

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ .....	11
2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КУРУВАННЯ ТА ЙОГО ТЕХНОЛОГІЧНІ ДАННІ.....	19
2.1 Опис конструкції та роботи станинних роликів чорнової кліті.....	19
2.2 Вимоги до електроприводу станинних роликів.....	21
2.3 Розрахунок статичних моментів.....	22
2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень .....	25
2.5 Час керування електроприводом.....	29
2.6 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву.....	34
3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ .....	36
3.1 Вибір комплектного електропривода.....	36
3.2 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя.....	40
3.3 Принципової схеми силової частини електроприводу станинних роликів.....	44
3.4.1 Джерела живлення електродвигунів (SIMOREG DC Master) .....	47
3.4.2 Резервування комплектного електроприводу.....	47
3.5 Система автоматизації.....	48
3.6 Математичний опис об'єкта керування.....	49
3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електропривода.....	50
3.8 Синтез регулятора струму.....	52
3.9 Синтез регулятора швидкості .....	56
3.10 Розрахунки задатчика інтенсивності швидкості.....	60
3.11 Моделювання ЕП з підпорядкованою системою керування в середовищі Matlab/Simulink.....	64
4 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ .....	74
4.1 Загальні положення синтезу системи методом аналітичного	

5	
конструювання регуляторів .....	75
4.2 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат .....	77
4.3 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат .....	80
4.4 Математичне моделювання електроприводу станинних роликів з релейною системою керування в середовищі Matlab/Simulink.....	82
4.5 Стратегія ефективного управління підприємствами на основі обліку енергоспоживання.....	91
ВИСНОВОК.....	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	99
Додаток А .....	106

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Перші ролики, які розташовані по обидва боки прокатної кліті (до трьох роликів з кожного боку), отримали назву "станинні". Ці ролики застосовуються виключно на великих обтискних заготівельних станах, що прокочують короткі злитки. Їх розташування максимально близько до валків призначене для ефективного подавання металу в кліт зі швидкістю, відповідною швидкості обертання прокатних валків або навіть трошки більшою. Станинні ролики відіграють ключову роль у завданні металу у валки та його прийманні з валків прокатної кліті. Загальна довжина рольгангів досить велика, а їх вага складає 20-30% від загальної маси механічного обладнання прокатного стану. Залежно від призначення рольганги поділяються на робочі та транспортні.

Робочі рольганги, які розташовані безпосередньо у робочій кліті стану, використовуються для завдання прокочуваного металу у валки та його приймання. Перші ролики, розташовані праворуч і ліворуч від валків стану (по одному або два з кожного боку), отримали назву "станинні".

Транспортні рольганги (підвідні та відвідні) призначені для забезпечення зв'язку між окремими допоміжними машинами та пристроями прокатного стану.

В сучасному виробництві однією з найпоширеніших та масово виготовлюваних систем керування електроприводом є системи, побудовані на принципі підпорядкованого регулювання. Порівняно з попередніми системами, вони вирізняються великою швидкодією, використанням уніфікованих елементів, що спрощує проектування та складання. Проте ці системи мають значний недолік - високу чутливість до параметричних та зовнішніх збурень.

При розробці систем керування для електроприводів важливо досягти високої точності виконання завдань та знизити чутливість до змін параметрів об'єкта керування та зовнішніх впливів. Отримання ефективної роботи в технологічній сфері обов'язково повинно поєднуватися з раціональним використанням матеріальних і трудових ресурсів, а також врахуванням витрат

виробництва та експлуатації обладнання. Таким чином, системи керування оптимального типу стають надзвичайно важливими для досягнення ефективності в електроприводах, особливо при умовах стрімкого зростання їхньої питомої ваги в сучасному виробництві.

Сучасні тенденції в автоматизації технологічних процесів диктують потребу у спільних принципах синтезу систем керування для складних об'єктів. Важливим аспектом є максимальне врахування та ефективне використання властивостей об'єкта керування. Зокрема, цей підхід сприяє розвитку нових принципів та законів керування, які, крім досягнення високої якості керування, також гарантують високі техніко-економічні показники системи. У цьому контексті важливо виявити та використовувати специфічні властивості об'єкта управління, які обумовлені його фізичною природою.

Вирішення цих завдань може визначити нові принципи та методи синтезу систем керування, але в умовах нелінійності світу не існує універсальних методів, що були б аналогічні до лінійної теорії управління. Кожна нелінійність є унікальною та вимагає індивідуального підходу до синтезу.

Автоматизовані електроприводи (ЕП) є важливим компонентом сучасних технічних систем, а зокрема, вони є ключовим споживачем електроенергії у промислово розвинених країнах. Більш як 60% енергії, виробленої в цих країнах, споживається саме автоматизованими електроприводами [7-12]. З урахуванням того, що третина виробленої електроенергії йде на виробництво, а споживання електроенергії зростає, виникає актуальна задача раціонального використання енергії та мінімізації витрат. Одним із способів вирішення цієї задачі є розробка алгоритмів керування електроприводами, які забезпечують виконання завдань керування з мінімальними втратами електроенергії [13-18].

В сучасний період найбільш перспективними в розрізі ККД та компактності конструкції є ЕП на основі електричних машин змінного струму, живлення яких здійснюється від силових напівпровідникових перетворювачів напруги. Однак електроприводи постійного струму залишаються активно задіяними на підприємствах, зокрема, у металургійній галузі.

Важливою рисою таких ЕП є релейна нелінійність, яка виникає через роботу сучасних силових приладів у "ключовому режимі" для мінімізації енергетичних втрат [8-9, 11, 15-16, 19-22]. Такі динамічні системи є принципово нелінійними та описуються диференціальними рівняннями з розривним управлінням, тобто релейним керуванням.

Історія релейних систем налічує вже більше століття і починається з використання релейного зворотного зв'язку Ч. Шофілдом в 1836 році [14, 23, 24]. Незважаючи на схильність релейних систем до автоколивань, простота їхньої реалізації та високі динамічні властивості, а також властивість самоадаптації при зміні параметрів і навантаження, забезпечили цим системам широке поширення і розвиток теорії релейних систем.

У період формування теорії релейних систем ключовими науковцями були А.А. Андронов, Я.З. Ципкін та І.Флюгге-Лотц. З цього етапу виокремилися два самостійні напрями: теорія нелінійних систем автоматичного керування з різними видами модуляції та теорія систем автоматичного керування зі змінною структурою. Останній напрямок виник як результат внеску академіка С.В. Ємельянова, який виховав цілу групу вчених, що внесли значний внесок у розвиток теорії. Основна ідея цієї теорії полягає в використанні ковзного режиму - спеціального руху, що виникає в релейних системах при певних умовах.

Ковзний режим, що є характерною рисою цієї теорії, забезпечує високу якість процесів керування, інваріантність до зовнішніх збурень та малу чутливість до змін динамічних властивостей об'єкта керування.

Далі теорія систем зі змінною структурою розвинулася в теорію систем з розривним управлінням та теорію бінарних систем. Перша з них використовує багатовимірний змінний режим у просторі стану для вирішення завдань керування, а друга базується на принципі бінарної природи сигналів в нелінійних динамічних системах.

Застосування ковзних режимів для керування електроприводами на основі напівпровідникових перетворювачів з релейними регуляторами знайшло широке застосування. Це особливо актуально з урахуванням прогресу

напівпровідникової техніки і переходу до силових напівпровідникових перетворювачів, силові елементи яких працюють в ключовому (релейному) режимі. Більш того, фахівці в галузі електроприводу також вдалися до використання релейних законів керування на основі ковзних режимів.

Шалений розвиток силової напівпровідникової техніки відбувся паралельно з появою нових високочастотних силових приладів, заснованих на технологіях MOSFET і IGBT. Це відкрило безмежні перспективи для розробки та удосконалення провідникових перетворювачів електричної енергії, які утвердились як крайній камінь для автоматизованих електроприводів протягом останнього десятиліття. Нові технологічні рішення активно застосовують багатовимірне релейне керування, зокрема в контурі регулювання фазних струмів електродвигуна, що підтверджується стрімким зростанням обсягу публікацій. Варто відзначити, що саме такий вид регулювання у різних джерелах може мати різні найменування: "релейне керування" [8, 9], "розривне керування" [19, 50], частотно-токове керування, "керування на ковзних режимах", "hanging control", "hysteresis current control", "current forced control", "direct torque control" і так далі. З точки зору максимально повного пояснення процесів, що відбуваються при використанні цього типу керування, виправдане використання терміну "керування на ковзних режимах".

**Об'єктом дослідження** є електромагнітні та механічні процеси в електроприводі постійного струму та підвищення показників якості його роботи (мінімізація статичної й динамічної помилок відпрацювання швидкості).

**Предметом дослідження** є електропривод постійного струму станинних роликів чорнової кліті товстолистового стану з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

**Метою** роботи є синтез та дослідження релейної системи керування електроприводом станинних роликів чорнової кліті товстолистового стану, яка має необхідні (високі) показники якості в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- розрахувати та вибрати двигун та силове обладнання електропривода;
- синтезувати регулятори класичної системи підпорядкованого керування;

- синтезувати релейні регулятори, структура яких реалізована на доступних технічних засобах та забезпечують необхідні динамічні і статичні показники електропривода механізму ножиць поперечного різання;

- провести аналіз роботи синтезованих систем за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях у середовищі моделювання динамічних систем Matlab/Simulink;

- визначити залежності показників якості релейної системи від параметрів об'єкта керування.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У системах автоматичного регулювання технологічних процесів мають місце коливання параметрів. Наприклад, загальний коефіцієнт підсилення системи регулювання товщини на реверсивному стані холодної прокатки алюмінію змінюється приблизно в 4 рази в каналі регулювання товщини натискним пристроєм і приблизно в 15 разів в каналі регулювання товщини натягом. У багатьох об'єктах управління, що мають механізми з кривошипно-шатунною передачею, може істотно змінюватися приведений до вала двигуна момент інерції й обумовлена ним електромеханічна стала часу.

Найбільше поширення одержали неперервні системи з підпорядкованим регулюванням і послідовним коригуванням завдяки простій методиці їхнього розрахунку і налагодження. Ці системи в багатьох випадках задовольняють вимогам, що висуваються до електроприводу. Однак такі системи мають і істотний недолік - високу чутливість до параметричних і зовнішніх збурювань. Відомо, що в процесі експлуатації відбувається старіння елементів системи, збільшуються температурні похибки, змінюються характеристики окремих вузлів (сталі часу, коефіцієнти підсилення). Змінювання параметрів об'єкту управління і контурів регулювання відразу ж позначається на якості динамічних режимів роботи електропривода, на якості формування діаграм струму і швидкості електродвигуна.

Недоліком лінійних систем підпорядкованого регулювання, як показано в [51], є також статизм по збуренню однократно інтегруючих систем і велике динамічне падіння швидкості в дворазово інтегруючих системах. А умови стійкості не дозволяють використовувати в лінійних системах великий коефіцієнт підсилення.

Таким чином, при синтезі системи управління електроприводом одночасно необхідно забезпечити високу точність відпрацьовування завдання, тобто оптимізацію за мінімумом інтегральної квадратичної похибки, а також низьку чутливість до змінень різних параметрів об'єкту управління та до



зовнішніх збурювань. При такій постановці задачі найбільш перспективним є створення систем оптимального управління, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення. У таких системах не повинне бути протиріччя між точністю і стійкістю.

Меєровим М. В. показано, що стійкі лінійні системи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення мають властивості інваріантності до параметричних збурювань [52]. Проілюструємо це положення, розглядаючи об'єкт управління з передатною функцією  $W_0(p)$ . Управляючий пристрій (рис. 1.1) складається з двох підсилювачів з великими коефіцієнтами підсилення ( $K_1$  і  $K_2$ ). Один з підсилювачів охоплений стабілізуючим пристроєм з передатною функцією  $W_c(p)$ , а об'єкт управління піддається впливу збурень, що на рис 3.1 приведені до його входу і представлені величиною  $f_{\Pi}$ .

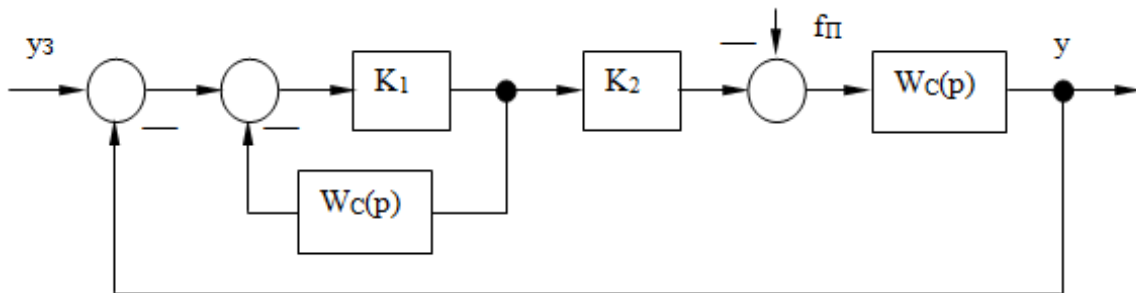


Рисунок 1.1 – Структурна схема замкненої лінійної системи регулювання

Передатні функції цієї замкненої системи за завданням та збуренням відповідно такі:

$$W_{y_3}(p) = \frac{y_1(p)}{y_3(p)} = \frac{K_1 K_2 W_0(p)}{1 + K_1 W_c(p) + K_1 K_2 W_0(p)}, \quad (1.1)$$

$$W_{f_{\Pi}}(p) = \frac{y_2(p)}{f_{\Pi}(p)} = -\frac{W_0(p)[1 + K_1 W_c(p)]}{1 + K_1 W_c(p) + K_1 K_2 W_0(p)}. \quad (1.2)$$

Зображення вихідної величини  $y(p)$  визначається в такий спосіб:

$$y(p) = y_1(p) + y_2(p) = W_{y_3}(p) \cdot y_3(p) + W_{f_{\Pi}}(p) \cdot f_{\Pi}(p)$$

Після підстановки в цей вираз значень  $W_{y_3}$ ,  $W_{f_{II}}(p)$  і виконання необхідних перетворень виходить наступне рівняння для визначення  $y(p)$ :

$$\begin{aligned} y(p) \left[ \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{W_C(p)}{K_2} + W_0(p) \right] = \\ = y_3(p) W_0(p) - f_{II}(p) W_0(p) \left[ \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{W_C(p)}{K_2} \right] \end{aligned} \quad (1.3)$$

З (1.3) випливає, що при  $K_2 \rightarrow \infty$ ,  $y(p) \rightarrow y_3(p)$ . Таким чином, система зі структурою на рис. 1.1 має властивості інваріантності до збурювань, якщо  $K_2 \rightarrow \infty$ .

Властивість замкнених САУ забезпечувати інваріантність до зовнішніх збурювань при нескінченно великому коефіцієнті підсилення покладено в основу методу структурного синтезу, що викладається далі в розділі 3.

У лінійній САУ неможливо забезпечити нескінченно великий коефіцієнт підсилення. Створення САУ з теоретичним значенням  $K = \infty$  стає здійсненним, якщо скористатися результатами робіт Я. З. Ципкіна [11], у яких доведена еквівалентність релейної системи, що працює в ковзному режимі, лінійній системі з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

Ковзний режим роботи релейної системи - це специфічний режим, який полягає в тому, що при середньому значенні сигналу на вході релейного елемента, рівному нулю, під дією внутрішніх зворотних зв'язків, що охоплюють цей елемент, він перемикається з високою частотою (теоретично з безкінечно високою), а середнє значення вихідного сигналу в цей час по абсолютній величині менше максимального, відповідного одному зі стійких положень релейного елемента.

На рис. 1.2 показана структурна схема САУ, що містить релейний елемент (РЕ), охоплений негативним зворотним зв'язком з передатною функцією  $W_C(p)$ . Рівняння релейної системи за рис. 1.2 можна записати так:

$$\begin{aligned} x(p) = Z(p) - x_1(p) = Z(p) - U(p) \cdot W_C(p) \\ Z(p) = y_3(p) - U(p) \cdot W_0(p) \end{aligned} \quad (1.4)$$

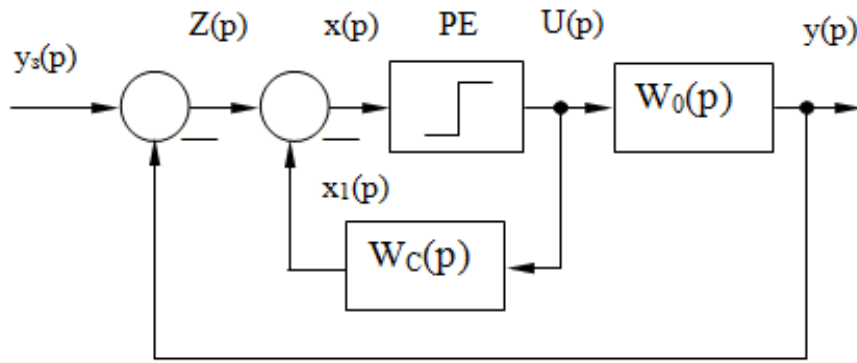


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи, що має релейний елемент

У ковзному режимі сигнал  $x(p)$  на вході РЕ, як показано в [26], дорівнює нулю, тобто

$$x(p) = Z(p) - U(p) \cdot W_C(p) \equiv 0,$$

Звідси можна одержати сигнал на виході релейного елемента

$$U(p) = U_E(p) = \frac{Z(p)}{W_C(p)} \quad (1.5)$$

Тут  $U_E(p)$  являє собою зображення деякого еквівалентного керуючого впливу. Підставляючи це значення  $U_E(p)$  за (1.5) у записане вище рівняння (1.4) релейної системи для  $Z(p)$ , одержимо вираз, що описує поведінку релейної системи в ковзному режимі:

$$Z(p) = y_3(p) - \frac{Z(p) \cdot W_0(p)}{W_C(p)},$$

звідки

$$Z(p) = -\frac{W_C(p)}{W_C(p) + W_0(p)} \cdot y_3(p) \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) відповідає лінійній системі, структурна схема якої приведена на рис. 1.3.

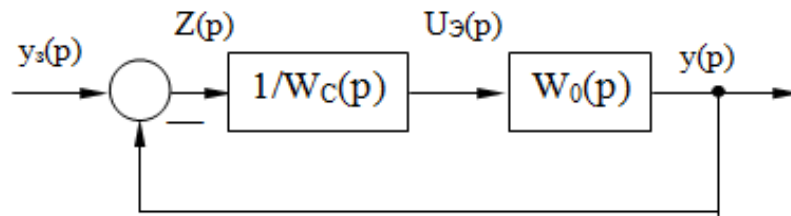


Рисунок 1.3 – Структурна схема лінійної системи,  
що еквівалентна релейній

З порівняння рис. 1.2 та рис. 1.3 видно, що лінійна САУ за структурною схемою рис. 1.3 може бути отримана з релейної САУ рис. 1.2 шляхом заміни РЕ підсилювачем з коефіцієнтом підсилення  $K \rightarrow \infty$ . У таким чином релейна система лінеаризується завдяки ковзному режиму роботи РЕ.

Наведений вище доказ еквівалентності релейної системи управління з ковзним режимом і лінійної системи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення, зроблений Я. З. Ципкіним в [26], також покладено в основу методу структурного синтезу.

Отримане вище рівняння (1.6) для  $Z(p)$  справедливо також і для системи управління, структурна схема якої наведена на рисунку 1.3. З цього виходить, що релейна САУ, що працює в ковзному режимі, нечутлива до змін параметрів ланки  $K_1(p)$ , охопленого спільно з РЕ негативним зворотним зв'язком. Це робить можливим створення автоматичних систем управління електроприводами, які мають дворазову інваріантність - по відношенню до зовнішніх збурень і до зміни параметрів об'єкта управління.

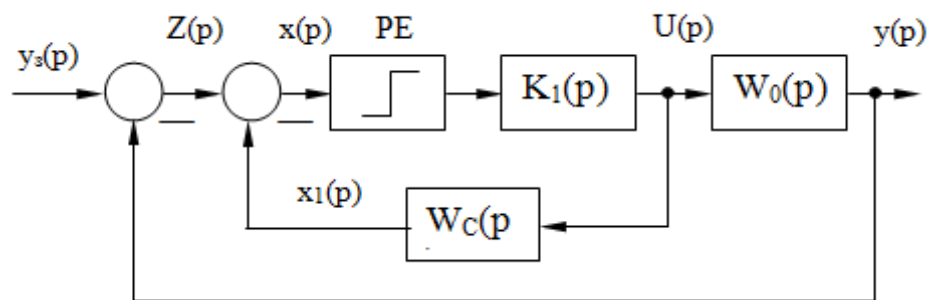


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління

Введення в систему автоматичного управління декількох РЕ і створення для кожного з них змінного режиму шляхом охоплення зворотними зв'язками спільно з кожною ланкою лінійної частини дозволить усунути вплив більшості параметрів на динамічні властивості об'єкта управління і отримати бажаний перехідний процес. Інакше кажучи, також САУ є ніби «адаптивними», так як вони зберігають свої властивості незалежно від внутрішніх (параметричних) змін і зовнішніх збурень. Релейні САУ, як показано в [52], забезпечують також малу статичну похибку. Порівняно з безперервними релейними САУ не вимагають високої стабільності елементів для дотримання певної залежності між вхідними і вихідними величинами.

Основним напрямком удосконалення систем управління електроприводами є їх оптимізація. За визначенням А. М. Лєтова математичні задачі синтезу оптимальних систем діляться на два класи [53, 54]. Завдання першого класу - це завдання, пов'язані з розрахунком бажаного виду перехідного процесу. При цьому шукається програма автоматичного управління, що забезпечує перехідному процесу необхідне екстремальну властивість, шукається вид оптимального перехідного процесу в часі. Системи, що задовольняють вирішення цього завдання, називаються оптимальними по режиму управління. До цього класу систем відносяться системи, оптимальні за швидкодією. Теорія їх досить добре розроблена і описана в літературі [55-60].

Завдання другого класу - це завдання, в яких є регулятор, що забезпечує задану якість перехідного процесу. Системи управління, синтезовані таким чином, називаються оптимальними по перехідному процесу. Завдання другого класу, звані також завданнями аналітичного конструювання регуляторів (АКР), полягають у визначенні варіаційними методами такого управління, яке мінімізує функціонал, що характеризує відхилення траєкторії руху системи від бажаної.

Далі розглядається задача оптимізації другого класу, тобто оптимізації по перехідному процесу, яке вирішується методом динамічного програмування в поєднанні з прямим методом Ляпунова. Розробка цього методу оптимізації з використанням в якості критерію оптимальності мінімуму інтегральної

квадратичної помилки привела до доказу можливості заміни функції Беллмана функцією Ляпунова [54], що дозволило значно спростити процедуру відшукування оптимального управління. Поєднання методу динамічного програмування і теорії стійкості Ляпунова дає вельми ефективний апарат для вирішення завдань оптимізації систем управління електроприводами. При цьому результат АКР є одночасно і рішенням задачі структурної оптимізації, як це буде показано далі.

Таким чином, з огляду на викладені міркування, можна прийти до висновку про те, що оптимальну динаміку електромеханічного об'єкта (ЕМО) слід формувати за допомогою багатоконтурною САУ, в якій для кожної стабілізуючої фазової координати повинен бути передбачений окремий релейний регулятор, який здійснює оптимізацію цієї фазової координати по заданому критерієм якості. Такий релейний регулятор при стабілізації фазової координати повинен здійснювати ковзний режим в будь-якій точці оптимальної гіперплощини перемикання і забезпечувати стійкість цього режиму. Включення регуляторів кожної фазової координати може бути реалізовано за схемами і паралельного або підлеглого регулювання. При останньому (більш доцільний) способі спрощується настройка системи, а також реалізується відносно легкий перехід від вживаних в даний час лінійних систем з підлеглим регулюванням до релейних систем.

Відповідно до викладеного, оптимальна САУ ЕМО повинна мати функціональну схему наведену на рис. 1.5, що включає релейні регулятори струму (РС), швидкості (РШ), а для позиційних або слідкуючих механізмів також і регулятор положення (РП).

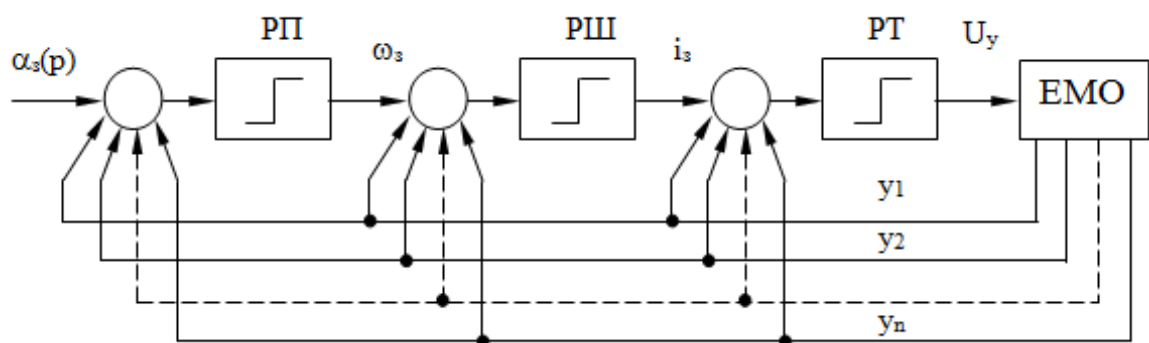


Рисунок 1.5 – Структурна схема оптимальної САУ

На кожен регулятор надходить повна інформація про стан фазових координат  $y_1 \div y_n$  силової частини ЕМО, що контролює весь простір стабілізуючих координат.

Остаточна структурна схема із зазначенням числа та знаків зворотних зв'язків з тієї чи іншої фазової координати на кожному релейному регуляторі повинна бути отримана в результаті аналітичного рішення задачі структурного синтезу оптимальних управлінь цих регуляторів по заданому критерію якості, в якості якого, як вказувалося вище, слід прийняти мінімум інтегральної квадратичної похибки. Якщо, крім того, форсувати процес виведення регульованих координат на їх рівні стабілізації, то таким чином можна забезпечити квазіоптимальність релейної САУ за швидкодією.

Для формування управлінь використовуються фазові координати  $y_1 \div y_n$  ЕМО. В якості таких координат можуть бути застосовані природні координати стану (ЕРС перетворювача, струм, швидкість, положення), канонічні координати (положення та три похідні від нього) та їх комбінації. При зміні використаних координат змінюється опис ЕМО як об'єкта управління. Процедура синтезу від вибору координат стану не залежить. Статичні властивості систем з управліннями в різних просторах стану суттєво відрізняються. Таким чином вибір набору координат стану для реалізації релейного управління визначаються компромісом між властивостями системи та складністю її технічної реалізації.

В роботі буде розглянута та досліджена релейна система керування швидкістю з підпорядкованою структурою та релейними управліннями в просторі природних координат.

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

### 2.1 Опис конструкції та роботи станинних роликів чорнової кліті

Станинні ролики встановлюються між станинами з обох боків кліті на ділянці між роликом робочого рольганга і робочими валками. Перед і за кліттю встановлюється по три станинні ролика. Станинні ролики мають ребристу бочку діаметром 600/400мм. Кінематична схема механізму представлена на рис.2.1

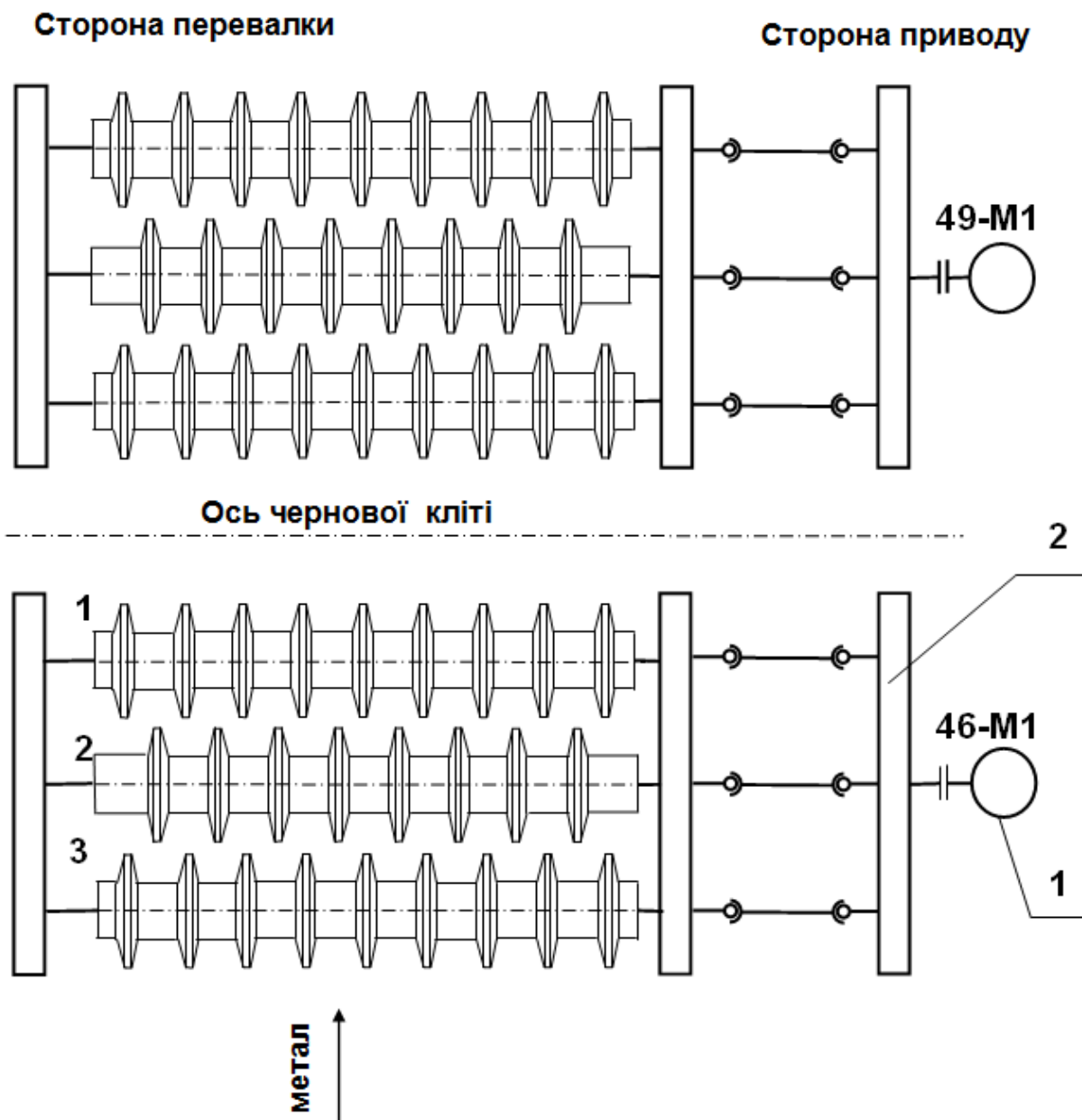


Рисунок 2.1 – Кінематична схема станинних роликів чорнової кліті



Груповий привід обертання трьох станинних роликів здійснюється електродвигуном постійного струму (1), який через зубчасту муфту пов'язаний із середнім станинним роликом. Передача руху двом іншим роликам здійснюється через роздавальний редуктор (2) з паразитними шестернями, виконаний таким чином, щоб окружна швидкість всіх станинних роликів була однаковою (див. рисунок 2.2).

До електродвигунів підводиться повітря від системи примусової вентиляції, що працює по розімкненому циклу.

