

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ.....	12
1.1 Опис конструкції.....	12
1.2 Технічні характеристики.....	13
1.3 Механізм підйому крана	16
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	18
2.1 Вимоги, які висуваються до електроприводів і системи електропостачання.....	18
2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна	21
3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	26
3.1 Вибір комплектного електроприводу	26
3.2 Вибір комплектного електроприводу	29
3.3 Вибір струмообмежувального реактора.....	33
3.4 Вибір згладжувального реактора	33
3.5 Розрахунок параметрів об'єкта керування.....	34
4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ...	38
4.1 Математичний опис об'єкта управління.....	38
4.2 Розрахунок регулятора струму	41
4.3 Розрахунок регулятора швидкості	48
4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості.....	53
4.5 Вузол завдання швидкості КТЕ.....	55
4.6 Функціональна схема системи електроприводу.....	58
4.7 Моделювання електропривода в середовищі MATLAB / SIMULINK ...	59
5 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ В ПРОСТОРИ ПРИРОДНИХ КООРДИНАТ	71
5.1 Синтез регулятора струму в просторі природних координат.....	72
5.2 Синтез регулятора швидкості в просторі природних координат.....	77

	4
5.3 Математичне моделювання ЕП з релейною (оптимальною) системою керування	83
5.4 Оптимальне управління ЕП механізмів переміщення і підйому з урахуванням зміни довжини канату.....	92
ВИСНОВОК	99
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	100

ВСТУП

На сучасний момент козлові крани визнаються найбільш поширеними серед різних типів кранів. Їх використання охоплює широкий спектр галузей будівництва та виробництва. Популярність цих кранів обумовлена їхньою практичністю, доступною вартістю, високою вантажопідйомністю та простотою в експлуатації. Робочі витрати козових кранів значно менше, ніж у баштових та гусеничних кранів з аналогічною здатністю піднімати вантажі.

Козлові крани знаходять широке застосування в обслуговуванні складів і цехів, вантаженні та розвантаженні штучних вантажів, а також в монтажі та демонтажі різноманітних будівельних і промислових споруд. Вони також ефективно використовуються у суднобудівній галузі та обслуговуванні гідроелектростанцій. Для монтажу великих виробів, наприклад, у суднобудуванні, використовуються крани з двома вантажними візками, що дозволяє кантувати вантаж для точного розміщення. Крани для будівельних робіт, які мають можливість зміни місця роботи, зазвичай виконують у формі баштових кранів. Термін експлуатації козлового крана оцінюється на рівні 20-25 років, вказуючи на їх високу довговічність при належному обслуговуванні.

Стандартні козлові крани відрізняються вантажопідйомністю від 5 до 60 тонн та широким прольотом від 10 до 50 метрів. Варіанти, що виходять за рамки стандарту, можуть важити від 60 до 500 тонн та володіти різними технічними особливостями. Важливою рисою конструкції козлового крана є балочний міст, закріплений на рейковому шляху, і таль, який працює за допомогою електродвигуна, встановленого на галереї моста.

Основні компоненти та пристрій крана включають опори, пролітну балку, таль з механізмом переміщення, електрообладнання, ходові візки і пульт або кабінку управління. Рух кранового візка, на якому розміщено підйомний пристрій, здійснюється за допомогою рейок, які закріплені на кінцях кран-балки. За потреби у збільшенні прольоту можуть використовуватися додаткові балки.

Козлові крани є найбільш ефективними для підйому та транспортування великогабаритних вантажів, і вони визначаються своєю високою безпекою, надійністю та довговічністю при належному обслуговуванні.

Існують два основних типи козових кранів: універсальні (загального призначення) та спеціальні. Універсальні крани придатні для обслуговування різних будівельних та складських майданчиків і відрізняються характеристиками, такими як прольот, висота підйому вантажу та робочий виліт консолі. Вони часто використовуються для робіт із схожими умовами експлуатації. Крім того, козові крани можуть бути класифіковані за характером опори, такими як крани з жорсткими, одною жорсткою і одною еластичною опорами, кожен з яких має свої переваги та простоту в конструкції.

Козлові крани, завдяки своїй універсальності та можливостям, часто використовують різноманітні вантажозахватні пристрої, серед яких можна виділити грейфер, крюк та магніт, а також інші.

Грейфер є пристроєм, що представляє собою черпак, який прикріплюється до підйимального механізму крана. Його основне призначення - захоплення та вивантаження різних матеріалів, таких як вугілля, кокс, пісок, земля, гірські породи тощо. Грейфери використовуються в ситуаціях, де потрібно ефективно опрацьовувати різноманітні матеріали з різними властивостями. Крюк є пристроєм для пересування штучних вантажів, які закріплені на тросах. Цей вантажозахватний пристрій широко використовується для підняття та переміщення великих, масивних об'єктів, таких як будівельні блоки, сталеві конструкції чи інші важкі матеріали. Магніт є пристроєм, призначеним для пересування металевих вантажів. Цей механізм використовує магнітне поле для захоплення та утримання металевих об'єктів, що дозволяє ефективно та безпечно переміщувати важкі металеві матеріали на будівельних або промислових майданчиках.

Важливою перевагою використання цих вантажозахватних пристроїв є адаптивність до різних завдань та можливість оптимізації робочих процесів у залежності від конкретних вимог та характеру вантажів.

В сучасний період автоматизації технологічних процесів виявляється тенденція до пошуку загальних принципів синтезу систем управління для складних об'єктів, які ефективно враховують фізичні властивості об'єктів управління [1-6]. У такому підході конкретні властивості об'єкта управління не лише беруться до уваги, але і ефективно використовуються для досягнення зазначених цілей. Це відкриває можливість виникнення нових принципів і законів управління, які, крім забезпечення високої якості управління, також забезпечать високі техніко-економічні показники системи. У нелінійному світі, проте, відсутні стандартні шляхи і універсальні методи, що є характерними для лінійної теорії управління. Кожна нелінійність є індивідуальною і породжує свої власні методи синтезу.

Серед нелінійних об'єктів управління особливе місце займають автоматизовані електроприводи (ЕП), які становлять понад 60% від усієї споживаної енергії в промислово розвинених країнах [7-12]. Близько третини виробленої електроенергії йде на виробництво електроенергії, часто непоправною, первинною енергією, і цей показник стабільно зростає. Тому проблема раціонального використання електроенергії та досягнення ефективного управління з мінімальними втратами енергії є актуальною. Один із можливих способів вирішення цієї проблеми - розробка алгоритмів управління для електроприводів, які гарантують виконання задач управління із мінімальними енергетичними витратами [13-18].

На сьогоднішній день, з точки зору ККД (коефіцієнта корисної дії) та компактності конструкції, особливо перспективними є електроприводи, які використовують електричні машини змінного струму та живляться від силових напівпровідникових перетворювачів напруги. Незважаючи на це, електроприводи постійного струму залишаються широко використовуваними, зокрема, на металургійних комбінатах.

Характерною особливістю таких електроприводів є релейна нелінійність, що обумовлена роботою сучасних силових приладів у

"ключовому режимі" з метою забезпечення мінімальних втрат енергії. Динамічні системи такого типу є принципово нелінійними та описуються диференціальними рівняннями з розривним (релейним) керуванням.

Історія релейних систем налічує значно більше часу, ніж історія існування напівпровідникових приладів, починаючи з релейного зворотного зв'язку, використаного Ч. Шофілдом в 1836 році. Незважаючи на тенденцію релейних систем до автоколивань, їхню простоту реалізації в поєднанні з високими динамічними властивостями та самоадаптивністю при зміні параметрів і навантаження забезпечили їх широке поширення і розвиток теорії релейних систем. Релейні системи представляють собою клас динамічних систем управління, які використовують релейне керування або розривне керування. Релейне керування визначається використанням реле, які вмикають або вимикають живлення системи відповідно до певних умов.

Одна з основних характеристик релейних систем - це використання реле, що дозволяє переключати керування системи між двома або більше станами. Розривне керування використовує періодичні зміни стану системи, де реле регулює включення та вимикання системи відповідно до вимірюваних параметрів або зовнішніх впливів.

Релейні системи мають декілька важливих особливостей:

- Нелінійність: релейні системи є принципово нелінійними через характеристику розривного керування, що використовується для зміни станів системи.

- Простота реалізації: релейні системи зазвичай мають просту конструкцію, оскільки вони використовують реле для переключення між різними режимами роботи.

- Самоадаптивність: релейні системи можуть бути самоадаптивними, оскільки зміна стану системи відбувається автоматично відповідно до умов оточення чи параметрів системи.

- Використання в різних галузях: релейні системи застосовуються в різних галузях, таких як автоматика, регулювання технологічних процесів,

адаптивне управління та інші.

- Незважаючи на свою простоту та великий ряд застосувань, релейні системи можуть мати проблеми з автоколиваннями та точністю управління, що вимагає удосконалення та комбінації з іншими методами управління в деяких випадках.

Перший етап розвитку теорії релейних систем визначається великим внеском видатних вчених, таких як А.А. Андронов, Я.З. Ципкін і І. Флюгге-Лотц. Роботи цих дослідників відіграли ключову роль у встановленні основ та розвитку цієї галузі. Андронов [25], і Ципкін [24, 26] внесли суттєвий вклад у розуміння і дослідження нелінійних систем автоматичного керування, які використовують різні методи модуляції. Це відкрило нові можливості для розвитку теорії релейних систем і визначило їхню специфіку в контексті нелінійних динамічних систем [29-32].

Також, з цього періоду вирізняється теорія систем автоматичного керування зі змінною структурою [33-35]. Дослідження в цьому напрямку були проведені іншими вченими, зокрема, праці І. Флюгге-Лотц [27, 28] вносять значний внесок у розуміння та оптимізацію систем, де структура може змінюватися відповідно до умов експлуатації.

Справжній розвиток теорії релейних систем отримав імпульс завдяки видатному вченому, академіку С.В. Ємельянову, який визначив основні принципи та ідеї цієї галузі. Під його керівництвом виріс цілий колектив вчених, які робили вагомий внесок у розвиток теорії релейних систем.

Основною концепцією, внесеною академіком Ємельяновим, є використання для синтезу систем автоматичного керування явища ковзного режиму. Цей режим є специфічним видом руху, що виникає в релейних системах при певних умовах. Важливою особливістю цього режиму є його властивості, які сприяють високій якості процесів керування.

Ковзний режим забезпечує динамічній системі високу якість управління, інваріантність до зовнішніх збурень та малу чутливість до змін динамічних властивостей об'єкта керування. Це робить його ефективним і

надійним інструментом для стабілізації та оптимізації процесів автоматичного керування в різних галузях техніки та промисловості.

Розвиток теорії систем зі змінною структурою призвів до виникнення двох нових напрямків досліджень: теорії систем з розривними управліннями [36-41] та теорії бінарних систем [1-2, 7]. Теорія систем з розривними управліннями, яка ґрунтується на використанні багатовимірного змінного режиму в просторі стану, дозволяє вирішувати складні завдання керування.

Теорія бінарних систем, яка базується на принципі бінарної природи сигналів в нелінійних динамічних системах, використовує принципи двоїстості сигналів для синтезу оператора стабілізуючого зворотного зв'язку на допоміжну нелінійну систему. Цей підхід дозволяє ефективно керувати складними системами та забезпечує стабільність управління в різних умовах.

У сучасних електроприводах, зокрема на базі напівпровідникових перетворювачів напруги, використання релейних регуляторів на основі ковзних режимів знайшло широке застосування [42-45]. Це особливо актуально у зв'язку з прогресом напівпровідникової техніки та переходом до силових напівпровідникових перетворювачів напруги або струму, які працюють в ключовому (релейному) режимі. Використання цих законів керування на основі ковзних режимів стало ефективним засобом для оптимізації електроприводів та забезпечення їхньої стабільності.

Розвиток силової напівпровідникової техніки в останні десятиліття привів до інтенсивного впровадження нових типів високочастотних силових приладів, заснованих на технологіях MOSFET і IGBT. Це відкрило широкі можливості для створення та вдосконалення провідникових перетворювачів електричної енергії, які стали основою для автоматизованих електроприводів.

Зокрема, в сучасних системах все ширше використовуються технології багатовимірного релейного керування. Важливим вдосконаленням стало використання цих технологій в контурі регулювання фазних струмів електродвигуна. Це відкриває нові перспективи для оптимізації роботи електроприводів, забезпечуючи їхню високу ефективність та стабільність.

