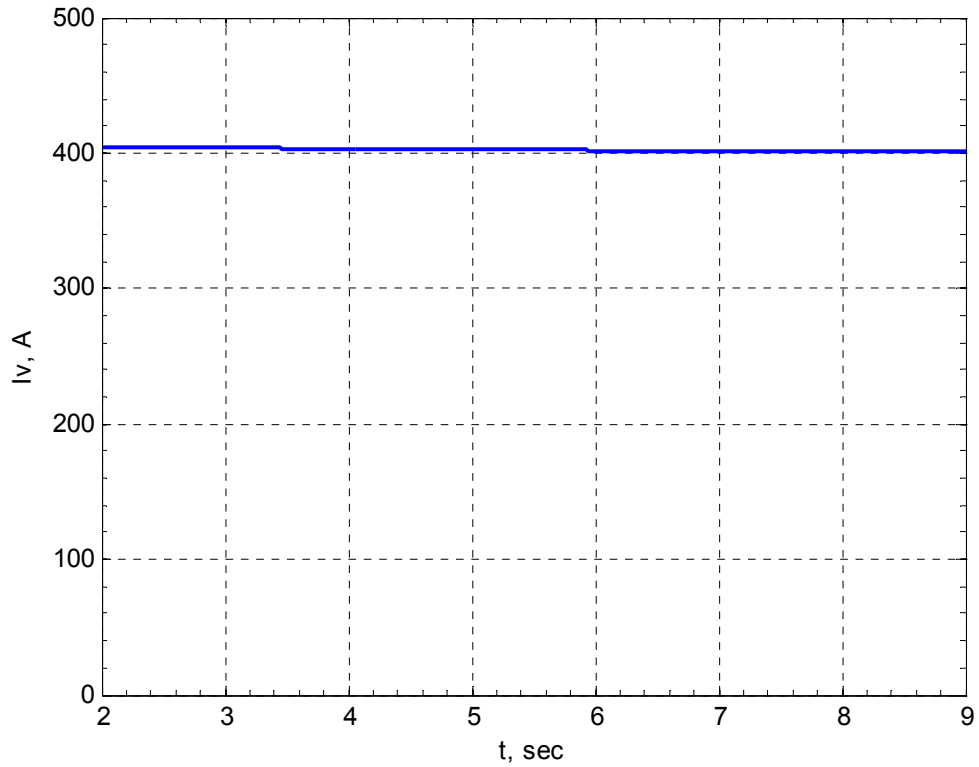


Рисунок 5.10 – Перехідний процес струму збудження при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

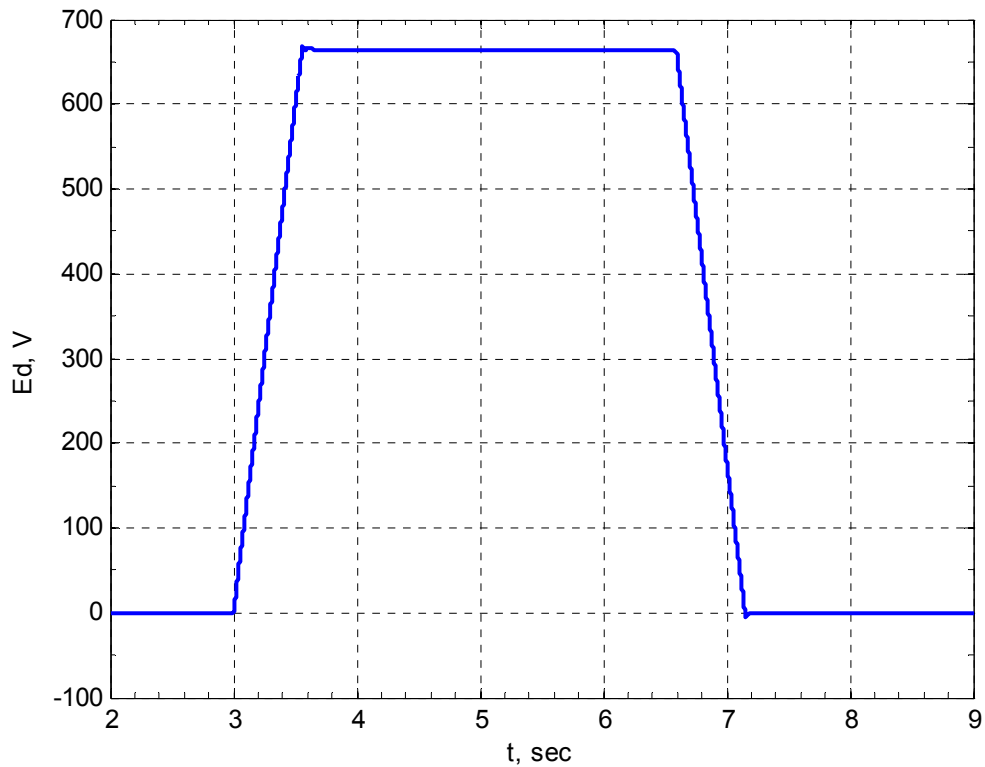


Рисунок 5.11 – Перехідний процес ЕРС при розгоні ЕП вхолосту до номінальної швидкості

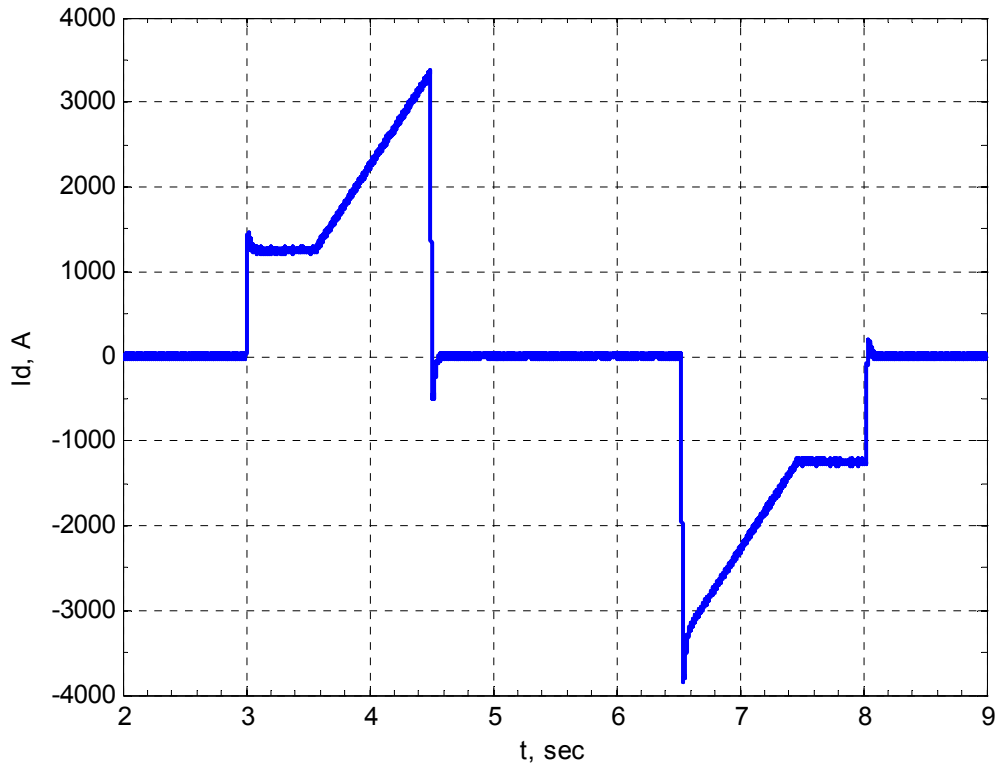


Рисунок 5.12 – Перехідний процес струму двигуна при розгоні ЕП вхолосту до максимальної швидкості

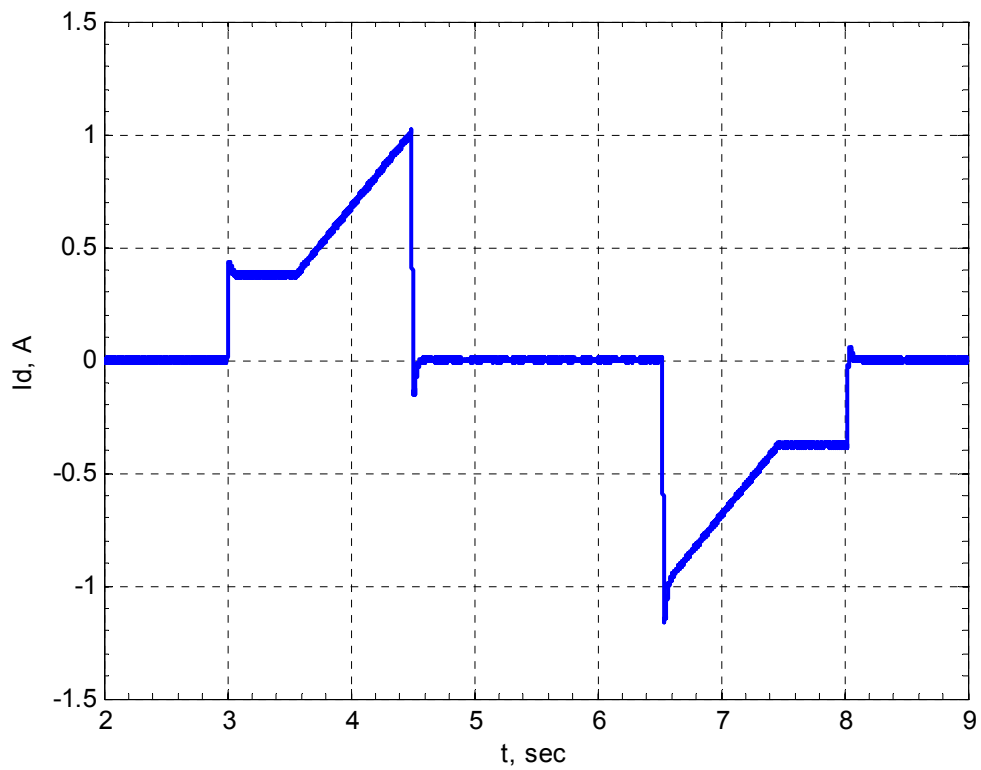


Рисунок 5.13 – Перехідний процес струму двигун (в.о.) при розгоні ЕП вхолосту до максимальної швидкості