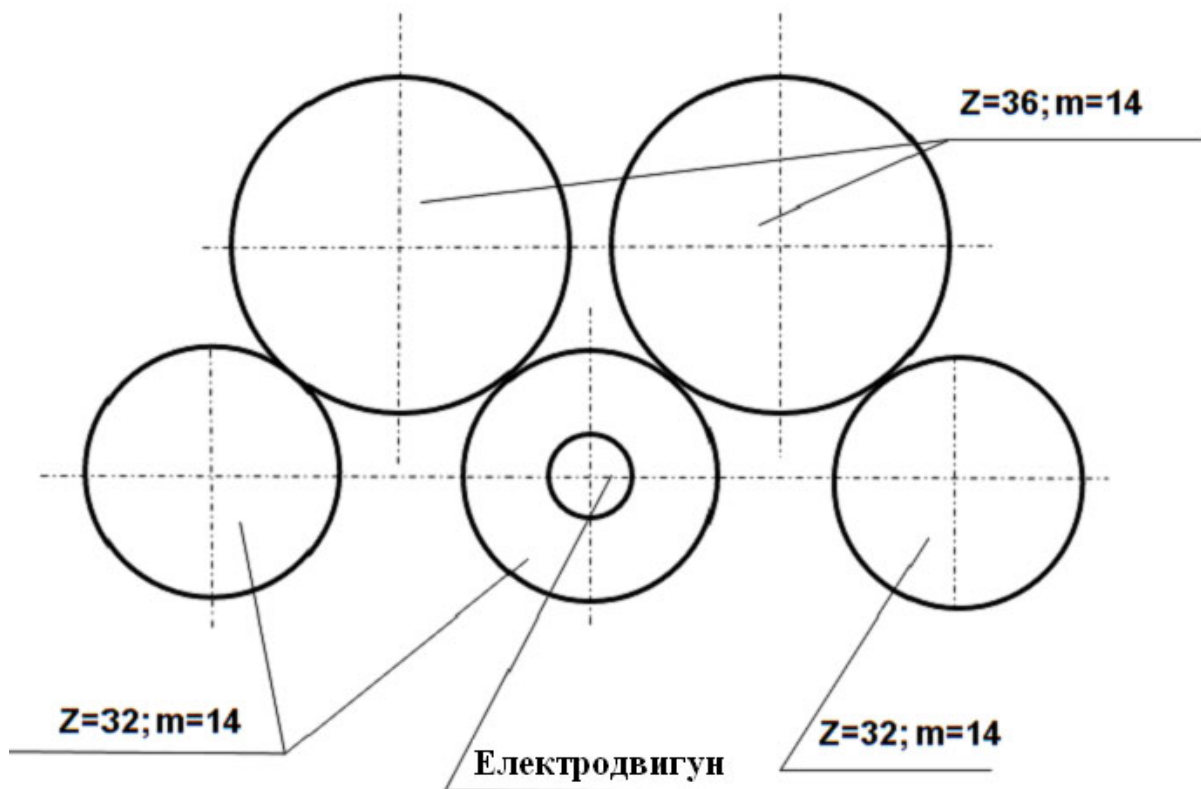


Рисунок 1.2 – Кінематична схема роздавального редуктора

Опис роботи механізму. Режим прокатки в чорновій кліті - реверсивний. При цьому в кожному конкретному пропуску підтримується рівень швидкості, необхідний за технологією. У загальному випадку: кількість пропусків в чорновій кліті - непарне, а швидкість від пропуску до пропуску збільшується відповідно до зменшення товщини розкату.

У процесі прокатки швидкість транспортування і подачі металу станинними роликами узгоджується зі швидкістю головного приводу з

урахуванням випередження і відставання металу в осередку деформації.

Повернення металу в прокатку в парному пропуску можливе після установки нового отвору валків натискаючими гвинтами, а також після центрування розкату по поздовжній вісі прокатки (маніпуляторними лінійками за кліттю). Обидві згадані операції можуть виконуватися одночасно.

Приводи станинних роликів працюють в повторно-короткочасному, реверсивному режимі. Швидкість регулюється зміною величини напруги, яка живить якірні ланцюги двигунів.

Технологічні та технічні дані станинних роликів наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Вихідні технологічні і технічні дані

<b>Найменування і розмірність технічного параметра</b>	<b>Значення параметра</b>
1.1. Товщина слябу, мм	200...250...300
1.2. Ширина сляба, мм	1500...2800
1.3. Довжина сляба, мм	1600...2300
1.4. Маса сляба, кг	до 7500
<b>2 Станинні ролики</b>	
2.1 Діаметр бочки ролика, мм	600/400
2.2 Внутрішній діаметр підшипника ролика, мм	200
2.3 Зовнішній діаметр підшипника ролика, мм	420
2.4 Кількість роликів, шт.	3
2.5 Маса ролика:	
першого, кг	3222
другого, кг	3154
третього, кг	3122
2.6 Передаточне число редуктора, відн. од.	1
<b>3 Технологічні дані</b>	
3.1 Швидкість прокатки, м/с	3
3.2 Момент прокатки у кліті, кНм	3500
3.3 Зусилля прокатки в кліті, кН	40000

## **2.2 Вимоги до електроприводу станинних роликів**

Станинні ролики працює в повторно-короткочасному режимі, при цьому число включень на годину становить 360-450 і тривалість включень ПВ = 80%.

Для забезпечення необхідних технологічних режимів роботи і високої продуктивності стану, електропривод станинних роликів повинен задовольняти основним вимогам:

- час протікання перехідних процесів при заданих значеннях динамічного струму повинно бути мінімальним;
  - забезпечувати часті пуски і гальмування;
  - забезпечувати необхідний діапазон регулювання швидкості;
  - величина прискорення не повинна залежати від швидкості, до якої розганяється двигун;
  - мати високу перевантажувальну здатність приводного двигуна по струму і моменту;
  - забезпечувати високу надійність роботи системи;
- система керування електроприводом повинна забезпечувати зручності введення керуючих впливів з боку системи автоматики при малій потужності цих впливів.

### **2.3 Розрахунок статичних моментів**

На даний момент в якості приводного електродвигуна електроприводу станинних роликів перед чорною кліткою кварто товстолистового стану 3000 встановлено електродвигун постійного струму типу П100/1600У3 закритого виконання з примусовою вентиляцією по розімкненому циклу з паспортними даними, наведеними в табл. 2.2. Привод обертання трьох станинних роликів груповий, який через зубчасту муфту пов'язаний із середнім станинним роликом. Передача руху двом іншим роликам здійснюється через роздавальний редуктор з паразитними шестернями, виконаний таким чином, щоб окружна швидкість всіх станинних роликів була однаковою.

Двигуни оснащені імпульсними датчиками швидкості HOG 10 DN концерну Huebner Berlin – 1024 імпульсу/оборот.

Таблиця 2.2 - Паспортні дані електродвигуна П100/160У3

Найменування параметра	Чисельне значення
Номінальна потужність, кВт	$P_H = 100$
Номінальна напруга, В	$U_H = 440$
Номінальний струм, А	$I_H = 248$
Номінальна частота обертання, об/хв	$n_H = 160$
Момент інерції якоря, кг·м <sup>2</sup>	$J_{дв} = 54,9$

За час циклу роботи станинних роликів електродвигун навантажений статичними моментами різної величини. При розрахунку виділяють наступні основні статичні моменти: момент холостого ходу, момент транспортування металу по роликам, момент буксування роликів по транспортованому металу [1-3]. Розрахунок ведеться для групового, редукторного електроприводу. Момент холостого ходу на приводному валу ролика [61, 62]:

$$M_{x.p} = \frac{G_p d_{ш} \mu_{ш}}{2i\eta_x}, \quad (2.1)$$

де  $G_p$  - вага роликів (3 шт), кг;

$d_{ш} = 0,2$  м - діаметр шийки ролика (внутрішній діаметр підшипника);

$\mu_{ш} = 0,007$  - коефіцієнт тертя в підшипниках ковзання ролика під дією високих температур, металу що транспортується [62, табл. 5.3];

$i = 1$  отн. ед. - передавальне число редуктора;

$\eta_x$  - ККД редуктора при холостому ході.

Вага роликів визначається за формулою:

$$G_p = g(m_1 + m_2 + m_3) = 9,81(3222 + 3154 + 3122) = 93140 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \quad (2.2)$$

де  $m_1, m_2, m_3$  - маси відповідно 1-го, 2-го, 3-го роликів, кг;

$g = 9,81 \text{ м / с}^2$  - прискорення вільного падіння.

Оскільки при холостому ході момент на валу редуктора становить 5-10% від номінального, то рекомендується [61] зменшувати ККД приводу в два рази, тобто

$$\eta_x = 0,5\eta_H = 0,5 \cdot 0,95 = 0,475 \quad (2.3)$$

де  $\eta_H = 0,95$  - ККД зубчастих редукторів [62, табл. 5.4].

З огляду на все вище зазначене, розрахуємо момент холостого ходу за формулою (2.1) з урахуванням (2.2) і (2.3)

$$M_{x,p} = \frac{93140 \cdot 0,2 \cdot 0,007}{2 \cdot 1 \cdot 0,475} = 137,3 \text{ Нм}$$

При визначенні холостого ходу необхідно також враховувати втрати в електродвигуні. Момент холостого ходу електродвигуна:

$$M_{x,d} = 0,07M_H = 0,07 \cdot 5968,3 = 417,7 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

де  $M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{100 \cdot 10^3}{16,75} = 5968,3 \text{ Нм}$  - номінальний момент двигуна;

$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 160}{30} = 16,75 \text{ 1/с}$  - номінальна швидкість електродвигуна.

Таким чином, повний момент холостого ходу станинних роликів:

$$M_x = M_{x,p} + M_{x,d} = 137,3 + 417,7 = 555 \text{ Нм}, \quad (2.5)$$

Момент транспортування металу по роликам:

$$M_{тр} = \frac{9,81m_M \left( \mu_{ш} \frac{d_{ш}}{2} + f \right)}{i\eta_{тр}} = \frac{9,81 \cdot 7500 \left( 0,007 \frac{0,2}{2} + 0,0015 \right)}{0,475} = 340,7 \text{ Нм} \quad (2.6)$$

де  $m_m = m_{сл} = 7500$  кг - маса металу, яка припадає на станинний блок (прийнятий рівним максимальній вазі сляба масою 7,5 т);

$f = 0,0015$  - коефіцієнт тертя кочення гарячого металу по роликам [61, с. 88];

$\eta_{тр} \approx \eta_x = 0,5\eta_H = 0,475$ , оскільки транспортування злитка по станинним роликам дає зазвичай незначне збільшення статичного навантаження на електропривод в порівнянні з навантаженням холостого ходу [61].

Повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування і додаткових опорів:

$$M_{с.т} = M_x + M_{тр} = 555 + 340 = 895,7 \text{ Нм} \quad (2.7)$$

Момент буксування, приведений до валу електродвигуна:

$$M_б = \frac{9,81m_m d_p \mu_б}{2\eta_H} = \frac{9,81 \cdot 7500 \cdot 0,5 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,95} = 5808,5 \text{ Нм} \quad (2.8)$$

де  $d_p = \frac{0,4 + 0,6}{2} = 0,5$  м - діаметр ролика;

$\mu_б = 0,3$  - коефіцієнт тертя при буксуванні [1, табл. 4.2].

Повний момент статичного опору при буксуванні:

$$M_{сб} = M_x + M_б = 555 + 5808,5 = 6363,5 \text{ Нм} \quad (2.9)$$

#### 2.4 Розрахунок динамічних моментів і прискорень

Через буксування розкату по роликам можна розігнати розкат з прискоренням, що перевищує максимально можливе прискорення. Покажемо це теоретично.

Для розгону розкату необхідно подолати силу інерції. Величина сили інерції, що припадає на один ролик, дорівнює

$$F_{ин} = m_m a, \quad (2.10)$$

де  $a$  - лінійне прискорення розкату.

Ця сила не може бути більше сили буксування  $F_{\text{ин}} \leq F_6$ . Тоді запишемо

$$m_M a \leq G_M \mu_6, \quad (2.11)$$

Оскільки  $G_M = m_M g$ , де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , то з (2.11) отримаємо вираз для визначення максимально можливого прискоренню розкату на рольгангу

$$a \leq g \mu_6, \quad (2.12)$$

З останнього виразу видно, що максимально можливе прискорення розкату на рольгангу визначається коефіцієнтом тертя при буксуванні  $\mu_6$ . Приймаючи  $\mu_6 = 0,15 \div 0,3$  [61, 62], отримаємо  $a \leq 1,47 \div 2,94 \text{ м/с}^2$ . Більше значення прискорення відповідає гарячому металу, менше – холодного.

Момент електродвигуна, що відповідає максимально можливому прискоренню розкату, називають гранично-виправданим моментом. Якщо момент електродвигуна перевищує гранично-виправданий момент, то виникає буксування, в результаті чого погіршується якість поверхні розкату, підвищується знос роликів, але збільшення прискорення розкату не відбувається. Оскільки буксування можливе як при розгоні (прискоренні), так і при гальмуванні (уповільненні), то мають місце два гранично-підтверджуваних моменти – при розгоні і при гальмуванні.

Отримаємо вираз гранично-виправданого моменту електродвигуна при розгоні (прискоренні) ролика рольганга:

$$M_{\text{п.о.р}} = M_{\text{дин}} + M_{\text{с.т}_i}, \quad (2.13)$$

де  $M_{\text{дин}}$  - динамічний момент, необхідний для розгону механізму і розкату з гранично-виправданим прискоренням;

$M_{\text{с.т}_i}$  - повний статичний момент при транспортуванні металу по рольгангу і при відсутності буксування й додаткових опорів.

Динамічний момент на валу електродвигуна дорівнює:

$$M_{\text{дин}} = J'_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}, \quad (2.14)$$

де  $J'_{\Sigma}$  - сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна;

$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}$  - кутове прискорення електродвигуна.

Виразимо кутове прискорення електродвигуна через лінійне прискорення розкату,

$$\frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} = \frac{d\omega_{\text{р}}}{dt} i = \frac{2i}{d_{\text{р}}} \frac{dV}{dt}, \quad (2.15)$$

де  $\omega_{\text{р}}$  - кутова швидкість ролика,  $1/c$ ;

$i$  - передавальне число редуктора рольганга, далі опускається, тому що електропривод безредукторний;

$d_{\text{р}}$  - діаметр ролика, м;

$a = \frac{dV}{dt}$  - лінійне прискорення металу на рольгангу,  $m/c^2$ .

Сумарний момент інерції представимо як суму моменту інерції механізму  $J_{\text{мех}}$  і моменту інерції розкату  $J_{\text{м}}$ , отриманого шляхом еквівалентного приведення поступального руху до обертального руху:

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}. \quad (2.16)$$

Приведення поступального руху до обертального руху здійснюється на підставі закону збереження енергії, а саме - кінетична енергія в обох випадках повинна бути однаковою. У зв'язку з цим запишемо

$$\frac{m_{\text{м}} V_{\text{м}}^2}{2} = \frac{J_{\text{м}} \omega_{\text{дв}}^2}{2}, \quad (2.17)$$

звідки знаходимо



$$J_M = m_M \frac{V_M^2}{\omega_{дв}^2}. \quad (2.18)$$

Підставляючи замість лінійної швидкості металу її вираз через частоту обертання електродвигуна  $V_M = \frac{\omega_{дв} d_p}{2}$ , отримаємо момент інерції транспортованого злитка, приведений до валу електродвигуна у кожному пропуску

$$J_{M_i} = m_{M_i} \frac{d_p^2}{4}. \quad (2.19)$$

Приймаючи максимально можливе значення лінійного прискорення (2.12), з урахуванням (2.15), (2.16) і (2.19) з (2.14) отримуємо такий вираз для визначення динамічного моменту на валу електродвигуна:

$$M_{дин} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_6}{d_p} J'_\Sigma, \quad (2.20)$$

де  $J'_\Sigma$  - сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу двигуна в кожному пропуску.

Момент інерції механізму дорівнює:

$$J_{мех} = J_{дв} + J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} = 54,9 + 100,7 + 98,5 + 97,5 = 351,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

де  $J_{дв} = 54,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції двигуна (див. табл. 2.1);

$$J_{p1} = m_1 \frac{d_p^2}{8} = 3222 \frac{0,5^2}{8} = 100,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 1-го ролика;}$$

$$J_{p2} = m_2 \frac{d_p^2}{8} = 3154 \frac{0,5^2}{8} = 98,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 2-го ролика;}$$

$$J_{p3} = m_3 \frac{d_p^2}{8} = 3122 \frac{0,5^2}{8} = 97,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ - момент інерції 3-го ролика;}$$

Сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна згідно (2.16):

$$J'_{\Sigma} = 351,6 + 468,7 = 820,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Оскільки максимальне прискорення визначається виразом (2.12), то для гранично-виправданому моменту при розгоні (прискоренні) вираз (2.13) набирає вигляду:

$$\begin{aligned} M_{\text{п.о.р}} &= (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} + M_{\text{с.т}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} J'_{\Sigma} + M_{\text{с.т}} = \\ &= \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{0,5} 820,3 + 895,7 = 10552,3 \text{ Нм} = 1,7 M_{\text{н}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для гальмування (уповільнення) вираз гранично-виправданого моменту має вигляд:

$$M_{\text{п.о.т}} = M_{\text{дин}} - M_{\text{с.т}}, \quad (2.23)$$

або

$$\begin{aligned} M_{\text{п.о.т}} &= (J_{\text{мех}} + J_{\text{м}}) \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} - M_{\text{с.т}} = \frac{2 \cdot 9,81 \mu_{\text{б}}}{d_{\text{р}}} J'_{\Sigma} - M_{\text{с.т}} \\ &= \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{0,5} 820,3 - 895,7 = 8760,8 \text{ Нм} = 1,5 M_{\text{н}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Приймаємо кратність пуск-гальмівних струмів (динамічних моментів)  
 $\lambda_{\text{пт}} = 2$ .

## 2.5 Час керування електроприводом

Виділимо наступні ділянки навантажувальної діаграми в циклі роботи електроприводу станинних роликів:

- розгін без підкату до швидкості захоплення;
- робота на холостому ході до підходу підкату;
- транспортування металу до захоплення його валками;
- розгін з металом до швидкості прокатки;
- гальмування вхолосту.

У таблиці 2.3 наведено час роботи електроприводу станинних роликів, заснований на реальних графіках завдання швидкості для станинних роликів, які формуються контролером керування АСУ ТП.

Таблиця 2.2 – Час роботи електроприводу станинних роликів перед чорною кліттю

№ проходу	Час, с						
	розгін до швидкості захоплення	холостий хід на швидкості захоплення	розгін до швидкості транспортування	рух на швидкості транспортування	Гальмування	Швидкість прокатки, м/с	Пауза перед проходом
1	0,6	3,42	0,5	0,72	0,8	1,4	3,2
2		1,02	0,53	0,91	0,83	1,4	2,1
3(к)		1,56	0,22	0,8	0,72	1,25	5,4
4		0,53	0,35	1,25	0,8	1,4	1,5
5		3,22	0,35	1,4	0,8	1,4	2,4
6		1,13	0,7	1,25	1,2	1,75	3,1
7		2,5	0,7	1,5	1,1	1,75	2,8
8		1,36	0,7	1,63	1,1	1,75	3,2
9		2,3	0,75	2,3	1,2	1,75	2,9
10		0,9	0,75	2,5	1,2	1,75	2,3
11		1,8	0,75	2,6	1,2	1,75	3,2
12		1,2	0,75	2,9	1,2	1,75	2,7
13		0	2,2	4,2	2,0	3,0	3,9
Загальний час	7,8	21,11	8,25	23,96	14,15		38,7
Машинний час	75,27					Час циклу	114

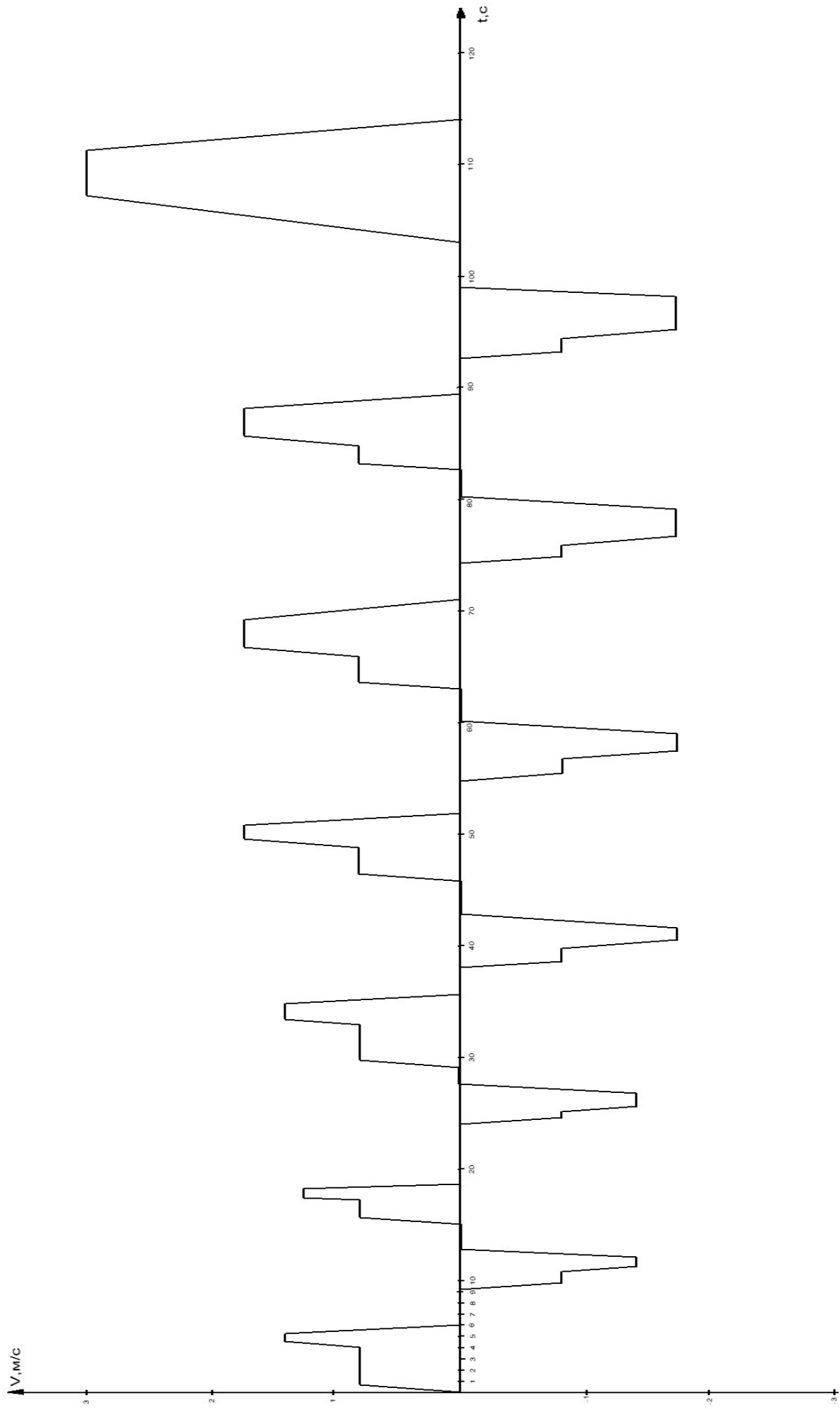


Рисунок 2.3 – Тахограми роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліттю за цикл роботи прокатного стану 31

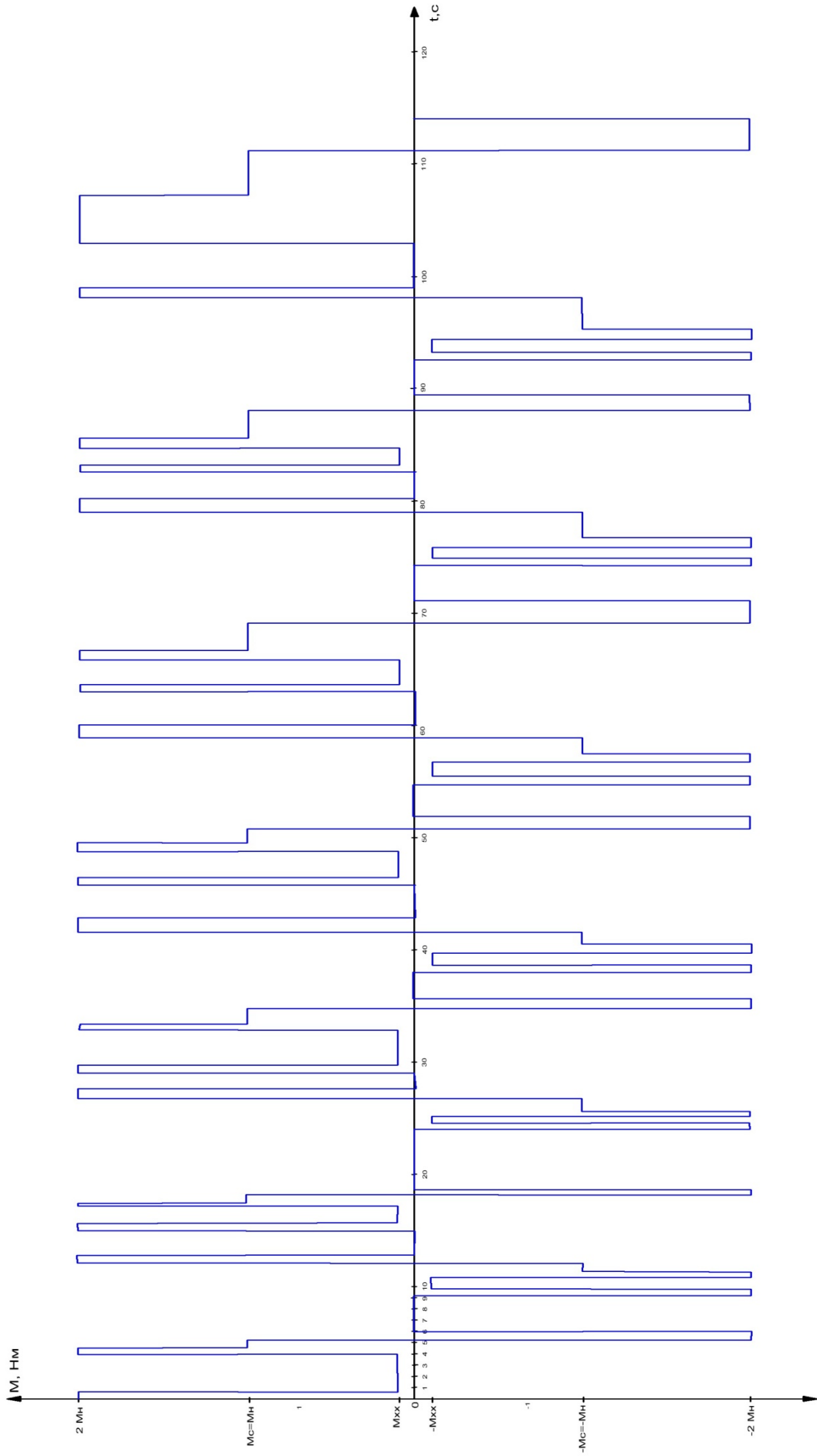


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліткою за цикл роботи стану <sup>32</sup>

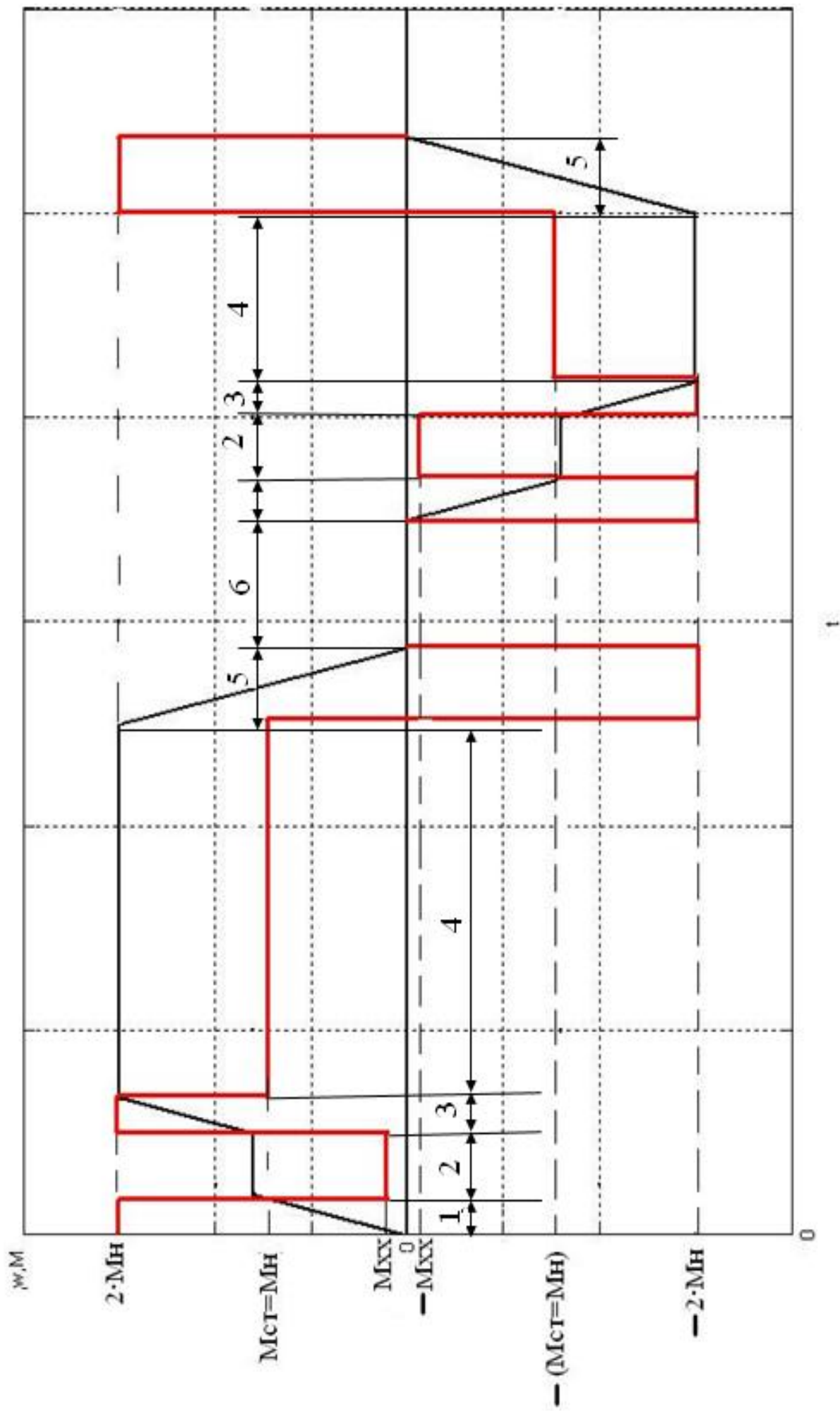


Рисунок 2.5 – Тахограма і навантажувальна діаграма роботи ЕП станинних роликів перед чорною кліттю 1-2 прохід <sup>33</sup>

На рис. 2.3 - 2.5 наведені тахограми і навантажувальні діаграм роботи електроприводу робочого рольганга за цикл роботи прокатного стану (прокатка в чорновій кліті), а також для декількох з пропусків. Цифри над стрілками позначають час роботи на виділених ділянках діаграми. Так, 1-час пуску, 2 час розгону від швидкості захоплення до швидкості прокатки, 3 час руху на холостому ході, 4 час транспортування, 5 час гальмування, 6-час паузи перед проходом. Конкретні значення часу наведені у таблиці 2.3.

## 2.6 Перевірка потужності обраного електродвигуна по нагріву

На рис. 2.4 зображена навантажувальна діаграма електроприводу станинних роликів перед чорною кліттю.

Еквівалентний момент електродвигуна:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (M_{\text{пт}}^2 (t_{\text{п}} + t_{\text{т}} + t_{\text{р}}) + M_{\text{х}}^2 \cdot t_{\text{х}} + M_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{тр}})}{t_{\text{ц}} \cdot \text{ТВ}}} = \quad (2.25)$$

$$= \sqrt{\frac{2,814 \cdot 10^9}{114 \cdot 1}} = 4986,3 \text{ Нм} = 0,8M_{\text{н}}$$

де  $M_{\text{пт}}$  - середній пускотормозний момент, Нм;

$M_{\text{тр}}$  - момент транспортування, Нм;

$t_{\text{п}}$  - час пуску, с;

$t_{\text{р}}$  - час розгону від швидкості захоплення до швидкості прокатки, с;

$t_{\text{т}}$  - час гальмування, с;

$t_{\text{тр}}$  - час транспортування, с,

$t_{\text{х}}$  - час руху на холостому ході, с,

$t_{\text{ц}}$  - час циклу, с,

ТВ – тривалість включення.