Автоматизовані електроприводи, засновані на сучасних технологіях релейного керування, виявляються дуже ефективними в управлінні фазними струмами електродвигуна. Це сприяє вдосконаленню процесів автоматизації та забезпечує оптимальну роботу електроприводів в різних умовах експлуатації. Про це свідчить зростаюча кількість публікацій. Причому таке регулювання в різних публікаціях називається по-різному: «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 т.д. З позиції найбільш повного пояснення процесів, що протікають при використанні даного виду керування, краще є 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).

Предметом дослідження є електропривод постійного струму механізму підйому козлового крана з релейною системою керування в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Метою роботи є синтез релейної системи керування електроприводом механізму підйому козлового крану, 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.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ

1.1 Опис конструкції

Козловий кран ККГЗ-25-32 є краном загального призначення. Знаходить широке застосування для оперативного обслуговування відкритих складів і навантажувальних майданчиків. Даний кран знайшов широке використання так само на складах штучних, тарних, контейнерних вантажів промислових підприємств, сільському господарстві при температурі навколишнього повітря від плюс 40 ° С до мінус 40 ° С.

Зовнішній вигляд крана представлений на рисунку 1.1. Суцільнометалева ґратчаста конструкція крана служить гарантом його надійності і довговічності. Оснащення кабіни кріслом-пультом, електронною апаратурою, дистанційним керуванням, датчиком тиску вітру робить його сучасним вантажопідйомним краном, надійним в експлуатації і зручним в обслуговуванні.

Кран ККГЗ-25-32 комплектується знімними вантажозахоплювальними пристроями (траверсами, канатними стропами), вантажопідйомними електромагнітами і грейферами, а також пристосуваннями для монтажу. Пристосування для монтажу крана складаються з чотирьох поліспастів, чотирьох гальмових башмаків.

Живлення крана ККГЗ-25-32 здійснюється від мережі трифазного змінного струму напругою 380 В, частотою 50 Гц.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд козлового крана ККГЗ-25-32

1.2 Технічні характеристики

Кран козловий ККГЗ-25-32 електричний володіє вантажопідйомністю в 20 тонн (25 тонн на зниженій швидкості) з підвісним вантажним візком. Проліт крана козлового становить 32 м, висота підйому 9 м; режим експлуатації ЗК / АЗ, управління з стаціонарної або рухомий кабіни, розміщення У1 (відкрите повітря), температурний режим -40 / + 40С.

Умови роботи крана:

- необхідна температура робочого середовища становить -40 ° С до + 40 ° С;
- стандартні групи режиму роботи крана - ЗК, кліматичне виконання - У1;
- необхідну напругу 380В;
- обладнання не призначене для роботи над місцями зберігання вибухових речовин.

Кран ККГЗ-25-32 відрізняє підвищена швидкість підйому вантажу і пересування крана. Застосування на крані електричного гальмування електроприводом без участі механічного гальма при опусканні вантажу дозволяє отримати стійкі посадочні швидкості, значно поліпшити використання електродвигуна, гальма, підвищити надійність роботи контакторної апаратури за рахунок зниження числа включення приводу при здійсненні доводочних операцій.

На рисунку 1.2 наведено габаритне креслення крана ККГЗ-25-32, а його технічні характеристики наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики крана ККГЗ-25-32

Найменування	Значення
1. Вантажопідйомність Q, т	20/25
2. Висота підйому H, м	9
3. Проліт L, м	32
4. Виліт консолі L _к , м	8,5
5. База ходової частини крана B, м	15,095
6. Будівельні довжини консолей L _{с1} /L _{с2} , м	10,46/10,46
7. Швидкість підйому V _{под} , м/с	0,15/0,08
8. Швидкість пересування крана V _к , м/с	0,86
9. Швидкість пересування візка V _т , м/с	0,69
10. Група режиму роботи крана	A3
11. Навантаження на ходове колесо при роботі крана, кН	350
12. Тип кабіни	СК/ПК
13. Число приводних візків механізму пересування крана, шт.	4
14. Конструктивна маса G, т	53,7

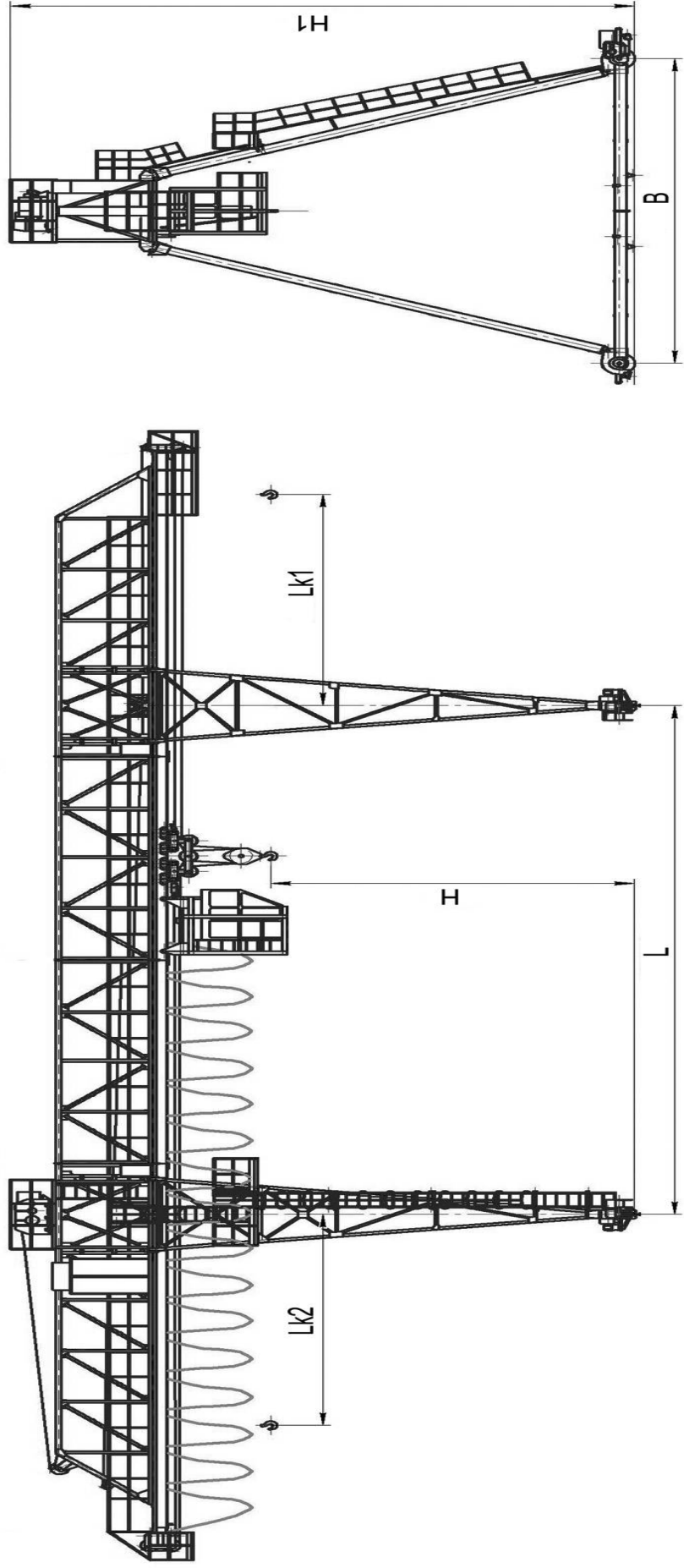


Рисунок 1.2 – Габаритный кресления козлового крана

1.3 Механізм підйому крана

Конструкція механізму підйому козлового крана показана на рисунку 1.3, а кінематична схема цього механізму наведена на рисунку 1.4.