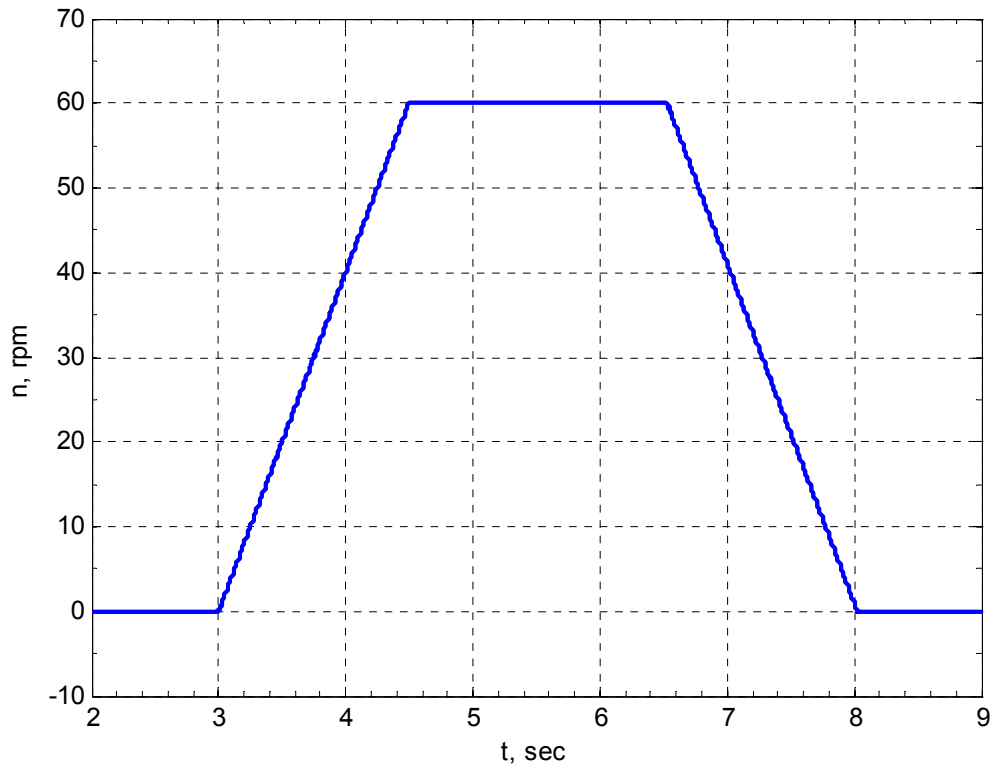


Рисунок 5.14 – Перехідний процес швидкості двигуна при розгоні ЕП вхолосту до максимальної швидкості

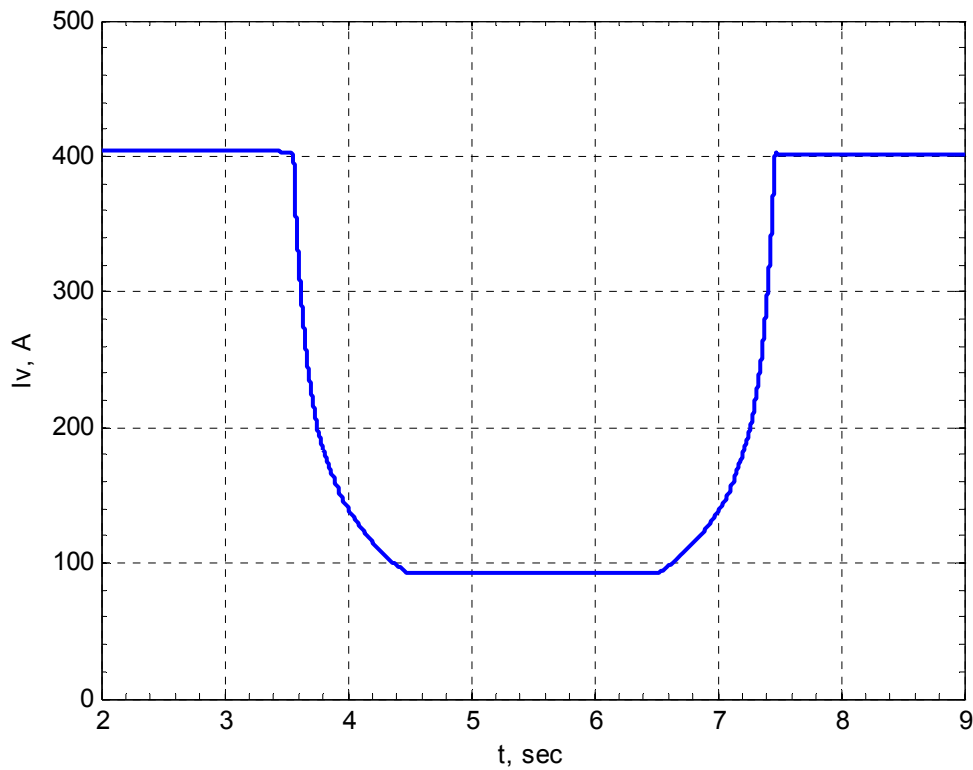


Рисунок 5.15 – Перехідний процес струму збудження при розгоні ЕП вхолосту до максимальної швидкості

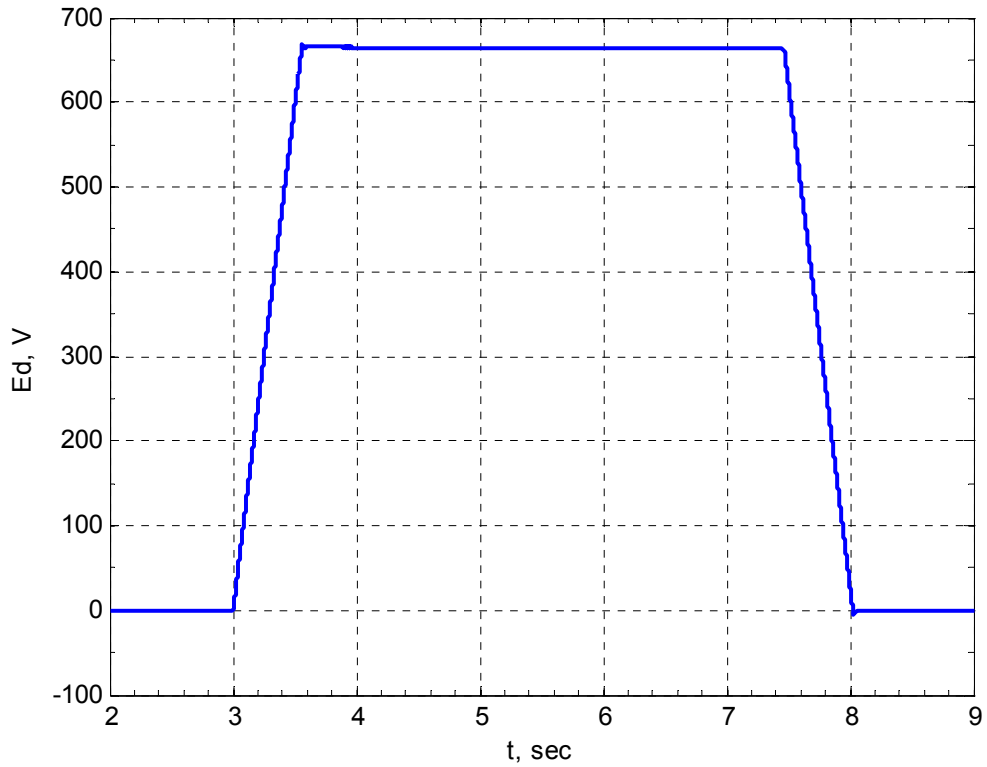


Рисунок 5.16 – Перехідний процес ЕРС при розгоні ЕП вхолосту до максимальної швидкості

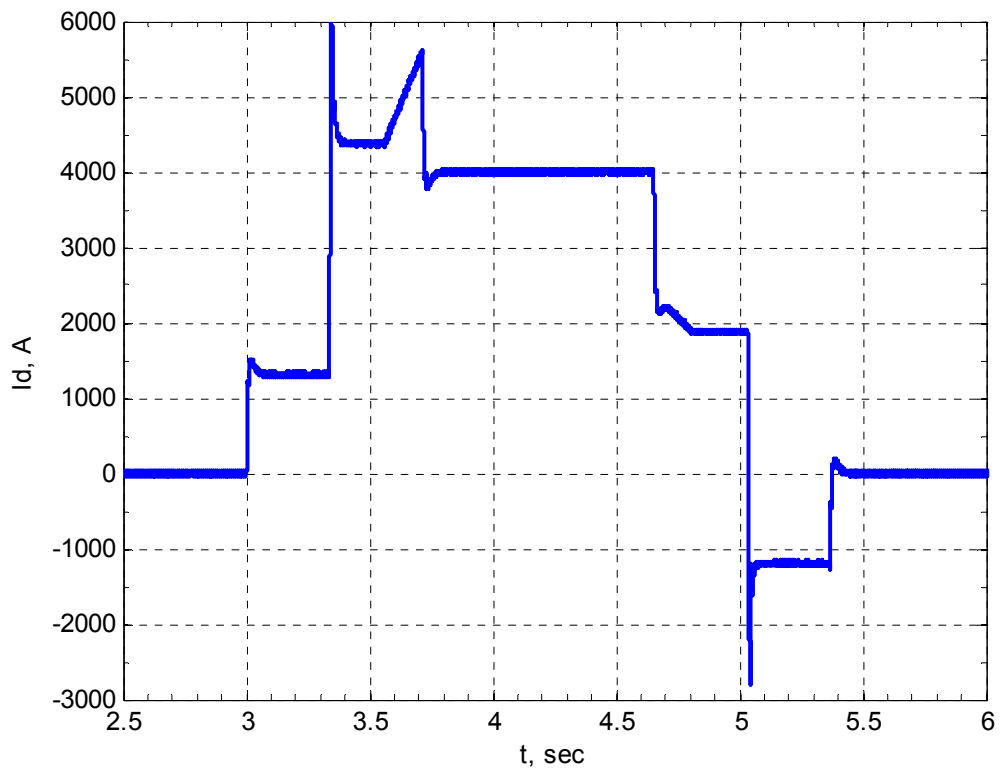


Рисунок 5.17 – Перехідний процес струму двигуна при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу)

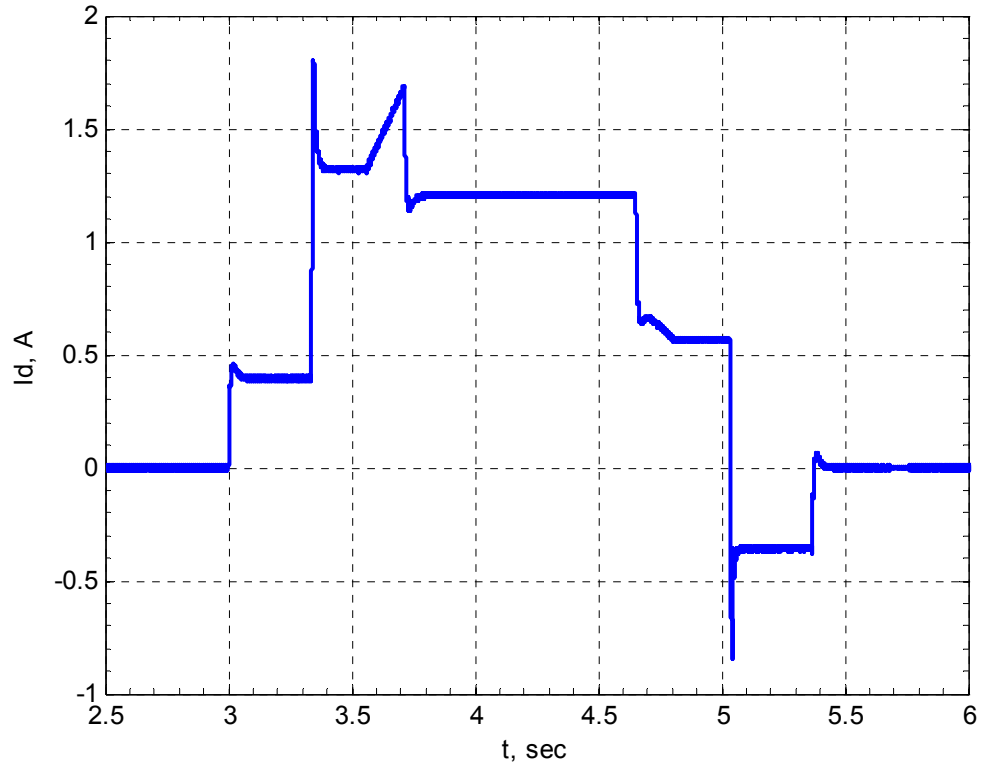


Рисунок 5.18 – Перехідний процес струму двигуна (в.о.) при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу)