Отримане розрахункове значення еквівалентного моменту показує, що прийняті значення пускового і гальмівного моментів забезпечують інтенсивне

протікання перехідних процесів при одночасній допустимому навантаженні електродвигуна по нагріванню. Завантаження електродвигуна становить 80%.

Серед усіх можливих моментів на валу двигуна найбільшим є пусковий момент електроприводу при транспортуванні металу. Таким чином, обраний електродвигун проходить і по перевантажувальній здатності (максимально допустима кратність струму якоря 2,5).

При прокатці аркушів інших типорозмірів (при підкатах більшої маси) завантаження двигуна по середньоквадратичного моменту становить 90%, що допустимо. Дещо завищена потужність машини пояснюється необхідністю реалізації заданого темпу розгону/гальмування при транспортуванні металу найбільшої маси 7,5 т. Крім того, в разі ручного керування механізмами району прокатної кліти можливі неузгодженості лінійних швидкостей валів головного приводу, станинних роликів, робочих і розкатних рольгангів що призводить до появи буксування роликів об поверхню металу (статичні моменти на двигуні зростають до моментів буксування), викликаючи додатковий нагрів машини. Також буксування роликів об метал виникає при виході розкату з валів кліти з більшою швидкістю через так званого «випередження». Вважаємо, що 20% -го резерву потужності двигуна досить для покриття додаткових моментів.



## 3 ВИБІР ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАКОНІВ КУРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

### 3.1 Вибір комплектного електропривода

Основні характеристики комплектних тиристорних електроприводів визначаються номінальними параметрами струму  $I_{н\ TP}$  та напруги  $U_{н\ TP}$ . При окремому живленні якірних ланцюгів, номінальний струм перетворювача збігається з номінальним струмом двигуна.

Номінальна напруга перетворювача визначається за номінальною напругою електродвигуна, меншою за номінальну напругу ТП на 5-15%. Це забезпечує достатній резерв для регулювання швидкості та безпечного інвертування при зниженні напруги мережі живлення. Номінальні параметри для двигуна П100/160УЗ, для якого проводиться вибір силового тиристорного пристрою, наведені в таблиці 2.1.

При виборі електродвигуна з каталогу використовується реверсивний комплектний тиристорний електропривід () SIMOREG DC Master від компанії Siemens у шафовому виконанні. Технічні характеристики цього пристрою можна знайти в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики шафового КТЕ SIMOREG DC Master 6RM7078-6FV02

Назва параметра	Значення параметра
Номінальна живляча 3х фазна напруга, В	$U_{н1\ TP} = 460$
Номінальний вхідний струм, А	$I_{н1\ TP} = 233$
Номінальна випрямлена (постійна) напруга, В	$U_{н\ TP} = 480$
Номінальна випрямлена (постійна) струм, А	$I_{н\ TP} = 280$
Номінальна потужність, кВт	$P_{н\ TP} = 134$
Номінальна напруга збудження, В	$U_{в\ TP} = 373$
Номінальний струм збудження, А	$I_{в\ TP} = 15$
Маса, кг	$m_{TP} = 200$

Однолінійна схема силової частини комплектного електроприводу та конструкція шафи SIMOREG DC MASTER надані на рисунках 3.1 - 3.2.

Перетворювачі SIMOREG DC MASTER представляють собою компактні цифрові модулі з трьохфазним живленням, призначені для живлення якоря і обмотки збудження двигунів постійного струму з регульованою швидкістю та номінальним струмом якоря в діапазоні від 15А до 2000А. Ці компактні перетворювачі можуть бути з'єднані паралельно, щоб забезпечити струм до 10000А. Максимальне значення струму для живлення ланцюга збудження однофазне і становить 40А (фактичні значення струмів залежать від номінального струму якоря).

Всі блоки SIMOREG DC MASTER мають просту панель керування (PMU), яка закріплена на дверцятах перетворювача. Ця панель включає в себе п'ятирозрядний семисегментний індикатор, три світлодіоди індикації стану та три клавіші параметрування. Також на панелі керування розташований з'єднувач типу X300 з інтерфейсом USS, що відповідає стандартам RS232 або RS485. Ця панель забезпечує все необхідне для регулювання, налаштування та відображення вимірюваних значень, необхідних для запуску перетворювача.

Параметризацію перетворювача можна також здійснювати за допомогою звичайного ПК, використовуючи відповідне програмне забезпечення. ЕОМ підключається до базового блоку через послідовний інтерфейс, який використовується під час запуску, для збереження параметрів під час відключення, а також для діагностики під час роботи. Крім того, оновлення програмного забезпечення перетворювача можна завантажити через цей інтерфейс для зберігання в пам'яті Flash.

У перетворювачах одного квадранта живлення якоря здійснюється від повністю керованого трифазного моста, а в чотириквADRANTНИХ модулях - від двох повністю керованих трифазних мостів, які включаються зустрічно-паралельно. Схема живлення збудження подається через однофазний напівкерований двонапівперіодний міст. Напряга живлення якоря і схеми збудження може варіюватися за частотою від 45 до 65 Гц. Послідовність чергування фаз джерела живлення якоря немає значення.

With SIMOREG DC MASTER 60 A to 210 A, 575 V

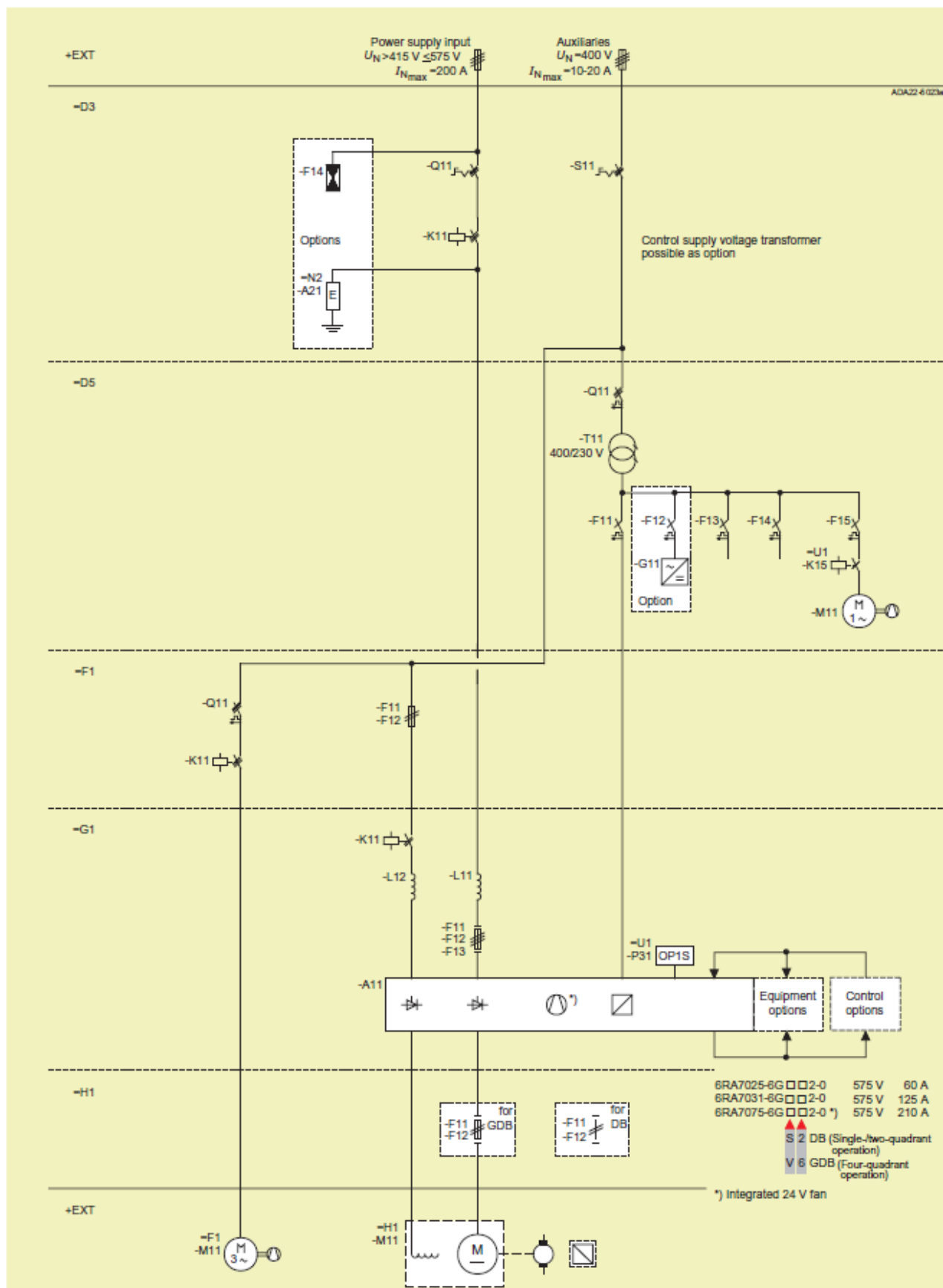


Рисунок 3.1 – Силова схема (однолінійна) частини комплектного електроприводу SIMOREG DC MASTER

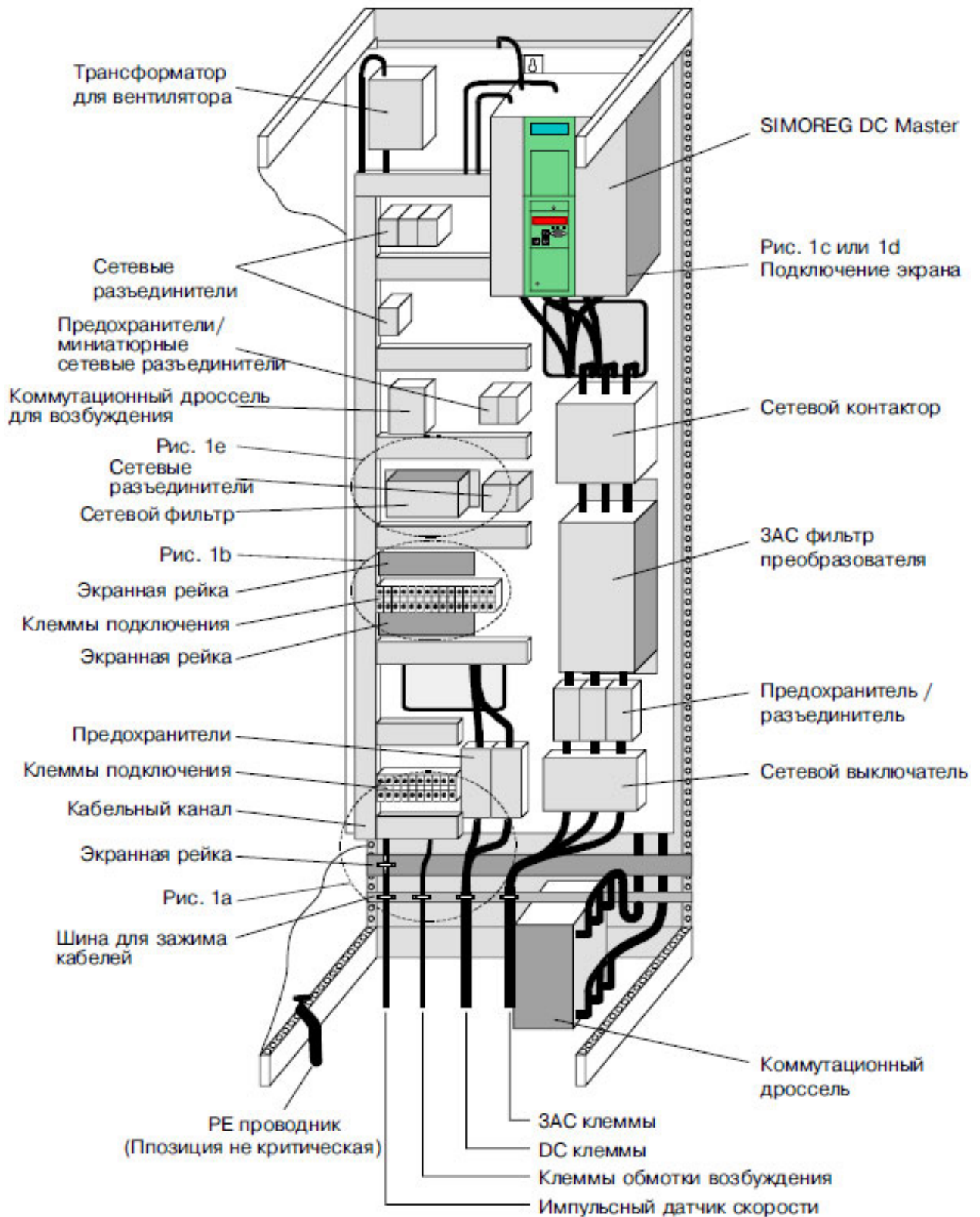


Рисунок 3.2 – Устаткування шафи комплектного електроприводу  
SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

### 3.2 Вибір силового трансформатора і згладжувального дроселя

Силовий трансформатор, впроваджений у схемі керованого випрямляча, використовується для вирівнювання стандартної напруги мережі та напруги навантаження. Намагаючись знизити напругу на виході тиристорного перетворювача постійного струму шляхом зміни кута керування, ми стикаємося з практичною неприпустимістю цього підходу. У більшості випадків це призводить до недоексплуатації потужнісної установки та зменшення її енергетичних показників, зокрема коефіцієнта потужності. Зокрема, трансформатор служить обмежуючим елементом для струму в режимі короткого замикання, а також контролює швидкість наростання струму як в нормальних, так і в аварійних режимах роботи перетворювача.

Вибір трансформаторного обладнання здійснюється відповідно до параметрів тиристорного перетворювача. Для забезпечення взаємодії тиристорних перетворювачів (12 + 1) із мережею живлення, ми вибираємо силовий трансформатор ТСЗП-1000/10УЗ, технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики силового трансформатора ТСЗП-1000/10УЗ

Назва параметра	Значення параметра
Потужність, кВ·А	$P_{\text{тр}} = 402$
Номінальна первинна напруга, В	$U_{1 \text{ тр}} = 6000$
Номінальна вторинна напруга, В	$U_{2 \text{ тр}} = 569$
Діюче значення струму вторинної обмотки, А	$I_{2 \text{ тр}} = 408$
Потужність втрат холостого ходу, Вт	$\Delta P_{\text{хх}} = 795$
Потужність втрат короткого замикання, Вт	$\Delta P_{\text{кз}} = 2400$
Напруга короткого замикання, %	$U_{\text{кз}\%} = 4,7$
Струм холостого ходу, %	$I_{\text{хх}\%} = 5,2$
Маса, кг	$m_{\text{тр}} = 1700$

Посилення теплового режиму та ускладнення умов комутації електродвигуна виникають внаслідок пульсацій струму у якірному ланцюзі. Для зниження цих пульсацій застосовується згладжувальний дросель. Механізм зменшення пульсацій напруги на затискачах якоря при включенні дроселя полягає в тому, що на якір подається сума випрямленої напруги мережі та електромагнітної електродвигуна самоіндукції дроселя. Запровадження згладжувального реактора спричинює стиснення зони переривчастих струмів, що, в свою чергу, призводить до підвищення жорсткості швидкісних характеристик приводу.

Щодо вибору індуктивності згладжувального дроселя, яка включається послідовно з якорем двигуна, вона обирається враховуючи дві важливі вимоги:

- забезпечення безперервності струму якоря двигуна в конкретному діапазоні навантажень та частот обертання;
- обмеження амплітуди змінної складової струму якоря двигуна.

Наведений нижче розрахунок згладжувального дроселя [70, приклад 1-24, 1-27] визначає значення максимальної випрямленої ЕРС (напруга на виході перетворювача):

$$E_{d0} = 1,35U_{2 \text{ тр}} = 1,35 \cdot 569 = 768,15 \text{ В} \quad (3.1)$$

де 1,35 - коефіцієнт мостової схеми випрямлення;

$U_{2 \text{ тр}}$  - номінальна напруга на вторинній обмотці силового трансформатора, В.

Кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги:

$$\omega_1 = 2\pi f_c m_\phi = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6 = 1884,956 \text{ Гц} \quad (3.2)$$

де  $f_c$  - частота мережі живлення, Гц;

$m_\phi$  - число фаз випрямлення.

Активний, індуктивний і повний опір силового трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{2\text{ тр}}^2}{P_{\text{тр}}^2} = \frac{2400 \cdot 569^2}{(402 \cdot 10^3)^2} = 4,808 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$z_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}\%} U_{2\text{ тр}}}{100 I_{2\text{ тр}} \sqrt{3}} = \frac{4,7 \cdot 569}{100 \cdot 408 \cdot \sqrt{3}} = 37,843 \cdot 10^{-3} \quad (3.4)$$

$$x_{\text{а тр}} = \sqrt{z_{\text{тр}}^2 - r_{\text{тр}}^2} = \sqrt{37,843 \cdot 10^{-3} - 4,808 \cdot 10^{-3}} = 33,035 \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

де  $\Delta P_{\text{кз}}$  - потужність втрат короткого замикання трансформатора, Вт;

$P_{\text{тр}}$  - потужність трансформатора, В·А;

$U_{\text{кз}\%}$  - напруга короткого замикання трансформатора, %;

$I_{2\text{ тр}}$  - діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора, А.

Індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямля-ленного струму:

$$L_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{а тр}} \pi}{2\pi f_c} = \frac{33,035 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 105,154 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (3.6)$$

де  $x_{\text{а тр}}$  - повний опір силового трансформатора.

Індуктивність якоря двигуна визначається емпіричною формулою:

$$L_{\text{дв}} = k \frac{U_{\text{н}}}{2p \cdot n_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = 6 \frac{440}{4 \cdot 160 \cdot 248} = 16,633 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.7)$$

де  $k$  - постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції електродвигуна ( $k = 5 \dots 6$  - для компенсованих машин);

$U_{\text{н}} = 440$  В - номінальна напруга електродвигуна;

$I_{\text{н}} = 248$  А - номінальний струм електродвигуна;

$2p = 4$  - число пар полюсів електродвигуна;

$n_{\text{н}} = 160$  об/хв - номінальна частота обертання електродвигуна.

Необхідна індуктивність згладжувального дроселя:

$$L_{\text{сд}} = \frac{e_n E_{\text{d0}}}{i_e \omega_1 I_{\text{H}}} - (2L_{\text{тр}} + L_{\text{дв}}) =$$

$$= \frac{0,24 \cdot 768,15}{0,024 \cdot 1884,956 \cdot 248} - (2 \cdot 105,154 \cdot 10^{-6} + 16,633 \cdot 10^{-3}) = -0,41 \text{ мГн} \quad (3.8)$$

де  $e_n$  - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої напруги, може бути підрахована за допомогою рівнянь [68, с. 40], або з графіка [70, с. 47 рис. 1.31]. На цьому графіку зображено залежність для трифазної схеми випрямлення в функції кута регулювання  $\alpha$ . Приймаємо граничний кут регулювання  $\alpha_{\text{max}} = 90$  ел. град., тоді значення  $e_n = 0,24$ ;

$E_{\text{d0}} -$  значення максимально випрямленої ЕРС (напруга на виході перетворювача), В;

$i_e$  - відносна величина ефективного значення пульсацій першої гармоніки випрямленої струму.  $i_e = 0,02 \div 0,05$ , нижня межа береться для електроприводу середньої і великої потужності, а верхній – для електроприводу малої потужності [70, с. 46, 59];

$\omega_1$  - кругова частота 1-ої гармоніки випрямленої напруги, Гц;

$L_{\text{тр}} -$  індуктивність силового трансформатора, наведена до ланцюга випрямленого струму, Гн;

$L_{\text{дв}} -$  індуктивність обмотки якоря електродвигуна, Гн.

Виходячи з результату формули (3.8) в установці згладжувального дроселя немає необхідності, оскільки індуктивності якоря двигуна і трансформатора досить для згладжування пульсацій, що виникають в роботі електропривода. Це істотно зменшить вартість і масогабаритні показники електроприводу.



### 3.3 Принципової схеми силової частини електроприводу станинних роликів

Принципова схема силового ланцюга станинних роликів перед чорною кліткою наведена на рис. 3.3.

Схема підключення тиристорного електроприводу SIMOREG DC MASTER серії 6RM70 приведена на рис. 3.4 - 3.5.

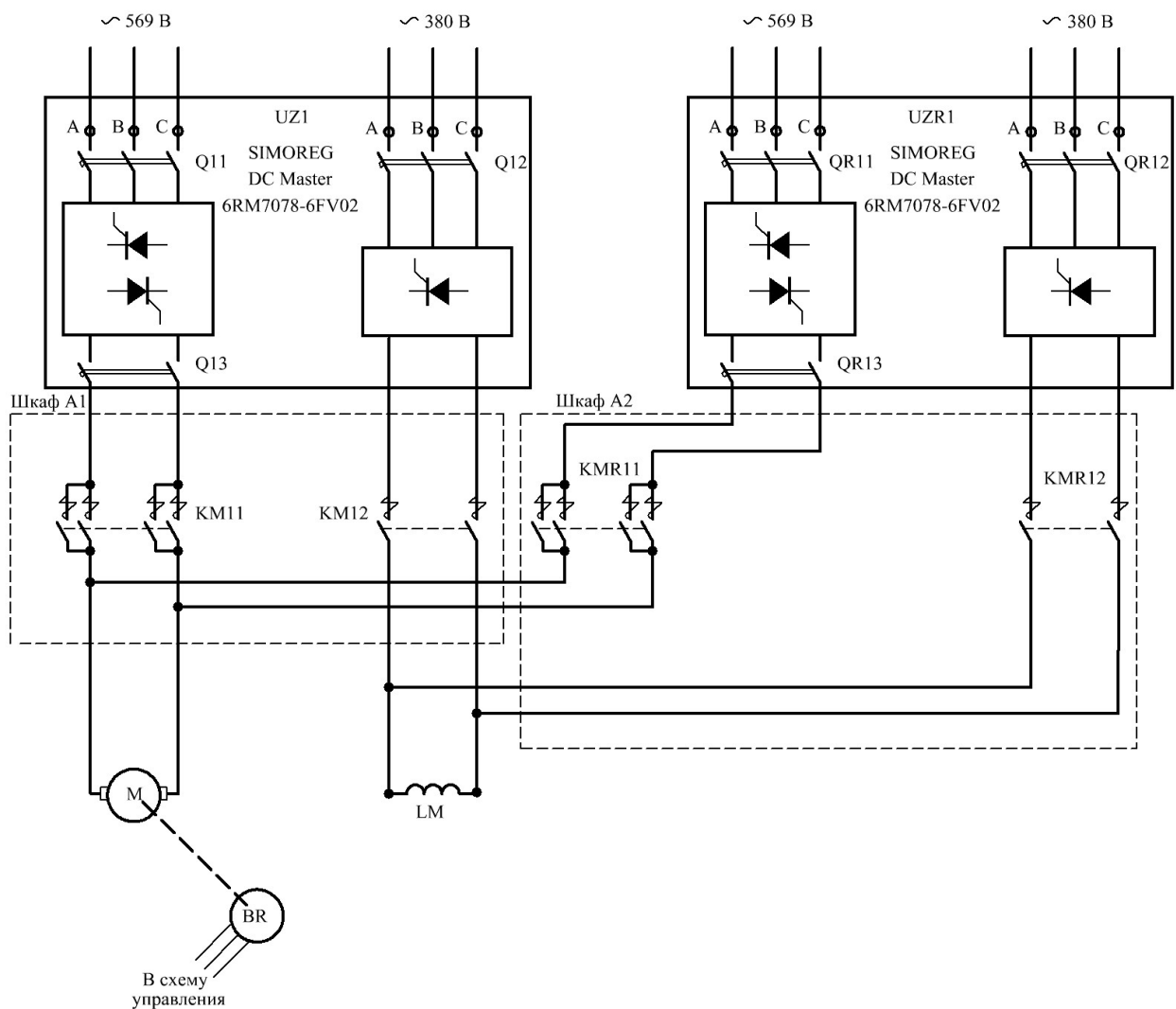


Рисунок 3.3 – Принципова схема силової частини електроприводу станинних роликів

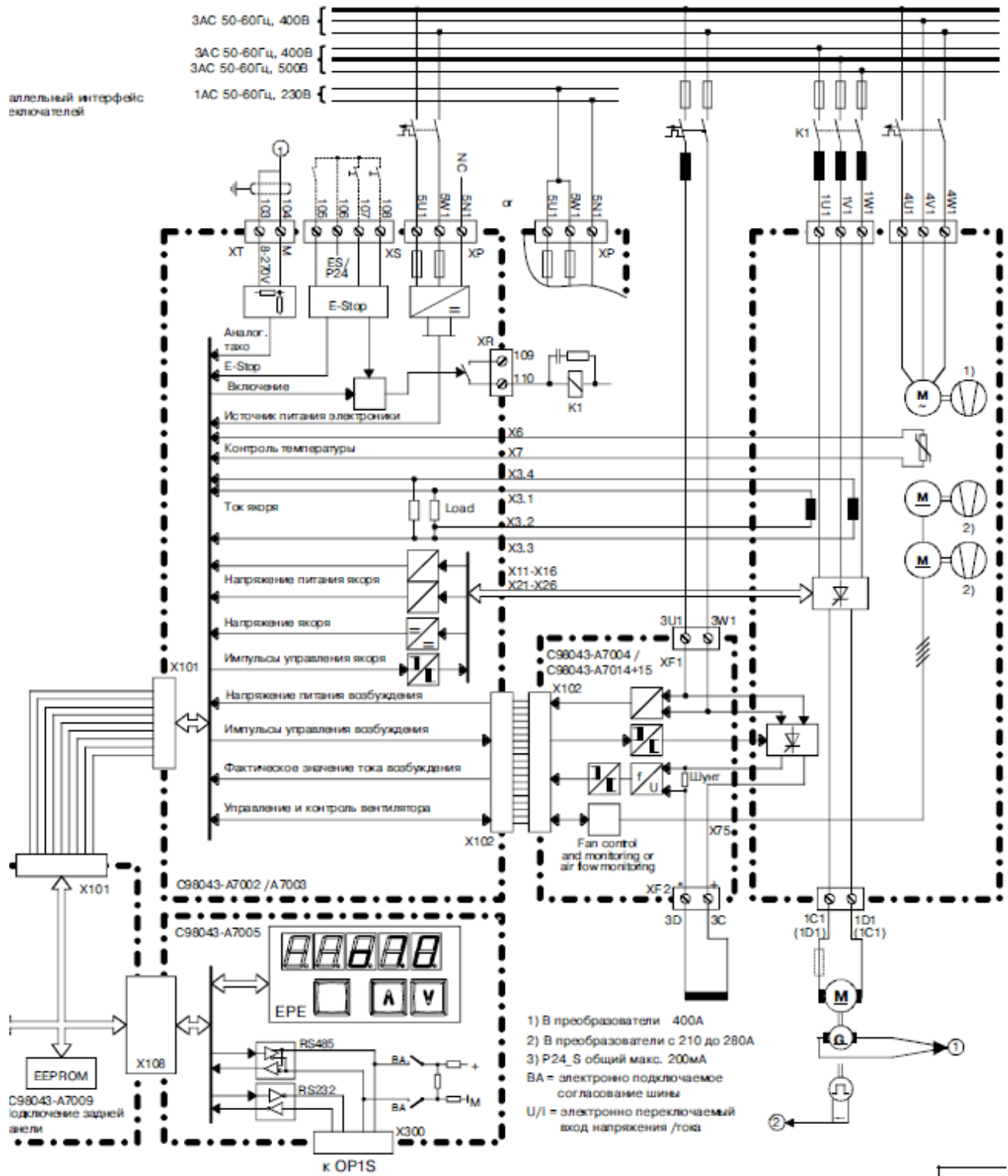


Рисунок 3.4 – Схема підключення (функціональна схема) КТЕ  
 SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

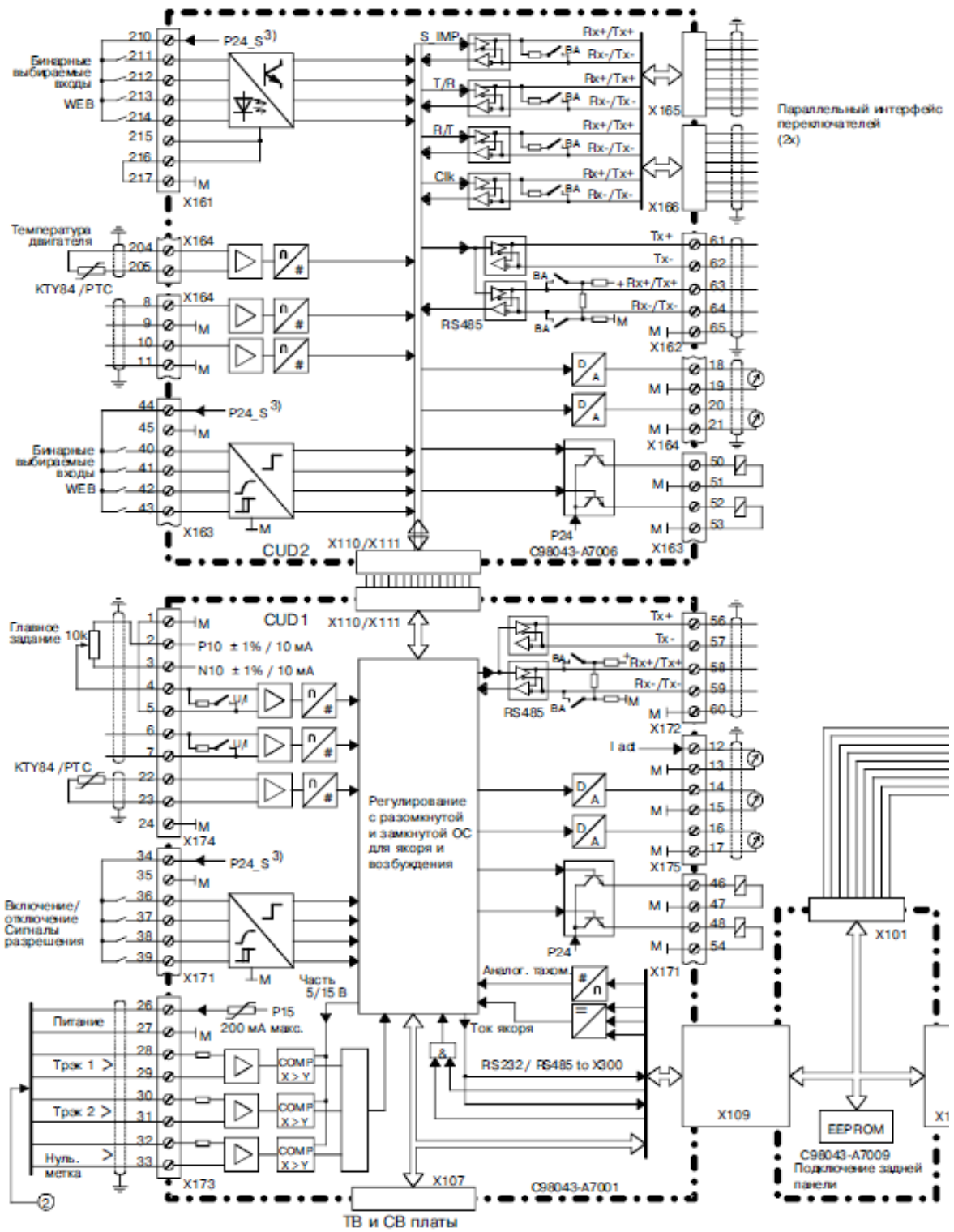


Рисунок 3.5 – Схема керування (функціональна схема) КТЕ SIMOREG DC MASTER серії 6RM70

### **3.4.1 Джерела живлення електродвигунів (SIMOREG DC Master)**

Для живлення електродвигунів використовують комплектні тиристорні електроприводи SIMOREG DC Master 6RM7028-6DV02 (див. табл. 3.1). Ці приводи мають реверс струму в якорному ланцюзі, трансформаторне підключення до мережі, лінійний контактор і пристрій динамічного гальмування. Також, вони обладнані вбудованим пристроєм збудження двигуна та програмованими засобами керування. Приводи мають одноступінчасту систему регулювання швидкості зі зворотнім зв'язком за швидкістю від імпульсного датчика швидкості. Додатково, вони оснащені мережевими зв'язками Profibus DP і CAN.