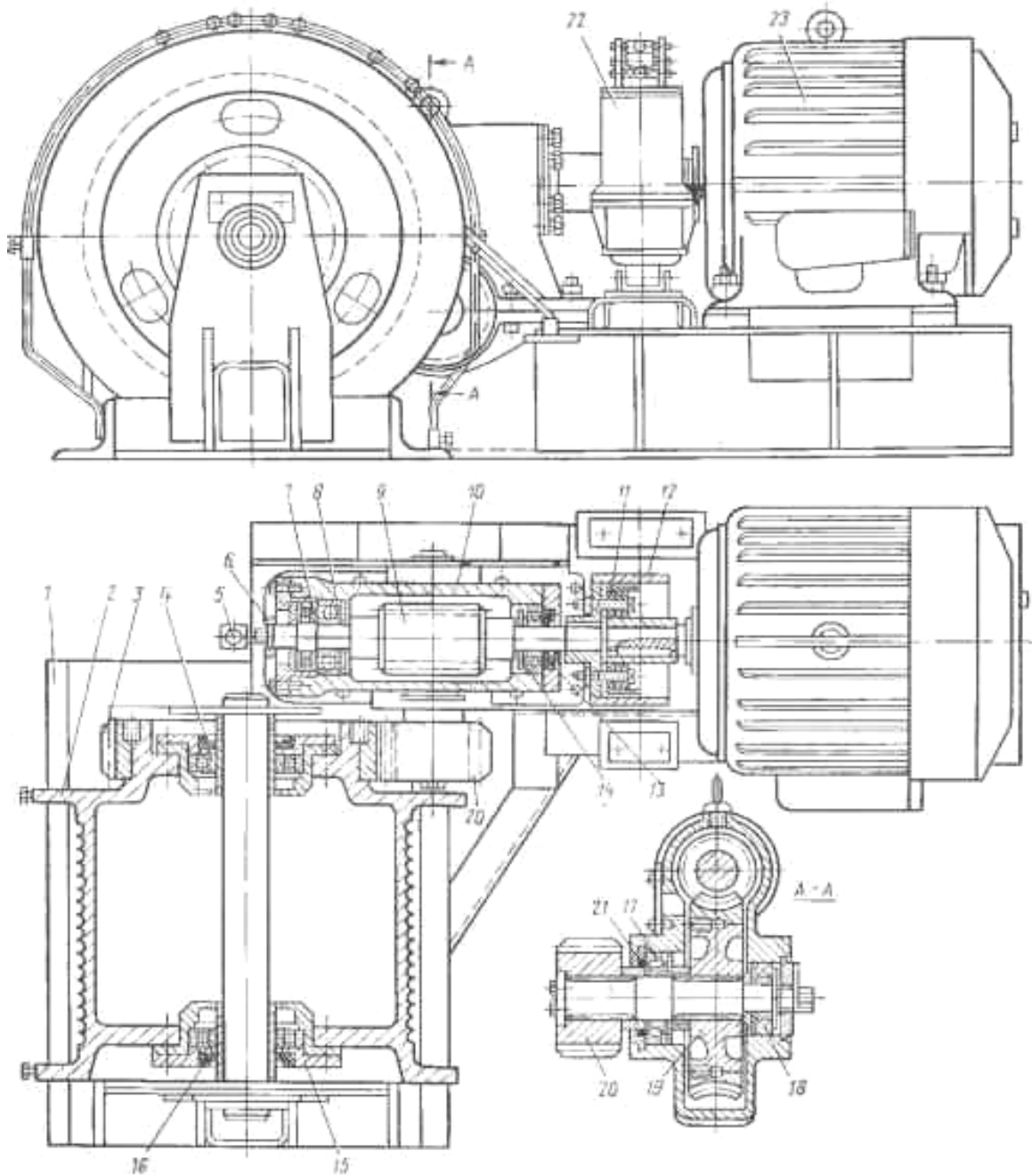


Рисунок 1.3 - Механізм підйому

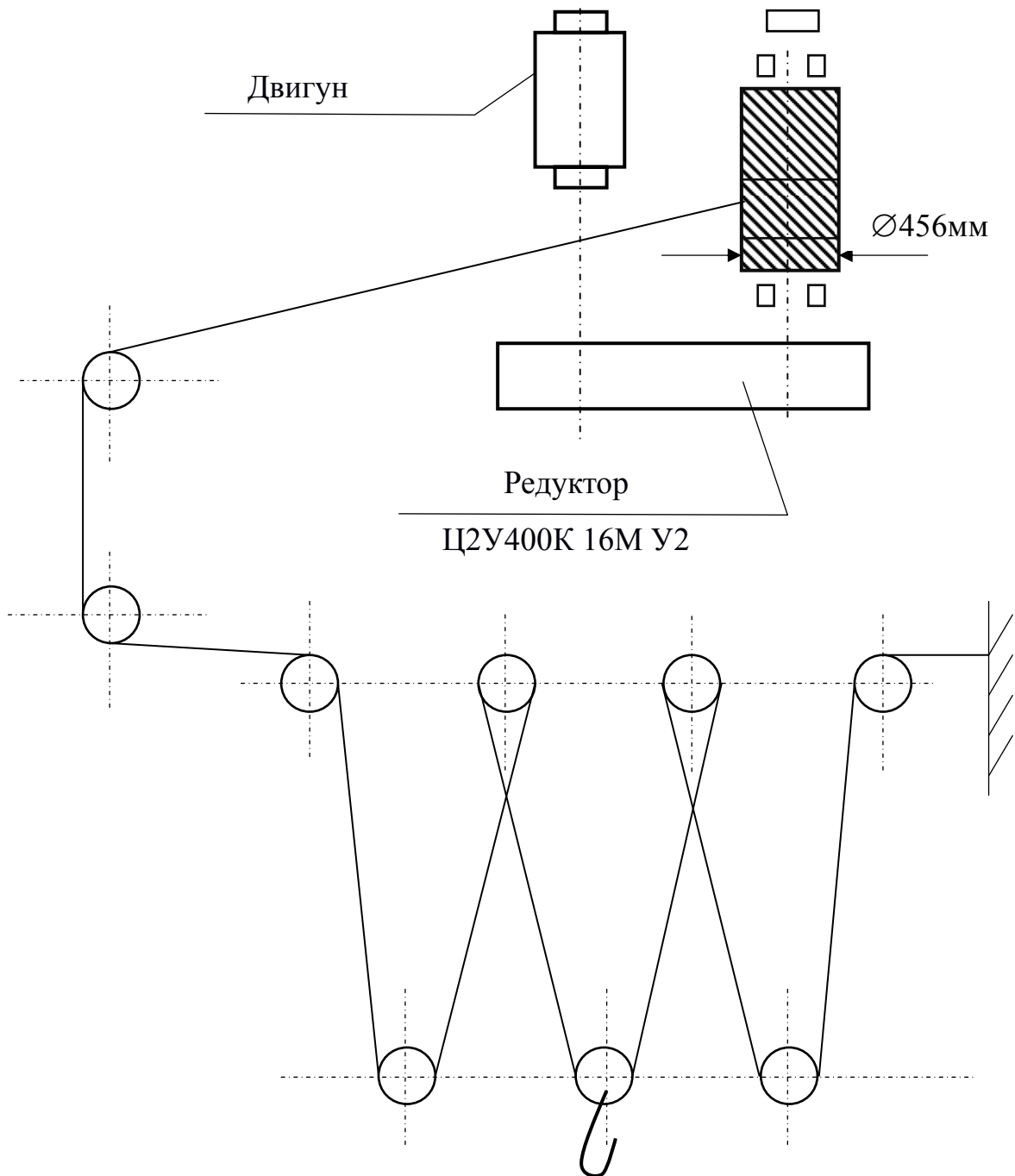


Рисунок 1.4 – Кінематична схема механізму підйому крана

Як видно з кінематичної схеми механізм підйому має наступні параметри:

- діаметр барабана;
- передавальне число поліспасти;
- передавальне число редуктора $i_p = 16$.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Вимоги, які висуваються до електроприводів і системі електропостачання

2.1.1 Вимоги, що пред'являються до електродвигунів підйомних установок

Залежно від характеру окремих операцій підйомних пристроїв до приводних двигунів пред'являються наступні основні вимоги:

- 1) забезпечення можливості пуску в хід механізму, реверсування напрямку переміщення вантажів і останов механізмів належною точністю;
- 2) в окремих випадках двигун повинен регулюватися в певному діапазоні швидкості відповідно до вимог технологічних процесів;
- 3) створюваний момент двигуна повинен бути таким, щоб була повна можливість забезпечення роботи механізму із заданою інтенсивністю;
- 4) при заданих частоті і числі включень в годину двигуна не повинно бути перегріву обмоток, через якого може бути тривалий останов підйомного механізму;
- 5) при особливих умовах роботи (підвищена температура, велика вологість, наявність газів і парів хімічних речовин, запиленість навколишнього середовища, наявність вибухонебезпечної суміші і т. п.) двигун повинен мати відповідну конструкцію, а його обмотки-термостійку і протилологу ізоляцію;
- 6) приводний двигун повинен володіти найменшими маховими масами, які надають значний вплив на перебіг перехідних процесів, особливо при частих пусках приводу;
- 7) при напружених режимах роботи підйомних установок і неможливості їх тривалого зупину за технологічними умовами виробництва

повинна бути передбачена можливість швидкої заміни двигуна; в окремих випадках корпус двигуна повинен бути роз'ємним;

8) приводний двигун по потужності повинен відповідати потужності підйомної установки, володіти необхідною перевантажувальною здатністю і підвищеною механічною міцністю;

9) напруга двигуна повинна відповідати напрузі мережі живлення; можливі коливання напруги повинні враховуватися при розрахунку потужності двигунів, особливо змінного струму, для яких зниження напруги сильно відбивається на їх пускових і перевантажувальних здібностях;

10) конструктивно двигуни повинні бути виконані з урахуванням безпеки та зручності обслуговування.

З перерахованих основних вимог, що пред'являються до приводних двигунів, видно, яким важливим обставиною є визначення реальних умов, в яких буде працювати встановлюється двигун. Перш ніж вибрати тип двигуна, треба ретельно проаналізувати всі можливі фактори, що впливають в тій чи іншій мірі на його роботу, а отже, і на роботу підйомної установки. Необхідно пам'ятати, що зупинка підйомної установки може спричинити за собою зупинку багатьох інших механізмів цеху та навіть кількох цехів.

2.1.2 Вимоги, що пред'являються до автоматики керування електроприводами

Механізми мостових кранів, як правило, працюють в дуже напружених режимах: велике число включень на годину, швидкі перехідні процеси при розгоні, гальмуванні, реверсуванні супроводжуються підвищеними моментами навантаження і т. П. Крім цього потрібно мати підвищену надійність роботи всіх механізмів кранів. З огляду на, що потужності двигунів кранових установок досить великі, управління ними за допомогою ручного дії вкрай важко. Тільки перехід на автоматичне керування електродвигунами механізмів кранів може дати належний ефект. Основні

вимоги, що пред'являються до автоматичного управління кранових механізмів, можуть бути наступними:

1) система автоматичного управління повинна мати просту структурну схему;

2) окремі елементи слід вибирати з підвищеною надійністю в роботі, легко замінні і прості за конструкцією;

3) в схемі автоматичного управління необхідно передбачати різні види захисту: від втрати напруги в мережі, перевантаження понад допустимі значення струму або моменту і від коротких замикань в системі;

4) пуск двигуна повинен здійснюватися за певним заданим законом, незалежно від швидкості перемикачів командоапарата оператором;

5) в схемі необхідно передбачати неможливість пуску двигуна після відновлення напруги мережі в момент, коли, командоапарат ще знаходиться в будь-якому робочому положенні; пуск повинен бути можливий тільки після повернення командоапарата в початкове (нульове) положення;

6) при різкому пересуванні рукоятки командоапарата з положення «уперед» в положення «назад» необхідно передбачати автоматичне плавне реверсування двигуна з струмами перемикачів, що не перевищують допустимих значень;

7) при повному відключенні живлення двигунів в схемі має бути передбачено механічне гальмування;

8) в схемі автоматичного управління необхідно передбачати роздільне керування кожним двигуном механізму (підйом, пересування візка або моста, поворот) від окремого командоапарата;

9) при переміщенні вантажів на всіх напрямках в схемі автоматичного управління необхідно передбачити обмежувачі ходу, що відключають харчування двигунів, коли пересування вантажу небезпечно; при роботі декількох кранів в одному прольоті цеху слід передбачати між ними блокування, що виключають можливість зіткнення кранів;

10) між пристроями проти викрадення і робочими двигунами пересування крана повинна бути блокування з тим, щоб при застопореному крані було б неможливо включити двигуни пересування;

11) при необхідності плавного опускання вантажу повинна бути передбачена можливість отримання низьких швидкостей;

12) в схемі слід передбачати блокування, що дозволяє відключати всю систему харчування крана, якщо потрібно знаходження людини на поверхні моста або візки.

2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна

Основною вимогою при виборі є його відповідність умовам технологічного процесу робочої машини. Завдання вибору приводного двигуна полягає в пошуку такої електричної машини, яка буде забезпечувати заданий технологічний цикл механізму, мати конструкцію, відповідну умовам експлуатації і компонування, а її нагрівання при цьому не повинен перевищувати допустимий (нормативний) межа.

Вибір двигуна недостатньої потужності може привести до порушення заданого технологічного циклу і зниження продуктивності робочої машини. Відбуваються при цьому його підвищене нагрівання і прискорене старіння ізоляції визначають передчасний вихід з ладу самого двигуна, останов робочої машини і економічні втрати.

Неприпустимим є також використання двигунів завищеною потужності, так як при цьому, маючи завищену початкову вартість, електропривод працює з низькими ККД і коефіцієнтом потужності. Таким чином, обгрунтований вибір потужності двигуна багато в чому визначає техніко-економічні показники роботи технологічного обладнання.

У завдання вибору двигуна кранового механізму входять попередній вибір двигуна, розрахунок його на задоволення теплового режиму, а також

перевірка на забезпечення заданих прискорень (забезпечення пускового режиму і запасу зчеплення для механізмів пересування).

Найбільшу складність представляє розрахунок теплового режиму двигуна. Загальноприйняті методи теплового розрахунку по еквівалентним параметрам навантаження (струму, моменту, потужності) або середнім втратам дають достовірні результати тільки тоді, коли досить точно відома здатність навантаження діаграма роботи електродвигуна. Для кранових електроприводів в більшості випадків характерним є невизначеність режиму роботи, що при специфічних особливостях кранових машин закритого виконання з підвищеними постійними втратами і погіршеними умовами тепловіддачі призводить до великих погрішностей при традиційних методах розрахунку.

Для розрахунку потужності приводного електродвигуна механізму підйому крана скористаємося методом еквівалентного ККД [1]. Даний метод найбільш повно враховує особливості роботи кранових електроприводів.

Визначаємо розрахункову потужність двигуна:

$$P_p = P_{\text{ст.ном}} = \frac{9,81 \cdot (Q + q) \cdot V_{\text{под}}}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{9,81 \cdot (20000 + 500) \cdot 0,15}{0,9} = 33518 \text{ Вт} \quad , \quad (2.1)$$

де $\eta_{\text{мех}} = 0,9$ - загальний ККД механізму підйому, при двоступеневої зубчастої передачі, вміщеній в закритий корпус редуктора [2];

$q = 500$ кг - маса підвіски з гаком.

Швидкість і частота обертання двигуна складуть:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{i_{\text{п}} \cdot i_{\text{р}} \cdot V_{\text{под}}}{0,5D_{\text{б}}} = \frac{6 \cdot 16 \cdot 0,15}{0,5 \cdot 0,456} = 63 \text{ с}^{-1} \text{ ,}$$

$$n_{\text{дв}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{дв}}}{\pi} = \frac{30 \cdot 63}{3,14} = 602 \text{ об / мин} \text{ ,}$$

(2.2)

де $i_{\text{п}} = 6$ - передавальне число поліспасти;

$i_{\text{р}} = 16$ - передавальне число редуктора.

Виходячи з режиму роботи М5 і застосовуваної системи електроприводу постійного струму з тиристорним перетворювачем по таблиці 6.5 з [1] визначаємо коефіцієнт $k_T = 1,15$. Тоді необхідна потужність складе:

$$P_{\text{НОМ.Т}} = \frac{P_p}{k_T} = \frac{33518}{1,15} = 29146 \text{ Вт} \quad (2.3)$$

Так як $P_{\text{НОМ.Т}}$ менше P_p , то попередньо вибираємо двигун по потужності розрахункової $P_p = 29146 \text{ Вт} = 30 \text{ кВт}$.

Попередньо вибираємо двигун постійного струму краново-металургійної серії Д810 з паспортними даними наведеними в таблиці 2.1. Дані взяті з [1].

Номинальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 600}{30} = 62,8 \text{ с}^{-1}. \quad (2.4)$$

Таблиця 2.1 - Паспортні дані двигуна Д810

1. Номинальная мощность P_H , кВт при ПВ, 40%	35
2. Номинальная мощность P_H , кВт при ПВ, 25%	40
3. Напряжение питания якоря U_H , В	440
4. Ток якоря номинальный I_H , А	74
5. Номинальная частота вращения n_H , об / мин	600
6. Момент инерции $J_{\text{ДВ}}$, кг · м ²	3,65
7. Сопротивление якоря и добавочных полюсов $r_{\text{я}}$, Ом	0,14

Визначаємо сумарний момент інерції:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= 1,2 \cdot J_{\text{ДВ}} + (Q + q) \cdot \left(\frac{V_{\text{ПОД}}}{\omega_H} \right)^2 = \\ &= 1,2 \cdot 3,65 + (20000 + 500) \cdot \left(\frac{0,15}{62,8} \right)^2 = 4,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Еквівалентну ККД визначається за формулою:

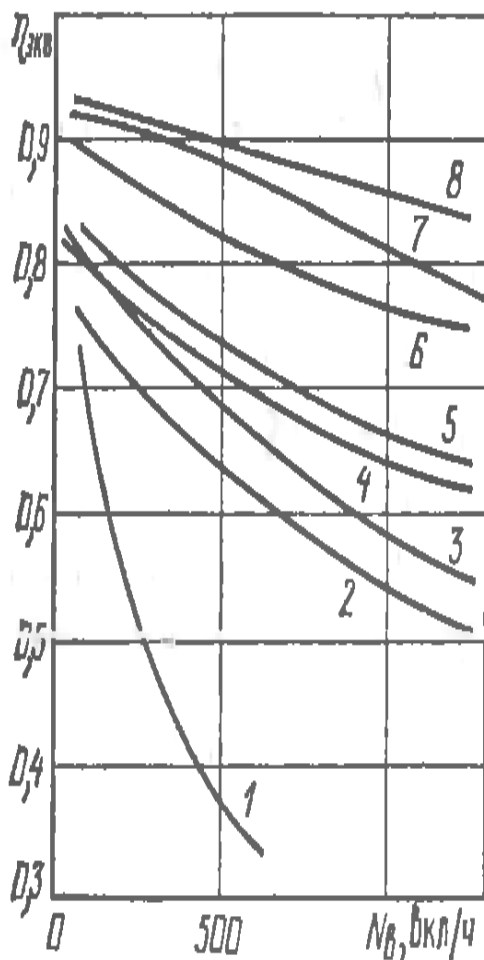
$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{1 + \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ.Н}}}{\eta_{\text{ЭКВ.Н}}} \cdot \frac{J_{\Sigma}}{1,2 \cdot J_{\text{ДВ}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{МАХ}}}{1000}\right)^2}, \quad (2.6)$$

де $\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} = 0,94$ - еквівалентну ККД, обумовлений з таблиці 6.5 в [1];

$n_{\text{МАХ}} = 1,05 \cdot n_{\text{Н}} = 1,05 \cdot 600 = 630$ об / мин максимальна частота
обертання двигуна (при однозонім регулюванні дорівнює швидкості
холостого ходу);

$\eta_{\text{ЭКВ.Н}}$ - ККД в залежності від числа включень двигуна в годину $N_{\text{В}}$ по
рисунок 2.1.

При числі включень в годину $N_{\text{В}} = 200$ для тиристорного
электроприводу постійного струму $\eta_{\text{ЭКВ.Н}} = 0,92$.



1 - двухскоростной короткозамкнутый двигатель при $2p = 4/24$; 2 - параметрическое регулирование двигателей с фазным ротором и торможением противовключением; 3 - трехскоростные короткозамкнутые двигатели при $2p = 4/8/24$; 4 - параметрическое регулирование двигателей постоянного тока, короткозамкнутых двигателей с $2p = 6$ и двигателей с фазным ротором при динамическом торможении; 5 - трехскоростные короткозамкнутые двигатели при $2p = 6/12/24$; 6 - с ограниченной зоной частотного управления двух скоростных короткозамкнутых двигателей; 7 - тиристорный привод постоянного тока; 8 - частотно-управляемые односкоростные короткозамкнутые двигатели

Рисунок 2.1 - Залежності $\eta_{\text{ЭКВ.Н}} = f(N_{\text{В}})$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{0,94}{1 + \frac{0,94 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{4,5}{1,2 \cdot 3,65} \cdot \left(\frac{630}{1000}\right)^2} = 0,93, \quad (2.7)$$

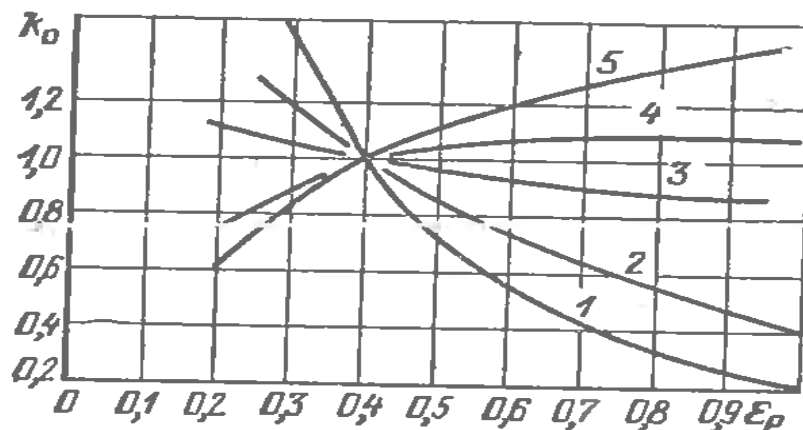
Перевіряємо двигун по тепловому режиму:

$$P_{\text{НОМ.Т}} = \frac{K_3 \cdot K_{\text{ЭКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_H}}}{K_O \cdot K_p} \cdot \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - K_D \cdot (\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ}})} \cdot P_{\text{СТ.НОМ}} = \quad (2.8)$$

$$= \frac{1 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{0,4}}}{1 \cdot 1} \cdot \frac{0,94}{0,94 - 1,25 \cdot (0,94 - 0,93)} \cdot 33518 = 27175 \text{ Вт} = 27,2 \text{ кВт}$$

Тут коефіцієнти $K_3 = 1$, $K_{\text{ЭКВ}} = 0,8$, $\varepsilon_p = 0,4$ прийняті згідно з таблицею 6.4 з [1]; $K_p = 1$; $K_D = 1,25$ згідно з таблицею 6.5 з [1], $K_O = 1$ по рисунку 2.2 взятому из [1].

Оскільки $P_{\text{НОМ.Т}} < P_H$, то двигун Д810 остаточно приймаємо в якості приводного для механізму підйому крана ККГЗ-25-32.



1 — невентилируемые асинхронные; 2 — постоянного тока; 3 и 4 — вентилируемые соответственно тихоходные и быстроходные с фазным ротором; 5 — вентилируемые быстроходные короткозамкнутые

Рисунок 2.2 – Залежності $K_0 = f(\varepsilon_p)$

3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

3.1 Вибір комплектного електроприводу

Виходячи з вимог, що висуваються до механізму підйому крана, обрано регульований електропривод постійного струму з тиристорним перетворювачем.

У сучасному електроприводі загального призначення електромашинні перетворювачі по системі Г-Д не знаходять широкого застосування.

При виборі типу електроприводу враховувалися жорсткість механічних характеристик, можливості і обмеження системи регулювання, економічність системи по відношенню до витрат електроенергії, первинних і експлуатаційних витрат.

Недоліки системи ТП-Д:

- 1) м'якша механічна характеристика;
- 2) чутливість до перенапруг;
- 3) низька перевантажувальна здатність;
- 4) впливає на мережу.

Переваги системи ТП-Д:

- 1) високу швидкодію;
- 2) миттєва готовність до роботи;
- 3) відсутність системи власних потреб і обертових частин;
- 4) високий ККД;
- 5) менші габарити;
- 6) менше витрат на конструкційні матеріали;
- 7) простота обслуговування, виготовлення і монтажу;
- 8) простіша система охолодження;
- 9) можливість участі в централізованій системі управління

технологічним процесом.

Таким чином, з усіх способів регулювання і зміни напрямку швидкості, використання реверсивного тиристорного перетворювача (РТП) є одним з найсучасніших способів створення швидкодіючого регульованого електроприводу постійного струму. Реверсивним тиристорним перетворювачем називається перетворювач, через який струм може протікати в обох напрямках. Оскільки тиристори пропускають струм тільки в одному напрямку, то для зміни напрямку струму навантаження необхідно використовувати дві групи вентилів, кожна з яких проводить струм в своєму напрямку. Ці групи вентилів найчастіше збираються за трифазною мостовою або трифазної нульової схемою. Трифазна нульова схема відрізняється простотою, меншим числом вентилів застосовуваних у схемі. Трифазна мостова схема має низку переваг у порівнянні з трифазної нульової:

- 1) Випрямлена ЕРС при одній і той же вторинній напрузі трансформатора в два рази більше;
- 2) Пульсації випрямленої ЕРС в два рази більше за частотою і менше по амплітуді;
- 3) Вентильні групи можуть підключатися до мережі без трансформатора;
- 4) Типова потужність трансформатора менше.

Перераховані переваги обумовлюють переважне застосування трифазної мостової схеми в системах електроприводу (ЕП) потужністю десятки - сотні кіловат. Оскільки потужність ТП, яке живить якірний ланцюг досить велика, то вибираємо трифазну мостову схему.

Як було зазначено вище, для отримання реверсивного ТП дві групи вентилів певним чином з'єднують між собою. Розрізняють зустрічно-паралельне і перехресне з'єднання. При зустрічно-паралельному з'єднанні застосовується простий двохобмотковий трансформатор меншої потужності. Перевага перехресної схеми в тому, що в даній схемі аварійні процеси при одночасному включенні тиристорних груп протікають легше, тому цю схему доцільно застосовувати в відповідальних ЕП. На підставі цього вибираємо

зустрічно-паралельне з'єднання випрямних груп.

Застосовуються два основні методи управління комплектами РТП: спільне і роздільне. При спільному управлінні імпульси подаються на тиристори обох груп одночасно. При цьому одна група працює в випрямному режимі з кутом регулювання α_B , розвиває середнє значення випрямленої напруги U_{α_B} і забезпечує протікання струму через навантаження. В цей же час друга група перекладається в інверторний режим з кутом регулювання α_U і середнє значення випрямленої напруги U_{α_U} . При такому управлінні в РТП утворюється замкнений контур, по якому може протікати зрівняльний струм. Для зменшення цього струму кути регулювання повинні бути в певному співвідношенні. При узгодженому управлінні співвідношення кутів встановлюється таким чином, щоб виконувалося співвідношення: $U_{\alpha_B} = U_{\alpha_U}$. Це рівність виконується за умови $\alpha_B + \alpha_U = 180^\circ$. При цьому способі управління в зрівняльній контурі протікає переривчастий струм середнє значення, якого називають статичним зрівняльним струмом і обмежують до допустимого зрівняльними реакторами. Для зменшення зрівняльного струму застосовують неузгоджене управління групами тиристорів в РТП. При цьому співвідношення кутів управління: $\alpha_B + \alpha_U > 180^\circ$. При цьому в зрівняльній контурі завжди є постійна складова напруги, спрямована проти провідності тиристорів, оскільки іверторна група розвиває більшу напругу, ніж випрямна. Це призводить до різкого зменшення статичного зрівняльного струму, хоча динамічний зрівняльний струм зменшується незначно. Необхідно відзначити також те, що перебіг невеликого зрівняльного струму сприятливо позначається на статичних характеристиках ТП. Таким чином переваги спільного управління:

- 1) Відсутність необхідності в переходах силового ланцюга;
- 2) Висока швидкодія при переході з одного режиму в інший і постійна готовність до цього переходу;
- 3) Однозначність в статичних характеристиках ТП.

В розроблюваному електроприводі застосуємо перетворювач з роздільним управлінням вентилями групами.

Для управління ТП в даний час застосовують головним чином безінерційні системи фазового управління з пилкоподібною або синусоїдальною опорною напругою. Перевагою синусоїдальної форми опорної напруги є лінійність результуючої характеристики ТП. Тому в розроблюваному ТП застосуємо синусоїдальну опорну напругу.

3.2 Вибір комплектного електроприводу

Відповідно до вибраного двигуном Д810 і його номінальними даними здійснимо вибір стандартного тиристорного перетворювача, номінальні дані якого будуть відповідати даним цього двигуна.

Основними технічними даними комплектних тиристорних електроприводів є номінальний струм і напруга. При виборі електроприводу слід перевірити, щоб максимальний струм двигуна не перевищував максимально допустимий струм електроприводу. Як правило, для найбільш відповідальних механізмів вибір електропривода проводиться з урахуванням реальних графіків навантаження електродвигуна.

Номінальна напруга електроприводу визначається номінальною напругою електродвигуна. Воно більше номінальної напруги електродвигуна на 5-10% (згідно ГОСТ 25953-83), що забезпечує необхідний запас на регулювання швидкості і на безпечне інвертування при зниженні напруги мережі живлення.