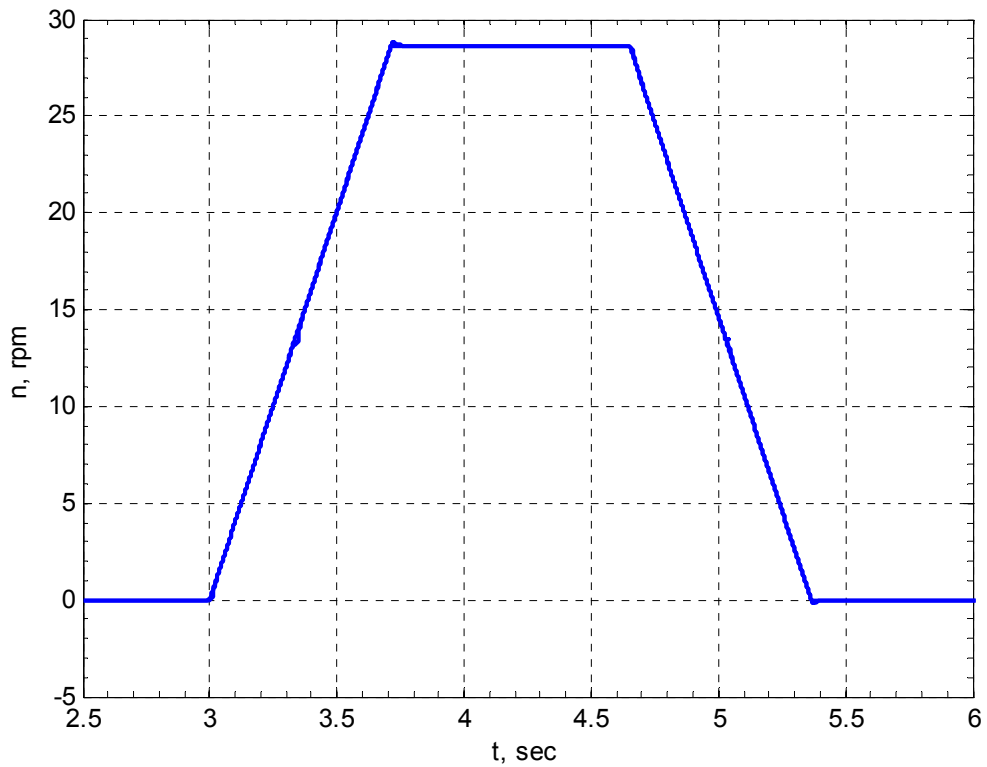


Рисунок 5.19 – Перехідний процес швидкості двигуна при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу)



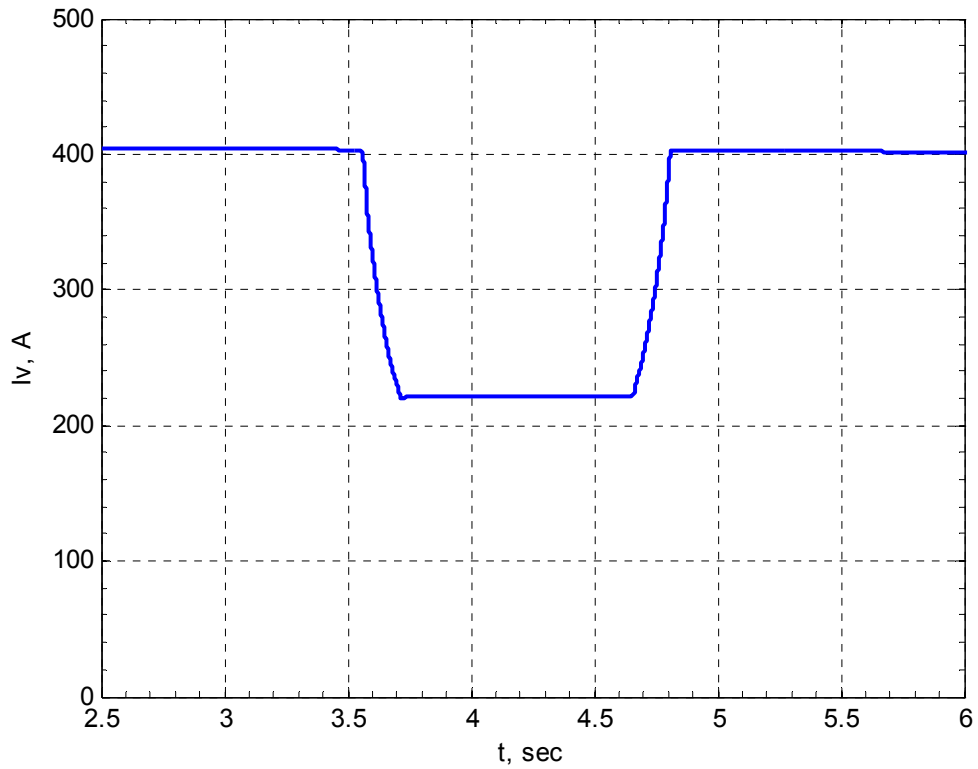


Рисунок 5.20 – Перехідний процес струму збудження при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу)

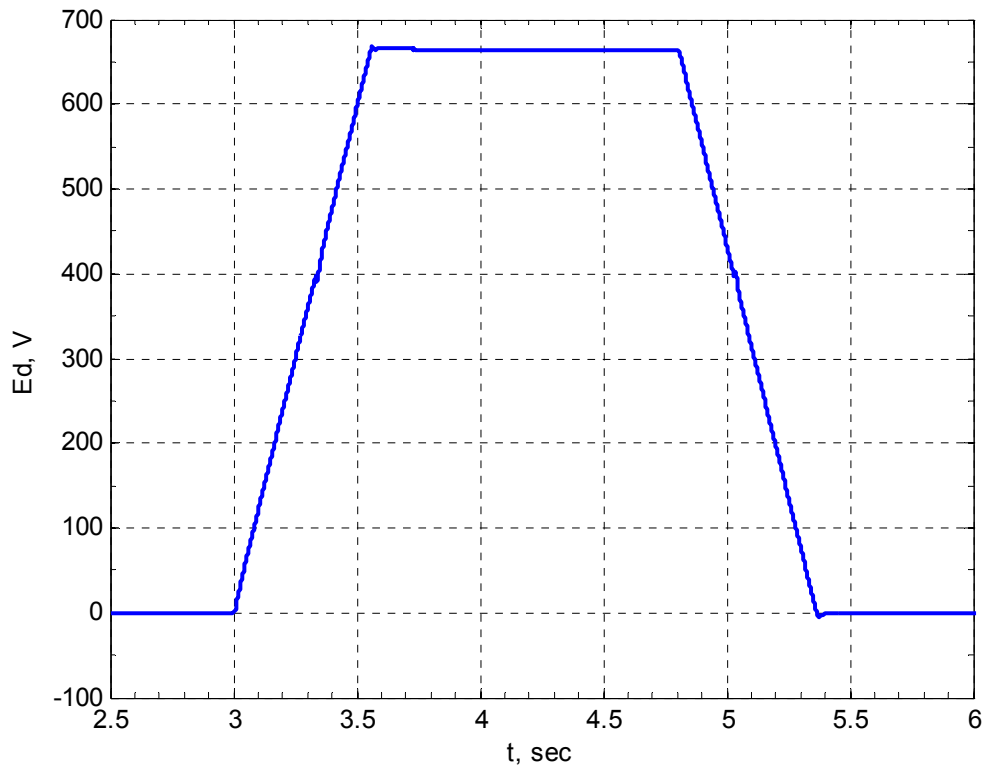


Рисунок 5.21 – Перехідний процес ЕРС при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу)

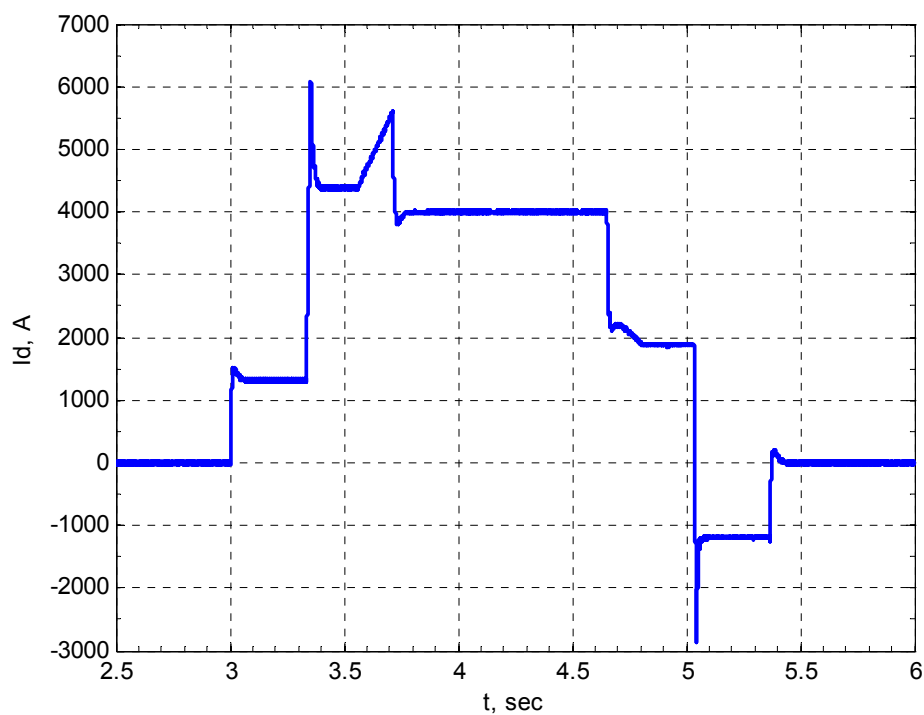


Рисунок 5.22 – Перехідний процес струму двигуна при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу) з урахуванням мережевої «просадки» напруги на 30%