Ця система також має систему захисту, яка реагує на датчики аварій, а також на аварійні ситуації, що визначаються програмно. Всі ці функції спрямовані на забезпечення надійності та ефективності роботи електродвигунів в різних умовах експлуатації.

### **3.4.2 Резервування комплектного електроприводу**

В якості резервного агрегату, UZR1 використовує комплектний тиристорний електропривід SIMOREG DC Master 6RM7078-6FV02 (див. табл. 3.1). Схема перемикання на резервний перетворювач зображена на рис. 3.2. Процес перемикання електродвигуна на живлення від резервного тиристорного перетворювача виконується при відключеному живленні основних ланцюгів і при зупиненому приводі.

Цей комплектний тиристорний електропривод використовується як резервний агрегат для надійного живлення електродвигунів у випадку відключення основних ланцюгів. Процес перемикання на резервний тиристорний перетворювач забезпечується інтегрованою схемою, яка виявляється особливо ефективною в умовах відсутності живлення основних ланцюгів та зупинення приводу.

### 3.5 Система автоматизації

Керування роботою станинних роликів може бути виконане вручну або автоматично. Ручний режим використовується під час налагодження, випробувань, а також в нештатних і аварійних ситуаціях, а також при тимчасових відмовах у роботі. Автоматичний режим, що є основним, передбачає автоматичну послідовність роботи механізмів у разі виявлення металу у відповідному контрольному перетині стану.

Режими та функції системи автоматизації визначаються потребами і вимогами виробництва. Ручний режим дозволяє операторам втручатися у процес управління для ручного контролю та реагування на нестандартні ситуації, в той час як автоматичний режим забезпечує ефективну та надійну роботу системи при нормальних умовах.

Основні функції системи автоматизації включають збір та обробку інформації від датчиків, забезпечення зв'язку з іншими системами, контроль електроприводів, ситуаційно-логічне керування, введення та виведення параметрів, локальну діагностику та інше. Усі ці функції спрямовані на оптимізацію роботи обладнання та забезпечення його ефективної експлуатації.

Технічні засоби системи автоматизації повинні бути уніфікованими та взаємозамінними для спрощення обслуговування та можливості легкої заміни компонентів. Пульт керування повинен інтегрувати управління приводами та системою автоматизації, забезпечуючи зручний та ефективний контроль над всією системою. Кількість та розташування органів керування погоджуються між проектувальниками електроприводів та АСУ ТП під час проектування.

Оперативна зона, зона апаратури ручного керування та зона підготовки обладнання до роботи чітко визначаються на пульті керування для забезпечення зручності та легкості в обслуговуванні. Додатково, передбачено кнопку на кожному пульті для контролю справності сигнальних ламп.

Керування станинними роликами перед та за чорною кліттю здійснюється з поста керування чорною кліттю ПУЗ, забезпечуючи необхідну координацію швидкостей руху різних елементів обладнання.

### 3.6 Математичний опис об'єкта керування

Під час синтезу системи керування застосовуються стандартні допущення, які є типовими для систем електропривода. Зокрема, лінеарізуються силові елементи об'єкта керування, такі як електродвигун та регульоване джерело живлення ланцюга якоря. Під час математичного опису не враховуються фактори, такі як вплив пружних елементів, гістерезису, вихрових струмів і реакції якоря. Коефіцієнти передачі і константи часу структурних елементів електропривода вважаються незмінними.

Основним об'єктом керування в цій системі є тиристорний перетворювач, електродвигун і механічна частина. Тиристорний перетворювач, виступаючи як елемент системи регулювання, є нелінійним дискретним пристроєм. Його особливості включають дискретний характер управління, оскільки зміна сигналу керування після відмикання тиристора не призводить до негайної зміни напруги перетворювача протягом певного часу.

Якщо швидкість зміни кута  $d\alpha/dt > \omega_0$  велика, то електрорушійна сила (ЕРС) визначається не тільки кутом  $\alpha$ , але й зміною напруги живлення, яку генерує останній тиристор, проводячи струм через систему. Це явище відоме як неповна керуваність тиристорного перетворювача.

У зв'язку з цим вивчення динамічних характеристик тиристорного перетворювача ускладнене, і на практиці застосовуються різноманітні спрощення. Найбільш поширені два типи моделей тиристорного перетворювача: безперервна, що описує перетворювач як аперіодичний елемент з коефіцієнтом передачі  $k_{\text{тп}}$  та сталою часу  $\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ , і імпульсна. В контексті подальшого синтезу системи автоматичного керування буде використана безперервна модель тиристорного перетворювача.

Система керування обраного тиристорного перетворювача має два процесори, і всі регулятори (струму якоря, швидкості, ЕРС двигуна, струму збудження та інші) реалізовані програмно відповідно до функціональних блоків. Завдяки високій швидкодії мікропроцесорів і наявності достатніх

ресурсів, система може здійснювати не лише базове регулювання, але й виконувати функції системи захисту, моніторингу стану електропривода, діагностики збоїв, передбачень та інтерфейсу для оператора.

Синтез системи керування виконується шляхом узгодження контурів регулювання за традиційними принципами настройки контурів на основі модульного та симетричного оптимуму. Сама система керування розглядається як безперервна, незважаючи на програмну реалізацію.

У розділах, присвячених синтезу системи автоматичного регулювання, будуть представлені докладні структурні схеми відповідних регуляторів тиристорного перетворювача SIMOREG DC Master. Для репрезентації електродвигуна використовується тривимірна модель, яка включає аперіодичну ланку першого порядку (електричну частину двигуна) та інтегруючу ланку (механічну частину), обидві охоплені негативним зворотнім зв'язком згідно з ЕРС двигуна.

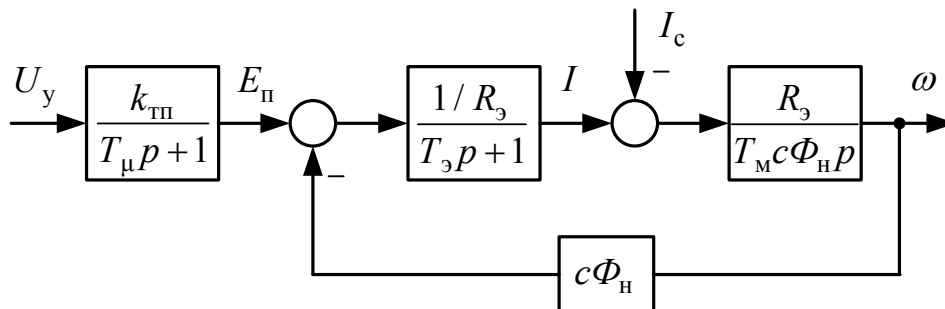


Рисунок 3.7 – Структурна схема силової частини ЕП

### 3.7 Розрахунок основних параметрів елементів системи електропривода

Опір якорного ланцюга електродвигуна (сумарний):

$$r_{я.дв} = \beta(r_{я} + r_{дп} + r_{к}) = 1,32(0,0533 + 0,01027 + 0,026) = 0,118 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

де  $\beta = 1,32$  - температурний коефіцієнт двигуна, що враховує зміну опору при нагріванні машини на  $80^{\circ}\text{C}$ ;

$r_{я} = 0,0533$  Ом - опір при  $20^{\circ}\text{C}$  обмотки якоря (холодний);

$r_{дп} = 0,01027$  Ом - опір при  $20^{\circ}\text{C}$  додаткових полюсів (холодний);

$r_k = 0,026$  Ом - опір компенсаційної обмотки (холодний);

Активний опір трансформатора (комутаційний опір) викликаний реактивністю розсіювання:

$$r_k = \frac{m_\phi \cdot x_a}{2\pi} = \frac{6 \cdot 33,035 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 31,546 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (3.10)$$

де  $m_\phi = 6$  - число фаз випрямлення;

$x_a = 33,035$  мОм - повний опір силового трансформатора.

При синусоїдальній напрузі опору СІФУ перетворювача характеристика вхід-вихід ТП лінійна і коефіцієнт передачі ТП по напрузі розраховується за формулою:

$$k_{\text{ТП}} = \frac{E_{d0}}{U_{y \text{ max}}} = \frac{768,15}{10} = 76,8 \quad (3.11)$$

де  $U_{y \text{ max}} = 10$  В – максимальна керуюча напруга ТП;

$E_{d0} = 768,15$  В - значення максимально випрямленою ЕРС.

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$\begin{aligned} R_\Delta &= r_{\text{я.дв}} + 2r_{\text{тр}} + r_k + r_{\text{ш}} = \\ &= 0,118 + 2(4,808 \cdot 10^{-3}) + 31,546 \cdot 10^{-3} + 11,8 \cdot 10^{-3} = 0,17 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де  $r_{\text{я.дв}} = 0,118$  Ом - активний опір якірного ланцюга двигуна;

$r_{\text{тр}} = 4,808$  мОм - активний опір силового трансформатора;

$r_k = 31,546$  мОм - комутаційний опір;

$r_{\text{ш}} = 0,1r_{\text{я.дв}} = 0,1 \cdot 0,118 = 11,8$  мОм - активний опір шин або кабелю, що

з'єднують ТП з якорем двигуна.

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга системи ТП-Д:

$$L_\Delta = L_{\text{дв}} + 2L_{\text{тр}} = 16,633 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 105,154 \cdot 10^{-6} = 0,017 \text{ Гн} \quad (3.13)$$

Сумарний момент інерції (з урахуванням моменту інерції



транспортованого злитка), приведений до валу електродвигуна:

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}} = 54,9 + 296,7 + 468,7 = 820,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.14)$$

де  $J_{\text{дв}} = 54,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції електродвигуна (см. табл. 2.1);

$J_{\text{р}} = 296,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції роликів;

$J_{\text{м}} = 468,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції транспортованого злитка,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Коефіцієнт двигуна (постійна двигуна):

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я,дв}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{440 - 248 \cdot 0,118}{16,75} = 24,5 \text{ Вс} \quad (3.15)$$

де  $\omega_{\text{н}} = 16,75 \text{ 1/с}$  - номінальна швидкість електродвигуна.

Електромагнітна стала часу системи ТП-Д:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = \frac{0,017}{0,17} = 0,1 \text{ с} \quad (3.16)$$

Електромеханічна стала часу електроприводу:

$$T_{\text{м}} = \frac{J'_{\Sigma} R_{\text{э}}}{c\Phi_{\text{н}}^2} = \frac{820,3 \cdot 0,17}{24,5^2} = 0,23 \text{ с} \quad (3.17)$$

Постійну часу ТП через наявність в ньому і взагалі в системі малих неврахованих інерційні, приймаємо  $T_{\mu} \approx 5 \text{ мс}$ .

### 3.8 Синтез регулятора струму

При розгляді контуру регулювання струму будемо вважати, що електромеханічна стала часу набагато більша електромагнітної постійної часу  $T_{\text{э}}$ . Можна також зневажати зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, вважаючи її збурюючим впливом у контурі струму.

Структурна схема контуру струму представлена на рисунку 3.8.

У якості малої сталої часу контуру струму затверджуємо малу сталу ТП  $T_{\mu} = 5 \text{ мс}$ . Налаштовуємо контур струму на модульний оптимум.

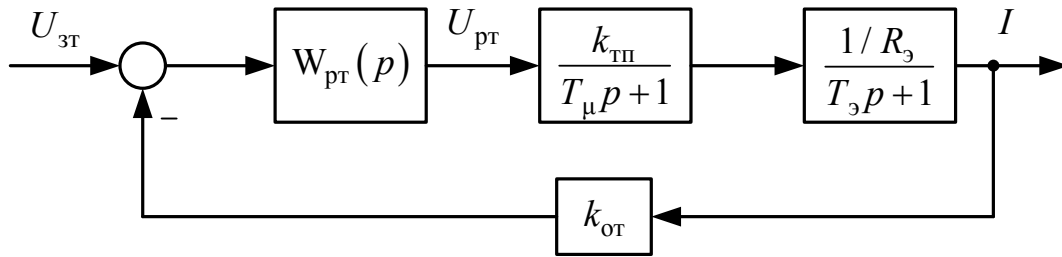


Рисунок 3.8 - Структурна схема контуру струму

Передатна функція регулятора має вигляд:

$$W_{\text{пт}}^{\text{м}}(p) = \frac{R_э(T_э p + 1)}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} 2T_μ p} = \frac{R_э(T_э p + 1)}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}} p} = k_{\text{птп}} + \frac{k_{\text{птИ}}}{p} \quad (3.17)$$

Пропорційна та інтегральна частина Пі-регулятора струму:

$$k_{\text{птп}} = \frac{R_э T_э}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}}} = \frac{0,17 \cdot 0,1}{76,8 \cdot 0,016 \cdot 0,01} = 1,383 \quad (3.18)$$

$$k_{\text{птИ}} = \frac{R_э}{k_{\text{тп}} k_{\text{от}} T_{\text{от}}} = \frac{0,17 \cdot 0,1}{76,8 \cdot 0,016 \cdot 0,01} = 13,835 \quad (3.19)$$

де  $T_э$  – електромагнітна стала часу системи ТП-Д;

$k_{\text{тп}}$  – коефіцієнт передачі ТП по напрузі;

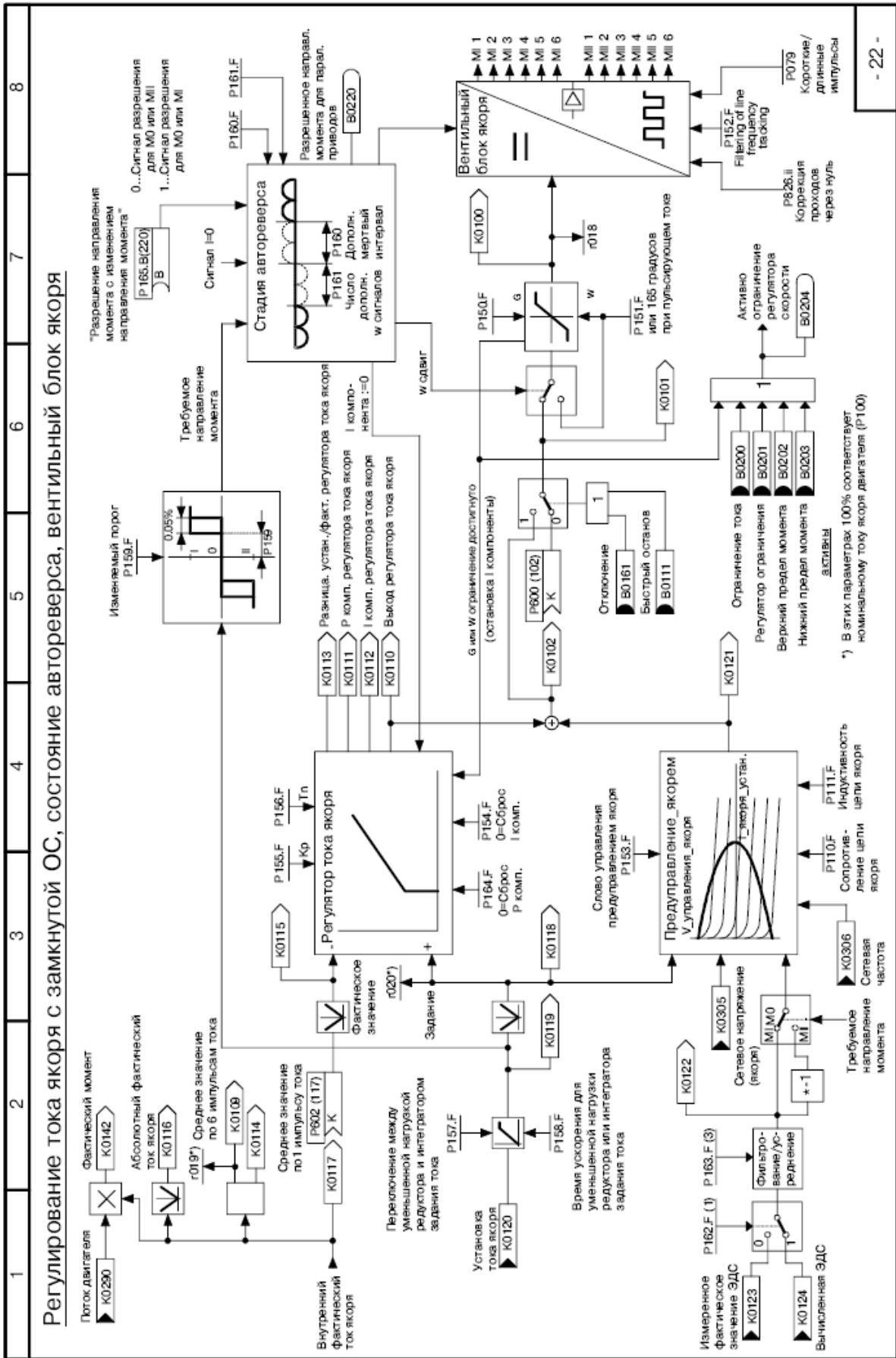
$k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт.мак}}}{I_{\text{мак}}} = \frac{10}{620} = 0,016$  В/А – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язка по струму;

$U_{\text{зт.мак}} = 10$  В – максимальний сигнал завдання на струм;

$I_{\text{мак}} = 2,5 I_{\text{н}} = 2,5 \cdot 248 = 620$  А – максимально допустимий струм якоря двигуна (струм упору);

$T_{\text{от}} = 2T_μ = 2 \cdot 0,005 = 0,01$  с – стала часу інтегрування контуру струму при настроюванні на модульний оптимум.

Функціональну схему контуру регулювання струму якоря, реалізовану у перетворювачі програмно на базі відповідних блоків, представлено на рис 3.9.



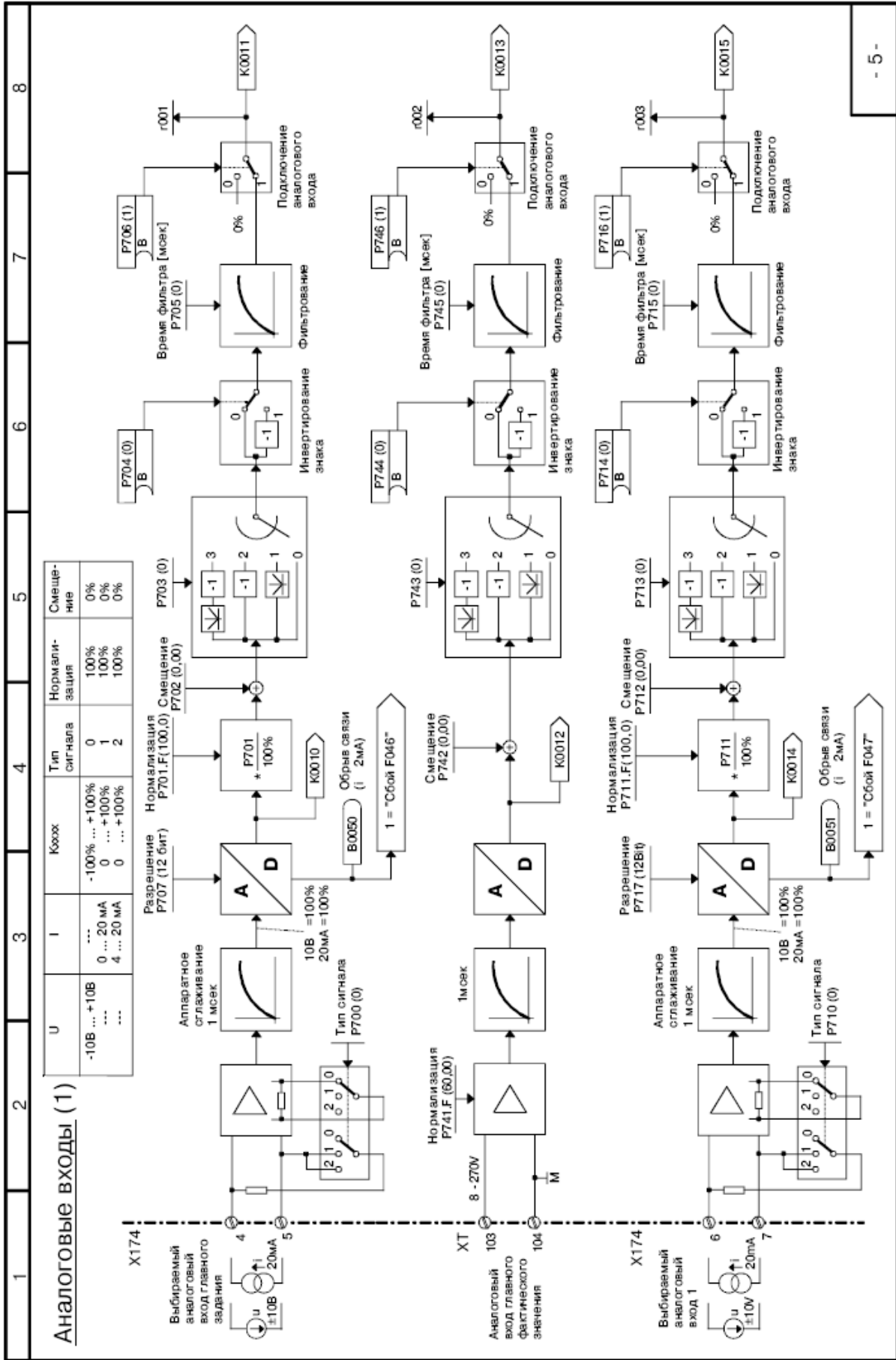


Рисунок 3.10 – Канал формирования сигнала зворотного зв'язка по струму в перетворювачі SIMOREG DC Master

Розраховані величини пропорційної й інтегральної частин регулятора струму при налагодженні електропривода необхідно встановити в параметрах P155.F і P156.F відповідно.

Для формування сигналу, пропорційного реальному струму якоря двигунів використовується канал аналогового входу (клеми X173.4 і X173.5 на рис. 3.10), на який подається напруга з датчика напруги, підключеного до вимірювального шунта. Шунт необхідно встановити у якірному ланцюзі двигуна. Далі сигнал фільтрується апаратним згладжуванням, оцифровується аналого-цифровим перетворювачем А/D, нормується за величиною до 100% параметром P701.F і далі при необхідності інвертується за допомогою параметра P703, програмно фільтрується й на виході конектора K0011 виходить програмний сигнал, пропорційний реальному току.

### 3.9 Синтез регулятора швидкості

Структурну схему контуру швидкості зі згорнутим контуром струму (оскільки  $T_\mu$  - мала стала часу, то добутком  $T_{от}T_\mu$  можна зневажити) наведено на рисунку 3.11.

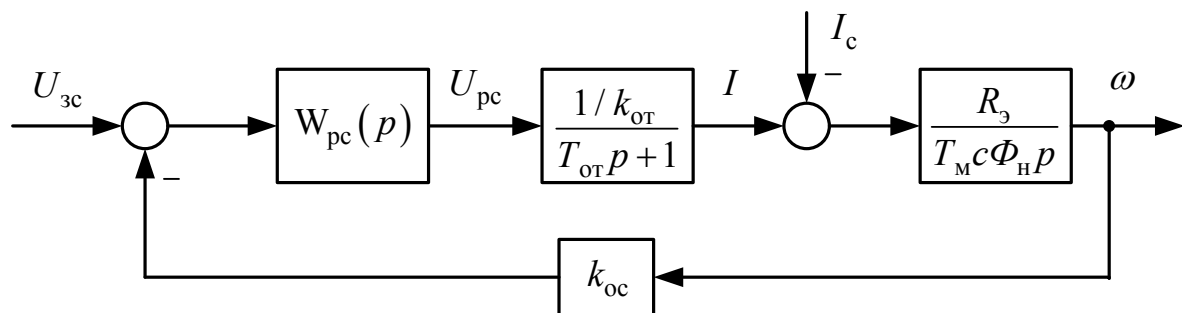


Рисунок 3.11 - Структурна схема контуру швидкості

Оскільки вимоги до статичної помилки регулювання в межах 5%, контур швидкості виконуємо дворазово-інтегруючим (з ПІ-регулятором), тобто здійснюємо налаштування на симетричний оптимум. У цьому випадку передатна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{pc}^c(p) = \frac{T_M c \Phi_H k_{OT}}{R_3 k_{oc} 2T_{OT}} \frac{4T_{OT} p + 1}{4T_{OT} p} = \frac{T_M c \Phi_H k_{OT}}{R_3 k_{oc} T_{oc}} \frac{2T_{oc} p + 1}{2T_{oc} p} = k_{pc\Pi} + \frac{k_{pcИ}}{p} \quad (3.20)$$

Пропорційна та інтегральна частина ПІ-регулятора швидкості:

$$k_{pc\Pi} = \frac{T_M c \Phi_H k_{OT}}{R_3 k_{oc} T_{oc}} = \frac{0,23 \cdot 24,5 \cdot 0,016}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,02} = 75,1 \quad (3.21)$$

$$k_{pcИ} = \frac{T_M c \Phi_H k_{OT}}{R_3 k_{oc} 2T_{oc}^2} = \frac{0,23 \cdot 24,5 \cdot 0,016}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 2 \cdot 0,02^2} = 1878,4 \quad (3.22)$$

де  $T_M$  – електромеханічна стала часу системи ТП-Д;

$$k_{oc} = \frac{U_{zc.max}}{\omega_{max}} = \frac{10}{16,75} = 0,6 \text{ Вс} \text{ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного}$$

зв'язку по швидкості;

$$U_{zc.max} = 10 \text{ В} \text{ – максимальний сигнал завдання на швидкість};$$

$$\omega_{max} = \omega_H = 16,75 \text{ 1/с} \text{ – максимальна швидкість електродвигуна};$$

$$T_{oc} = 2T_{OT} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ с} \text{ – стала часу інтегрування контуру швидкості}$$

при налаштуванні на симетричний оптимум.

Для зниження перерегулювання швидкості при налаштуванні контурів на симетричний оптимум на його вході, встановлюємо фільтр з передавальної функцією:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi} p + 1} \quad (3.23)$$

$$\text{де } T_{\phi} = 8T_{\mu} = 2T_{oc} = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ с} \text{ – стала часу фільтру.}$$

Функціональна схема контуру регулювання швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.12. Розраховані величини пропорційної й інтегральної частин регулятора швидкості при налагодженні електропривода необхідно встановити в параметрах P550.F, P225.F і P226.F відповідно.

У якості датчика швидкості обираємо імпульсний датчик HOG 10 DN концерну Huebner Berlin – 1024 імпульсу/оберт.



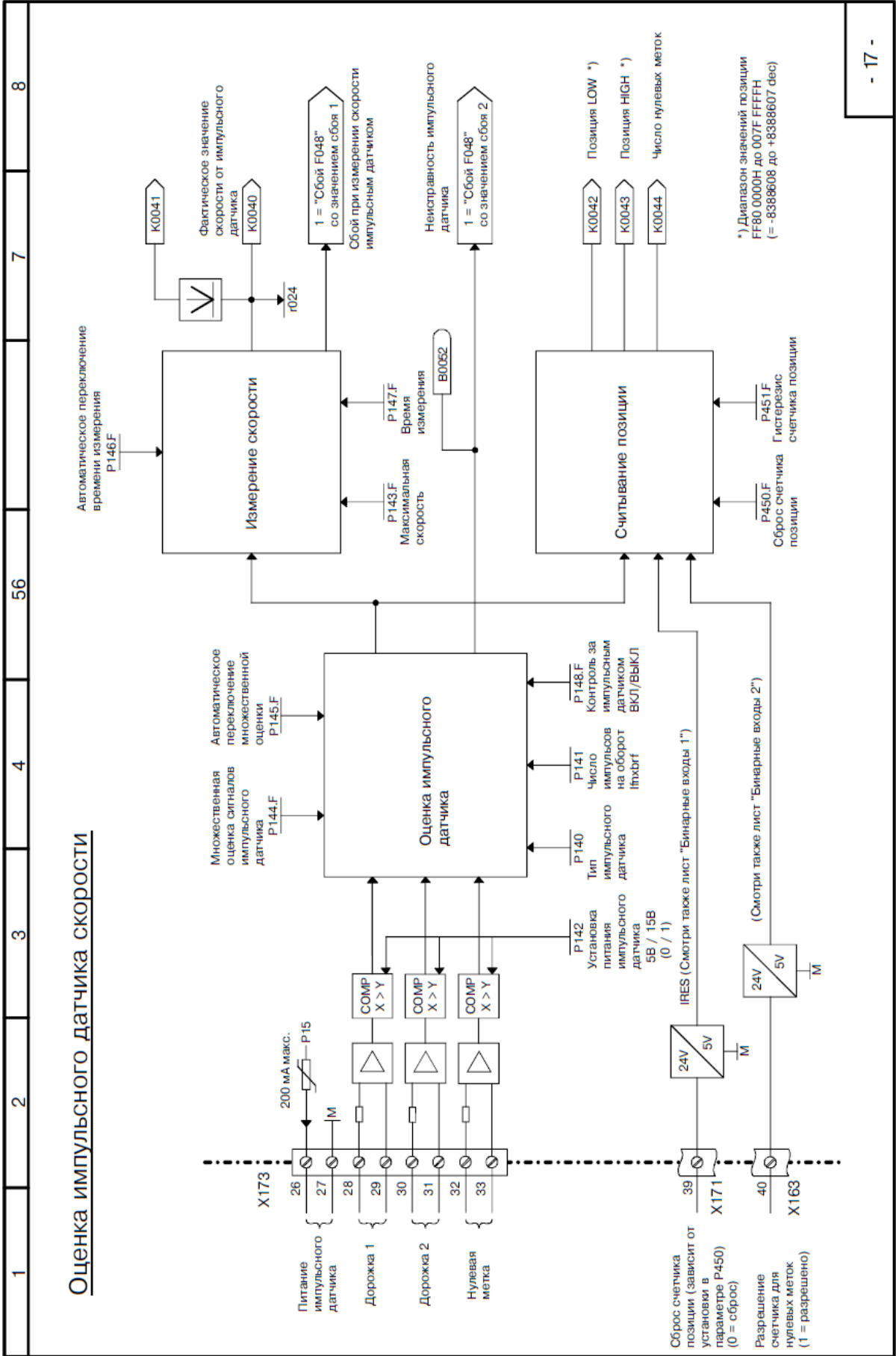


Рисунок 3.13 – Функціональна схема регулятора швидкості у перетворювачі SIMOREG DC Master



### 3.10 Розрахунки задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону й гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим вставки токообмеження ( $I_{\max} = 2,5I_{\text{н}}$ ) необхідно на вході регулятора швидкості встановити задатчик інтенсивності швидкості (ЗІШ). Він перетворить східчастий сигнал завдання швидкості в лінійно мінливий сигнал у часі. Значення напруги виходу ЗІШ, що встановилося, яке подається на вхід регулятора швидкості, дорівнює вхідному сигналу. Структурна схема задатчика інтенсивності наведена на рисунку 3.14.