В якості силового перетворювача виберемо комплектний тиристорний електропривод ДП ХЕМЗ типу ТКЕ. Перетворювачі даного типу випускаються з наступними типовими номінальними значеннями струму і напруги навантаження:

- ряд номінальних значень струму: I_d 25, 50, 100, 200, 320, 500, 800, 1000, 1600, 2500, 3200, 4000 А;

- ряд номінальних значень напруги: U_d 220, 440, 600, 750, 930 В.

Таким чином, з урахуванням номінальних даних двигуна вибираємо перетворювач ТКЕ на $I_d = 100\text{А}$ і $U_d = 440\text{В}$.

Нижче наведена специфікація тиристорного перетворювача для проєктованого електроприводу підйому крана: ТКЕ-100 / 440-13113-УХЛ4.

Розшифровка наведеної специфікації дана нижче:

ТКЕ - комплектний тиристорний електропривод;

100/440 - номінальний струм електроприводу 100А, номінальна напруга навантаження 440В;

1 - кількість двигунів електропривода - один (можливі поставки без двигуна, багатодвигунні електроприводи);

3 - реверсивний режим роботи зі зміною полярності напруги на якорі;

1 - виконання перетворювача за способом зв'язку з мережею - бестрансформаторних виконання з струмообмежувальним реактором;

1 - регулювання швидкості, однозонне регулювання;

3 - силова частина виконана з лінійним контактором.

Як видно з рисунку 3.1, перетворювач складається з двох тиристорних мостів, включених зустрічно-паралельно для забезпечення реверсивної роботи електроприводу. Для роботи системи управління в силовій частині перетворювача передбачені трансформатори струму по змінній частині, що забезпечують захист від струмів короткого замикання в аварійних ситуаціях. Включення перетворювача по стороні змінного струму передбачений автоматичний вимикач QF1. З боку постійного струму в перетворювачі передбачені:

SF2 - вимикач, знеструмлюючий електродвигун без відключення перетворювача від мережі;

M - електродвигун, який був обраний в дипломному проєкті раніше;

RS - шунт постійного струму, для формування зворотного зв'язку по струму;

KV, RV1, RV2 - контактор і резистори динамічного гальмування, що працюють в аварійних режимах електропривода;

RP - зворотний зв'язок по напрузі перетворювача.

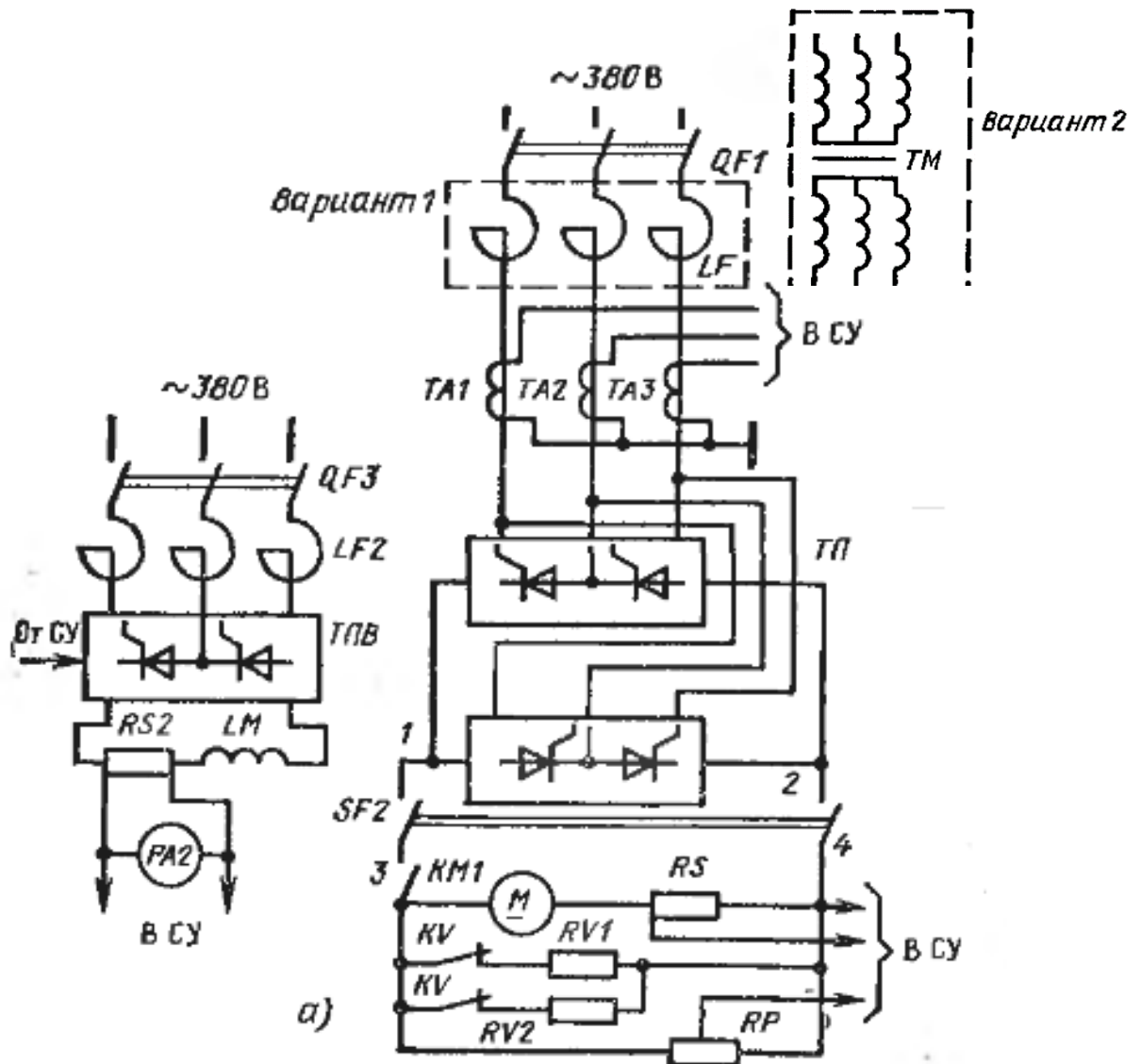


Рисунок 3.1 - Силова частина електроприводу КТЭ

Комплектні електроприводи серій ТКЕ забезпечені тиристорні збудниками (ТПВ), номінальний струм яких знаходиться у відповідність з номінальним струмом електроприводу. Зазначений вище перетворювач комплектується тиристорним збудником на номінальну напругу 220В і струм збудження максимальний 20А, що повністю забезпечує роботу двигуна незалежного збудження обраного типу.

Умови експлуатації електропривода наступні.

Електроприводи призначені для експлуатації в районах з помірним і холодним кліматом (виконання УХЛ4) при температурі від 1 до 40 ° С. Відносна вологість не більше 80% при температурі 20 градусів Цельсія. Електроприводи призначені для роботи в закритих стаціонарних приміщеннях за відсутності безпосереднього впливу сонячної радіації, навколишнє середовище не вибухонебезпечне.

Електроприводи мають такі види захистів:

- від виходу з ладу тиристорів при зовнішніх і внутрішніх коротких замикань, відкриванні тиристора в непрацюючій групі, перекидання інвертора;
- від перенапруг на тиристорах;
- від аварійної перевантаження тиристорів;
- від розвитку аварійних процесів при зникненні напруги власних потреб і силового напруги;
- від неприпустимої тривалості роботи при зникненні примусової вентиляції;
- від зниження струму збудження двигуна нижче допустимого;
- від перевищення допустимого струму збудження;
- від перенапруги на якорі двигуна;
- від перевищення швидкості двигуна;
- від неправильного порядку складання схеми;
- від перевантаження двигуна, що перевищує задану протягом певного часу (до 20 секунд) або захист по середньоквадратичне току;
- від включень ТП на обертовий двигун або при напрузі на виході ТП, що не дорівнює нулю;
- від порушення ізоляції елементів силового ланцюга.

При всіх видах захистів забезпечується певна селективність захистів, що не допускає перегорання запобіжника або тиристора. В цьому випадку аварія буде відключена автоматичним вимикачем або гратчастої захистом ТП.

Для полегшення експлуатації і пошуку несправностей електроприводи забезпечені аварійної та попереджувальної сигналізації. Аварійні та попереджувальні сигнали запам'ятовуються з видачею їх на світлову індикацію і в зовнішній ланцюга.

3.3 Вибір струмообмежувального реактора

Струмообмежувальний реактор - пристрій, для захисту тиристорів від надструмів в аварійних режимах роботи перетворювачів, включаються в кожен фазу мережі живлення. Індуктивність реактора вибирається з умови обмеження діючого значення усталеного струму короткого замикання.

Вибираємо струмообмежувальним реактор РТСТ-165-0,145У3 на 165А.

Параметри струмообмежувального реактора РТСТ-165-0,145У3:

- лінійна напруга мережі живлення $U_L = 410 \text{ В}$;
- струм навантаження тиристорного перетворювача $I_{\text{ТП}} = 165 \text{ А}$;
- номінальна індуктивність $L_{\text{ТОР}} = 0.145 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$;
- активний опір $r_{\text{ТОР}} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

3.4 Вибір згладжувального реактора

Згладжувальний реактор включається в ланцюг випрямленого струму з метою зменшення його змінної складової. Пульсації випрямленої струму повинні бути обмежені на рівні допустимого значення для обраного двигуна. При тиристорному харчуванні надійна робота двигунів серії Д забезпечується без необхідності застосування реактора, що згладжує, якщо коефіцієнт пульсацій струму $k_{\text{I(доп)}}$ не перевищує 15%. При $k_{\text{I(доп)}} = 15\%$ номінальна потужність знижується не більше ніж на 3%.

ЕРС перетворювача при куті управління $\alpha = 0$:

$$E_{d0} = 1.35 \cdot U_{2л} = 1.35 \cdot 380 = 513 \text{ (В)} \quad (3.1)$$

Мінімальна сумарна (еквівалентна) індуктивність якірного ланцюга за умовою обмеження пульсацій випрямленого струму:

$$L_{\text{э}(\min)} = \frac{k_U}{k_{I(\text{доп})}} \cdot \frac{E_{d0}}{m \cdot \omega_c \cdot I_n}, \quad (3.2)$$

де k_U - коефіцієнт пульсацій напруги (для трифазної мостової схеми приймаємо $k_U = 0,13$),

m - пульсність перетворювача (для мостової трифазної схеми = 6)

$$L_{\text{э}(\min)} = \frac{0,13}{0,15} \cdot \frac{513}{6 \cdot 314 \cdot 74} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.3)$$

Індуктивність якоря двигуна визначимо використовуючи формулу Уманського-Лінвілля:

$$L_{\text{яд}} = \frac{0,25 \cdot U_n}{I_n \cdot \omega_n \cdot p} = \frac{0,25 \cdot 440}{74 \cdot 62,8 \cdot 6} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.4)$$

Розрахункова індуктивність згладжує реактора:

$$\begin{aligned} L_{\text{ср}} &= L_{\text{э}(\min)} - 2 \cdot L_{\text{тор}} - L_{\text{яд}} = 3,2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,145 \cdot 10^{-3} - 3,9 \cdot 10^{-3} = \\ &= -0,99 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Так як розрахункова індуктивність виявилася негативною, згладжує реактор не потрібно. Власної індуктивності якірного ланцюга досить для обмеження пульсацій струму.

3.5 Розрахунок параметрів об'єкта керування

Проведемо розрахунок параметрів об'єкта управління, необхідних для синтезу системи керування електроприводом.

Опір якоря двигуна з урахуванням температури навколишнього середовища:

$$R_{\text{я}} = k_t \cdot r_{\text{я}} = 1,38 \cdot 0,14 = 0,19 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

де $k_t = 1,38$ - температурний коефіцієнт.

Еквівалентну сумарний опір якірного ланцюга:

$$R_{\Sigma} = R_{\Omega} = R_{я} + 2 \cdot r_{\text{top}} + \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{H}}} = 0.19 + 2 \cdot 0.029 + \frac{2}{74} = 0.275 \text{ (Ом)} \quad (3.7)$$

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

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{\Omega} = L_{\text{яд}} + 2 \cdot L_{\text{top}} = (3.9 + 2 \cdot 0.145) \cdot 10^{-3} = 4.19 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.8)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{\Omega} = \frac{L_{\Omega}}{R_{\Sigma}} = \frac{0.00419}{0.275} = 0.015 \text{ (с)} \quad (3.9)$$

Потікосцеплення машини:

$$C\Phi_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{H}} \cdot R_{я}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{440 - 74 \cdot 0.19}{62.8} = 6.78 \text{ (В} \cdot \text{с)} \quad (3.10)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{\text{M}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma}}{C\Phi^2} = \frac{4.5 \cdot 0.275}{6.78^2} = 0.027 \text{ (с)} \quad (3.11)$$

Статичний коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача:

$$k_{\text{тп}} = \frac{E_{\text{d0}}}{U_{\text{y}}} = \frac{513}{10} = 51.3 \quad (3.12)$$

де $U_{\text{y}} = 10 \text{ В}$ - максимальна напруга управління.