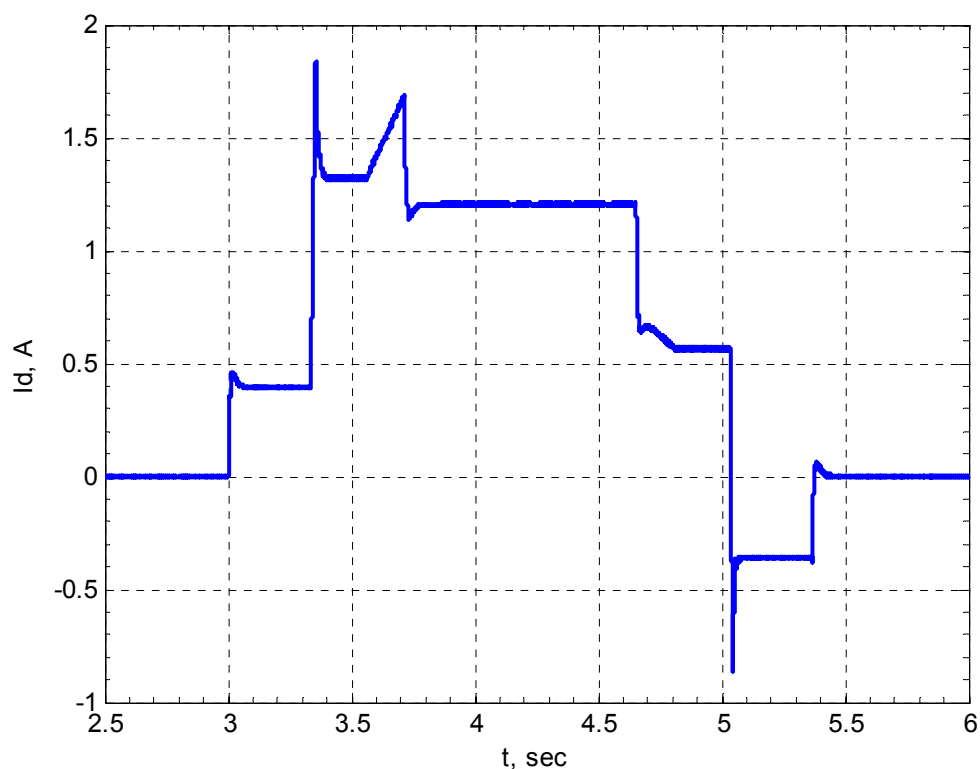


Рисунок 5.23 – Перехідний процес струму двигуна (в.о.) при прокатці з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу) з урахуванням мережевої «просадки» напруги на 30%

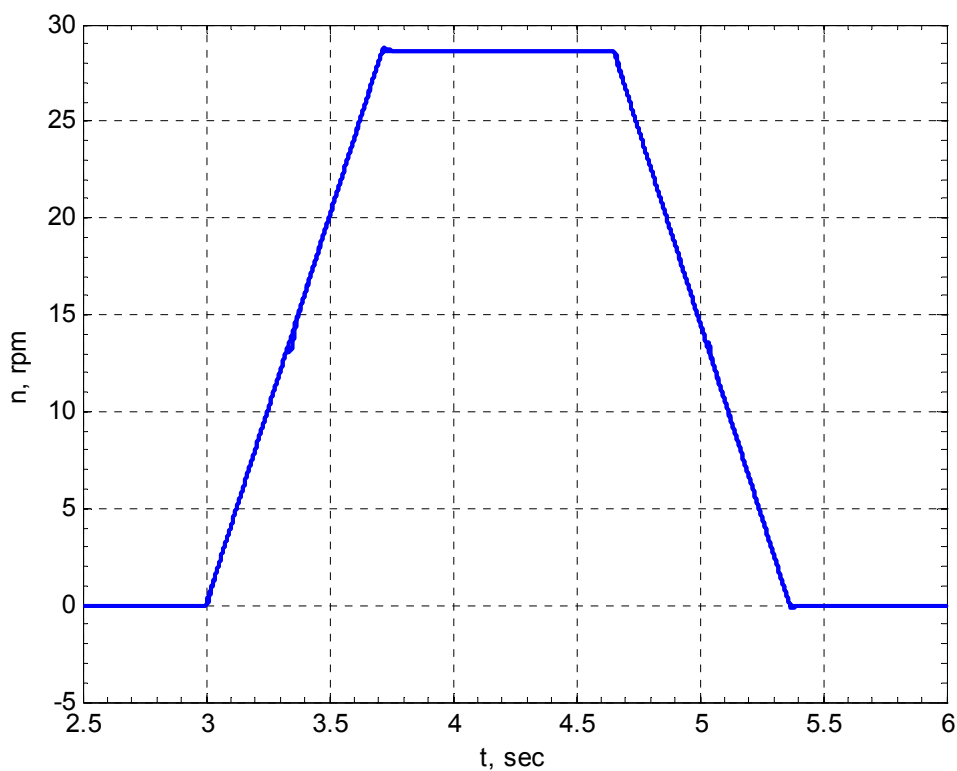


Рисунок 5.24 – Перехідний процес швидкості двигуна при імітації прокатки з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу) з урахуванням мережевої «просадки» напруги на 30%

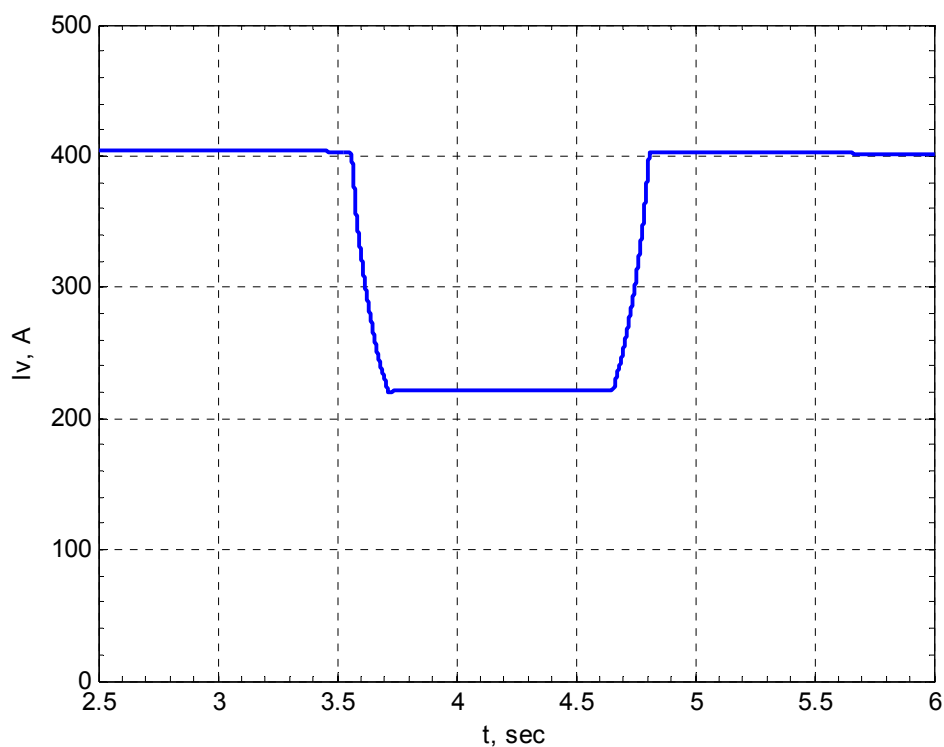


Рисунок 5.25 – Перехідний процес струму збудження при імітації прокатки з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу) з урахуванням мережевої «просадки» напруги на 30%

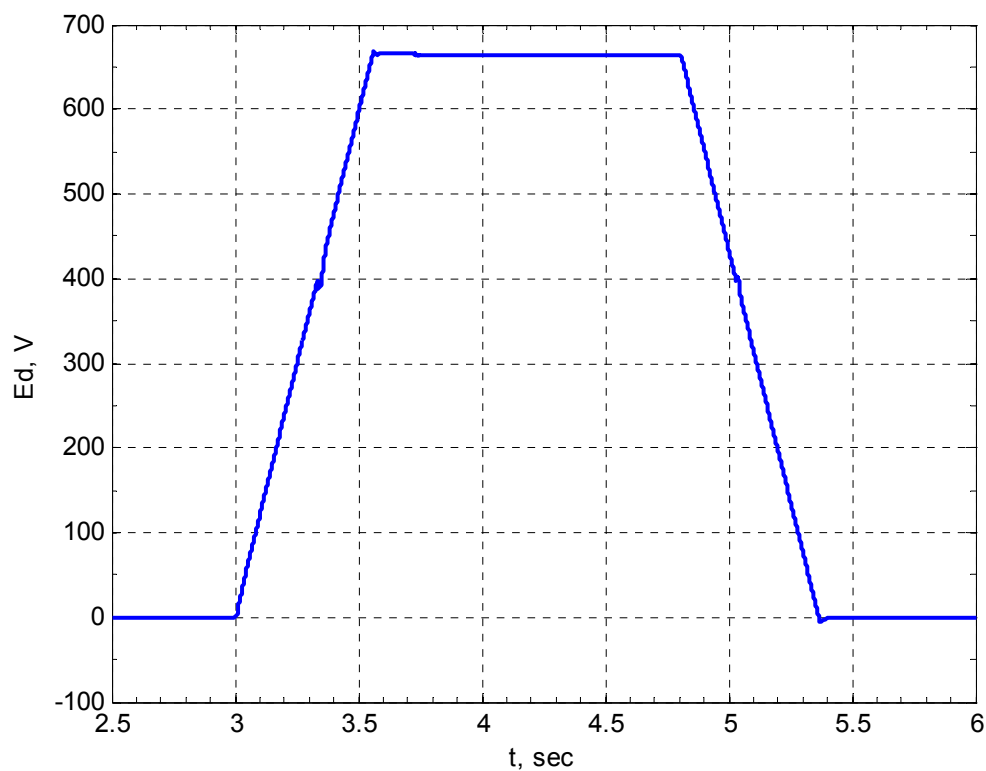


Рисунок 5.26 – Перехідний процес ЕРС при імітації прокатки з навантаженням (відпрацювання 1-го проходу) з урахуванням мережевої «просадки» напруги на 30%

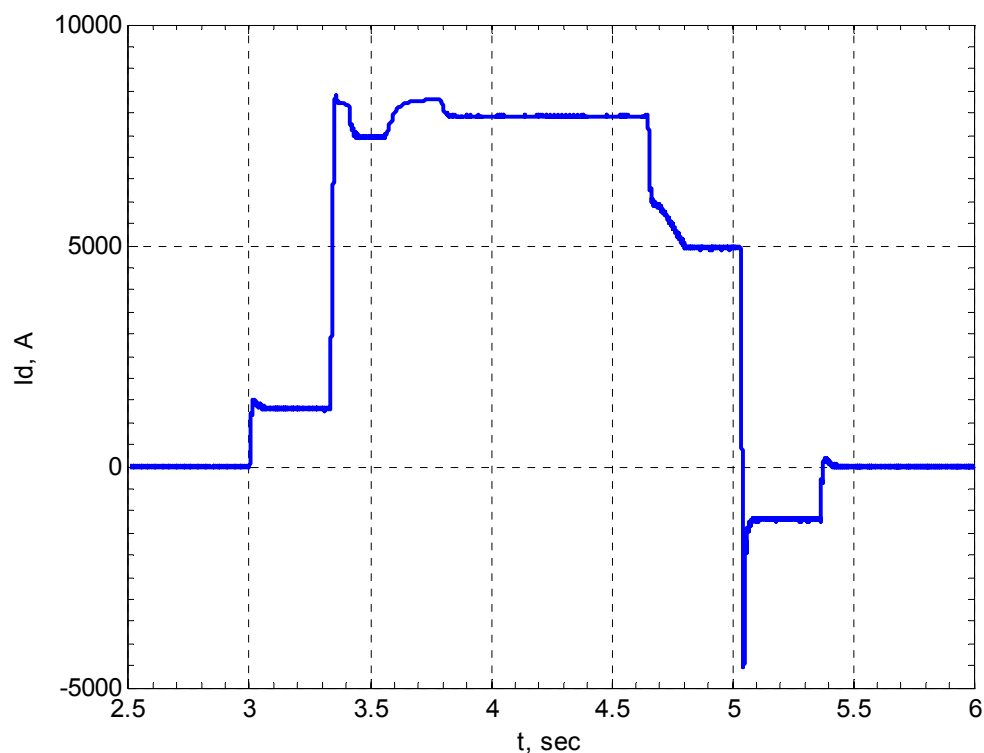


Рисунок 5.27 – Перехідний процес струму двигуна при технологічному збільшенні зусилля (моменту) в 2 рази (відпрацювання 1-го проходу)