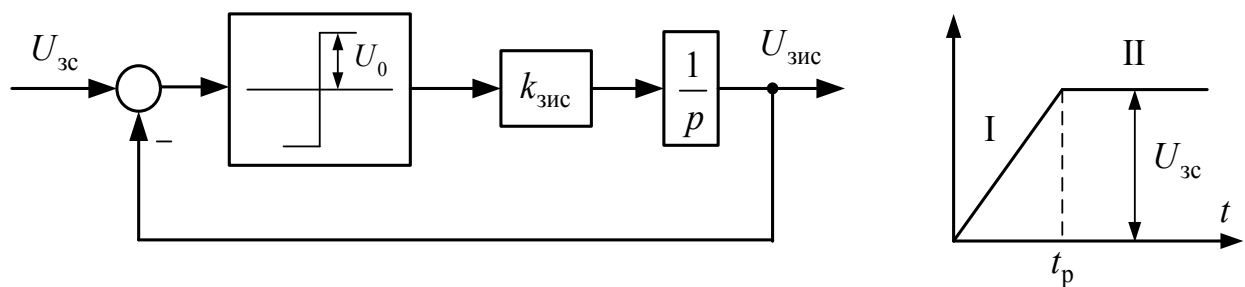


Рисунок 3.14 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Вихідні напруги задатчика інтенсивності можна описати наступними рівняннями:

I ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{I}} = U_0 k_{\text{зис}} t_p = \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{м}} c \Phi_{\text{н}}} \frac{I_{\text{дин}} U_{\text{зс}}}{\omega_{\text{з,уст}}} t_p \quad (3.24)$$

II ділянка:

$$U_{\text{зис}}^{\text{II}} = U_{\text{зс}} \quad (3.25)$$

де  $I_{\text{дин}} = I_{\text{н}} = 93$  А – заданий динамічний струм;

$\omega_{\text{з,уст}} = 13,85$  1/с – усталена швидкість (швидкість транспортування злитка), відповідна  $U_{\text{зс}}$ ;

$U_{\text{зс}} = 10$  В – напруга на вході напруги виходу ЗІШ (напруга, що задає);

$U_0 = 10$  В - полка релейного елемента.

Зі співвідношення (3.24) визначимо час розгону двигуна до встановленої швидкості:

$$t_p = \frac{T_M c \Phi_H}{R_3} \cdot \frac{\omega_{з.уст}}{I_{дин}} \text{ с} \quad (3.26)$$

Коефіцієнт передачі задатчика інтенсивності:

$$k_{зис} = \frac{U_{зс}}{t_p}, \text{ В/с} \quad (3.27)$$

Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості, реалізованого в перетворювачі SIMOREG DC Master програмно на базі відповідних блоків, представлена на рисунку 3.15.

На рисунку 3.16 наведена структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування електропривода.



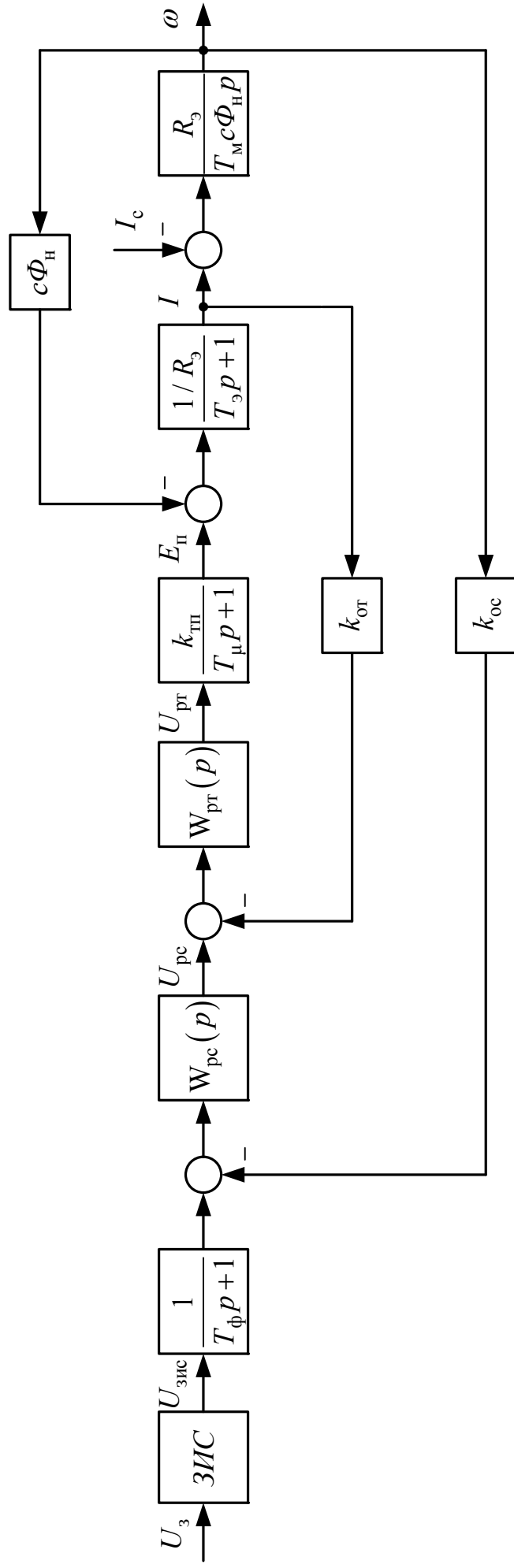


Рисунок 3.16 – Структурна схема швидкісної системи підпорядкованого керування

### 3.11 Моделювання ЕП з підпорядкованою системою керування в середовищі Matlab/Simulink

Для проведення цифрового моделювання заданої системи використовується середовище Matlab/Simulink для моделювання динамічних систем. Розроблена модель Simulink для системи підпорядкованого керування електроприводом ножиць включає в себе ПІ-регулятор струму, ПІ-регулятор швидкості та задатчик інтенсивності швидкості, як показано на рис. 3.17. Внутрішні структури типових вузлів схеми подані на рис. 3.18 - 3.19.

При реалізації цифрової моделі враховувалося насичення регуляторів струму та швидкості. Наприклад, при моделюванні ПІ-регулятора, обмеження його вихідної напруги через блок Saturation виявилось недостатнім, оскільки внутрішній інтегральний компонент може накопичувати значення, які перевищують встановлений поріг насичення. З цієї причини використання стандартного блоку PID-controller з бібліотеки Simulink Extras/Additional Liner виявилось неприйнятним. Моделі регуляторів належним чином враховують поріг насичення регулятора  $U_{y,max} = 10$  В (див. рис. 3.20).

Графіки перехідних процесів, такі як швидкість обертання двигуна, струм якірного ланцюга, ЕРС силового перетворювача та інші, були отримані як за номінальними параметрами об'єкта керування, так і при їхній варіації, як показано на рис. 3.21 - 3.32.

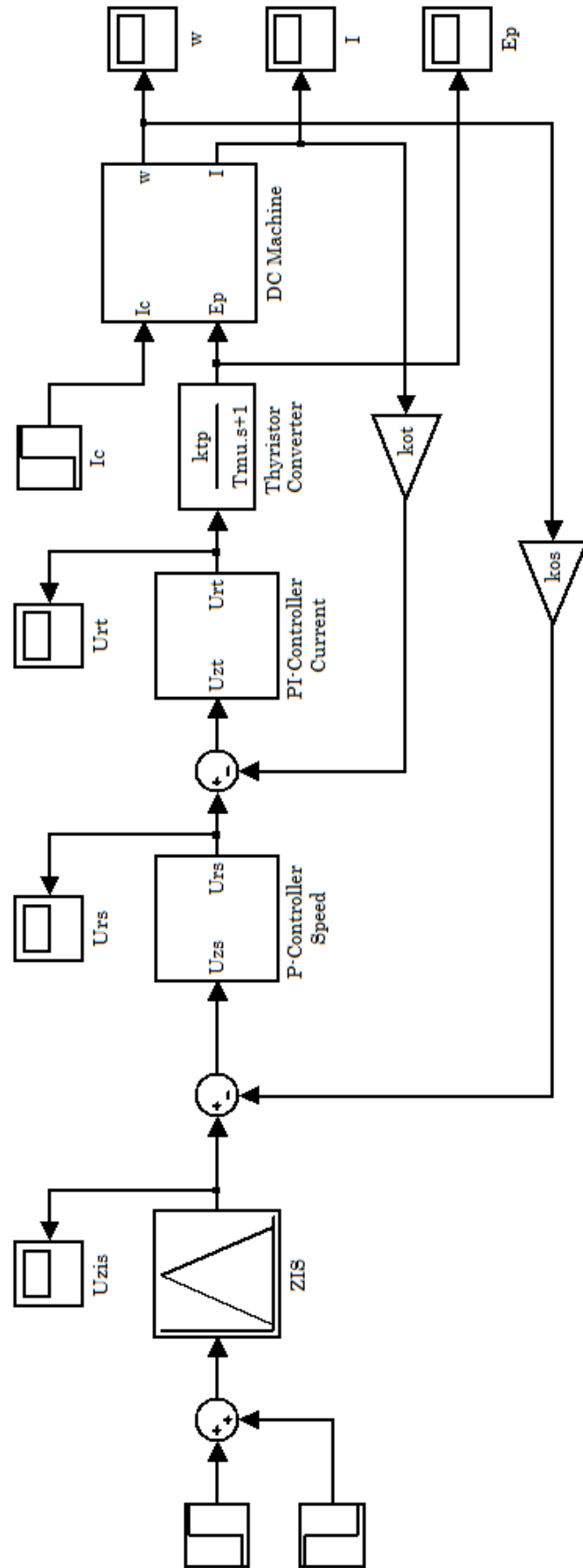


Рисунок 3.17 – Математична Simulink-модель системи підпорядкованого регулювання швидкістю ЕП

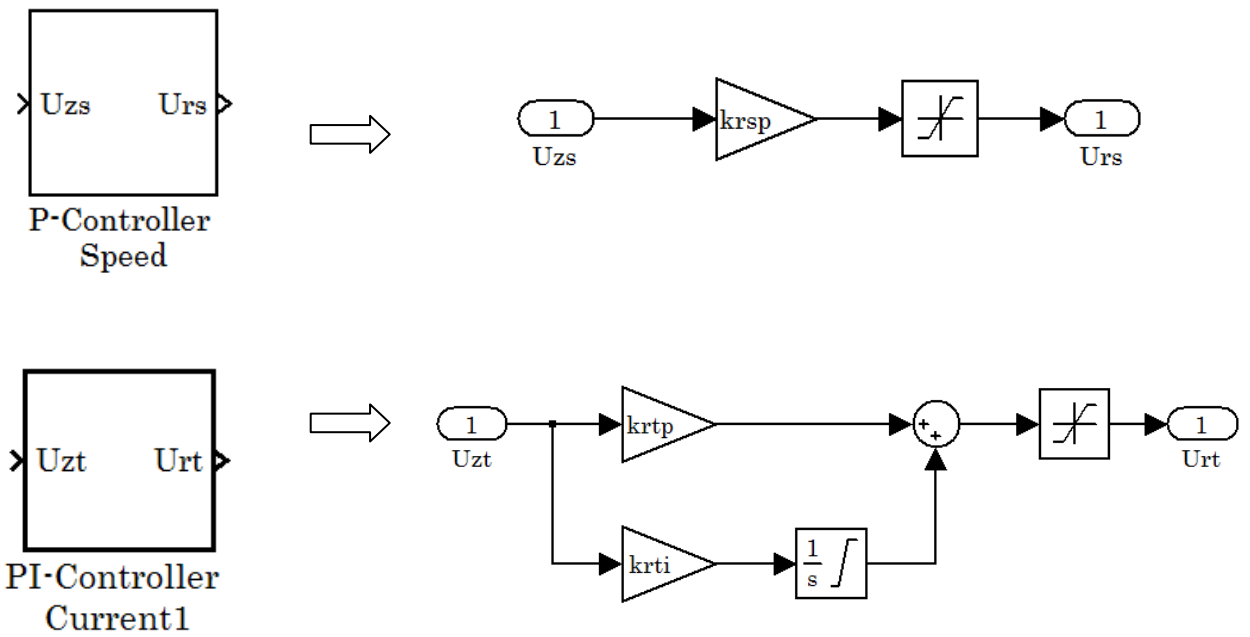


Рисунок 3.18 – Блок підсистеми «ПІ-регулятор» струму (PI-controller Current) і швидкості (P-Controller Speed), який враховує поріг насичення регулятора

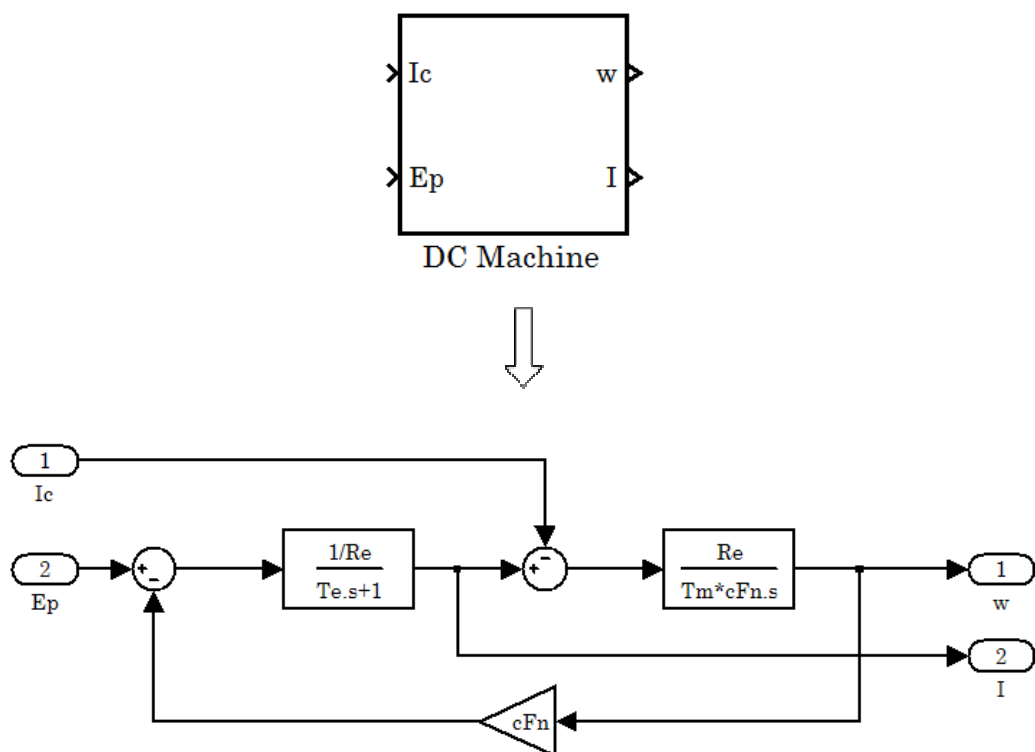


Рисунок 3.19 – Внутрішня структура підсистеми електродвигуна постійного струму (DC Machine)

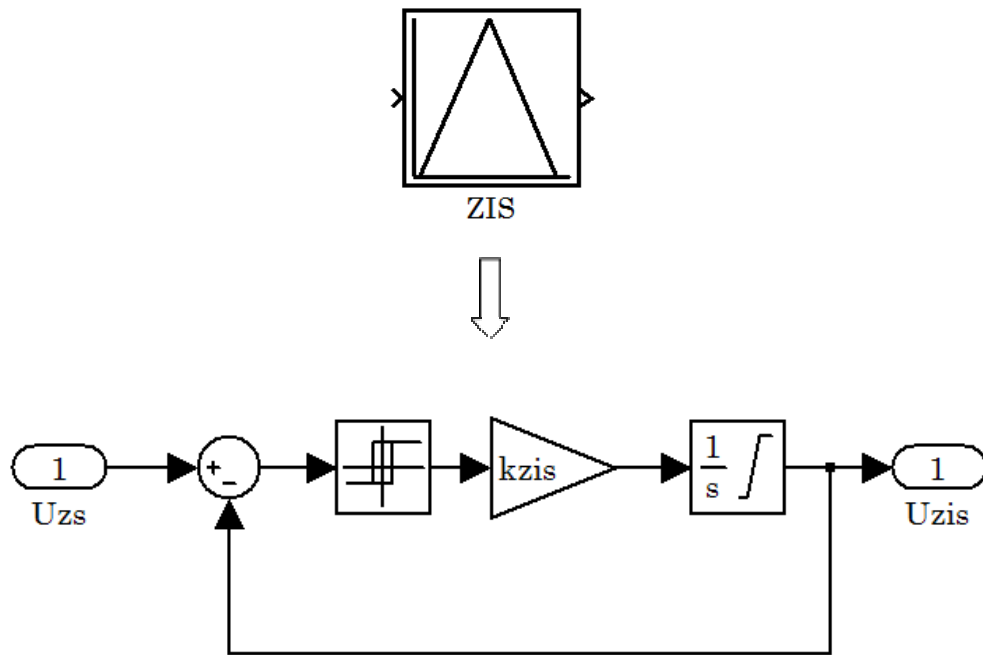


Рисунок 3.20 – Блок підсистеми «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS), який реалізує раціональну динаміку



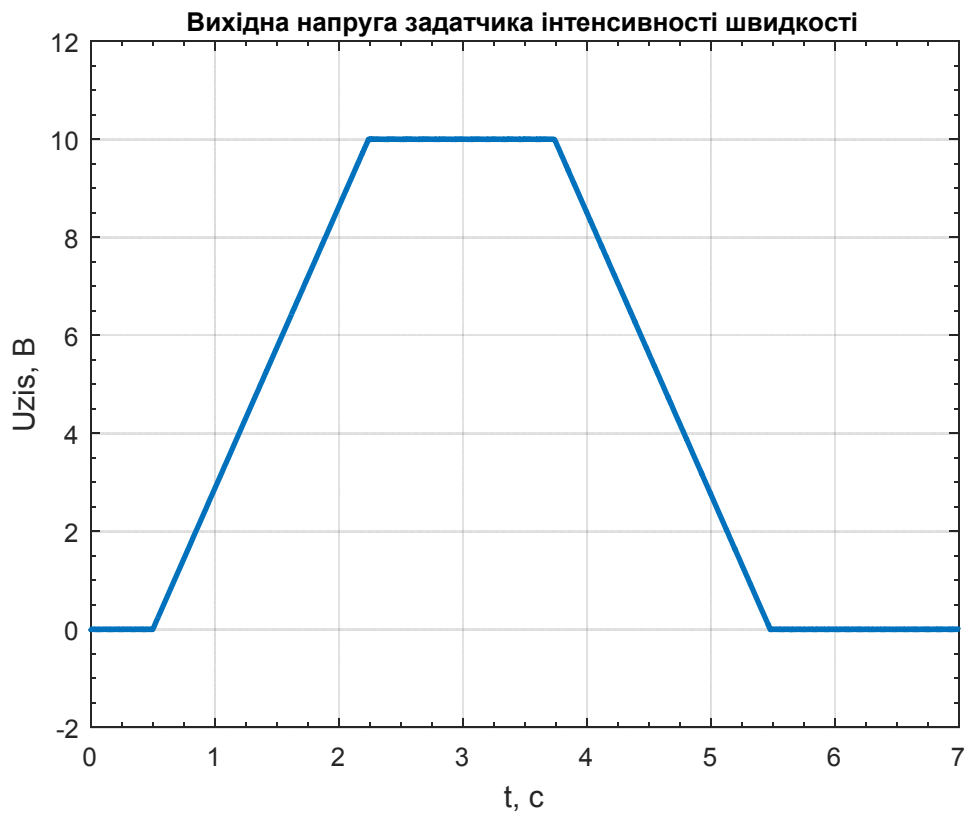


Рисунок 3.21 – Перехідний процес напруги задатчика інтенсивності швидкості в системі ЕП

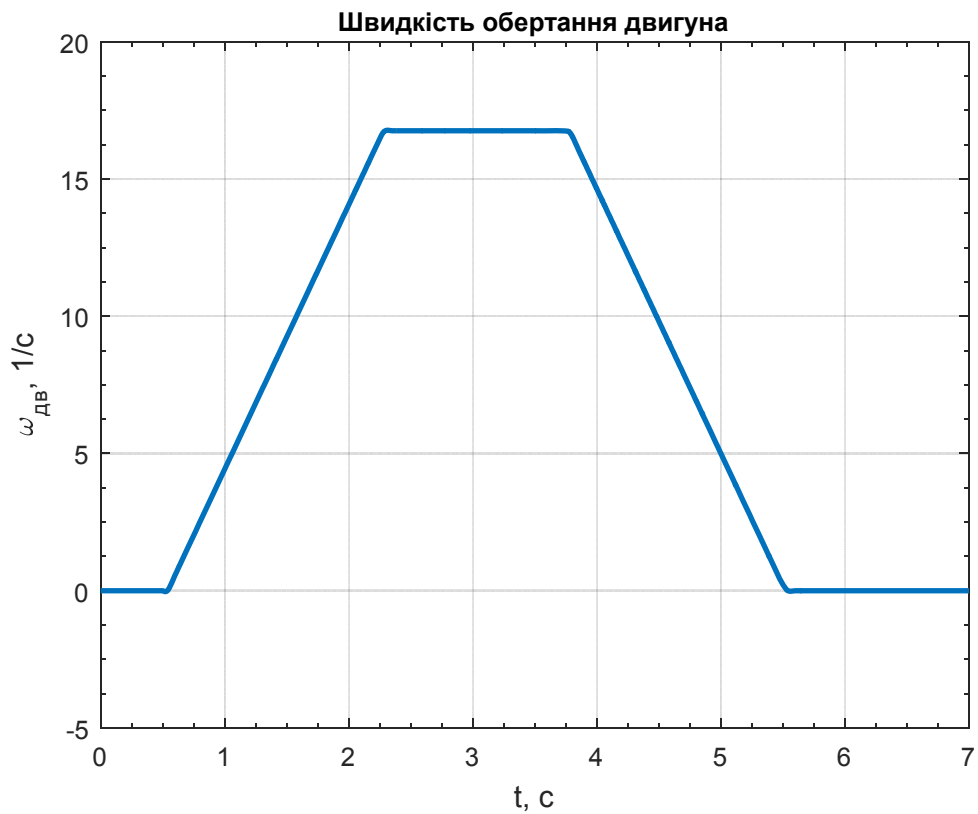


Рисунок 3.22 – Перехідний процес швидкості обертання двигуна ( $I_c = 0,4I_H$ ) в системі ЕП

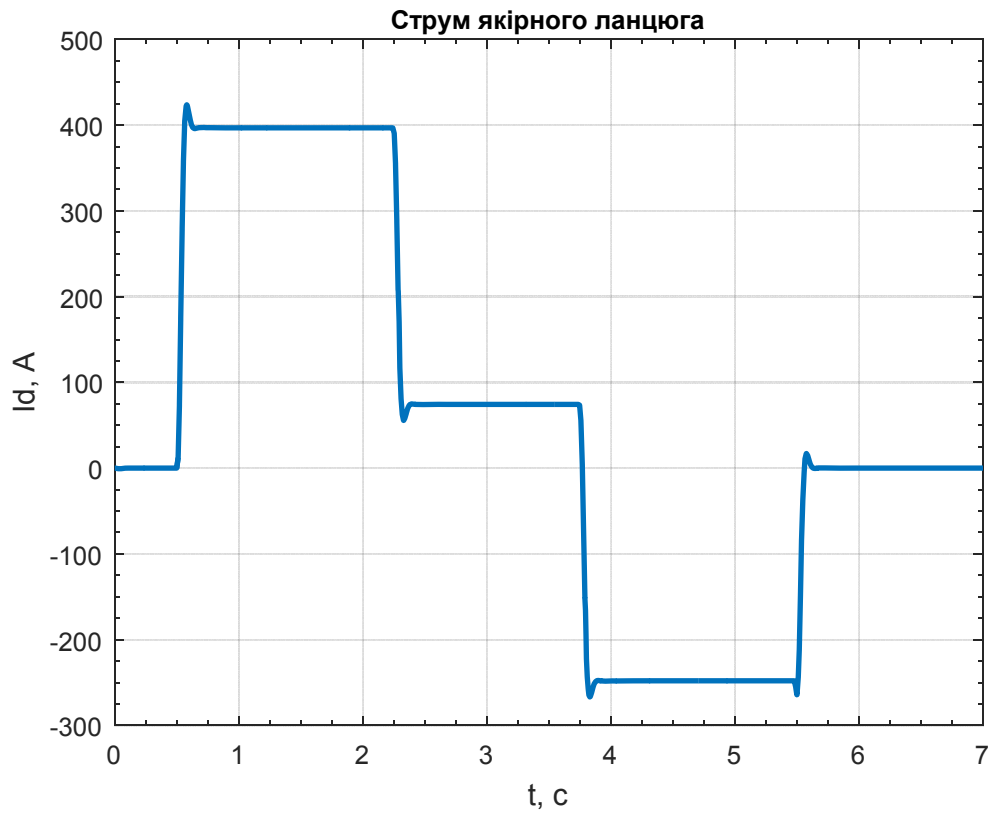


Рисунок 3.23 – Перехідний процес струму якоря ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

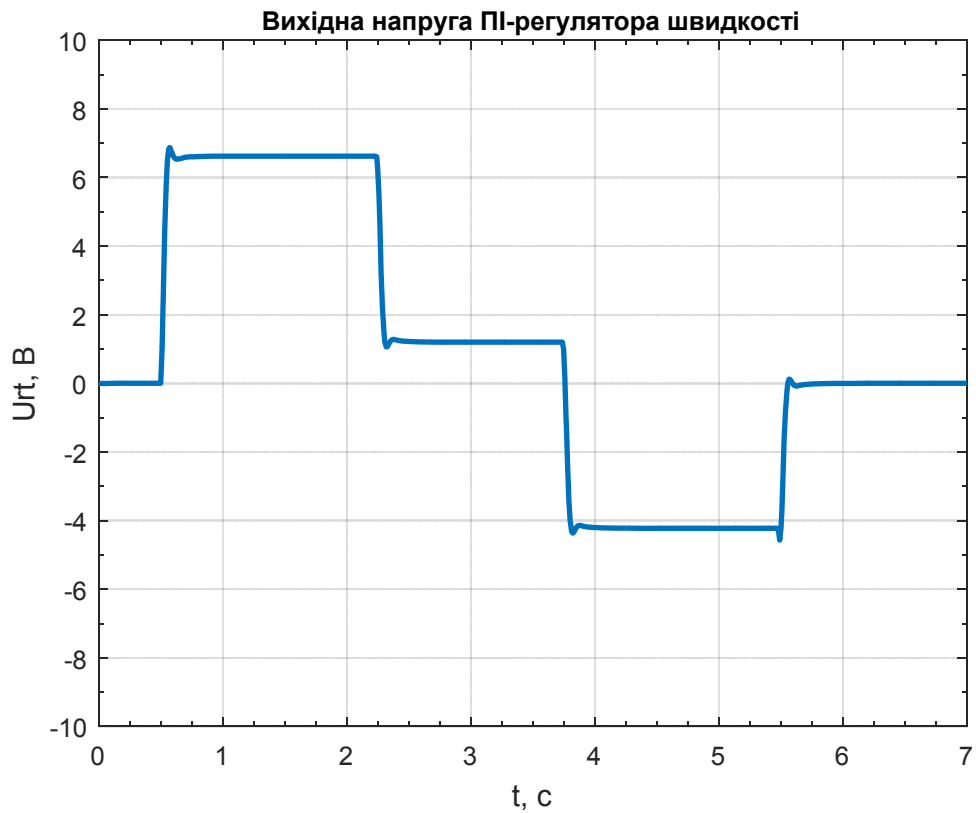


Рисунок 3.24 – Перехідний процес напруги ПІ-регулятора швидкості ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

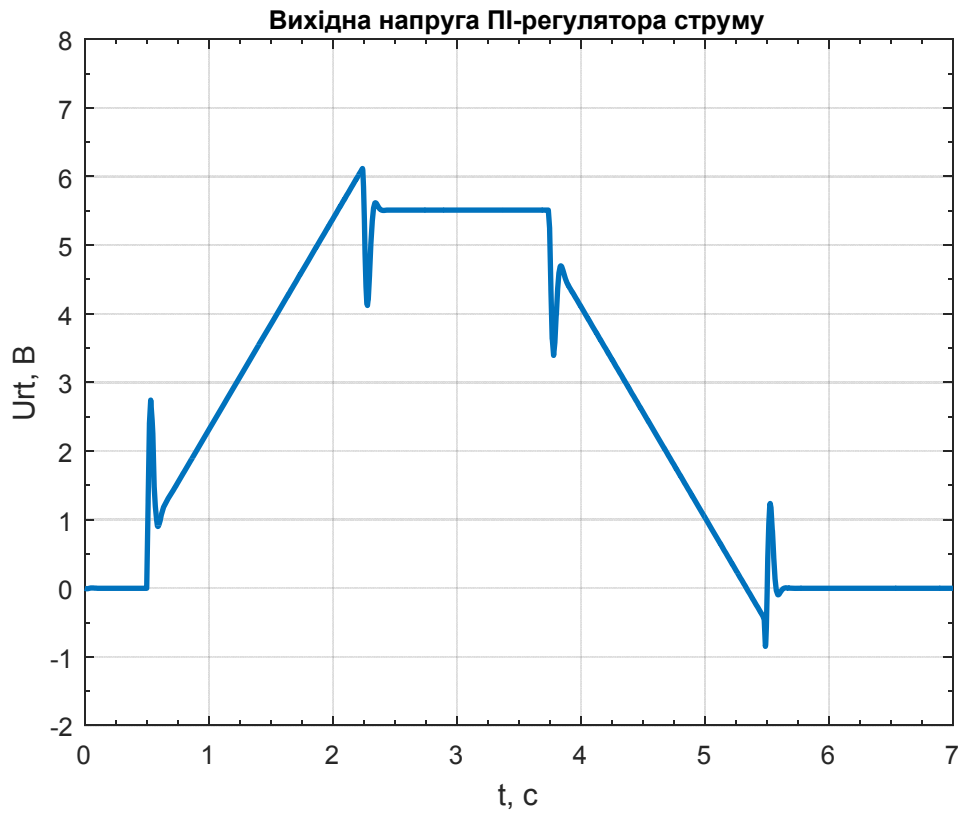


Рисунок 3.25 – Перехідний процес вихідної напруги ПІ-регулятора струму ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

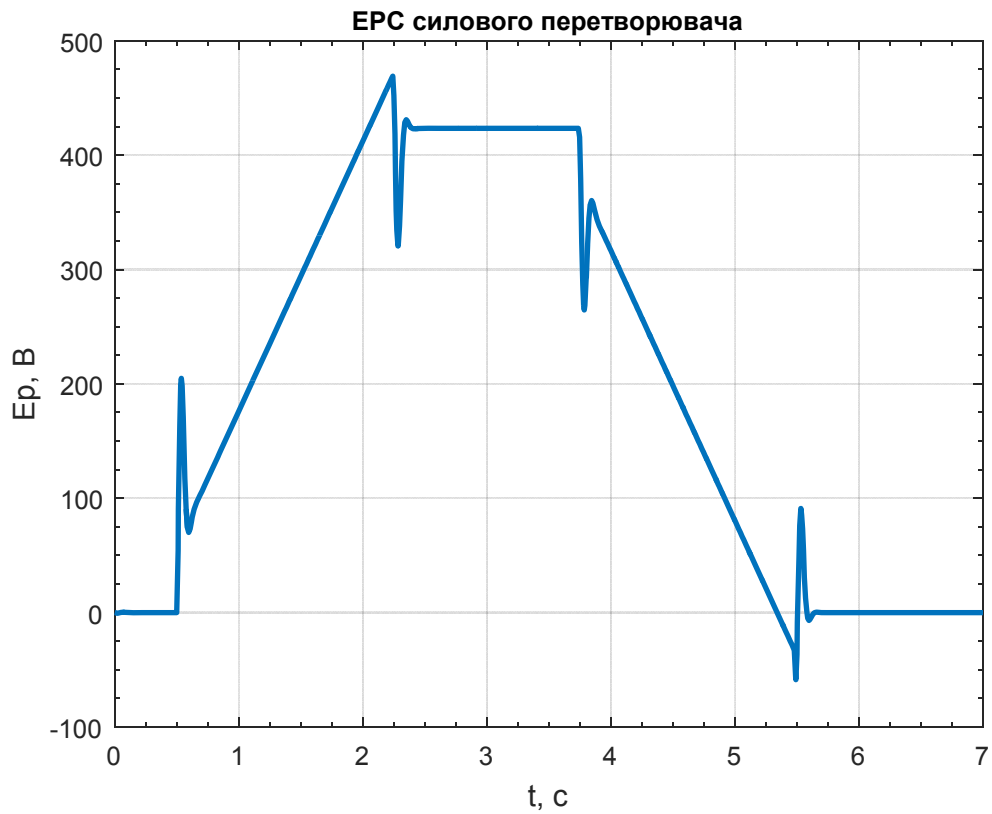


Рисунок 3.26 – Перехідний процес ЕРС тиристорного перетворювача ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