Тиристорний перетворювач залежно від можливості реверсу, типу управління групами вентилів, режиму роботи описується системою нелінійних диференціальних рівнянь. Його динаміка, як елемента системи управління, відрізняється наступними особливостями:

- 1) перетворювач управляється не безупинно, а дискретно;
- 2) перетворювач є напівкерованих пристроєм, оскільки тиристор відкривається в момент подачі керуючого імпульсу, а закривається - коли струм через нього стане дорівнює нулю.

Нелінійність тиристорного перетворювача викликає появу низькочастотних биття при впливі сигналів з частотою, більшою частоти

мережі живлення, субгармонійних коливань в замкнутих системах при спробі організувати високу швидкодію. Тому в цілому тиристорний перетворювач, що працює в режимі безперервного струму, з достатньою точністю можна уявити одним динамічним безінерційною ланкою з чистим запізненням, передавальна функція якого має вигляд:

$$W_{\text{ТП}}(p) = k_{\text{ТП}} \cdot e^{-\tau_3 p}$$

де $\tau_3 = \tau_{\text{СП}} + \tau_{\text{УУ}}$ - загальний час запізнювання;

$\tau_{\text{СП}}$ - час запізнювання силового перетворювача, яке приймається рівним половині максимального часу запізнювання:

$$\tau_{\text{СП}} = \frac{1}{2 \cdot f_{\text{сети}} \cdot m_{\text{В}}} = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 6},$$

де $f_{\text{сети}}$ - частота мережі;

$m_{\text{В}}$ - число фаз випрямлення;

$\tau_{\text{УУ}}$ - час запізнювання пристрою управління, яке приймають рівним:

$\tau_{\text{УУ}} = 0,07\text{с}$ для напівпровідниково-ємнісного пристрою;

$\tau_{\text{УУ}} = 0$ для СИФУ вертикального типу.

З достатньою точністю тиристорний перетворювач, що працює в режимі безперервного струму, можна уявити інерційним ланкою

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{\tau_3 p + 1}$$

Якщо блок управління тиристорами має на вході фільтр для захисту від високочастотних перешкод, то передавальна функція тиристорного перетворювача набуде вигляду:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{(\tau_3 p + 1) \cdot (T_{\text{Ф}} p + 1)}$$

Якщо немає даних про постійну часу фільтра, то її можна прийняти рівною $T_{\text{Ф}} = 0,002 \div 0,003$ с.

Для спрощення розрахунків тиристорний перетворювач можна уявити інерційним ланкою з передавальною функцією:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{(T_{\mu}p + 1)}$$

де $T_{\mu} = T_{\phi} + \tau_3$.

Підставивши в наведені вище формули відповідні параметри частоти мережі, числа фаз і т.д., виходить постійна часу тиристорного перетворювача:

$$T_{\mu} = 0.002 + \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3} = 0.005 \text{ с.}$$

4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Математичний опис об'єкта управління

При синтезі системи управління приймаються звичайні для систем електроприводу припущення, які лінеаризують силову частину об'єкта управління – двигун і регульоване джерело живлення ланцюга якоря. При математичному описі не враховується вплив пружних елементів, вплив гістерезису, вихрових струмів і реакції якоря. Коефіцієнти передач і сталі часу структурних елементів електроприводу приймаються незмінними.

Об'єктом управління в даній системі виступає тиристорний перетворювач, електродвигун і механічна частина.

Тиристорний перетворювач як елемент системи регулювання є нелінійним дискретним пристроєм. Його специфічні особливості полягають в наступному. Управління ТП здійснюється дискретно, так як після відмикання чергового тиристора зміна сигналу управління протягом деякого інтервалу часу не призводить до зміни напруги ТП.

Якщо швидкість зміни кута $d\alpha/dt > \omega_0$, то ЕРС визначається не кутом α , а зміною по кривій напруги живлення останнього тиристора, який проводив струм, у зв'язку з неможливістю закрити по ланцюгу управління відкритий тиристор. Останнє явище отримало назву неповної керованості ТП.

У зв'язку з цим повне дослідження динамічних характеристик ТП є складним завданням, і на практиці застосовують різного роду спрощення. Найбільшого поширення набули два види моделей ТП: безперервна, в якій ТП представляється апериодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{тп}}$ і сталою часу

$\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ і імпульсною. Надалі, при синтезі САУ буде використана

безперервна модель ТП.

Таким чином, два послідовно з'єднаних електродвигуна представимо у

вигляді трьох типових ланок (рис. 4.1): аперіодичної ланки першого порядку (електрична частина машин) і інтегруючої ланки (механічна частина), охоплених негативним зворотним зв'язком по ЕРС двох двигунів. Момент опору в структурній схемі відповідає навантаженню припадає на одну вісь крана (навантаженні двох двигунів). Так як J_{Σ} розраховуються в розрахунку на один двигун, то в структурній схемі його значення подвоюється.

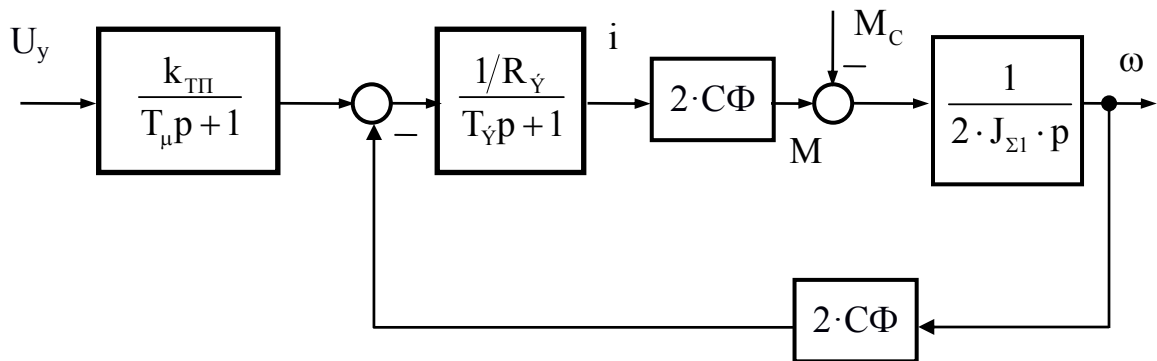


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електропривода

Одним із сучасних методів побудови уніфікованих систем автоматичного керування електроприводом є принцип підпорядкованого регулювання параметрів. При цьому об'єкт управління представляється в вигляді ланцюжка послідовно з'єднаних ланок, на виході кожного з яких формується той чи інший параметр. Важливою перевагою системи підпорядкованого управління є можливість обмеження величини підпорядкованого параметра шляхом обмеження вихідного сигналу регулятора зовнішнього контуру [3-4].

Найбільш поширеним в уніфікованих системах управління принципом побудови регулятора є компенсація основних інерційностей об'єкта управління. Принцип компенсації можна сформулювати наступним чином: кожній ланці об'єкта управління з великою сталою часу має відповідати ланка зі зворотним функцією передачі в складі регулятора. Тоді, якщо не враховувати впливу малих сталих часу, передавальна функція розімкненої системи є безінерційна ланка. Виходячи з вищесказаного, складемо структурну схему системи регулювання швидкості, яка приведена на рис. 4.2.

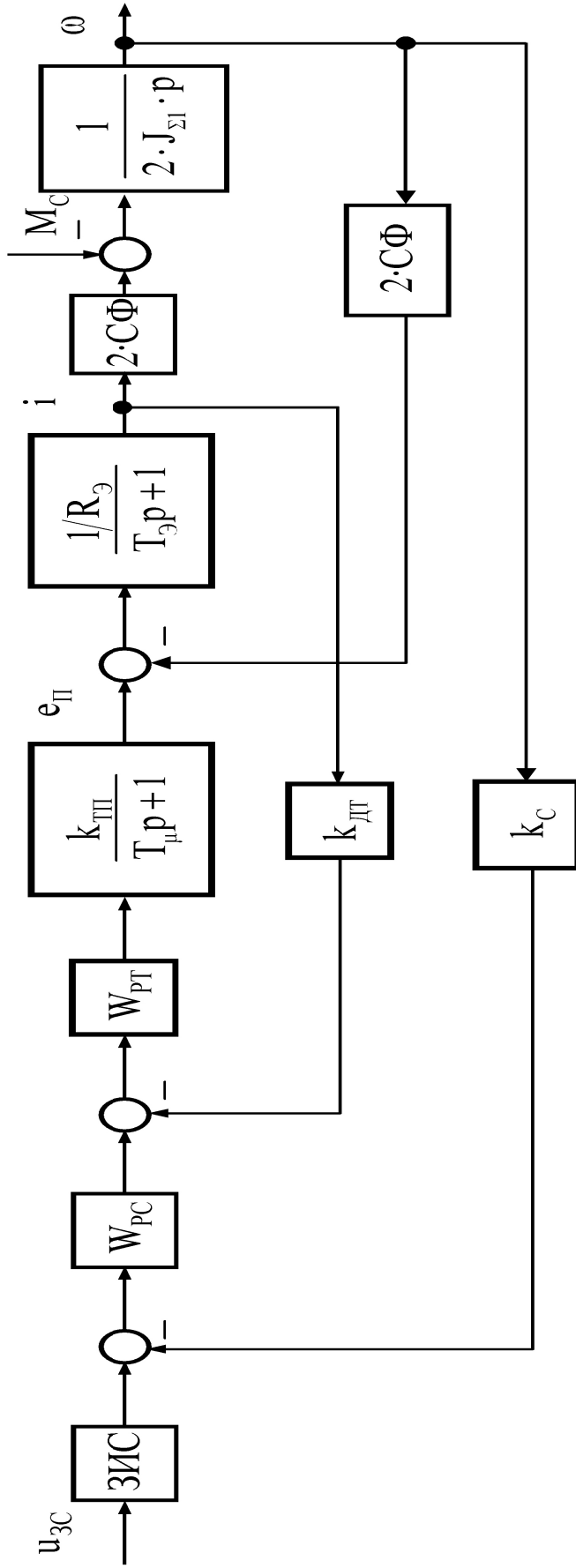


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи управління

4.2 Розрахунок регулятора струму

На рисунку 4.3 представлена структурна схема контуру струму.

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

$$W_{PT}(p) = K_{PT} \cdot \frac{T_{\Theta}p + 1}{T_{\Theta}p} \quad (4.1)$$

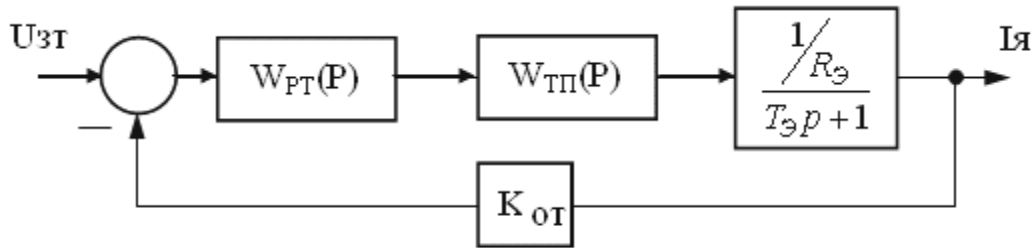


Рисунок 4.3 – Структурна схема контуру струму

Як видно з формули (4.1) регулятор струму - ПІ регулятор. Статичний коефіцієнт посилення регулятора струму:

$$K_{PT} = \frac{R_{\Theta} \cdot T_{\Theta}}{K_{ТП} \cdot K_{ОТ} \cdot T_{ОТ}} = \frac{0.275 \cdot 0.015}{51.3 \cdot 0.054 \cdot 0.01} = 0.149 \quad (4.2)$$

де $T_{ОТ} = 2T_{\mu} \cong 0.01$ с.;

$K_{ОТ} = \frac{U_{ЗТМАХ}}{I_{МАХ}} = \frac{10}{185} = 0.054$ В/А - коефіцієнт передачі ланки

зворотнього зв'язку по струму з урахуванням що:

- максимальний сигнал завдання на струм $U_{ЗТМАХ} = 10$ В;

- максимально допустимий струм якоря двигуна:

$$I_{МАХ} = \lambda_1 \cdot I_H = 2.5 \cdot 74 = 185 \text{ А} .$$

Спрощена функціональна схема контуру струму ТКЕ приведена на рисунку 4.4. Резистори з однаковими опорами позначені одним номером. На підсилювачі А1 обчислюється різниця $\Delta i = i_3 - i$. Сигнал i_3 утворюється на виході регулятора швидкості. Сигнал зворотного зв'язку i знімається з датчика струму ДТ1, підключеного до шунт в ланцюзі якоря двигуна.