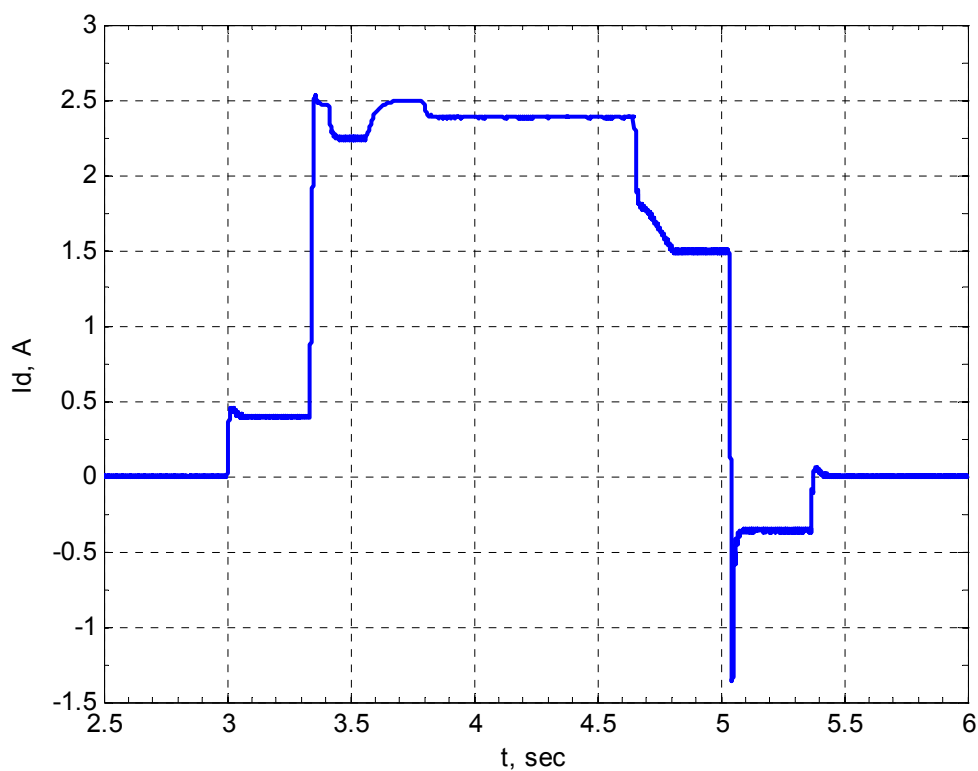


Рисунок 5.28 – Перехідний процес струму двигуна (в.о.) при технологічному збільшенні зусилля (моменту) в 2 рази (відпрацювання 1-го проходу)

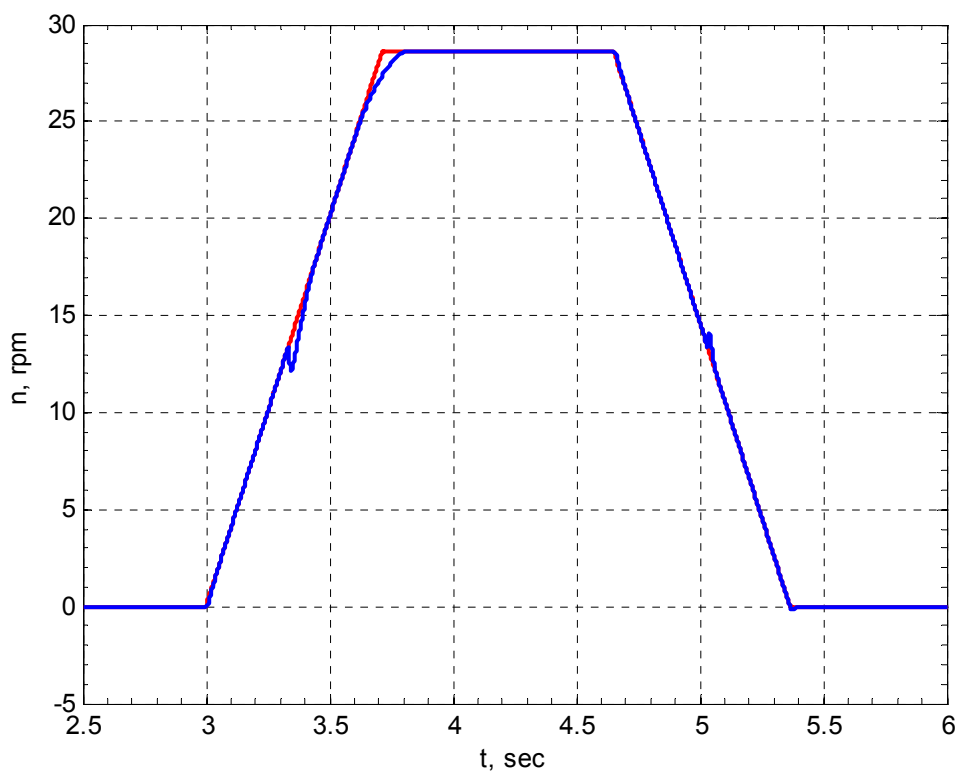


Рисунок 5.29 – Перехідний процес швидкості двигуна при технологічному збільшенні зусилля (моменту) в 2 рази (відпрацювання 1-го проходу)

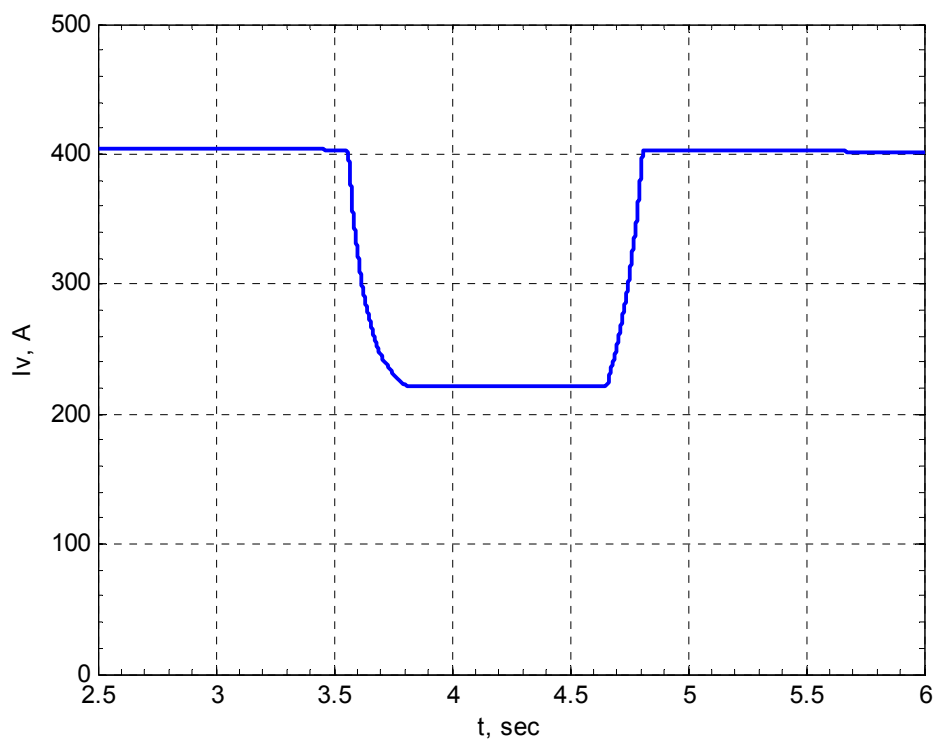


Рисунок 5.30 – Перехідний процес струму збудження при технологічному збільшенні зусилля (моменту) в 2 рази (відпрацювання 1-го проходу)

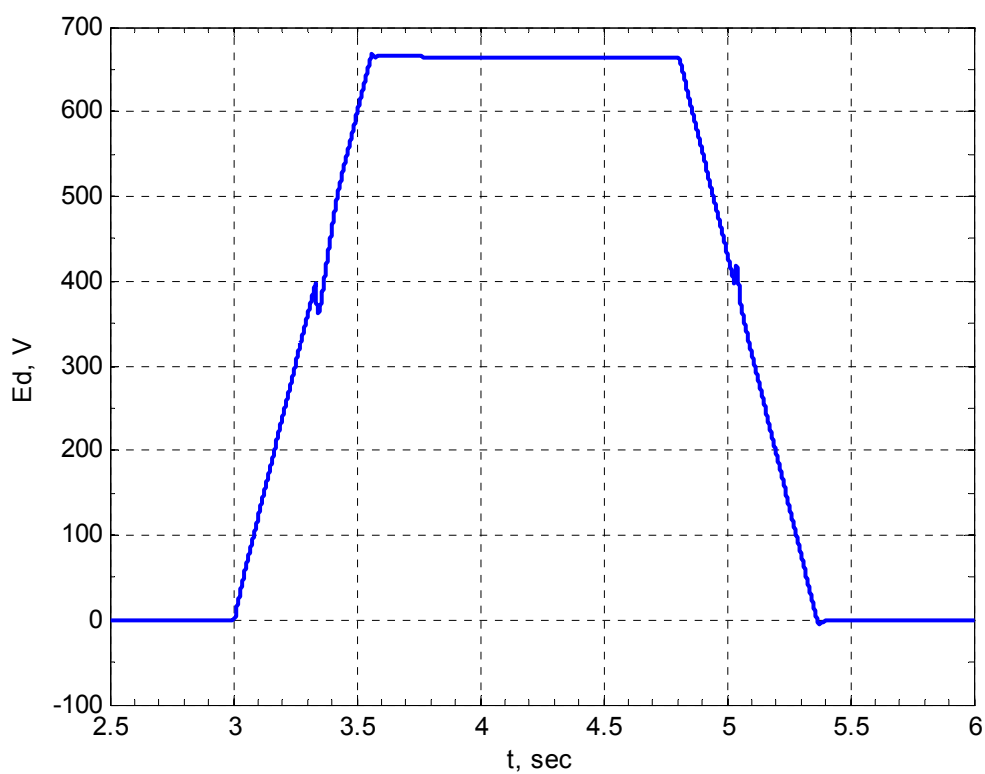


Рисунок 5.31 – Перехідний процес ЕРС при технологічному збільшенні зусилля (моменту) в 2 рази (відпрацювання 1-го проходу)