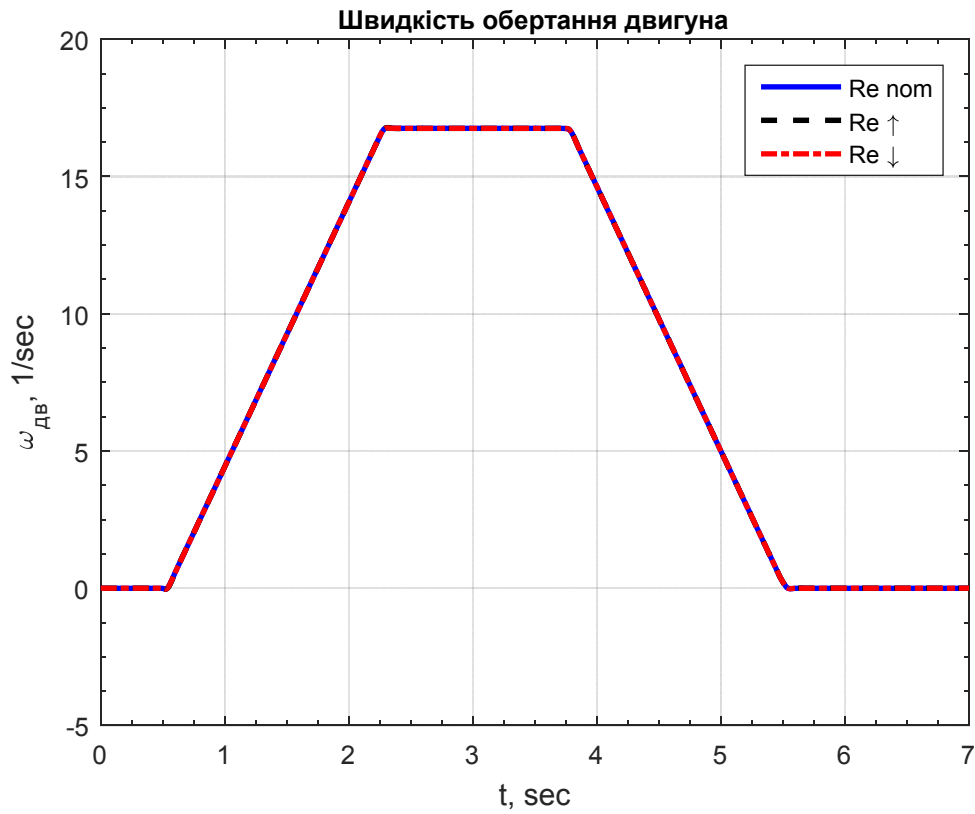


Рисунок 3.27 – Графіки перехідних процесів швидкості обертання двигуна при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

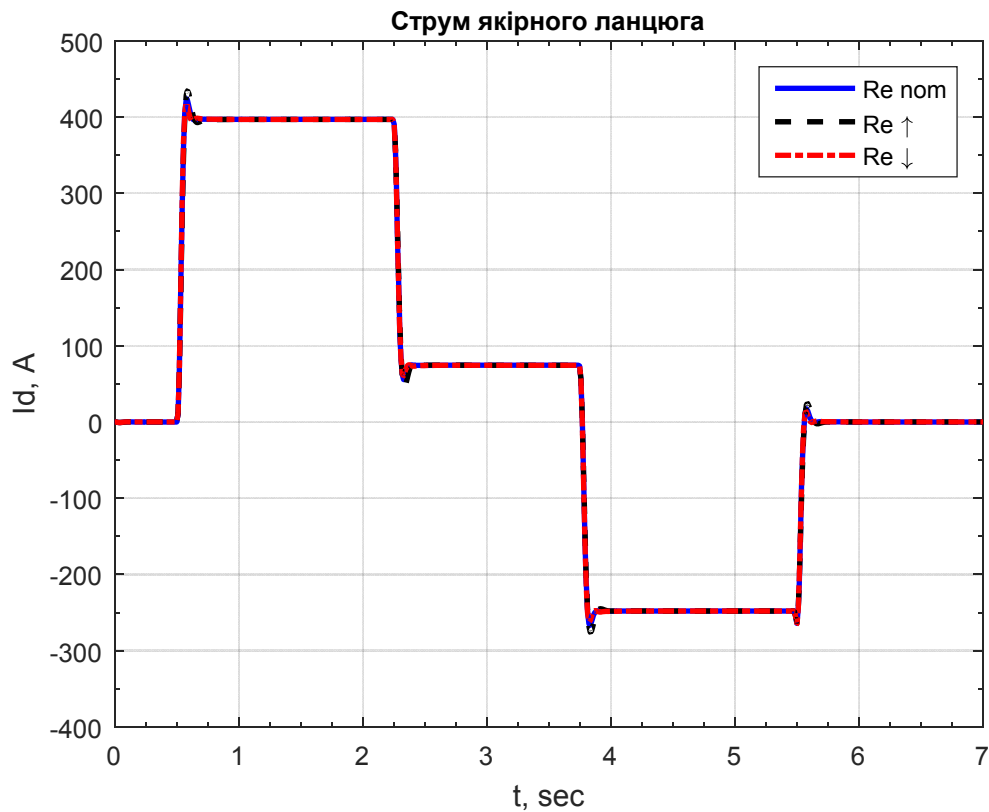


Рисунок 3.28 – Графіки перехідних процесів струму якоря при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП



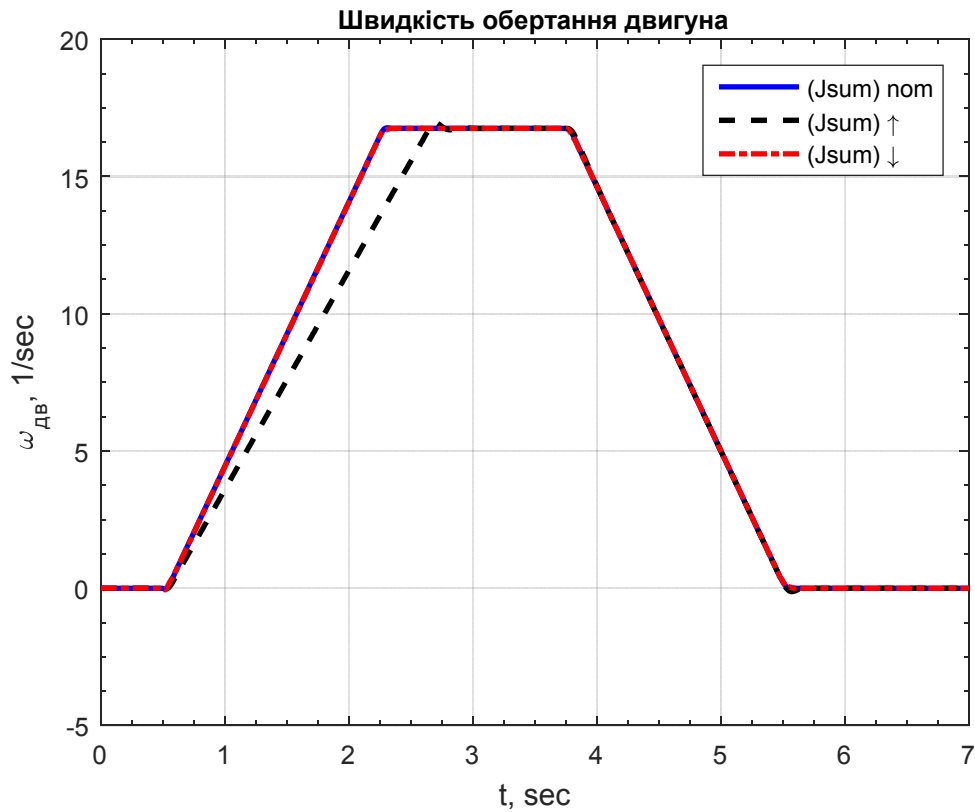


Рисунок 3.31 – Графіки перехідних процесів швидкості обертання двигуна при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

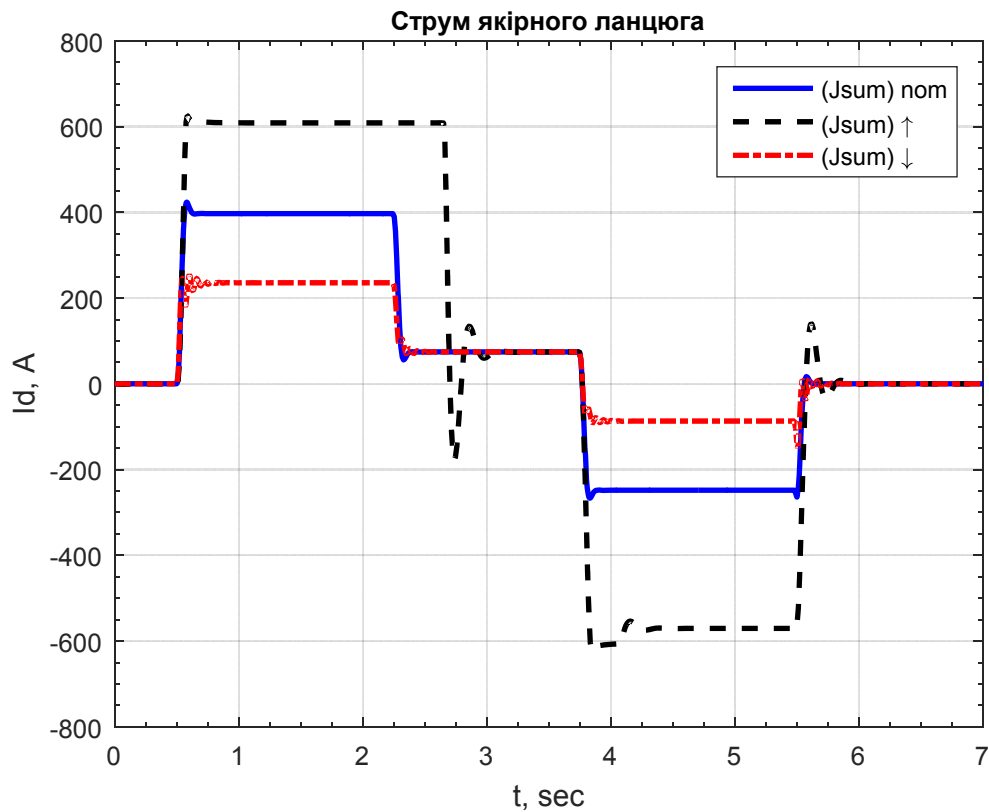


Рисунок 3.32 – Графіки перехідних процесів струму якоря при зміні  $J'_{\Sigma}$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в системі ЕП

## 4 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОСТОРІ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ

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

Найбільш перспективним для вирішення завдань синтезу систем оптимального управління є метод динамічного програмування Р. Белмана. Застосування цього методу з використанням в якості критерію оптимальності мінімуму інтегральної помилки дозволяє отримати алгоритм оптимального управління регулятора, не тільки оптимізуючи прийнятий функціонал якості, а й забезпечує стійкість руху фазових координат об'єкта управління.

Якщо силові частини об'єкта управління описуються лінійними диференціальними рівняннями і в якості критерію оптимальності приймається мінімум інтегральної квадратичної помилки, за допомогою зазначеної методики можна отримати алгоритми оптимальних управлінь в функції фазових координат. Це забезпечує легку реалізацію такої системи управління, так як всі зворотні зв'язки виявляються жорсткими. Однак статична помилка в такій системі, що виникає при наявності статичного моменту на валу, не дорівнює нулю і по своїй величині близька до помилки одноразово інтегрує лінійної системи. У зв'язку з цим актуальним є створення системи з гнучкою зворотним зв'язком по одній лише вихідній координаті. Статизм такої системи дорівнює нулю, що відповідає вимогам.

Застосування в якості регуляторів фазових координат релейних елементів, що працюють в ковзному режимі, дозволяє без втрат стійкості отримати дуже великі коефіцієнти підсилення. Тим самим забезпечується не тільки оптимізація управління, а інваріантність системи до параметричних збурень.

#### 4.1 Загальні положення синтезу системи методом аналітичного конструювання регуляторів

В основі метода аналітичного конструювання регуляторів (АКР) лежать інтегральні квадратичні критерії якості. Завдання АКР полягає в тому, що для об'єкта, рух якого описується системою лінійних диференціальних рівнянь.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.1)$$

де всі координати  $X_i$  і управління  $U$  задані у відносних одиницях, необхідно синтезувати алгоритм управління, який надає мінімум функціоналу якості

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l dt, \quad (3.2)$$

де  $\eta_i = X_i - X_i^*$   $X_i^*$

У векторній формі:

$$\dot{X} = AX + BU;$$

$$J(U) = \min \int_0^{\infty} \sum_{k,l=1}^n (\bar{\eta}, K \bar{\eta}) dt. \quad (3.3)$$

Перетворимо початкову систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\eta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, n; \quad (3.4)$$

$$\dot{\eta} = A\eta + BU.$$

Завдання вирішується методом динамічного програмування. Напишемо рівняння Беллмана:



$$\min_U \left[ \sum_{k,l=1}^n K_{kl} \eta_k \eta_l + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial \eta_i} \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j + b_i U \right) \right] = 0. \quad (3.5)$$

Оскільки не всі оптимальні керування можуть виявитися стійкими, використання функції Ляпунова  $V$  в якості опції Беллмана  $f$  одночасно забезпечить стійкість системи.

Функція Ляпунова для будь-яких лінійних систем:

$$V = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \eta_i \eta_j$$

у векторній формі:

$$\mathbf{V} = (\vec{\eta}, \mathbf{A}\vec{\eta}).$$

Тоді керування визначається за формулою:

$$U = -\text{sign} \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial V}{\partial \eta_i}. \quad (3.6)$$

Для синтезу алгоритму керування досить знайти потрібні коефіцієнти функції Ляпунова  $A_{ij}$  ( $A_{ij} = A_{ji}$ ). Визначити  $A_{ij}$  можна, вирішивши матричне рівняння Барбашина:

$$\mathbf{C}\mathbf{A}_V = -\mathbf{K},$$

$$\begin{bmatrix} C_{(11,11)} & C_{(12,11)} & \dots & C_{(ij,11)} & \dots & C_{(nn,11)} \\ C_{(11,12)} & C_{(12,12)} & \dots & C_{(ij,12)} & \dots & C_{(nn,12)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,kl)} & C_{(12,kl)} & \dots & C_{(ij,kl)} & \dots & C_{(nn,kl)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(11,nn)} & C_{(12,nn)} & \dots & C_{(ij,nn)} & \dots & C_{(nn,nn)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ \dots \\ \dots \\ A_{nn} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} \\ 2K_{12} \\ \dots \\ \dots \\ K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

де  $C$  - матриця Барбашина, елементи якої розраховуються по наступних правилах:

$$C_{(ij,kl)} = \begin{cases} 0 & , \text{если } i \neq k, j \neq l \\ a_{jl} & , \text{если } i = k, j \neq l \\ a_{ii} + a_{jj} & , \text{если } i = k, j = l, i \neq j \\ a_{ii} & , \text{если } i = k = j = l; \end{cases} \quad (3.8)$$

де  $A_V$  - вектор коефіцієнтів функції Ляпунова;

$K$  - вектор коефіцієнтів критерію якості.

## 4.2 Синтез релейного регулятора струму в просторі природних координат

Структурна схема об'єкта керування регулятора струму (РТ) приведена на рис.4.1.

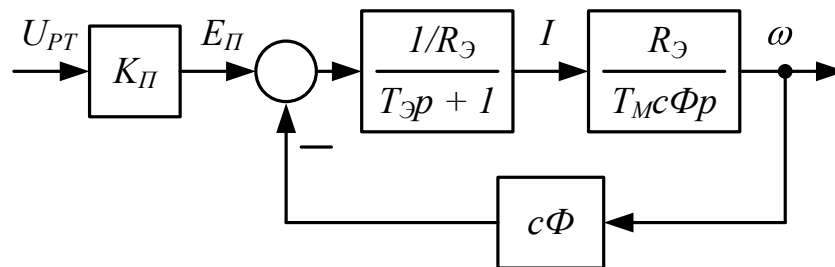


Рисунок 4.1 - Структурна схема об'єкта керування РТ

Математичний опис об'єкта керування РТ має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{I} = -\frac{1}{T_э} I - \frac{c\Phi}{R_э T_э} \omega + \frac{K_{\Pi}}{R_э T_э} U_{PT} \\ \dot{\omega} = \frac{R_э}{T_M c\Phi} I. \end{cases} \quad (3.9)$$

Наводимо керовані координати і напруга до відносним одиницям

$$X_1 = \frac{I}{I_M}; \quad X_2 = \frac{\omega}{\omega_M}; \quad U = \frac{U_{PT}}{U_M}, \quad (3.10)$$

де  $I_M, \omega_M, U_M$  – максимальні значення величин, які слід прийняти

$$I_M = 2,5 I_H; \quad \omega_M = \omega_H; \quad U_M = 10 B.$$

У відносних одиницях маємо:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -\frac{I}{T_{\mathcal{E}}} X_1 - \frac{c\Phi\omega_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} X_2 + \frac{K_{II}U_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M} U \\ \dot{X}_2 = \frac{R_{\mathcal{E}}I_M}{T_M c\Phi\omega_M} X_1. \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\eta_1 = X_1 - X_1^*; \quad \eta_2 = X_2 - X_2^*, \quad (3.12)$$

де  $X_1^*$ ,  $X_2^*$  - бажані траєкторії руху керованих координат.

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = a_{11}\eta_1 + a_{12}\eta_2 + b_1U \\ \dot{\eta}_2 = a_{21}\eta_1, \end{cases} \quad (3.13)$$

де

$$a_{11} = -\frac{1}{T_{\mathcal{E}}};$$

$$a_{12} = -\frac{c\Phi\omega_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M};$$

$$b_1 = \frac{K_{II}U_M}{R_{\mathcal{E}}T_{\mathcal{E}}I_M};$$

$$a_{21} = \frac{R_{\mathcal{E}}I_M}{T_M c\Phi\omega_M}.$$

Для зменшення трудомісткості виконання розрахунку коефіцієнтів системи (3.13) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою системи Matlab, у якій було розроблені програмні коди (m-файли).

Функція Ляпунова для системи другого порядку

$$V = A_{11}\eta_1^2 + 2A_{12}\eta_1\eta_2 + A_{22}\eta_2^2. \quad (3.14)$$

Критерій якості

$$J(U) = \int_0^{\infty} (k_{11}\eta_1^2 + 2k_{12}\eta_1\eta_2 + k_{22}\eta_2^2) dt. \quad (3.15)$$

Алгоритм управління РТ має вигляд:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[ b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \text{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (3.16)$$

Коефіцієнти функції Ляпунова  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  знаходимо з рівняння Барбашина:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} \\ 2k_{12} \\ k_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

При синтезі РТ вважаємо, що  $k_{11} = 1$ ,  $k_{12} = k_{22} = 0$ .

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Звідси знаходимо потрібні коефіцієнти:

$$A_{11} = \frac{\begin{vmatrix} -1 & a_{21} & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{-(-a_{12}a_{21})}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = -\frac{1}{a_{11}};$$

$$A_{12} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & -1 & 0 \\ a_{12} & 0 & a_{21} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{0}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = 0.$$

Отримуємо алгоритм керування РТ:

$$U_{PT} = -U_M \text{sign} \left[ -\frac{1}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) \right] = U_M \text{sign} [X_1^* - X_1] \quad (3.19)$$

### 4.3 Синтез релейного регулятора швидкості в просторі природних координат

Об'єкт керування регулятора швидкості (РС) також як і при синтезі РТ описується системою рівнянь виду (3.1) за винятком того, що функцією, яка керує, є напруга РС  $U_{PC}$ .

Алгоритм управління РС

$$U_{PC} = -U_M \operatorname{sign} \left[ b_1 \frac{\partial V}{\partial \eta_1} \right] = -U_M \operatorname{sign} [A_{11}\eta_1 + A_{12}\eta_2], \quad (3.20)$$

коефіцієнти  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  знаходимо, вирішуючи рівняння виду (3.2), в якому підставимо наступні значення коефіцієнтів критерію якості:

$$k_{11} = k_{12} = 0, \quad k_{22} = 1.$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

звідки знаходимо

$$A_{11} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{21} \\ -1 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{-a_{21}^2}{a_{11}(-a_{12}a_{21})} = \frac{a_{21}}{a_{11}a_{12}} ; ;$$

$$A_{12} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{12} & 0 & a_{21} \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{12} & a_{11} & a_{21} \\ 0 & a_{12} & 0 \end{vmatrix}} = \frac{a_{11}a_{21}}{a_{11}(-a_{12}a_{21})}.$$

$$\begin{aligned}
 U_{PC} &= -U_M \operatorname{sign} \left[ \frac{a_{21}}{a_{11}a_{12}} (X_1 - X_1^*) - \frac{1}{a_{12}} (X_2 - X_2^*) \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ \frac{a_{21}}{a_{11}} (X_1 - X_1^*) - X_2 + X_2^* \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ X_2^* - X_2 - \frac{R_\vartheta I_M T_\vartheta}{T_M c \Phi \omega_M} (X_1 - X_1^*) \right] = \\
 &= U_M \operatorname{sign} \left[ X_2^* - X_2 - k_{\omega i} (X_1 - X_1^*) \right],
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

де  $U_M = 10B$ ,  $k_{\omega i} = \frac{R_\vartheta I_M T_\vartheta}{T_M c \Phi \omega_M}$ .

Структурні схеми релейної системи з контролем природних фазових координат приведена на рисунку 4.2.

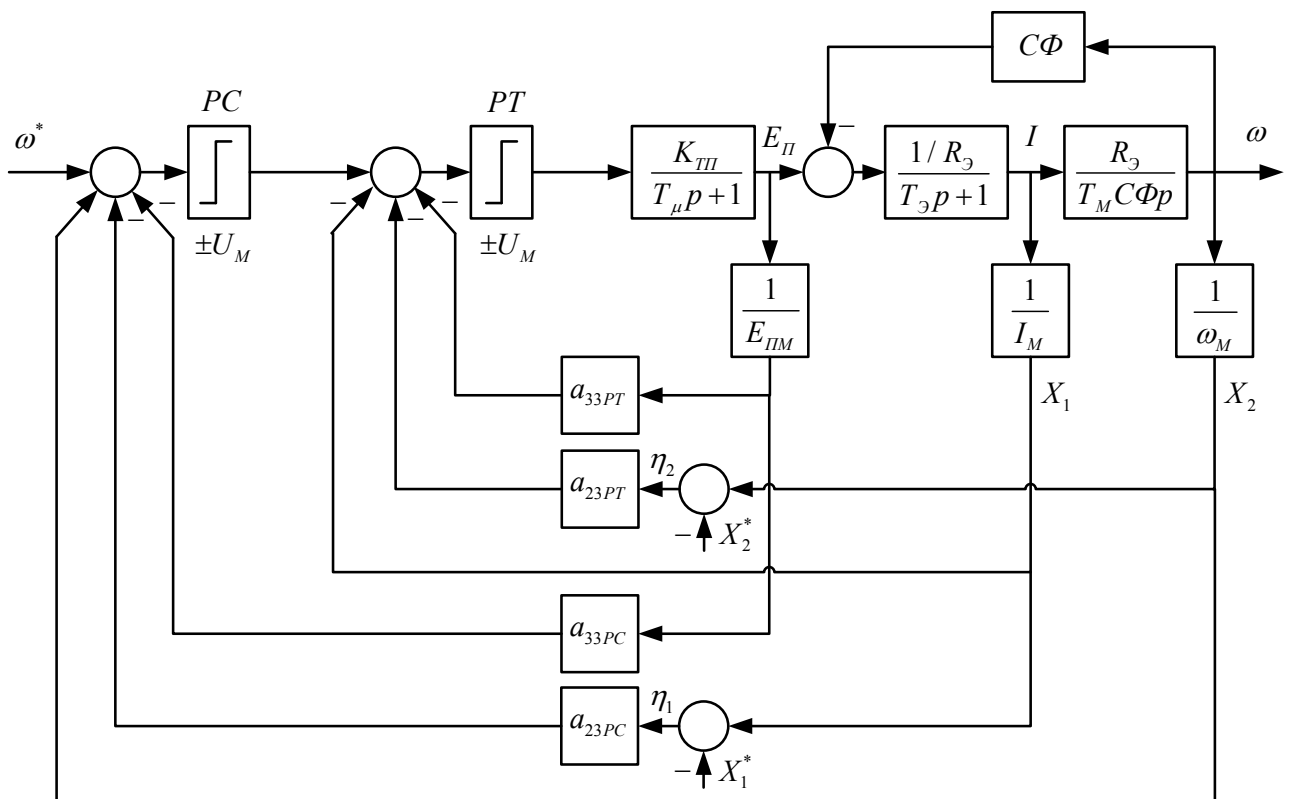


Рисунок 4.2 – Структурна схема релейної системи з контролем природних фазових координат

#### 4.4 Математичне моделювання електроприводу станинних роликів з релейною системою керування в середовищі Matlab/Simulink

Дослідження перехідних процесів в релейній системі керування електроприводом, синтезованої в просторі похідних, проводиться за допомогою пакета прикладних програм Matlab/Simulink. Математична модель системи приведена на рисунках 3.3 - 3.5. Робота релейної системи досліджувалася за такою самою програмою як і класична система підпорядкованого регулювання. З графіків перехідних процесів (рис. 3.6 – 3.15) видно, що в релейній системі процеси мають кращу якість, а система має більшу точність. Крім того, в релейній системі при зміні сталих часу практично не змінюється якість перехідних процесів.

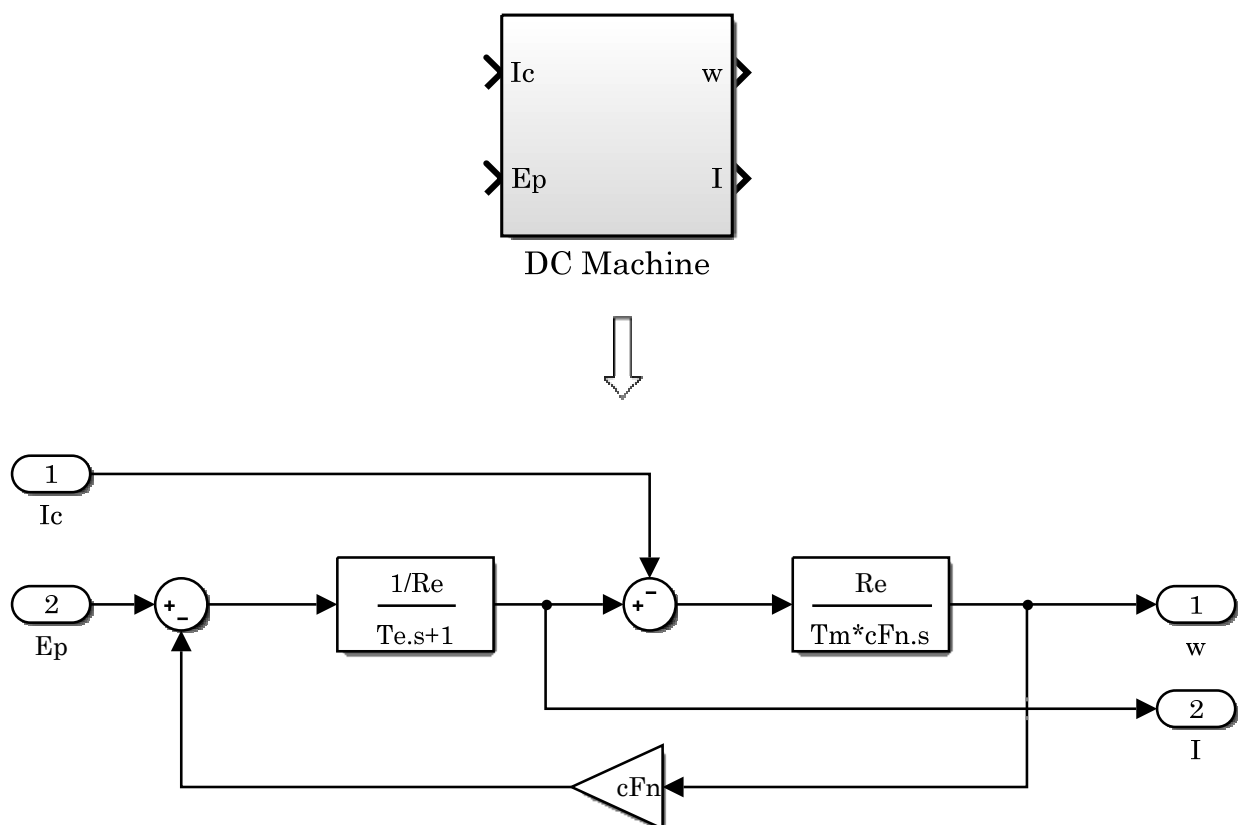


Рисунок 4.3 – Внутрішня структура підсистеми двигуна постійного струму (DC Machine)