Підсилювач А1 служить також для обмеження швидкості наростання струму в зв'язку з тим, що багато електродвигуни постійного струму не допускають великих швидкостей наростання струму. У ланцюзі зворотного зв'язку підсилювача А1 встановлена схема регульованого обмеження. Максимальні рівні напруг в елементах системи регулювання не перевищують 10 В.

Нехай коефіцієнт посилення підсилювача А1 дорівнює 1 ($R_1 = R_2$), а напруга обмеження дорівнює 10 В і нехай, наприклад, при відповідає 10 В. Тоді вихідна напруга підсилювача А1 в перший момент часу дорівнює 10 В, а потім, у міру збільшення i , зменшується. При цьому обмеження швидкості зміни струму не існує.

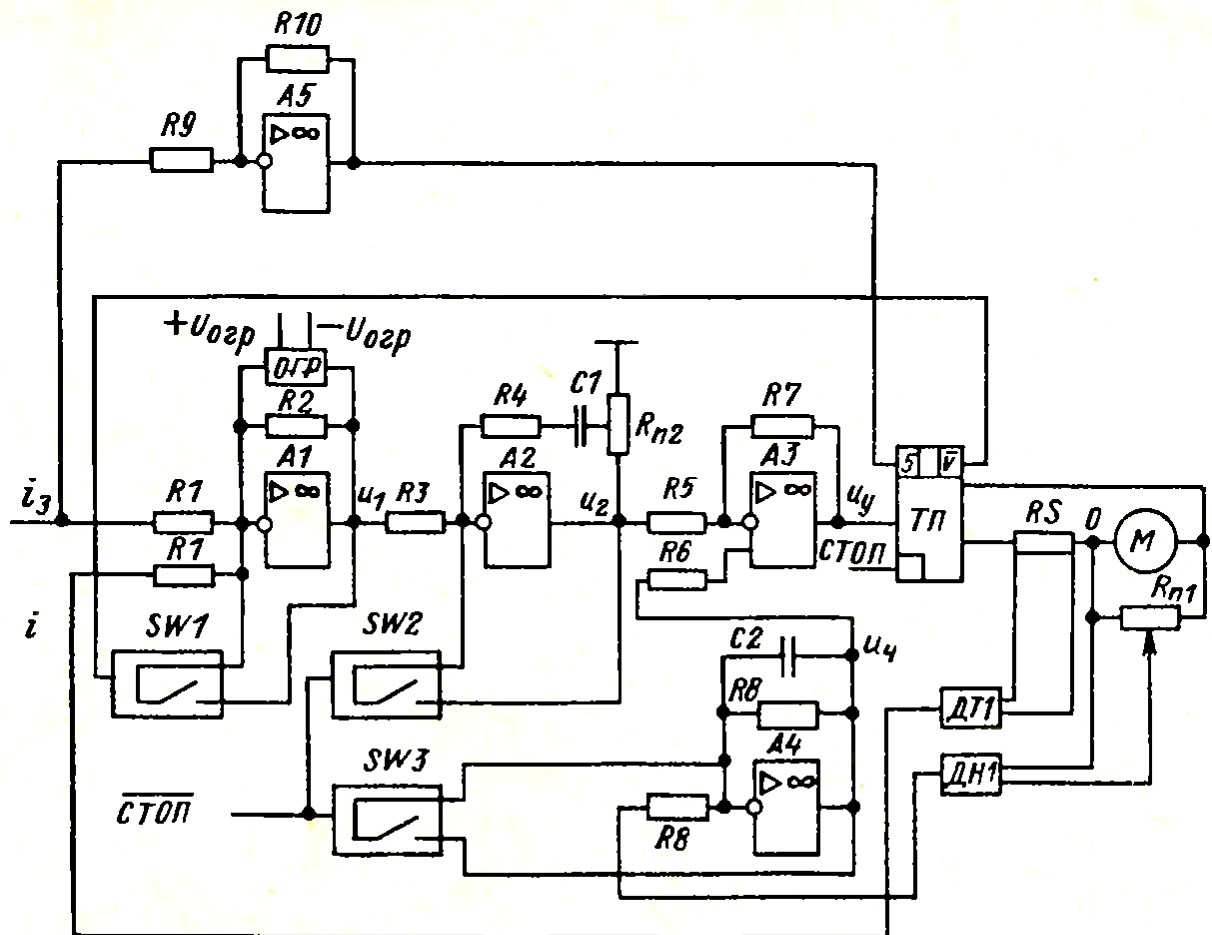


Рисунок 4.4 – Функціональна схема регулятора струму

Нехай тепер напруга обмеження $U_{огр}$ зменшено до 5 В. Вихідна напруга підсилювача А1 при тому ж завданні 10 В в перший момент дорівнюватиме

не 10, а 5 В. Тому і зміна напруги U_y буде меншим, ніж у першому випадку, а отже, і струм і буде наростати повільніше. Якщо ж напруга i_3 буде зменшено до 5 В, то обмеження не настане, і швидкість зміни струму буде колишньою, тобто високою.

Таким чином, ступінь обмеження швидкості наростання струму залежить від i_3 . Нехай коефіцієнт посилення підсилювача А1 встановлений рівним 2 ($R_2 / R_1 = 2$), а загальний коефіцієнт посилення регулятора залишається колишнім за рахунок збільшення, наприклад, опору резистора R_3 . При збільшенні сигналу i_3 на 5 В зміна вихідної напруги А1 мала дорівнювати 10 В, однак при $U_{ор} = 5$ У цю зміну одно тільки 5 В, що призведе до зменшення швидкості наростання струму якоря. Таким чином, збільшення коефіцієнта посилення підсилювача А1 призводить до зменшення значення i_3 , при якому настає обмеження швидкості зміни струму.

Вихідна напруга підсилювача А1 подається на вхід ОУ А2, що працює в пропорційно-інтегральному режимі, що забезпечує відсутність помилки в сталому режимі. Коефіцієнт передачі підсилювача за пропорційною складовою встановлюється резистором R_4 , а за інтегральною - конденсатором C_1 і положенням потенціометра $R_{п2}$ Вихідна напруга ОУ А2 надходить на вхід підсилювача регулятора напруги А3. На другий (НЕ інвертує) вхід А3 подано напругу підсилювача - фільтра А4, вхід якого через датчик напруги ДН і потенціометр $R_{п1}$ з'єднаний з якорем двигуна. Положення движка $R_{п1}$ вибирається таким, щоб при максимальній напрузі на якорі вхідна напруга ДН не перевищувало 10 В.

Основне призначення контуру напруги - поліпшення динаміки регулювання струму в режимі переривчастого струму. Це відбувається наступним чином. На рисунку 4.5 показані криві напруги перетворювача U і струму навантаження i в режимі безперервного струму для двох значень кута регулювання α , причому $\alpha_1 > \alpha_2$. При зменшенні α збільшується середнє

значення напруги, рівне E_d по (3.13). Фільтр А4 на рисунку 4.4 виділяє середнє значення напруги u_4 , яке віднімається з напруги u_2 .

Так як коефіцієнт посилення підсилювача А3 (тобто відношення опорів R_7 / R_5) вибирається досить великим (20-30), то з достатнім ступенем точності можна прийняти $u_2 \approx u_4$. З урахуванням рівності 1 коефіцієнта посилення фільтра А4 отримуємо такий вираз:

$$U_y = \frac{E_d}{k_{\text{ТП}}} = \frac{u_4}{k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{ДН}}} \approx \frac{-u_2}{k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{ДН}}} \approx -u_2 \frac{E_d}{10} \cdot \frac{U_{y.\text{max}}}{E_d} \approx -u_2 \quad (4.3)$$

Тут позначено $k_{\text{ДН}}$ - коефіцієнт передачі датчика напруги ДН з урахуванням потенціометра $R_{\text{П}}$ (Тобто відношення напруги на виході ДН до напруги на якорі двигуна) і прийнято, що вихідна напруга ДН дорівнює 10 В при напрузі на якорі E_d і що $U_{y.\text{max}} = 10\text{В}$.

Припустимо, що напруга u_2 збільшилася стрибком. Завдяки наявності фільтра А4 напруга u_4 стрибком змінитися не може, тому в перший момент часу зміна напруги u_4 буде значно більше, ніж в сталому режимі. Це призведе до відкривання перетворювача з меншим кутом i , отже, до форсування процесу наростання струму в ланцюзі якоря (швидкість зміни струму при незмінному куті визначається постійною часу ланцюга якоря T_E , що дорівнює відношенню індуктивності якорного ланцюга до її опору).

З плином часу відбувається процес наростання струму з постійною часу T_Δ і процес наростання напруги на виході фільтра А4, який визначається постійною часу фільтра T_Φ (де постійна часу чисельно дорівнює добутку R_8 на C_2). Якщо вибрати $T_\Phi = T_\Delta$, то можна показати, що постійна часу T_Δ буде практично скомпенсована. Це означає, що при стрибку напруги u_2 ток i буде змінюватися по експоненті з малою постійною часу T_μ . Для компенсації постійної часу T_μ служить резистор R_4 , який вибирається з умови $T_\mu = R_4 \cdot C_1$. При описаному виборі параметрів швидкодія контуру

визначається положенням движка потенціометра $R_{П2}$ при переміщенні движка до спільної точки швидкодія зростає.

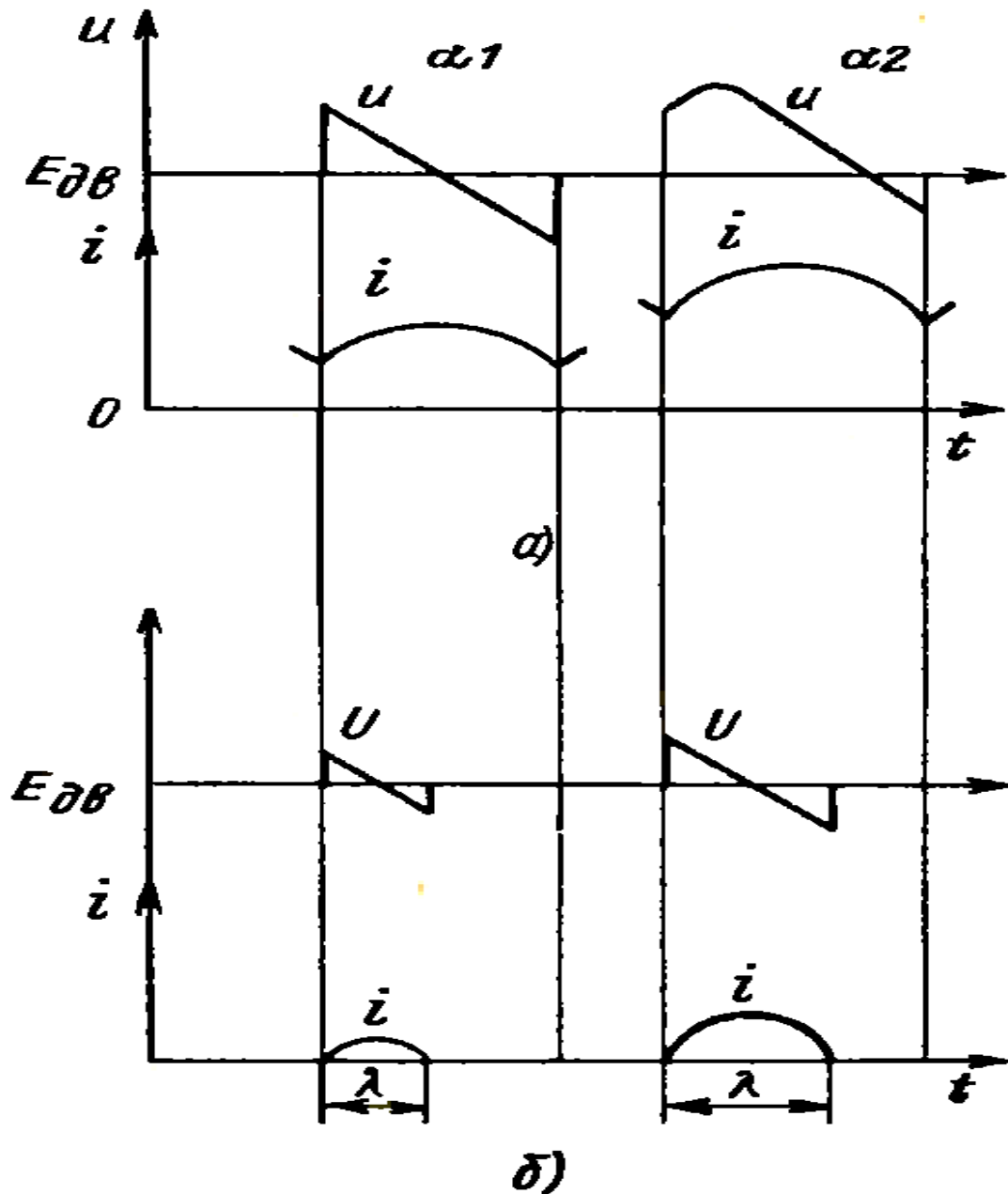


Рисунок 4.5 – Діаграми струмів і напруг перетворювача

У режимі переривчастого струму коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача різко падає, причому тим більше, чим менше тривалість протікання струму. В системі без внутрішнього контуру напруги в 10 разів і більше збільшується час перехідних процесів. Для ліквідації цього недоліку потрібно в режимі переривчастого струму істотно збільшити коефіцієнт

посилення контуру регулювання струму. Це досягається наступним чином. На рисунку 4.5б зображені криві напруги перетворювача в режимі переривчастого струму. Середнє значення напруги E_d дорівнює ЕРС двигуна $E_{дв}$ незалежно від кута α , тобто зміна α , а отже, і напруги управління U_y не впливає на середнє значення вихідної напруги підсилювача А4.