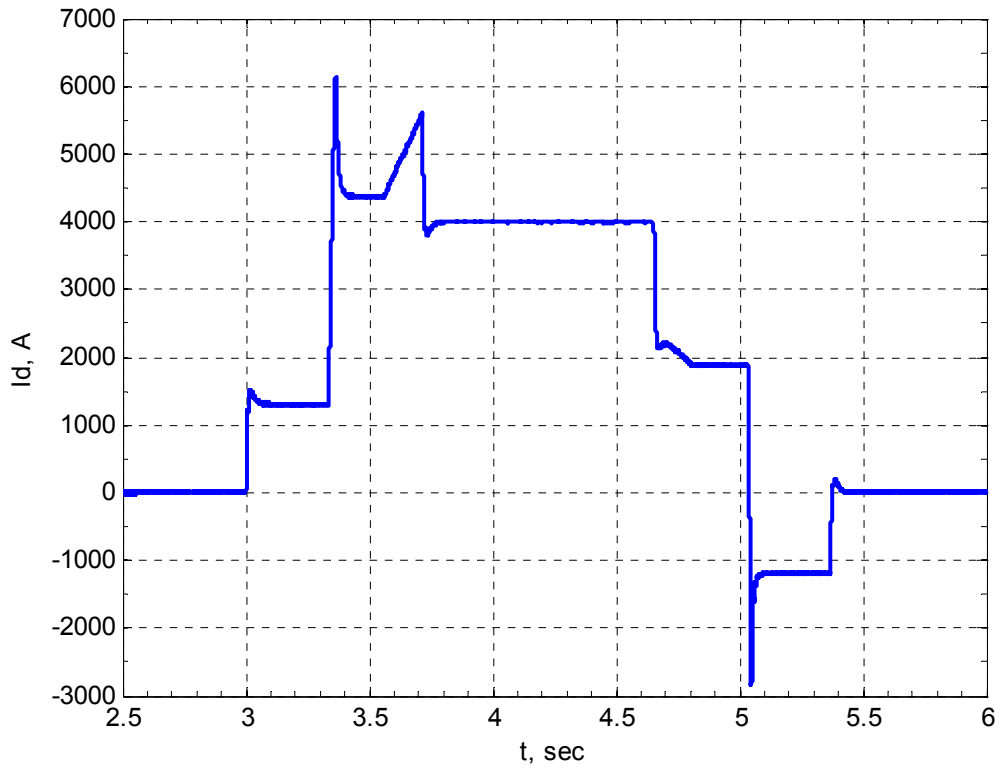


Рисунок 5.32 – Перехідний процес струму двигуна при збільшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

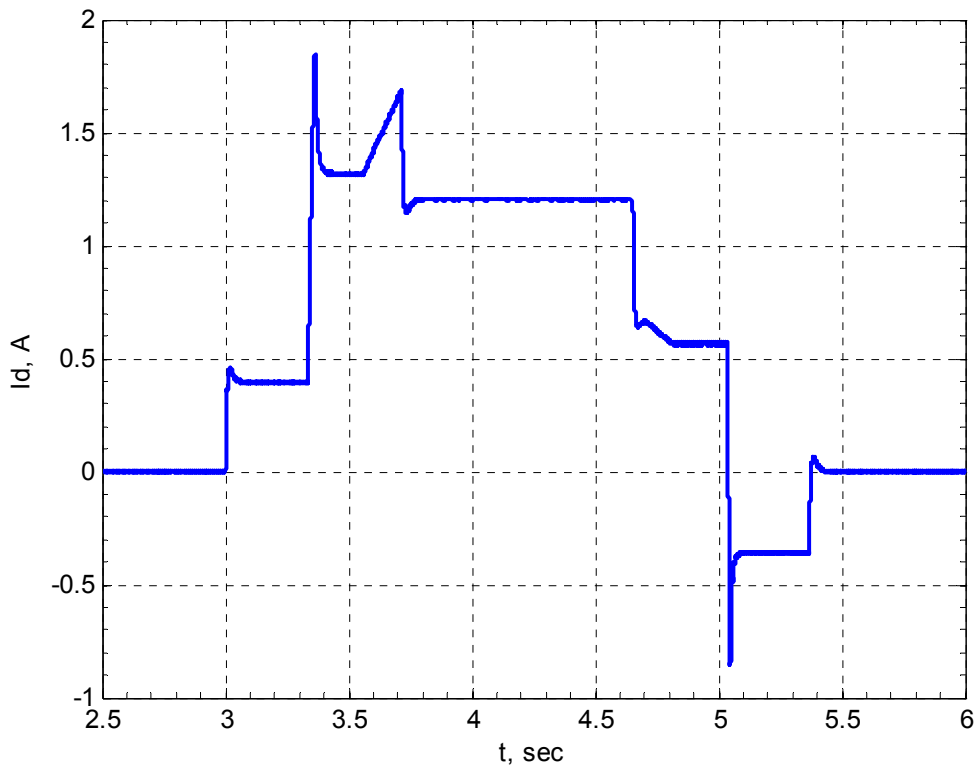


Рисунок 5.33 – Перехідний процес струму двигуна (в.о.) при збільшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

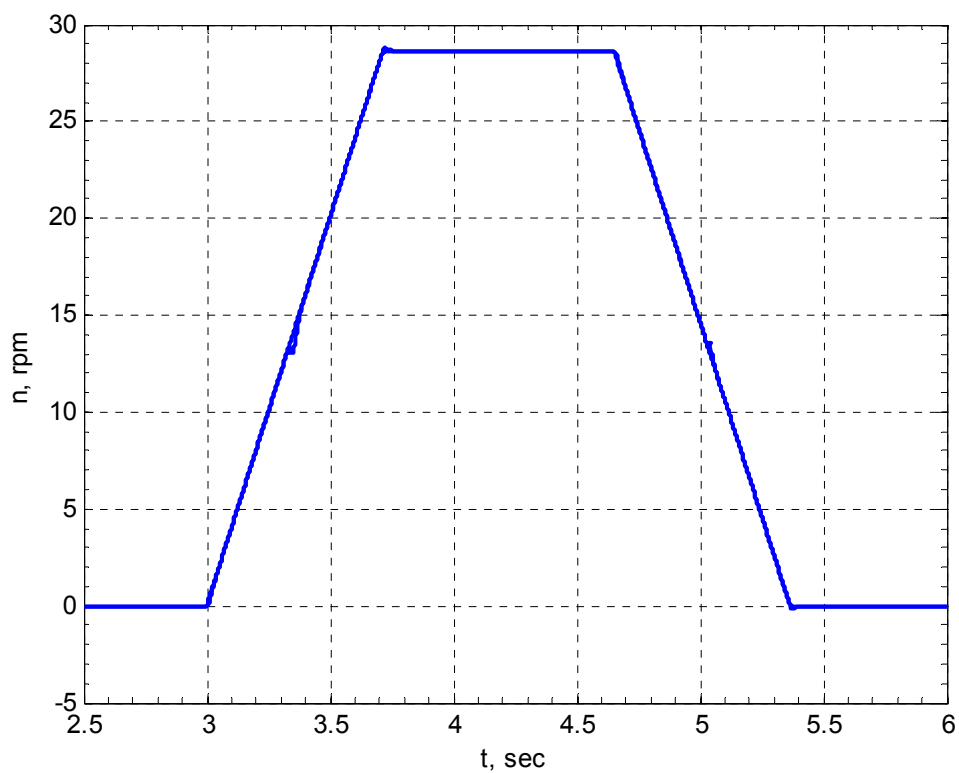


Рисунок 5.34 – Перехідний процес швидкості двигуна при збільшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

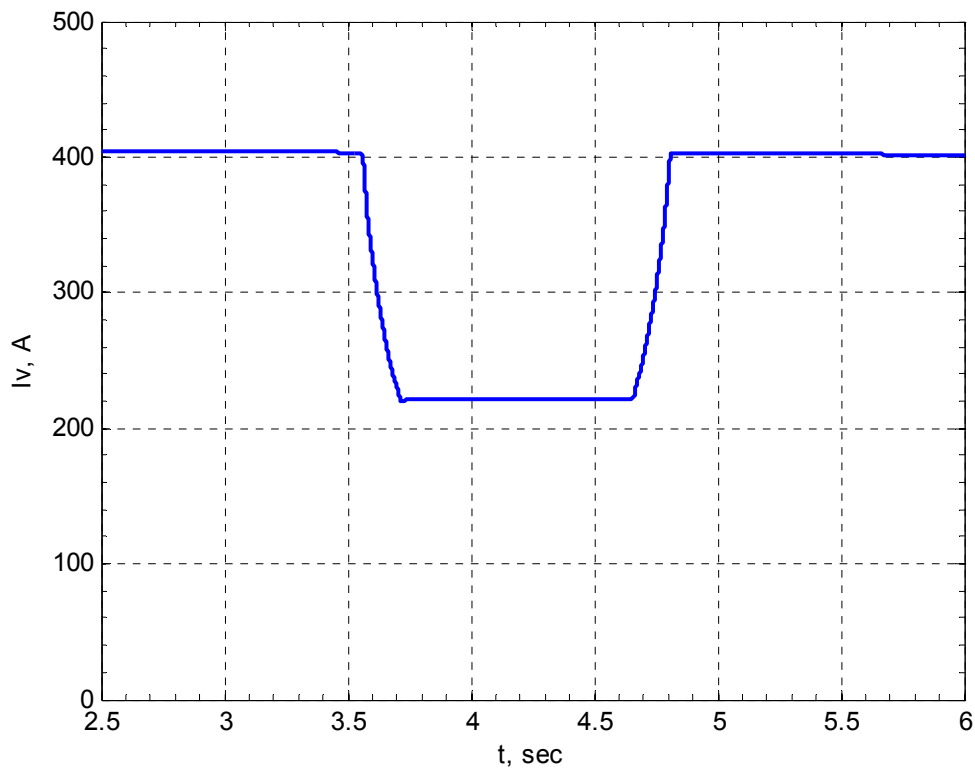


Рисунок 5.35 – Перехідний процес струму збудження при збільшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу



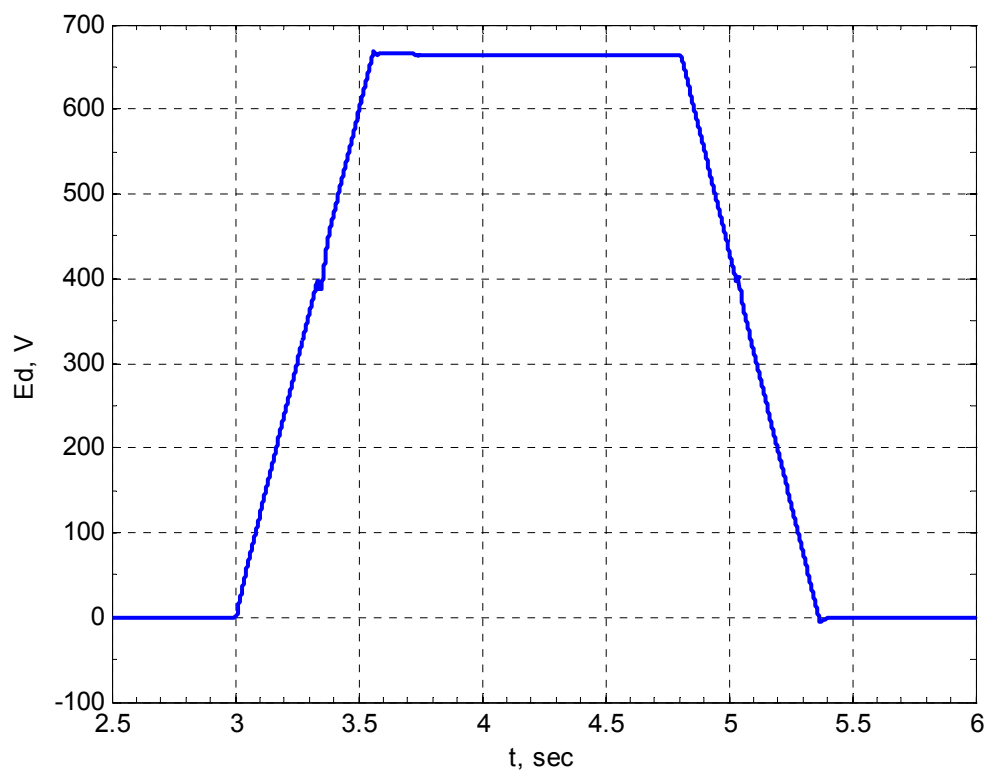


Рисунок 5.36 – Перехідний процес ЕРС при збільшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