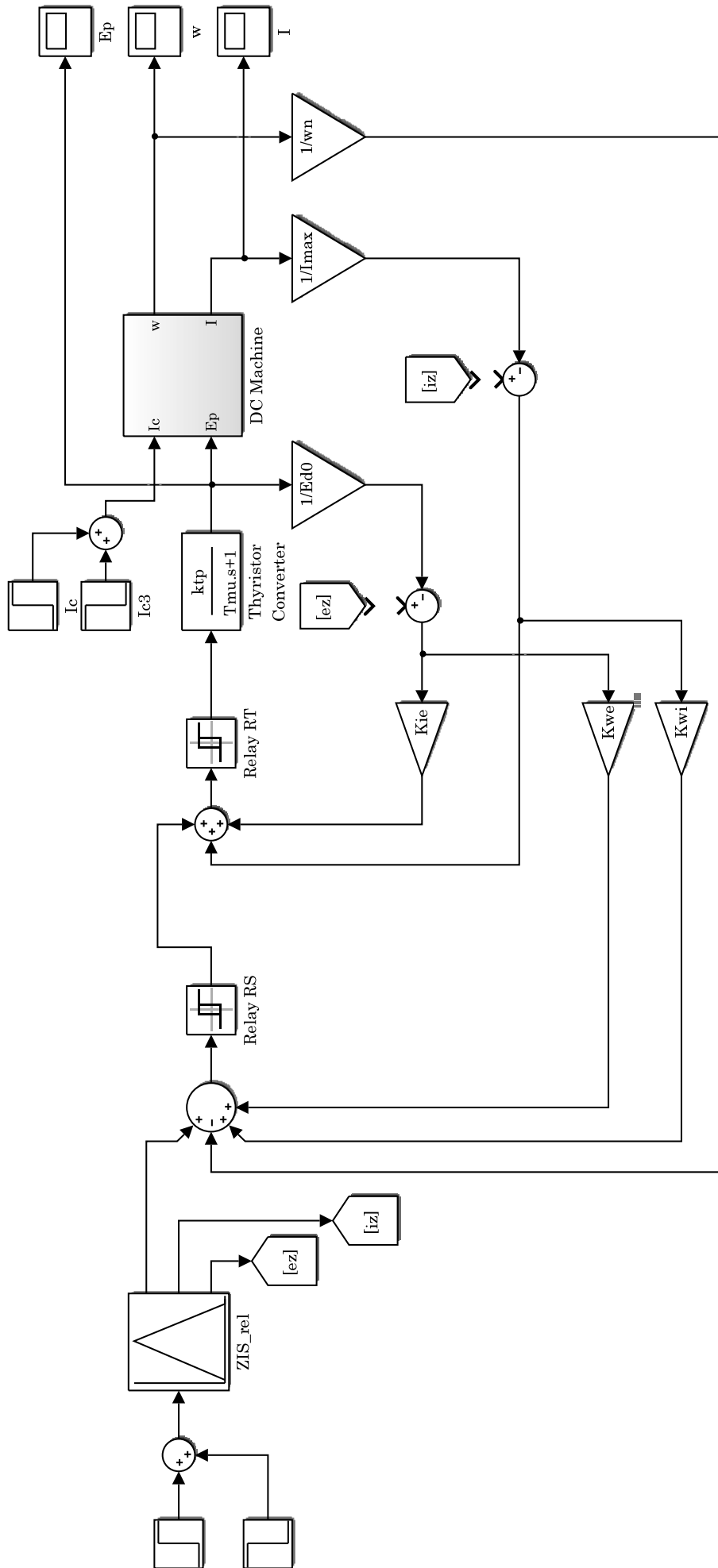


Рисунок 4.4 – Simulink-модель релейной системы керування електроприводом



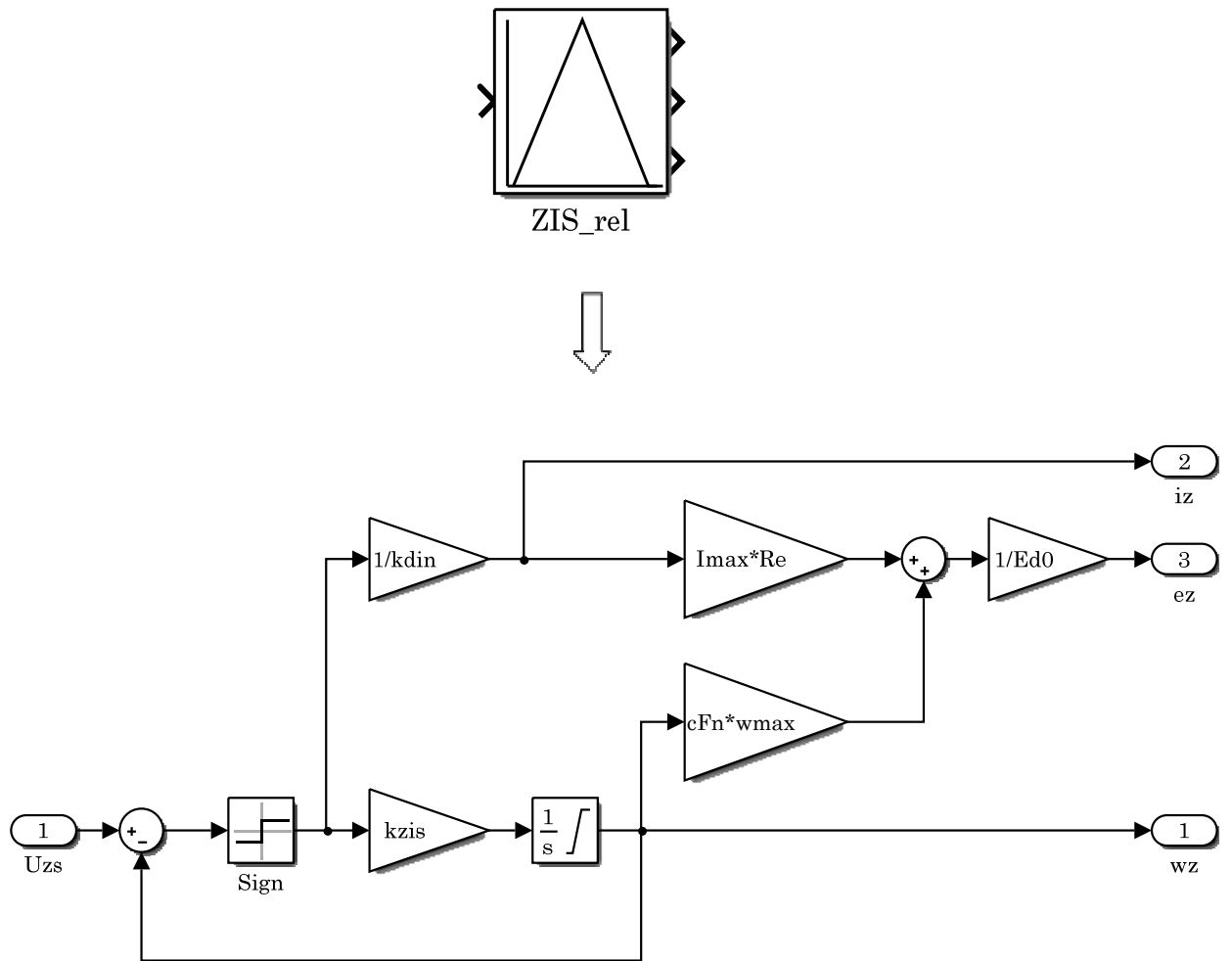


Рисунок 4.5 – Підсистема «Задатчик інтенсивності швидкості» (ZIS\_rel), що реалізує раціональну динаміку

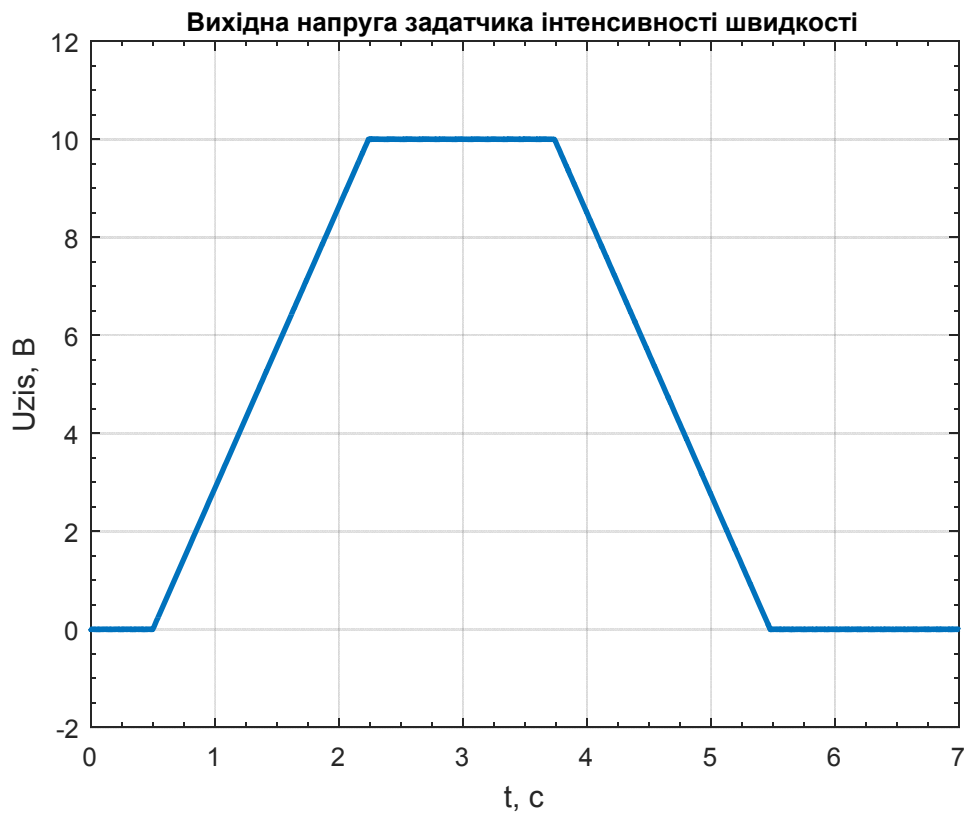


Рисунок 4.6 – Графік перехідного процесу напруги задатчика інтенсивності швидкості в релейній системі

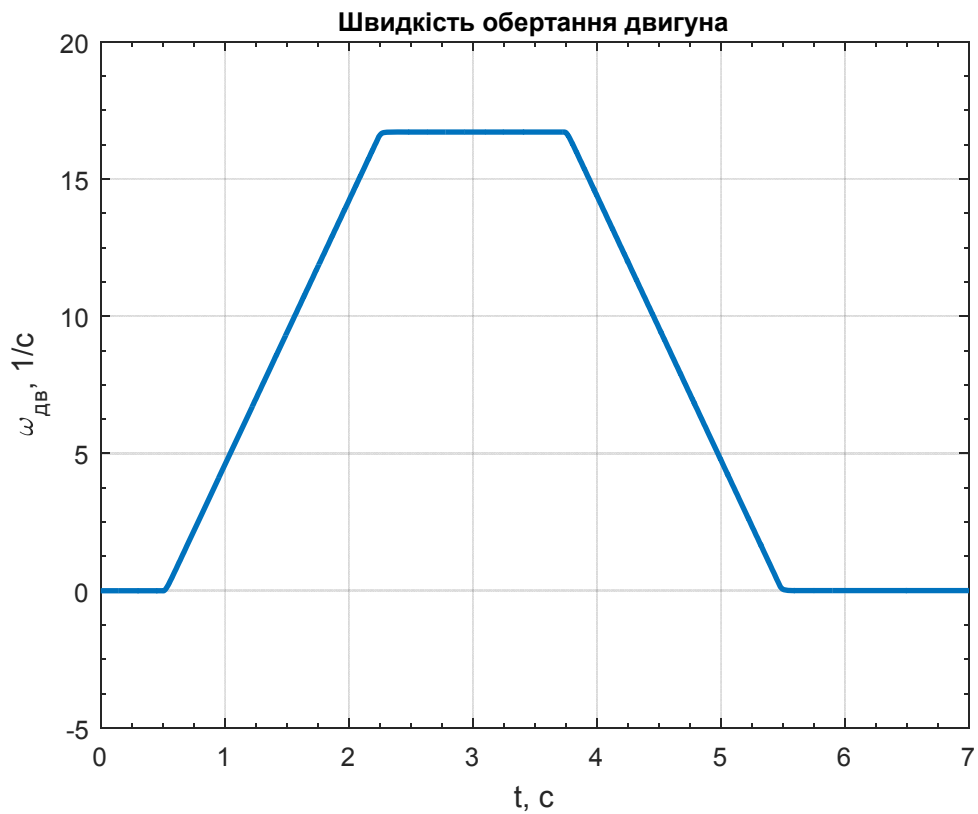


Рисунок 4.7 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

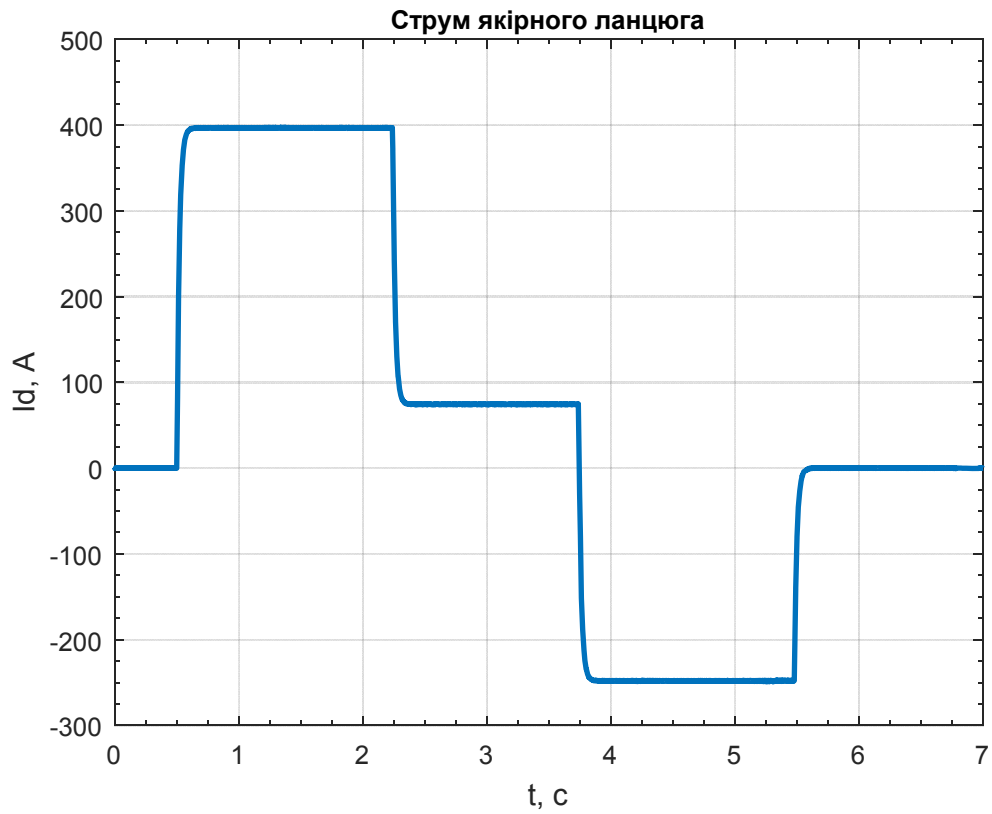


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу струму якоря ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

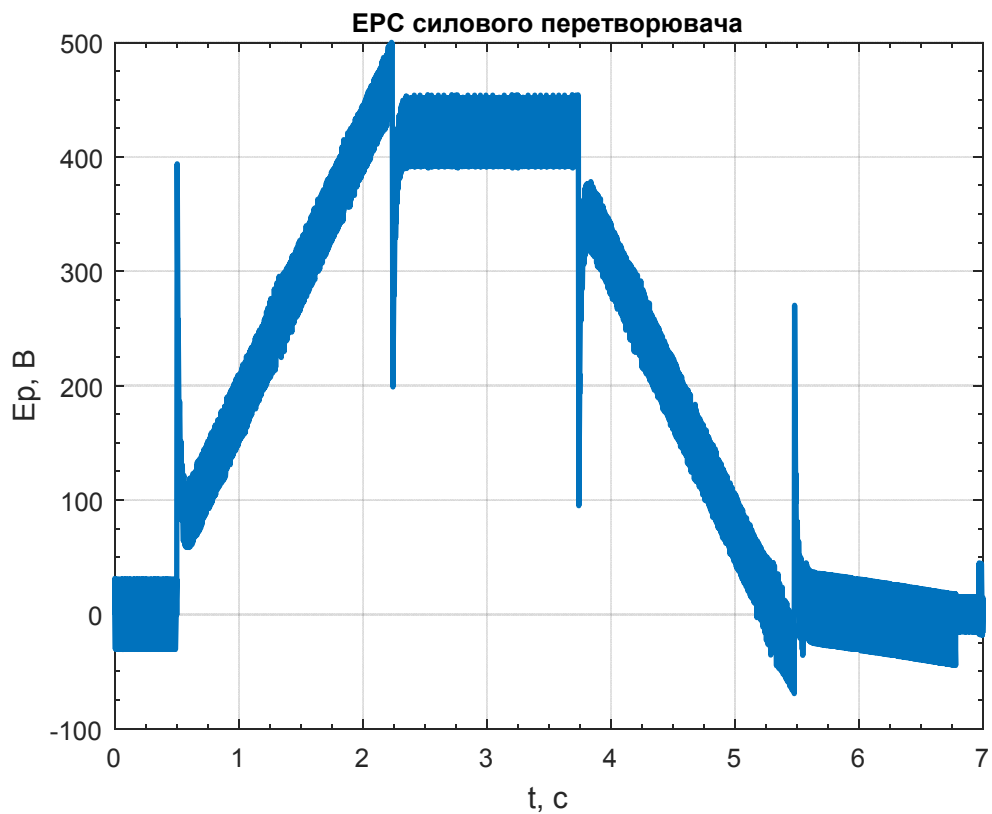


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу ЕРС тиристорного перетворювача ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

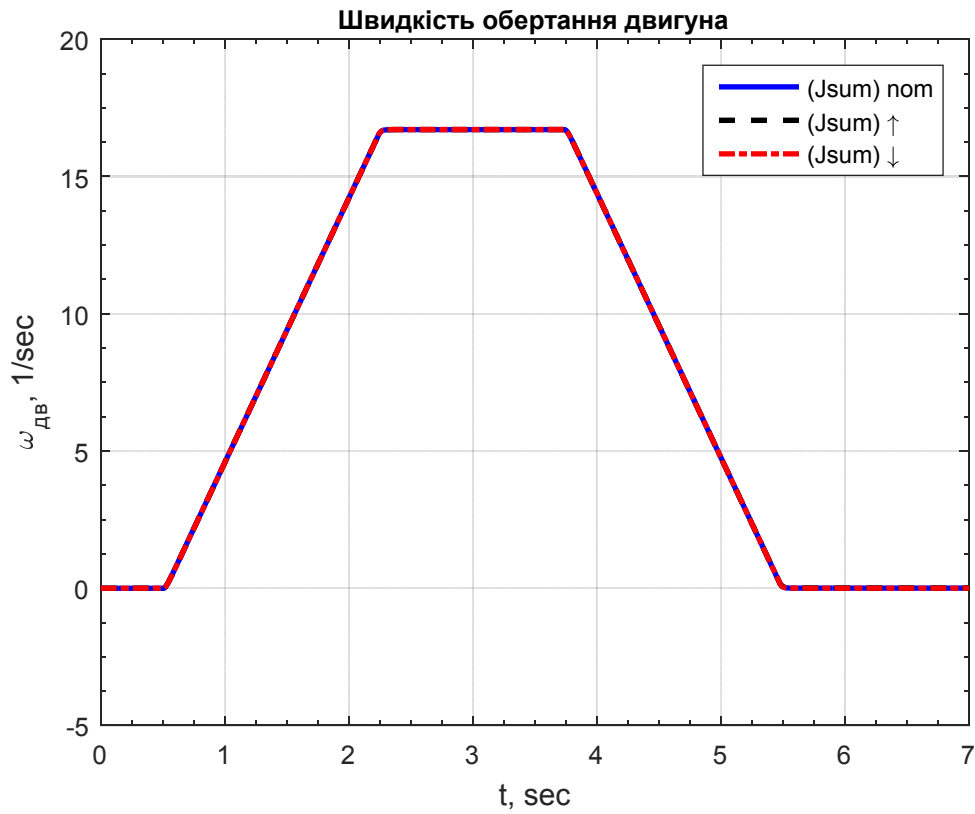


Рисунок 4.10 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

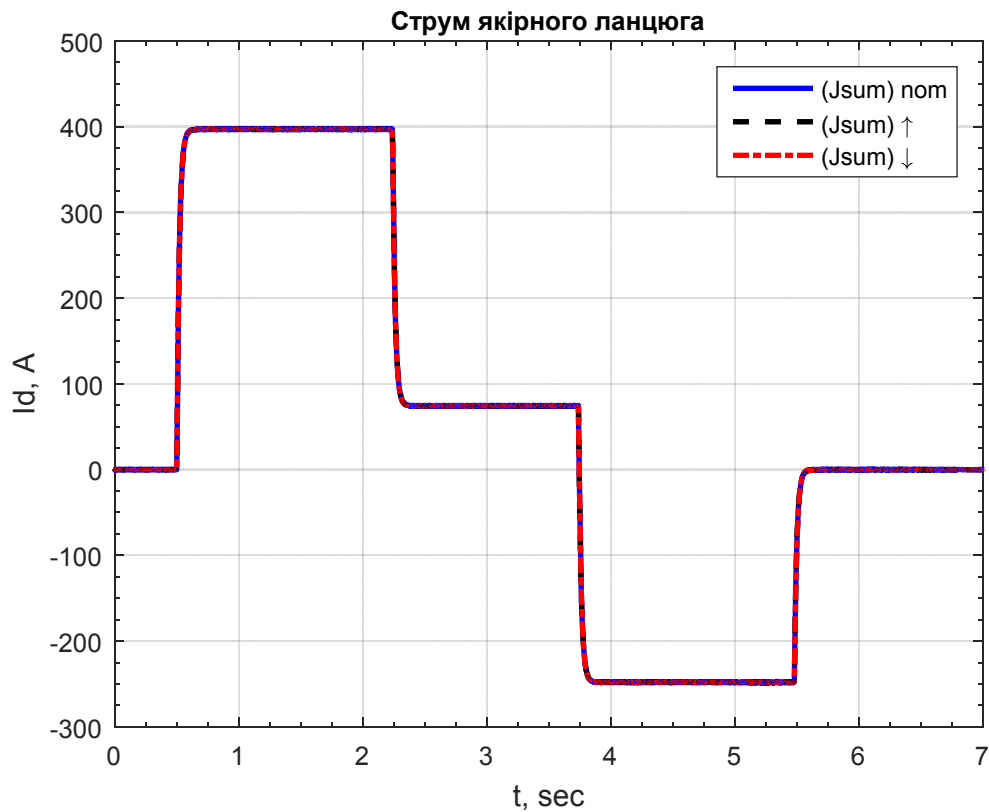


Рисунок 4.11 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $R_s$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

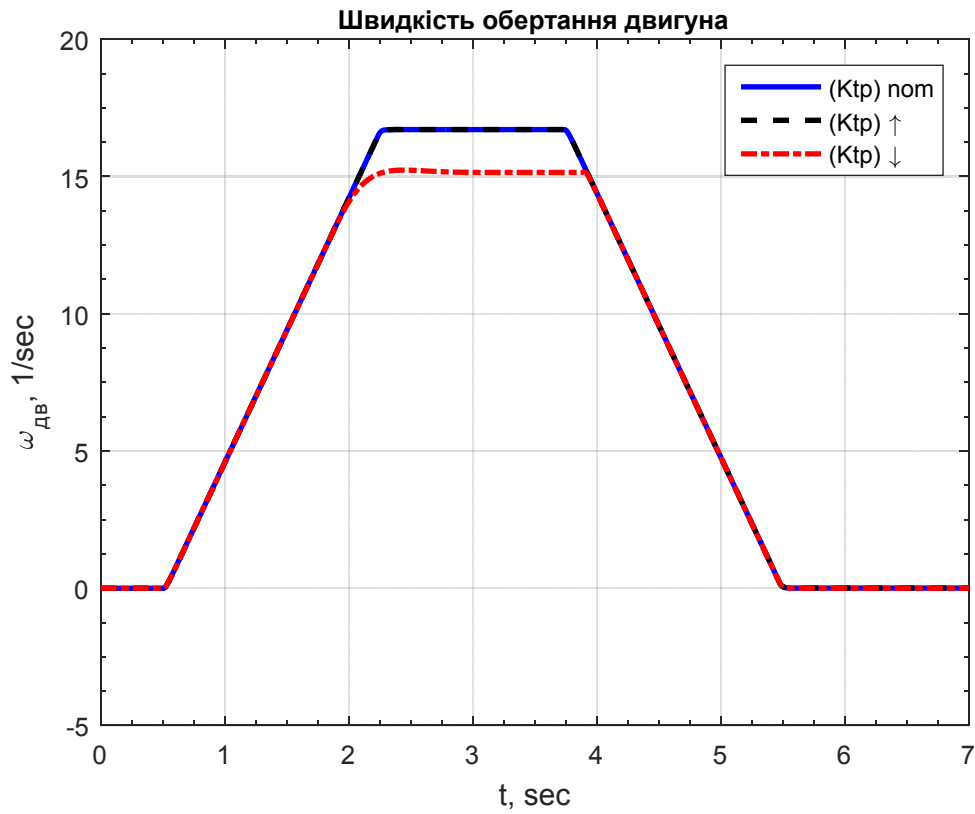


Рисунок 4.12 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $k_{\text{п}}$  в 2 рази ( $I_{\text{c}} = 0,3I_{\text{н}}$ ) в релейній системі

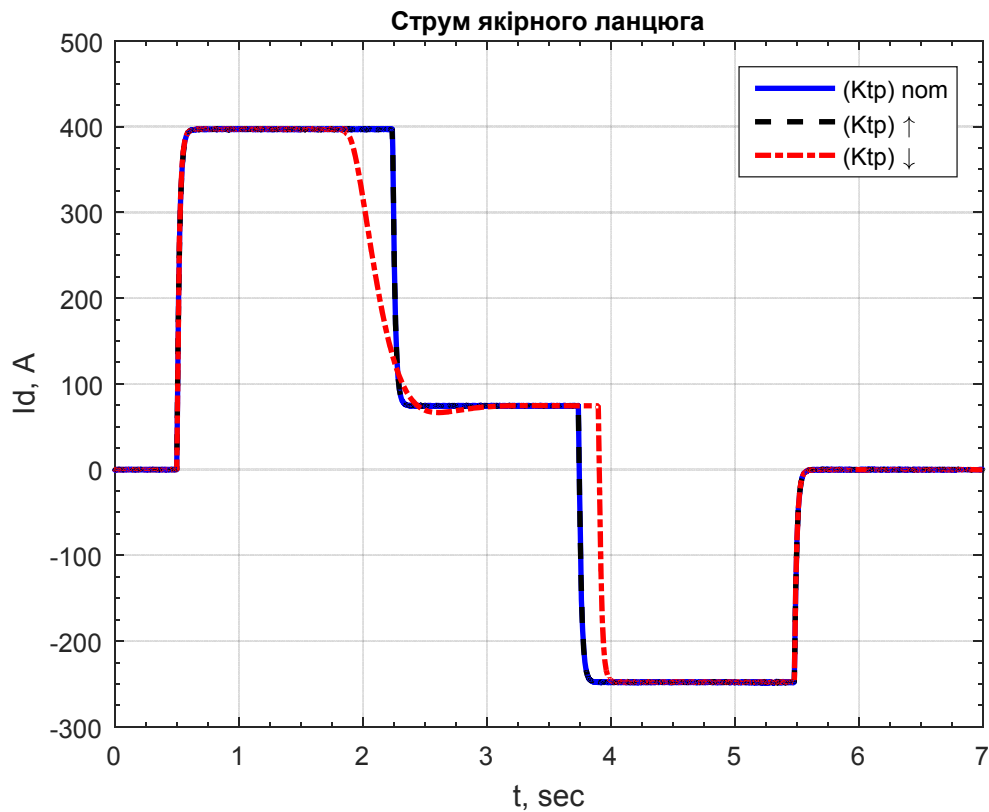


Рисунок 4.13 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $k_{\text{п}}$  в 2 рази ( $I_{\text{c}} = 0,3I_{\text{н}}$ ) в релейній системі

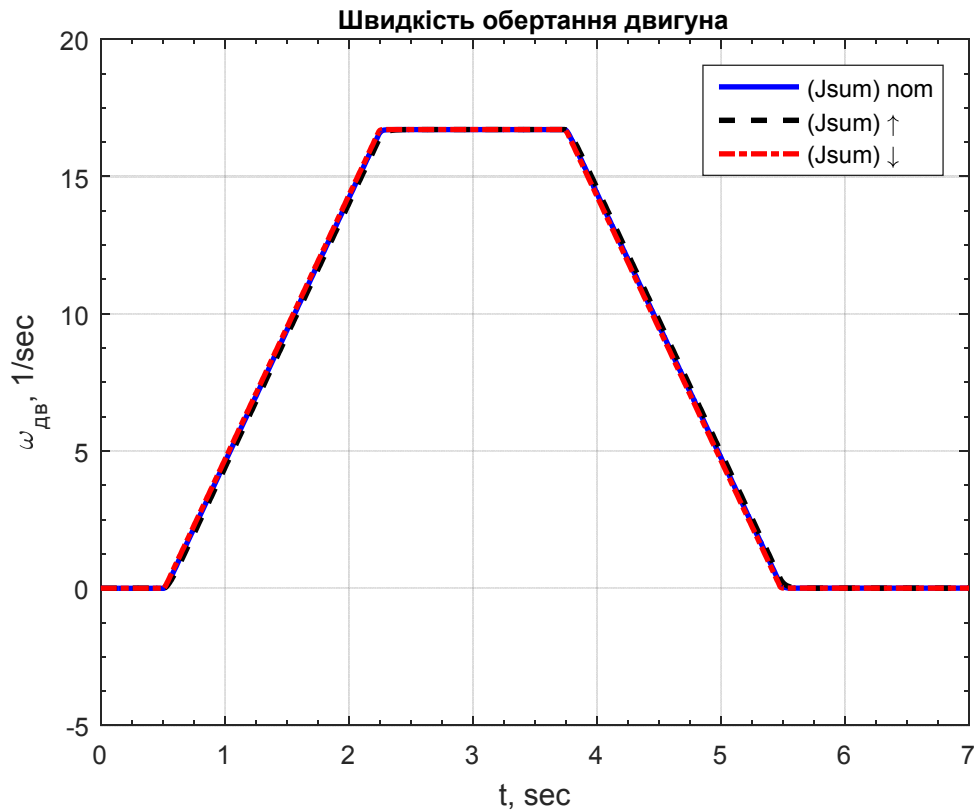


Рисунок 4.14 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $J'_\Sigma$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

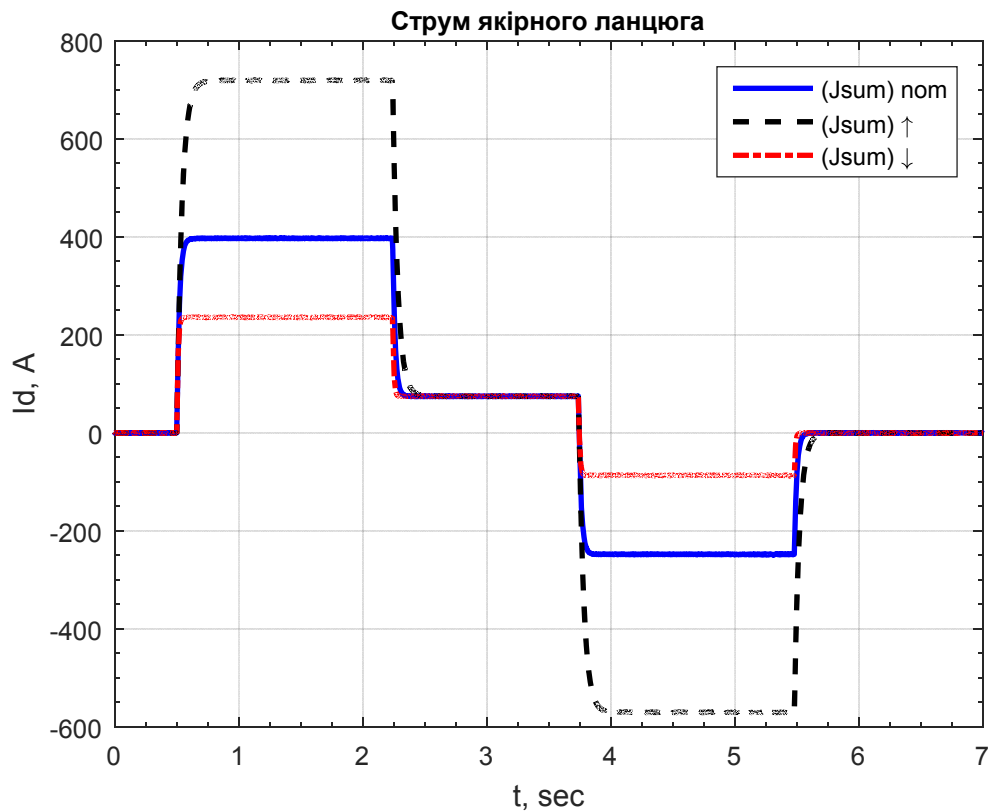


Рисунок 4.15 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $J'_\Sigma$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

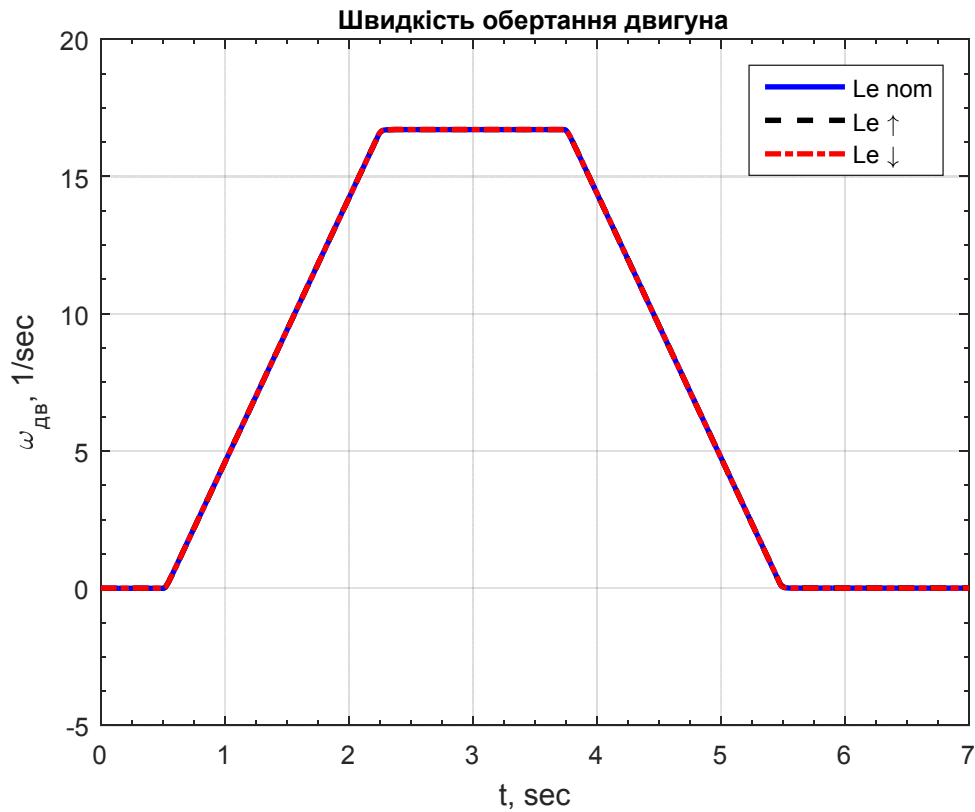


Рисунок 4.16 – Графіки перехідного процесу швидкості обертання двигуна при зміні  $L_e$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

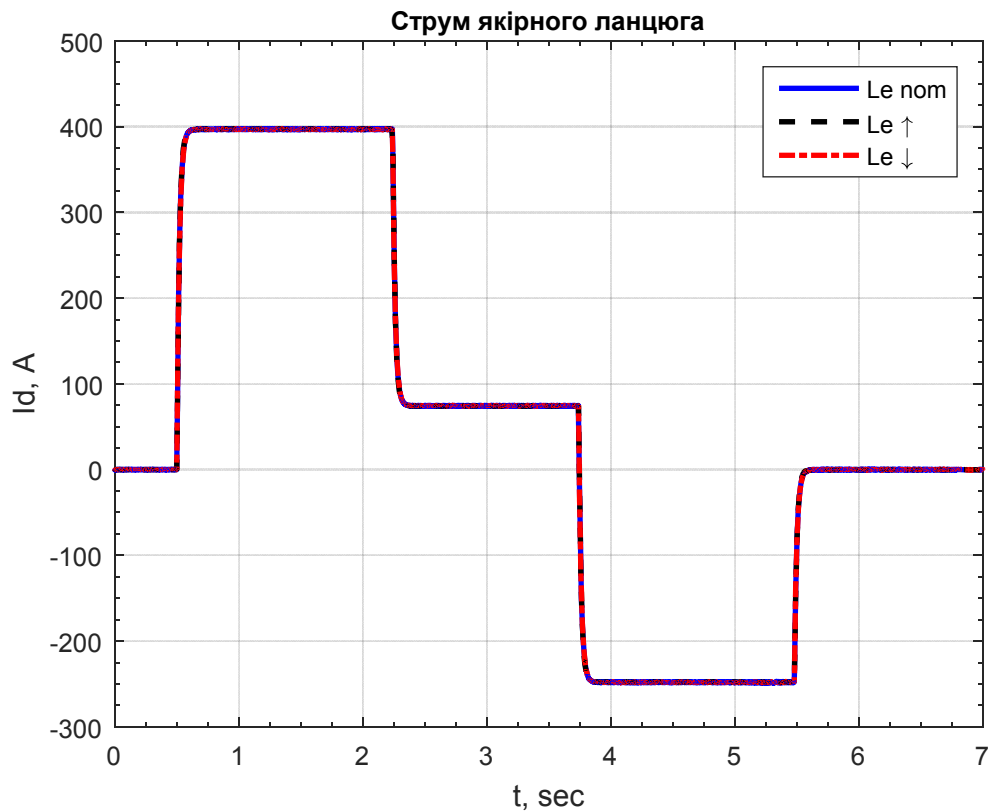


Рисунок 4.17 – Графік перехідного процесу струму якоря при зміні  $L_e$  в 2 рази ( $I_c = 0,3I_H$ ) в релейній системі

#### **4.5 Стратегія ефективного управління підприємствами на основі обліку енергоспоживання**

Основні стратегії ефективного управління підприємствами, спрямовані на оптимізацію енергоспоживання, визначаються принципами обліку та раціонального використання енергетичних ресурсів. Висвітлюється прозорість та систематизація процесів обліку енергопотреб, які становлять основу для прийняття стратегічних управлінських рішень.