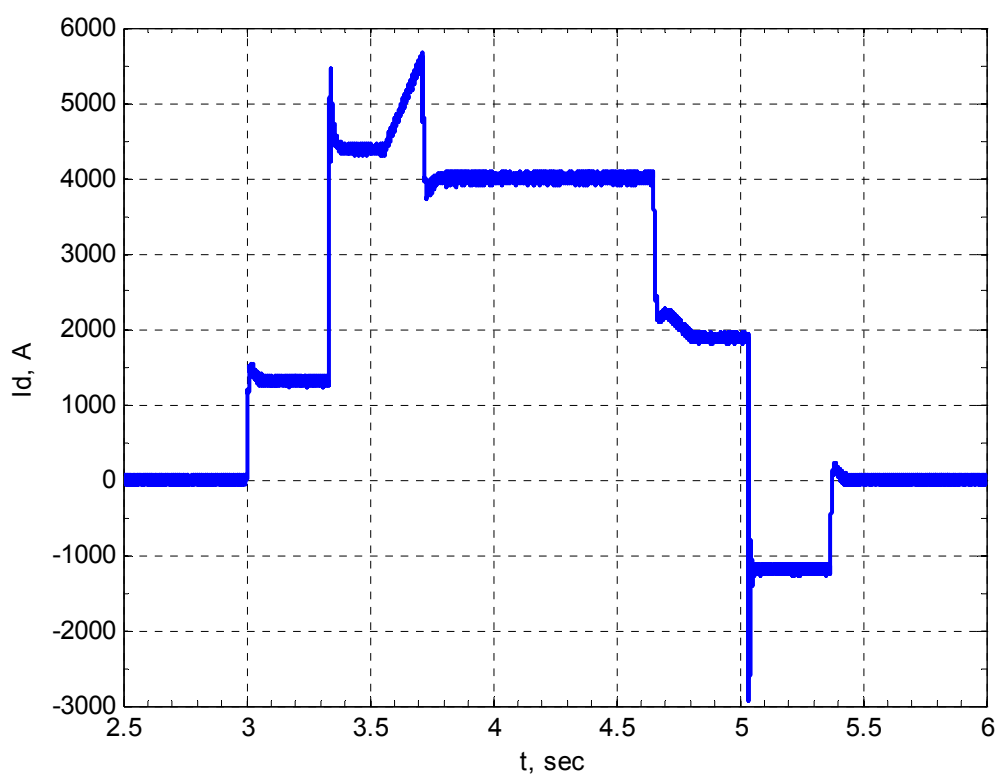


Рисунок 5.37 – Перехідний процес струму двигуна при зменшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

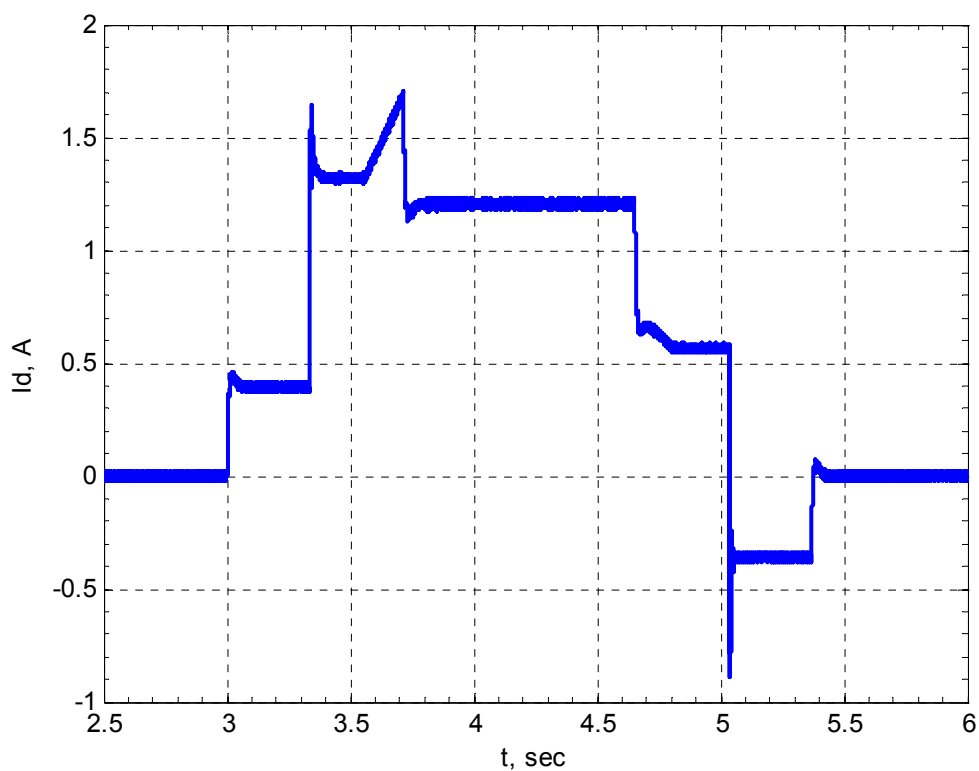


Рисунок 5.38 – Перехідний процес струму двигуна (в.о.) при зменшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

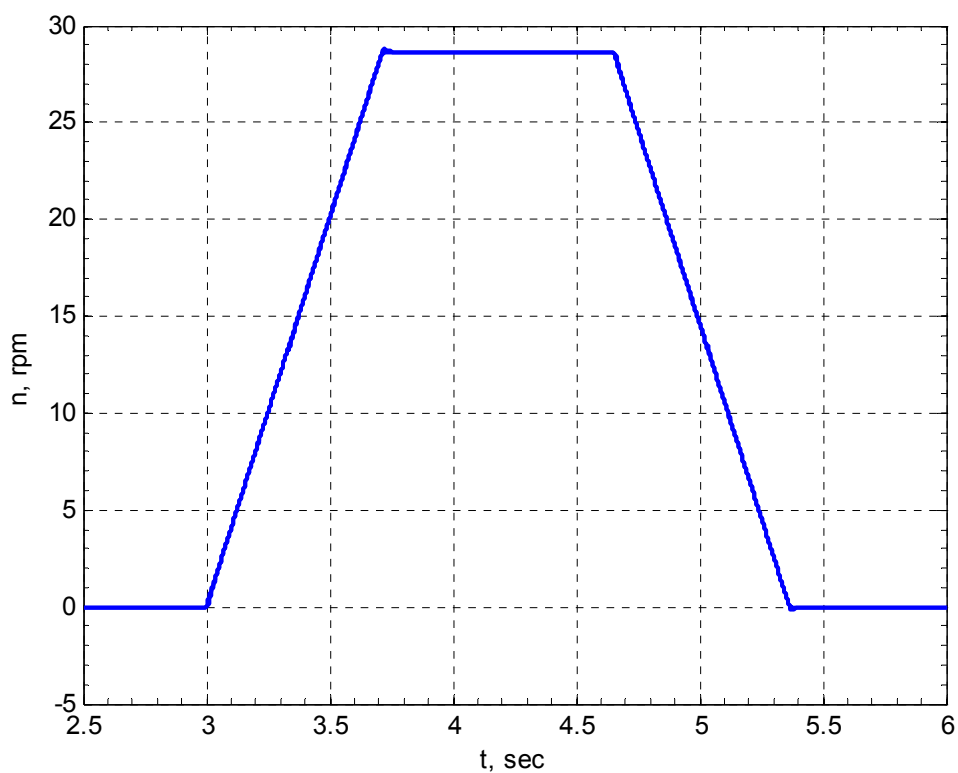


Рисунок 5.39 – Перехідний процес швидкості двигуна при зменшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

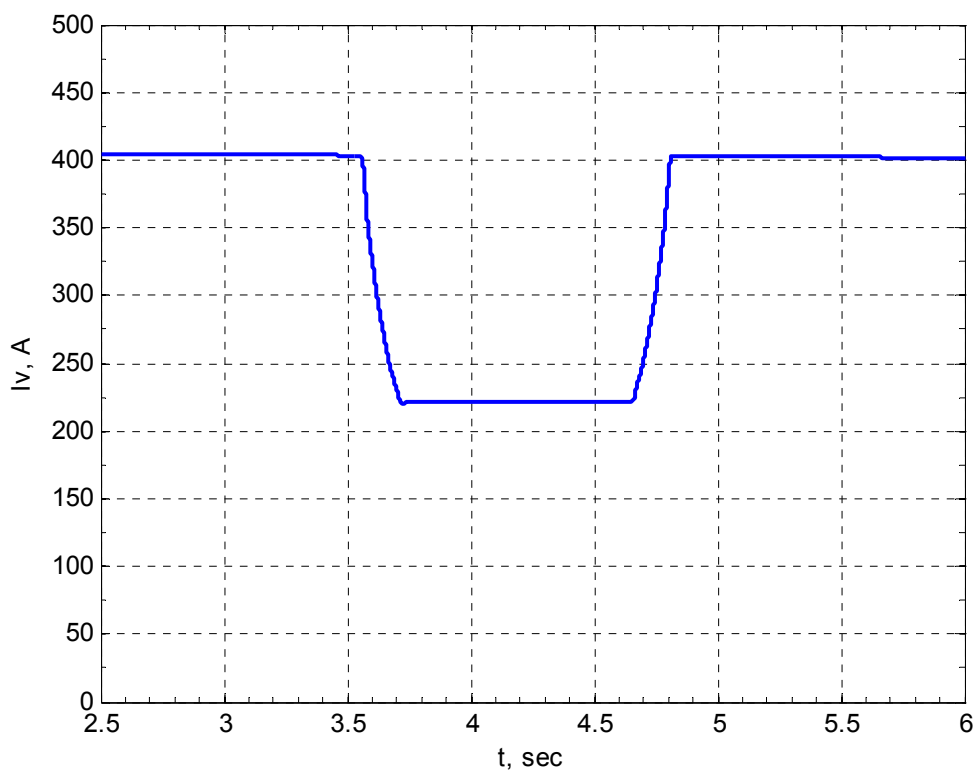


Рисунок 5.40 – Перехідний процес струму збудження при зменшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

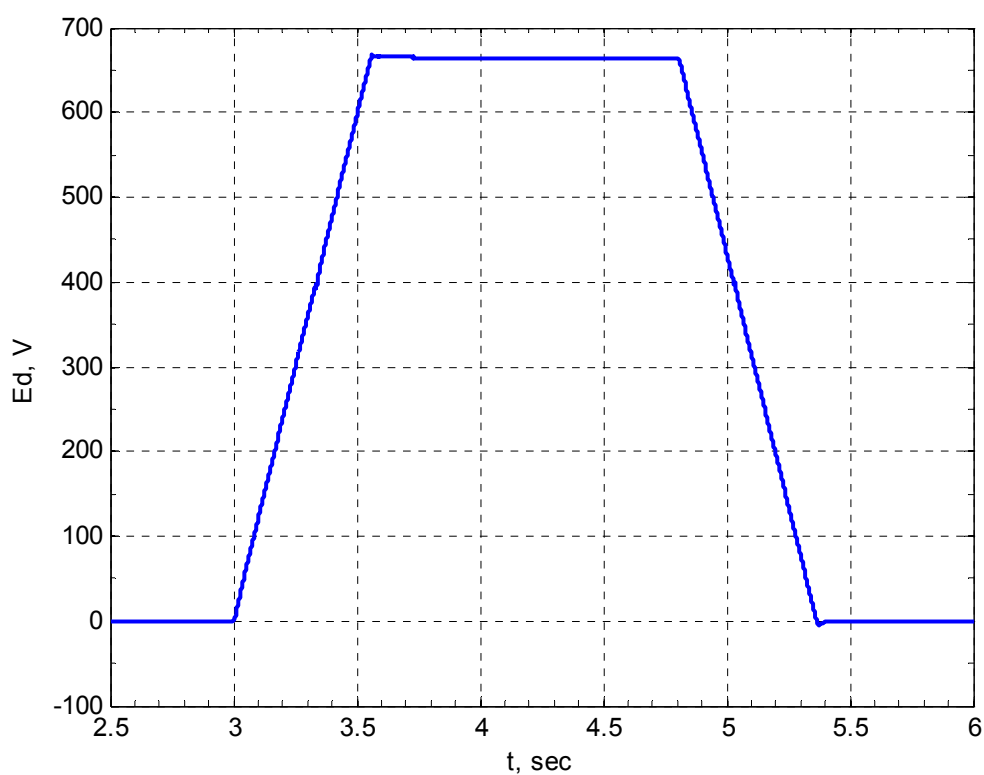


Рисунок 5.41 – Перехідний процес ЕРС при зменшенні  $R_e$  в 2 рази відпрацювання 1-го проходу

## ВИСНОВОК

На основі отриманих результатів теоретичних досліджень можна сформулювати наступні висновки:

1. Щодо об'єкта керування, яким є електропривід головного руху на основі електродвигуна постійного струму, визначено можливість ефективного використання оптимальних систем автоматичного регулювання (САР) для досягнення заданої швидкості з високими показниками якості.

2. Застосування методів оптимального (релейного) керування призвело до синтезу регулятора швидкості, що характеризується низькою чутливістю системи до параметричних збурень. Під час синтезу регулятора струму прийнято лінійний характер, враховуючи обмеження, які ставляться перед випрямляючою частиною реального тиристорного перетворювача. Регулятор швидкості побудований у релейному вигляді. Додатково введено два контури для більш ефективного керування: контур регулювання потоку та контур електрорегулювання (ЕРС).

3. Розроблені програмні коди у середовищі Matlab (набір m-файлів), які дозволяють проектувати оптимальні системи автоматичного регулювання для інших електромеханічних об'єктів.

4. Результати математичного моделювання, проведеного за допомогою середовища Matlab/Simulink для динамічних систем, підтверджують основні теоретичні положення, викладені у науковій роботі. Створені цифрові математичні моделі електропривода постійного струму з оптимальними регуляторами. Аналіз перехідних процесів свідчить про прийнятну якість у номінальному режимі. Проведено варіацію параметрів з метою наближення до реальних умов виробничих процесів, включаючи імітацію прокатки на максимальній швидкості та з урахуванням просадки напруги мережі на 15%. Також вивчено вплив збільшення моменту прокатки в 2 та 3 рази, а також зміну опору якірного ланцюга.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Уланов Г. М. Статические и информационные вопросы управления по возмущению. – М.: Энергия, 1970. – 256 с.
2. Емельянов С. В. Бинарные системы автоматического управления. – М.: МНИИПУ, 1984. – 315 с.
3. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424 с.
4. Цыпкин Я. З. Теория релейных систем автоматического регулирования. – М.: Гостехиздат, 1955. – 456 с.
5. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974. – 576 с.
6. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
7. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1961. – 367 с.
8. Борцов Ю. А., Юнгер И. Б. Автоматические системы с разрывным управлением / Ю. А. Борцов, И. Б. Юнгер. – Л.: Энергоатомиздат. 1986. – 167 с.
9. Аносов Д.В. Об устойчивости положений равновесия релейных систем. – Автоматика и телемеханика, 1959. – № 2. – С. 135-149.
10. Летов А. М. Математическая теория процессов управления. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
11. Красовский А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.
12. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 4. – С. 436-441.
13. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. II. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 5. – С. 561-568.
14. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. III. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 6. – С. 661-665.

15. Красовский Н. Н. К теории аналитического конструирования регуляторов / Н. Н. Красовский, А. М. Летов. – Автоматика и телемеханика, 1962. – № 6. – С. 713-719.

16. 90. Салуквадзе М. Е.. Об аналитическом конструировании регуляторов при постоянно действующих возмущениях. – Автоматика и телемеханика, 1962. – № 6. – С. 721-730.

17. Чжан Жень-вей. Одна задача синтеза оптимальных систем по принципу максимума. – Автоматика и телемеханика, 1961. – № 10. – С. 1302-1308.

18. Чжан Жень-вей. Синтез релейных систем по минимуму интегральных квадратичных отклонений. – Автоматика и телемеханика, 1961. – № 12. – С. 1601-1608.

19. Пряхин Н. С. К вопросу об аналитическом конструировании регуляторов. – Автоматика и телемеханика, 1963. – № 9. – С. 1183-1189.

20. Параев Ю. И. Одна задача аналитического конструирования регуляторов. – Автоматика и телемеханика, 1964. – № 2. – С. 167-172.

21. Попов Ю. Б. Некоторые вопросы качества регулирования в задачах аналитического конструирования оптимальных регуляторов. – Автоматика и телемеханика, 1964. – № 9. – С. 1263-1269.

22. Красовский А. А. Интегральные оценки моментов и синтез линейных регуляторов. – Автоматика и телемеханика, 1967. – № 10. – С. 53-71.

23. Красовский А. А. Интегральные оценки моментов и синтез нелинейных регуляторов. – Автоматика и телемеханика, 1967. – № 12. – С. 26-37.

24. Красовский А. А. Статистическая теория переходных процессов системах управления. – М.: Наука, 1968. – 240 с.

25. Красовский А. А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973. – 558 с.

26. Дружинин Н. Н. Автоматизация и электропривод металлургических машин и агрегатов / Под ред. Н.Н. Дружинина // Труды ВНИИМЕТМАШ, сборник научных работ №47.–М., 1977.–149 с.

27. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н. Н. Дружинин – М. :«Металлургия», 1975. – 336 с.
28. Файнберг Ю. М. Авторегулирование при холодной прокатке / Ю. М. Файнберг – Х.: Metallurgizdat, 1960. – 186 с.
29. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
30. Борцов Ю. А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский –Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
31. Егоров В. Н. Динамика систем электропривода / В. Н. Егоров, В. М. Шестаков – Л., Энергоатомиздат., 1983. – 216 с.
32. Зеленов А.Б. Электропривод механизмов прокатных станов / А. Б. Зеленов, В. Н. Тертичников, В. Г. Гулякин – Х., 1963. – 339 с.
33. Зеленов А. Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з вентильними перетворювачами. Навч. посіб. Для студ. Вузів / А. Б. Зеленов, И. С. Шевченко, Н. И. Андреева – Алчевськ: ДГМІ, 2002. – 400 с.
34. Зеленов А. Б. Теория электропривода, ч.1, 2: учебное пособие / Сост.: А. Б. Зеленов – Алчевск, ДонГТУ, 2005. – 382 с.
35. Полилов Е. В. Опыт разработки и внедрения систем регистрации электрических процессов и событий электроприводов линии стана / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – Вып. 4/2005(33). – С. 9–11.170.
36. Башарин А. В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский -Л., Энергоиздат., 1982. – 392 с.
37. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов – М.: Изд-кий центр «Академия», 2007. – 576 с.

38. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Учебник для вузов / В. И. Ключев, В. М. Терехов – М., Энергия, 1980. – 360 с.

39. Ключев В.И. Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводах / В.И. Ключев // Электричество, 1971. –№9.– С.47–51.

40. Садовой А. В. Система оптимального выравнивания скоростей взаимосвязанных электроприводов / А. В. Садовой, С. Б. Иванов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 1998. – №1. – С. 1–6.

41. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина – К.: ИСИМО, 1996 – 298 с.

42. Лимонов Л. Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Л. Г. Лимонов – Х.: Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.

43. Клепиков В. Б. Определение границ устойчивости электроприводов с вязким трением с учетом упругости кинематической цепи / В. Б. Клепиков, А. В. Осичев А.В. // Электричество, 1989. – №1. – С.36–41.

44. Толочко О. И. Исследование переходных процессов в системах двухзонного регулирования скорости / О. И. Толочко, П. А. Максаев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 1998. – №1. – С. 1–4.

45. Толочко О. И. Трехконтурная система подчиненного регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта / О.И. Толочко, Р.В. Федоряк, П.Х. Коцегуб // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 1998. – №1 – С.44–46.

46. Толочко О. И. Трехконтурная система подчиненного регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта / О. И. Толочко, Р.В. Федоряк, П.Х. Коцегуб // Вісник Кременчуцького державного



політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 1998. – №1 – С.44–46.

47. Толочко О. И. Система позиционного электропривода с комбинированным управлением по задающему и возмущающему воздействиям / О. И. Толочко, П. Х. Коцегуб, П. И. Розкаряка // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського.– Кременчуг: КДПУ, 2004. – Вып. 3/2004 (26). – С.14–17.

48. Толочко О. И. Синтез наблюдателей состояния для двухзонных систем косвенного регулирования скорости / О. И. Толочко, П. Х. Коцегуб, О. В. Писковатская // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 2005. – Вып. 4/2005 (33). – С. 12–14.

49. Коцегуб П. Х. Система подчиненного регулирования с фильтром в канале компенсации влияния статического момента / П. Х. Коцегуб, О. И. Толочко, В. Ю. Мариничев, П. И. Розкаряка // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КДПУ, 2004. – Вып.3/2004(26). – С. 28–42.172

50. Коцегуб П. Х. Синтез вентильных приводов постоянного струму: Навч. Посібник / П. Х. Коцегуб – К.: ІЗМН, 1997. – 122 с.

51. Michele Brencich. Rolling mill automation control system / Michele Brencich, Stefano Arondi // Millenium steel, 2008. – p. 149–152.

52. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання / С. М. Довгань – Дніпропетровськ, 2001. – 137с.

53. Герасимьяк Р.П. Оптимальные системы автоматического управления электроприводов: Учеб. пособие / Р.П. Герасимьяк. – Одесса, ОГПУ, 1998.- 72 с.

54. Зеленов А. Б. Теория электропривода ; часть 2 : учебн. пособ. / А. Б. Зеленов. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – 394 с.

55. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков : учебн. пособ. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / А. А. Королев – М.: "Металлургия", 1985. – 376 с.

56. Пілецький В. Т. Вибір елементів реверсивних тиристорних перетворювачів електроприводів постійного струму / В.Т.Пілецький. – К.: ІСДО, 1994. – 148 с.