Одним із ключових аспектів є впровадження систем енергетичного обліку, що дозволяє комплексно аналізувати та моніторити рівень споживаної енергії на підприємстві. Ці системи дозволяють виявляти області із зайвим витратами енергії та впроваджувати стратегії зменшення витрат.

Ще одним принципом є визначення енергоефективних практик та їхнє впровадження. Підприємства повинні активно розвивати та впроваджувати інноваційні технології, спрямовані на оптимізацію використання енергії та зменшення викидів.

Управління підприємствами на основі обліку енергоспоживання також передбачає залучення персоналу до процесу енергозбереження. Ініціювання програм навчання та свідомості з питань раціонального використання енергії допомагає створювати команду, спрямовану на досягнення спільних цілей енергоефективності.

Усі ці принципи управління обліком енергоспоживання лягають в основу стійкої енергетичної стратегії підприємства, сприяючи його конкурентоспроможності та відповідальному використанню енергетичних ресурсів.

Проблема енергетичної безпеки України ставить перед підприємствами значні завдання у сфері комплексного обліку енергоносіїв при управлінні технологічними процесами. У сучасних умовах більшість підприємств, в кращому випадку, мають різноманітні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) та системи комерційного обліку енергоносіїв. При розробці АСУТП головним пріоритетом було і залишається



забезпечення не лише випуску необхідної кількості продукції, а й врахування аспектів енергоефективності та оптимізації використання енергетичних ресурсів.

Сучасні автоматизовані системи управління підприємствами (АСУП) конструюються за ієрархічним принципом та включають кілька рівнів. Це визначається складністю промислових об'єктів, які потребують високого рівня автоматизації устаткування та координації управління різними функціональними та розподіленими системами. Зазначено, що сучасні підприємства мають підвищені вимоги до якості управління, тому системи управління повинні враховувати цю потребу.

Основними критеріями сучасних АСУП є:

- Використання "дисплейного" методу контролю та управління.
- Застосування колективних екранів для спільного використання інформації.
- Високий рівень автоматизації управлінських процесів.
- Впровадження цифрових систем безпеки.
- Використання мікропроцесорних засобів на нижньому рівні управління.
- Розвинена система діагностики для обладнання та АСУТП.

Ці вимоги визначають основні принципи, які керують сучасними системами управління підприємствами, зокрема, їхню спроможність ефективно вирішувати завдання з енергозбереження та оптимізації споживання енергії.

Управління підприємством автоматизується через створення інтегрованої, ієрархічної та децентралізованої системи. Інтеграція визначається необхідністю спільного розв'язання різноманітних завдань управління технологічними та організаційними процесами, які можуть варіюватися за призначенням, методами реалізації та функціональним призначенням як на рівні окремих агрегатів, так і на рівні всього підприємства. Ієрархія визначається рівнем функцій, що вирішуються відповідними частинами керуючої системи, включаючи рівні підприємства, переділу, цеху та окремих технологічних установок. Децентралізація означає спрямованість елементів керуючих систем

на автоматизацію локальних підсистем та потребу у розподілі функцій контролю та управління на різних рівнях, спрямовану на підвищення надійності та забезпечення безпеки експлуатації.

Встановлення взаємозв'язків у системах автоматизованого управління підприємствами визначається метою оптимізації енергоспоживання та раціонального використання електричної енергії на підприємствах. Існуючі системи управління характеризуються різними рівнями ієрархії та можуть бути класифіковані як системи низького, середнього і високого рівня в залежності від їхнього функціонального обсягу і складності.

Системи управління енергоспоживанням на низькому рівні можуть виконувати різноманітні функції, спрямовані на оптимізацію та ефективне використання ресурсів. Перелічимо основні завдання, які вони можуть виконувати:

- Комерційний облік енергоносіїв: Забезпечення точного та систематичного обліку витрат енергії, що є важливим аспектом для підприємств, що мають значний обсяг споживаної енергії.

- Технічний облік: Здійснення обліку енергетичних показників, розглядаючи їх до агрегатного рівня, що надає можливість вивчення та аналізу витрат на різних етапах виробничого процесу.

- Моніторинг якості енергоносіїв: Визначення та контроль параметрів якості енергії для забезпечення стабільності роботи обладнання та виключення можливих витрат через неефективність.

- Телемеханіка та диспетчерське управління: Використання технологій дистанційного контролю для ефективного управління енергосистемою та вживання заходів у випадку виникнення непередбачених ситуацій.

- Моніторинг та управління енергоспоживанням: Здійснення стеження за енергетичними показниками та можливість регулювання витрат для досягнення оптимальної ефективності.

- Управління технологічним обладнанням: Забезпечення контролю за роботою технологічного устаткування для оптимізації його функціонування та зменшення енерговитрат.

Відповідно до вимог "Правил користування електричною енергією", об'єкти з високою потужністю повинні обов'язково мати систему комерційного обліку, що також стосується інших видів енергоносіїв. Це надає підприємствам можливість здійснювати точний облік та контроль за ефективністю їхнього енергоспоживання.

Зазвичай підприємствам пропонується комплекс можливостей, якими має володіти система комерційного обліку енергоносіїв, яка забезпечує точний та систематизований облік споживаної енергії. Серед цих можливостей можна визначити наступні аспекти:

- Відображення Поточних Показників: Система повинна надавати актуальні дані про витрати енергії, фіксуючи та реєструючи їх значення впродовж конкретних проміжків часу.

- Розрахунок та Відображення Споживаної Потужності: Можливість визначення та відображення витрат енергії в зазначені інтервали часу, розподілення за каналами та групами обліку, а також підрахунок загальної споживаної енергії.

- Визначення Пікових Значень Потужності: Аналіз максимальних значень потужності в пікові години ранку та вечора, щоб ефективно управляти енергетичним попитом.

- Розрахунок за Тарифними Інтервалами: Система повинна визначати кількість спожитої енергії в кожен тарифний інтервал доби, що включає в себе підрахунок та облік витрат за різними періодами.

- Зберігання та Відображення Даних: Забезпечення зберігання вищезазначених показників та їх відображення на моніторі за викликом користувача.

- Розрахунок Загальних Витрат: Можливість визначення та відображення добових, місячних, кварталних та річних витрат енергоносіїв за певними групами обліку, а також сумарно по всьому підприємству.

- Видача Звітної Документації: Генерація необхідних форм звітів для внутрішнього користування та використання у фінансових розрахунках з постачальниками та споживачами енергії.

Такий комплекс функцій дозволяє ефективно керувати та контролювати енергоспоживанням підприємства, сприяючи оптимізації витрат та підвищенню його енергетичної ефективності.

Система комерційного обліку, у свою чергу, виконує переважно статистичні функції. Зі збільшенням дискретності використання її даних затримує процес прийняття рішень. На додаток, інші підсистеми рідко взаємодіють і не передають інформацію між собою, що призводить до затримок у вирішенні завдань персоналу та підсилює його вплив на виробничі показники.

Розглянемо конкретний приклад, коли пристрої та обладнання телемеханіки викликають перемикання в системі електропостачання підприємства для живлення агрегату через обвідний вимикач. У випадку, якщо система обліку не отримує дані про ці перемикання, можливе помилкове зафіксування генерації активної потужності на окремих приєднаннях. Це призводить до того, що персонал витрачає додатковий час на виявлення невідповідностей, що не відбулось би при своєчасному отриманні даних про перемикання розрахункової схеми.

Аналогічно, при наявності даних в системі контролю режимів роботи електроустаткування можна планувати графіки обслуговування та ремонту, а також контролювати роботу обладнання системи технічного обліку. Також можливий сценарій, коли кілька споживачів електроенергії, які живляться від одного приєднання, обладнані локальними системами управління, одна з яких може компенсувати реактивну потужність. Якщо система технічного обліку або моніторингу якості електроенергії реєструє споживання реактивної потужності на загальному приєднанні, система аналізу енергетичної ефективності підприємства може вважати, що цей режим призведе до додаткових втрат в мережах підприємства. Вона перевірить завантаження споживача, який може компенсувати реактивну потужність, і в разі його недозавантаження видасть завдання на генерацію реактивної потужності. Це дозволить оптимізувати циркуляцію реактивної потужності в межах одного приєднання і знизити втрати в мережах підприємства.

Запропоновано інтегрувати системи низького рівня управління енергоспоживанням, які працюють в режимі "реального" часу, в єдину інформаційну мережу для взаємного обміну даними та отримання сигналів від підсистем автоматизованої системи управління виробництвом (АСУП). Ці підсистеми виконують такі функції:

- Оперативне планування і диспетчеризація процесів.
- Фінансовий аналіз витрат на виконання процесів.
- Оперативне перепланування з урахуванням реального поточного стану виробництва.
- Перевірка достовірності інформації.
- Забезпечення інформації про поточний стан агрегатів.
- Реєстрація режимів роботи обладнання та формування ремонтних заходів.
- Прогнозування обсягів споживання енергоносіїв.
- Визначення оптимальних режимів роботи обладнання.

Включення зв'язків у систему АСУП, що забезпечать отримання інформації про стан та енергоспоживання виробничих об'єктів, дозволить:

- Підвищити енергетичну ефективність виробництва.
- Забезпечити персонал із достовірною оперативною інформацією про стан об'єктів.
- Здійснювати функції централізованого диспетчерського телеуправління агрегатами.
- Автоматично виявляти аварійні ситуації та гарантовано сповіщати про них.
- Уникнути помилкових дій персоналу при дистанційному управлінні агрегатами за рахунок програмної обробки правильності формування команд дистанційного керування, помехозахисту передачі їх до об'єктів і автоматичного контролю змін стану відповідних керованих агрегатів.
- Отримати інформаційну підтримку при розслідуванні нештатних ситуацій, виконати аналіз загальних тенденцій та експлуатаційних характеристик об'єктів на тривалих тимчасових інтервалах.

- Значно удосконалити технології прийняття рішень фахівцями-технологами на основі оперативного дистанційного доступу до достовірних поточних даних та електронних архівів.

- Створити інформаційну основу і програмно-технічну платформу для подальшої розробки підсистем активного управління і стабілізації найбільш значущих параметрів агрегатів, підсистем запобігання аварійних ситуацій та експертних систем-порадників диспетчера.

## ВИСНОВОК

На підставі результатів теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Стосовно до об'єкта керування – електропривод станинних роликів чорнової кліті товстолистого стану на базі електродвигуна постійного струму показана можливість використання релейних САР для відпрацювання заданої швидкості з високими показниками якості.

2. Методами оптимального (релейного) керування синтезовані регулятори струму та швидкості, що забезпечує низьку чутливість системи до параметричних збурень.

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

4. Результати математичного моделювання з використанням середовища моделювання динамічних систем Matlab/Simulink підтверджують основні теоретичні положення, сформульовані в науковій праці. Створені цифрові математичні моделі електропривода постійного струму з оптимальними регуляторами.

5. Зроблено порівняльний аналіз показників якості роботи системи підпорядкованого керування та релейної системи.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

- 1(42). Емельянов С.В. Пути развития типов обратных связей и их применение при построении замкнутых динамических систем / Емельянов С.В., Коровин С.К. - Проблемы управления и теории информации, т. 10 № 3, 1984.1. - С. 161 - 174.
- 2(44). Емельянов С.В. Новые типы обратной связи / Емельянов С.В., Коровин С.К. – М.: Наука. Физматлит, 1997. - 352 с.
- 3(68). Петров Б.Л. Исследования по теории много связных систем / Сб. под ред. Петрова Б.Л.-М.: Наука, 1982. - 152 с.
- 4(72). Колмановский В.Б. Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последействием / Колмановский В.Б., Носов В. Р. - М: Наука, 1984.1. - 448 с.
- 5(80). Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / Куржанский А.Б. - М.: Наука, 1977. -392 с.
- 6(104). Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Поляк Б.Т., Щербаков П.С. - М.: Наука, 2002. - 303с.
- 7(43). Емельянов С.В. Применение координатно-параметрической обратной связи при синтезе систем автоматического управления / Емельянов С.В., Коровин С.К., Сизиков В.И. - Проблемы управления и теория информации, т. 10 № 4, 1984.1.- С. 237 - 254.1.
- 8(65). Ильинский Н.Ф. Основы электропривода / Ильинский Н.Ф. – М.: Издательство МЭИ, 2004. - 221 с.
- 9(66). Ильинский Н.Ф. Общий курс электропривода / Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 544 с.
- 10(83). Леонхард В. Регулируемые электроприводы переменного тока / Леонхард В. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 196 - 239.
- 11(154). Цыпкин Я.4. Информационная теория идентификации / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1995. - 336 с.



- 12(157). Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов / Щипанов Г.В. - Автоматика и телемеханика, № 1, 1939.- С. 49 - 66.
- 13(9). Баховцев И.А. О синтезе алгоритмов управления для АИН с ШИМ / Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. - В кн.: Тиристорные преобразователи, Новосибирск: НЭТИ, 1985. - С. 23 - 34.
- 14(45). Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю.С. – М.: Энас, 2005. - 280 с.
- 15(46). Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Забродин Ю.С. - М.: Высшая школа, 1982. - 496 с.
- 16(48). Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники / Зиновьев Г.С. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос, тех ун-та, 2005. - 664 с.
- 17(60). Изосимов Д.Б. Улучшение качества энергопотребления полупроводниковыми преобразователями с ШИМ / Изосимов Д.Б., Рывкин С.Е. - Электричество, №4, 1996. - С. 48 - 55.
- 18(205). Holtz J. Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion / Holtz J. - Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, 1994. - pp. 1194-1214.
- 19(15). Борцов Ю.А. Автоматические системы с разрывным управлением / Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. - Л.: Онсргоиздат, 1986. - 168 с.
- 20(88). Макмарри У. Топология схем энергетической электроники / Макмарри У. - Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, т.76, №4, 1988. - С. 137-150.
- 21(149). Филиппов А.Ф. Система дифференциальных уравнений с несколькими разрывными функциями / Филиппов А.Ф. - Математические заметки, т. 27, №2, 1980. - С. 255 -266.
- 22(168). Basknays I. Investigation on High Speed SRD Incorporating Amorphous Iron / Basknays I. - Proceedings of EPE'95,1995. pp. 382 - 395.
- 23(2). Айзерман М. А. Краткий очерк становления и развития классической теории регулирования и управления / Айзерман М.А. - Автоматика и телемеханика №7, 1994. - С. 1-18.

- 24(151). Метод фазовой плоскости в теории релейных систем / Флюггелотн И. – М.: Физматгиз, 1959. - 176 с.
- 25(1). Андропов А.А. Теория колебаний / Андропов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. - М.: Физматгиз, 1959. - 916 с.
- 26(152). Цыпкин Я.4. Релейные автоматические системы / Цыпкин Я.4. – М.: Наука, 1974. - 575 с.
- 27(150). Флоренцев С.Н. Современная элементная база электроники / Флоренцев С.Н., Ковалев Ф.И. - Электротехника, № 4, 1996. - С. 5-12.
- 28(191). Fitzgerald A.E. Electric Machinery / Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D. - McGraw Hill Professional, 2002. - 704 p.
- 29(13). Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / Бесекерский В.А., Попов Е.П. – М.: Наука, 1972. - 768 с.
- 30(28). Воронов А.Л. Теория автоматического управления. В 2-х ч / Воронов А.Л. и др. - М: Высшая школа, 1986.ч.1 - 367 с., ч.2 - 504 с.
- 31(30). Гелиг А.Х. Динамика импульсных систем и нейронных сетей / Гелиг А.Х. - Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1982. - 192 с.
- 32(77). Кунцевич В.М. Нелинейные системы управления с частотно-широотно-импульсной модуляцией / Кунцевич В.М., Чеховой Ю.Н. - Киев: Техніка, 1970. - 340с.
- 33(39). Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой / Емельянов С.В. – М.: Наука, 1967. - 336 с.
- 34(40). Теория систем с переменной структурой / [Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А. и другие].– М.: Наука, 1970. - 592 с.
- 35(138). Старикова М.В. Автоколебания и скользящий режим в системах автоматического регулирования / Старикова М.В. - М.: Машгиз, 1962. - 195 с.
- 36(3). Айзерман М.А. Основы теории разрывных систем Ч.1 / Айзерман М.А. Пятницкий Е.С. - Автоматика и телемеханика №7, 1974. - с. 33 - 47.
- 37(37). Принцип блочного управления. Ч.1 / [Дракунов С.В., Изосимов Д.Е, Лукьянов А.Г. и другие]. -Автоматика и телемеханика №5, 1990. - С. 38 -47.

38(54). Изосимов Д.Б. Векторный подход к синтезу скользящих режимов. Симплексные алгоритмы / Изосимов Д.Б., Байда С.В. - Автоматики и телемеханика, №7, 1985. - С. 56-64.

39(143). Уткин В.И. Задачи управления асинхронным электроприводом / Уткин В.И. - Автоматика и телемеханика, №12, 1994. - С. 53 - 65.

40(144). Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / Уткин В.И. – М.: Наука, 1974. - 274 с.

41(195). Fridman L.M. Singular perturbation analyses of chattering in relay control systems / Fridman L.M. - IEEE Transactions on Automatic Control, vol 47, no. 12, 2002. - pp. 2079 - 2084.

42(103). Электропривод летательных аппаратов / [Полковников В.А., Петров Б.И., Попов Б.Н. и другие] - М.: Машиностроение, 1990. - 360 с.

43(109). Рабинович Л.В. Методы фазовой плоскости в теории и практике релейных следящих систем / Рабинович Л.В. – М.: Энергия, 1965. - 115 с.

44(110). Динамика следящих приводов / [Рабинович Л. В., Петров Б.И., Полковников В.А. и другие]. - М.: Машиностроение, 1982. - 348 с.

45(147). Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / Уткин В.И. – М.: Наука, 1984.1. - 368 с.

46. Горелов П.В. Релейно-модальное управление двухмассовыми электромеханическими системами / Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» // Горелов П.В., Мотченко А.И., Морозов Д.И.. - Харків: НТУ «ХПИ», 2008, № 30. – С.120-124.

47. Мотченко А.И., Марченко В.И. Квазиоптимальный по быстродействию релейный электропривод с заданными динамическими свойствами // Труды науч.-техн. конф. "Следящие электроприводы промышленных установок, роботов и манипуляторов". – Челябинск, 1986. – С.16

48. Яблонь В.П. Синтез релейных систем следящего электропривода повышенной точности с низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям: Дис ... канд. техн. наук: 05.09.04. – Донецк, 1999. – 207 с.

49. Зеленов А.Б. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з електромашинними, електромагнітними та імпульсними перетворювачами: Навч. посібн. // Зеленов А.Б., Шевченко І.С., Яблонь В.П., Нікітін М.Г. – Алчевськ: ДонДТУ, 2007. – 373 с.

50(89). Марчук Г.И. Методы вычислительной математики / Марчук Г.И. – М.: Наука, 1980. - 535 с.

54.1. Гарнов Б. К., Рабинович В. В., Вишневецкий Л. М. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. – М.: Металлургия, 1974.1. – 215 с.

52. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424 с.

54. Летов А. М. Математическая теория процессов управления. – М.: Наука, 1984.1. – 256 с.

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

55. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 200 с.

56. Чистов В. П. Оптимальное управление электрическими приводами постоянного тока / В. П. Чистов, В. М. Бондаренко, В. А. Святославский. – М.: Энергия, 1968. – 232 с.

57. Красовский А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1969. – 240 с.

58. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 4. – С. 436-444.1.

59. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. II. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 5. – С. 561-568.

60. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. III. – Автоматика и телемеханика, 1960. – № 6. – С. 661-665.

61. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Коцюбинский. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – 205 с.

62. Зеленев А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов: Учебное пособие / А.Б. Зеленев. – К.: УМК ВО, 1990. – 200 с.

63. Перельмутр В.И. Системы управления тиристорными электроприводами / В.И. Перельмутр, В.А. Сидоренко. – К.: Техника, 1985. – 320 с.

64. Двигатели постоянного тока ряда Д: Паспорт 04.1.10.09-94.1.

65. Переходченко В.А. Расчет мощности электродвигателей широкополосных станов горячей прокатки / В.А. Переходченко. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 384 с.

66. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. канд. техн. наук В.М. Перельмутра. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

67. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.4. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребник и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

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

69. Инструкция по эксплуатации КТЕ5-А для приводов постоянного тока с регулируемой скоростью.

70. Башарин А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А.В. Башарин, Ф.Н. Голубев, В.Г. Кепперман. – Л.: Энергия, 1974.1. – 440 с.

71. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниково-вых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2004.1. – 320 с.

72. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
73. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. Учебное пособие. 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
74. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно імпульсною модуляцією: Монографія, - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470с.
75. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями, Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла, Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет), 2002. – 43 с.
76. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Исследование динамики и энергетических показателей электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки) Тематический выпуск. – 2007. – С. 193 – 198.
77. Чермалых А.В. Исследование динамики и энергетических характеристик систем электропривода с помощью виртуальных моделей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – Вип. 4/2005 (33). – С. 142 – 147.
78. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2002. – 304 с., ил.
79. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с., ил.
80. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.

## Додаток А

### Скрипт-программа розрахунку параметрів регуляторів лінійної та релейної системи в пакеті MATLAB

```

n = 440; % Номинальное напряжение электродвигателя, В
In = 248; % Номинальный ток электродвигателя, А
n = 160; % Номинальная частота вращения, об/мин
Jd = 54.9; % Момент инерции двигателя, кгм2
Ra = 0.118; % Сопротивление якорной цепи двигателя, Ом
Ed0 = 768.15; % Максимально выпрямленная ЭДС преобразователя,
В
Re = 0.17*1; % Эквивалентное сопротивление якорной цепи
системы, Ом
Le = 0.017*0.5; % Эквивалентная индуктивность якорной цепи
системы ТП-Д, Гн
Tmu = 5e-3; % Малая постоянная времени ТП, с
Uymax = 10; % Максимальное управляющее напряжение, В
%-----
wn = pi*n/30; % Номинальная угловая скорость вращения
двигателя, 1/с
Jsum = 820.3*1; % Суммарный приведенный момент инерции ЭП,
кгм2
ktp = (Ed0/Uymax)*1; % Коэффициент усиления тиристорного
преобразователя
Te = Le/Re; % Электромагнитная пост. времени системы ТП-
Д, с
cFn = (Un-In*Ra)/wn; % Произведение потока на конст. пост.
двиг-ля, Вc
Tm = Jsum*Re/cFn^2; % Электромеханическая пост. времени ЭП,
Idin = 1.3*In; % Динамический ток, А
Mdin = cFn*Idin; % Динамический момент, Нм
%A = Sk*Mdin/(Jsum*wn^2); % Передаточный коэффициент
механизма, мм/рад
Ic = 0.3*In; % Статический ток

%-----%
%% 2. Синтез ПИ-РТ (модульный оптимум)
%-----%
Imax = 2.5*In; % Максимально допустимый ток якоря (ток
упора), А
kot = Uymax/Imax; % Коэффициент передачи цепи обратной связи
по току, В/А
Tot = 2*Tmu; % Постоянная времени интегрирования контура
тока, с
krtp = Re*Te/(ktp*kot*Tot); % Пропорциональная часть ПИ
регулятора тока
krti = Re/(ktp*kot*Tot); % Интегральная часть ПИ
регулятора тока
Wrt = krtp + tf(krti,[1 0]); % ПФ ПИ-РТ
%-----%

```

```

% Синтез ПИ-РС (симметричный оптимум)
wmax = wn;           % Максимальная скорость двигателя, 1/с
%wmax = wn;
kos = Uymax/wmax; % Коэффициент передачи цепи обратной связи
по скорости, Вс
Tos = 2*Tot;        % Постоянная времени контура скорости, с
krsp = Tm*cFn*kot/(Re*kos*Tos); % Пропорциональная часть
ПИ-РС
krsi = Tm*cFn*kot/(Re*kos*2*Tos^2); % Интегральная часть ПИ-
РС
Wrs = krsp + tf(krsi,[1 0]); % ПФ ПИ-РС

% Фильтр
Tf = 8*Tmu;         % Постоянная времени фильтра, Tf = 2*Tos
Wf = tf(1,[Tf 1]); % ПФ фильтра
%-----%

% Расчет задатчика интенсивности скорости
%tp = Tm*cFn*wmax/(Re*Idin); % Время разгона до
установившейся скорости, с
tp = ((Tm*cFn*wmax)/(Re*Idin))/1;
%tp = 0.2393;
%tp = Jsum*wmax/Mdin; % Время разгона до
установившейся скорости, с
%tp = 4.1.65;
kzis = 1/tp;        % Коэффициент передачи ЗИС, В/с
%kzis = Uymax/tp; % Коэффициент передачи ЗИС, В/с
%-----%

% % Расчет параметров позиционного контура
% Uoutmax = 110; % Максимальное вых. напряжение ФЧВ,
В
% kop = (Uoutmax/Sk); % Коэффициент обратной связи, В/мм
% kр = kop*0.89; % Коэффициент обратной связи, В/мм
(0.89 - затяжка)
% krp = kos*2*cFn*Idin/(kop*Jsum*wn*A); % Коэффициент
линейного РП
%% 4. Синтез релейной системы
%-----%
%система pozisionnaja (s)

% % file modeli -> rel_pozisija_est.mdl
% 3 regulatora (v estestv koordinatax)
%clear all
un=Un;
in=In;
nn=n;
ra=Ra;
%wn=4.1415*nn/30;
cf=cFn;

re=Re;
Te=Te;

%ktp=52;

```



```

Tu=Tmu;

J=Jsum;
%Tm=J*re/(cf^2);

Kdin=kdin; % otnochenie dinamich toka k nominalnomu
traz=tp;
%Ic=0.5*in;

%%%%%%%%%%5

Uum=Uymax;
im=Imax;
wm=wmax;
%wm=un/cf;
Epm=Ed0;

% ===== regulator skorosti =====

% ob`ekt upravlenija (v estestvennix)
b11w=0;
b12w=(re*im)/(cf*Tm*wm);
b13w=0;
b21w=-(cf*wm)/(re*Te*im);
b22w=-1/Te;
b23w=Epm/(re*Te*im);
b31w=0;
b32w=0;
b33w=-1/Tu;

m3w=ktp*Uum/(Tu*Epm);

Aow=[b11w b12w b13w;b21w b22w b23w;b31w b32w b33w];
Uw=[0 0 m3w];

% matrica Barbachina
Bw=[b11w b21w b31w 0 0 0;
     b12w b11w+b22w b32w b21w b31w 0;
     b13w b23w b11w+b33w 0 b21w b31w;
     0 b12w 0 b22w b32w 0;
     0 b13w b12w b23w b22w+b33w b32w;
     0 0 b13w 0 b23w b33w];
Kw=[-1;0;0;0;0;0];
Aw=inv(Bw)*Kw;

Kwi=Aw(5)/Aw(3);
Kwe=Aw(6)/Aw(3);
Kw=1; % :-)
KW=[Kw Kwi Kwe] %-> vector-stroka upravlenij

% ===== regulator toka =====

% ob`ekt upravlenija (v estestvennix)

b11i=-1/Te;

```

```
b12i=(1/(re*Te))* (Epm/im);  
  
b21i=0;  
b22i=-1/Tu;  
  
m2i=ktp*Uum/(Tu*Epm);  
  
Aoi=[b11i b12i;b21i b22i];  
Ui=[0 m2i];  
  
% matrica Barbachina  
Bi=[b11i b21i 0;  
    b12i b11i+b22i b21i;  
    0 b12i b22i];  
Ki=[-1;0;0];  
Ai=inv(Bi)*Ki;  
  
Kie=Ai(3)/Ai(2);  
Ki=1; % :-)  
KI=[Ki Kie] %-> vector-stroka upravljenij
```