Нехай ЭДС двигуна, обумовлена його швидкістю, змінюється значно повільніше, ніж струм. Тоді можна вважати, що за час перехідного процесу в контурі струму ЭДС не зміниться; також не зміниться напруга u_4 . Тому u_4 буде дорівнювати $u_2 \cdot R7 / R5$, т.е. значно більше, ніж в режимі безперервного струму (когда $u_2 \approx u_4$). Таким чином, в режимі переривчастого струму відбувається різке збільшення коефіцієнта посилення контуру регулювання струму, завдяки чому забезпечується приблизно таке ж швидкодію, як і в режимі безперервного струму.

Застосування контуру напруги вимагає досить точного налаштування параметрів регулятора. Якщо електропривод в режимі переривчастого струму не працює або характеристики в цьому режимі не мають значення, то контур напруги можна виключити. При цьому потрібно відключити зв'язок між виходом ОУ А4 і входом ОУ А3, а коефіцієнт посилення А3 встановити рівним 1 ($R7 = R5$). Для компенсації постійної часу якірного ланцюга ТЕ збільшують опір резистора R4 так, щоб виконувалося рівність:

$$T_3 = R4 \cdot C1 \quad (4.5)$$

У регуляторі струму є ряд додаткових вузлів. Підсилювач А5 з великим коефіцієнтом посилення визначає необхідність роботи того чи іншого випрямного моста (В або Н) в залежності від знака i_3 . Безконтактний ключ SW1 замикається під час бестокової паузи при перемиканні випрямних мостів. Призначення його наступне. Під час бестокової паузи $i = 0$, а сигнал i_3 не дорівнює нулю. Цей сигнал під час паузи буде інтегруватися (накопичуватися) на виході підсилювача А2. При подачі керуючих імпульсів на вступає в роботу випрямний міст напруга u_2 , а отже, і напруга U_y будуть

відрізнятися від тих значень, які були в момент зняття імпульсів з попереднього моста. Це призводить до перерегулювання струму при включенні моста - аж до спрацьовування захисту. Якщо ж за допомогою ключа SW1 з'єднати вхід підсилювача А1 з його виходом, то напруга на виході А1 дорівнюватиме нулю і, отже, під час паузи накопичення напруги u_1 підсилювачем А2 не відбудеться. Ключ SW1 спрацьовує від логічного сигналу, який виробляється в СІФУ.

Ключі SW2 і SW3 замикаються при появі логічного сигналу $\overline{\text{стоп}}$ (активний рівень - логічний нуль, на що вказує риска зверху). Цей сигнал виробляється в схемі завдання швидкості. Одночасно сигнал "стоп" впливає на СІФУ, забороняючи подачу керуючих імпульсів на обидва випрямних мосту. Призначення цього логічного сигналу - забезпечити надійну стоянку двигуна і запобігти дрейф нульових рівнів підсилювачів.

Підсилювачі А1-А5, ключі SW1, SW3 і пов'язані з ним резистори і конденсатори розміщені в осередку РТ-1АІ перетворювача ТКЕ.

В соответствии с предыдущим описанием регулятора тока преобразователя КТЭ и рассчитанными значениями коэффициента и постоянной времени данного регулятора, определим значения резисторов и конденсаторов схемы. Для ограничения нарастания тока устанавливаем значение $U_{огр} = 5В$, а коэффициент усиления подсилювача А1 рівним 2, тобто $k_{A1} = 2$.

$$k_{A1} = R2/R1 = 2 \quad (4.6)$$

Вибираємо резистори типу МЛТ-0,125: $R2 = 20 \text{ кОм}$, $R1 = 10 \text{ кОм}$.

Так як привід підйому працює при значних навантаженнях, то необхідність в регуляторі напруги відпадає. При цьому потрібно відключити зв'язок між виходом ОУ А4 і входом ОУ А3, а коефіцієнт посилення А3 встановити рівним 1 ($R7 = R5$):

$$k_{A3} = R7/R5 = 1 \quad (4.7)$$

Резистор виключаємо зі схеми і вибираємо резистори типу МЛТ-0,125:
 $R7 = R5 = 10 \text{ кОм}$.

За формулою (4.5) налаштуємо постійну часу регулятора струму.
 вибираємо $C1 = 1 \text{ мкФ}$. Тоді значення визначимо за формулою:

$$R4 = \frac{T_{\Delta}}{C1} = \frac{0.015}{1 \cdot 10^{-6}} = 15000 \text{ Ом} = 15 \text{ кОм} \quad (4.8)$$

Вибираємо резистор типу МЛТ-0,125: $R4 = 15 \text{ кОм}$. Підстроювання постійної часу проводиться резистором $R_{п2}$.

Загальний коефіцієнт регулятора струму відповідає виразу:

$$K_{PT} = k_{A1} \cdot k_{A2} \cdot k_{A3} \quad (4.9)$$

Звідки випливає:

$$k_{A2} = \frac{K_{PT}}{k_{A1} \cdot k_{A3}} = \frac{0.149}{2 \cdot 1} = 0.075$$

$$(4.10)$$

Опір резистора $R3$ буде наступним:

$$R3 = \frac{R4}{k_{A2}} = \frac{15000}{0.075} = 200000 \text{ Ом} = 200 \text{ кОм} \quad (4.11)$$

Вибираємо резистор типу МЛТ-0,125: $R3 = 200 \text{ кОм}$ з ряду точних резисторів Е48.

4.3 Розрахунок регулятора швидкості

У контур регулювання швидкості входить: об'єкт управління, що складається з оптимізованого контуру струму і механічної частини електроприводу; датчик швидкості; регулятор швидкості. Визначимо передавальну функцію замкнутого контуру струму:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{\frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{ОТ}}p} \cdot \frac{1}{K_{\text{ОТ}}}}{1 + \frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{ОТ}}p}} = \frac{\frac{1}{K_{\text{ОТ}}}}{T_{\text{ОТ}}T_{\mu}p^2 + T_{\text{ОТ}} + 1} \quad (4.12)$$

Оскільки T_{μ} - мала постійна часу, то $T_{\text{ОТ}}T_{\mu}p^2 = 2T_{\mu}^2p$ можна прирівняти нулю, тоді передавальна функція контуру струму набуде вигляду:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1/K_{\text{ОТ}}}{T_{\text{ОТ}}p+1}. \quad (4.13)$$

Таким чином, на малюнку 4.6 представлена структурна схема регулятора швидкості.

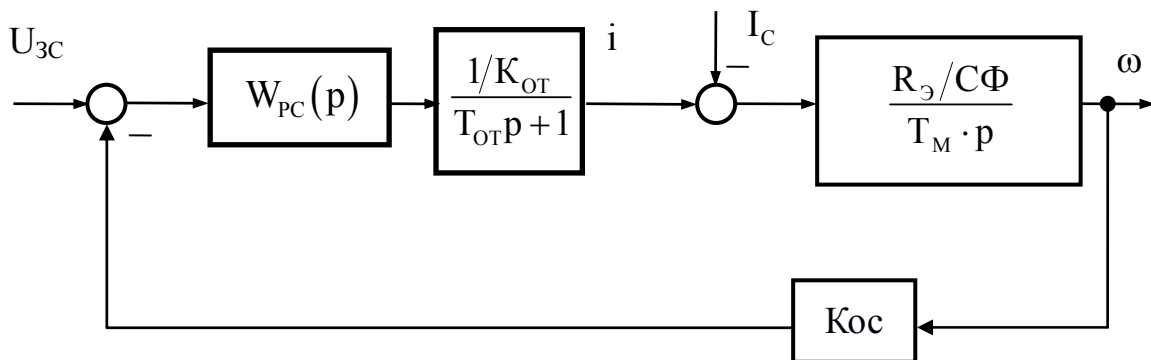


Рисунок 4.6 – Структурна схема контуру швидкості

Залежно від вимог, що пред'являються технологією до електроприводу механізму, контур швидкості виконують одноразово інтегруючим (з П - регулятором) або дворазово інтегруючим (ПІІ - регулятором).

Для систем підпорядкованого регулювання швидкості механізму підйому застосовується ПІІ - регулятор.

Передавальна функція регулятора швидкості при оптимізації контура на симетричний оптимум матиме вигляд:

$$W_{\text{РТ}}(p) = K_{\text{РС}} \cdot \frac{4 \cdot T_{\text{ОТ}}p + 1}{4 \cdot T_{\text{ОТ}}p} \quad (4.14)$$

Статичний коефіцієнт посилення регулятора швидкості:

$$K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot T_M \cdot C\Phi_H}{R_{\Sigma} \cdot K_{OC} \cdot T_{OC}} = \frac{0.054 \cdot 0.027 \cdot 6.78}{0.275 \cdot 0.159 \cdot 0.02} = 12.56 \quad (4.15)$$

де K_{OC} - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості;

$T_{OC} = 4T_{\mu} = 0.02$ с. – постійна часу інтегрування контуру швидкості;

$$K_{OC} = \frac{U_{3C_{MAX}}}{\omega_{MAX}} = \frac{10}{62.8} = 0.159 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад} - \text{коефіцієнт передачі ланки}$$

зворотнього зв'язку за швидкістю з урахуванням того, що:

- максимальний сигнал завдання на швидкість $U_{3T_{MAX}} = 10$ В.

Спрощена схема регулятора швидкості показана на рисунку 4.7. На підсилювачі А1 виділяється різниця $\Delta\omega = \omega_3 - \omega$. Напряга ω_3 виробляється в схемі завдання швидкості. Сигнал ω формується на виході датчика напруги ДН2, підключеного через потенціометр $R_{ПЗ}$ до тахогенератора ВР. Фільтр з конденсатора С1 і резистора R1 згладжує пульсації напруги тахогенератора, а з конденсатора С2 і резистора R2 зменшує перерегулювання САР при впливі за завданням. Коефіцієнт посилення ОУ А1 регулюється потенціометром R3. У ланцюзі зворотного зв'язку підсилювача встановлена осередок множення ХУ, яка реалізує операцію $z = x \cdot y$. Як сигнал у використовується напруга, пропорційне потоку збудження двигуна Φ . При такому включенні вихідна напруга підсилювача А1 пропорційно відношенню $\Delta\omega/\Phi$.

Необхідність введення операції ділення пов'язана з наступним. Припустимо, що сигнал завдання струму i_3 змінюється на величину Δi_3 . Зміна крутного моменту двигуна, пропорційне твору $\Delta i \cdot \Phi$, визначає швидкість зміни ω (прискорення двигуна) а. Ставлення прискорення а до помилки визначає швидкодію системи регулювання швидкості. Так як відношення $\Delta i_3/\Delta\omega$ обернено пропорційно величині Φ , а відношення $a/\Delta i_3$ прямо пропорційно Φ , то ставлення $a/\Delta\omega$ от Φ не залежить. Таким чином, введення осередку множення забезпечує сталість динамічних характеристик системи регулювання.

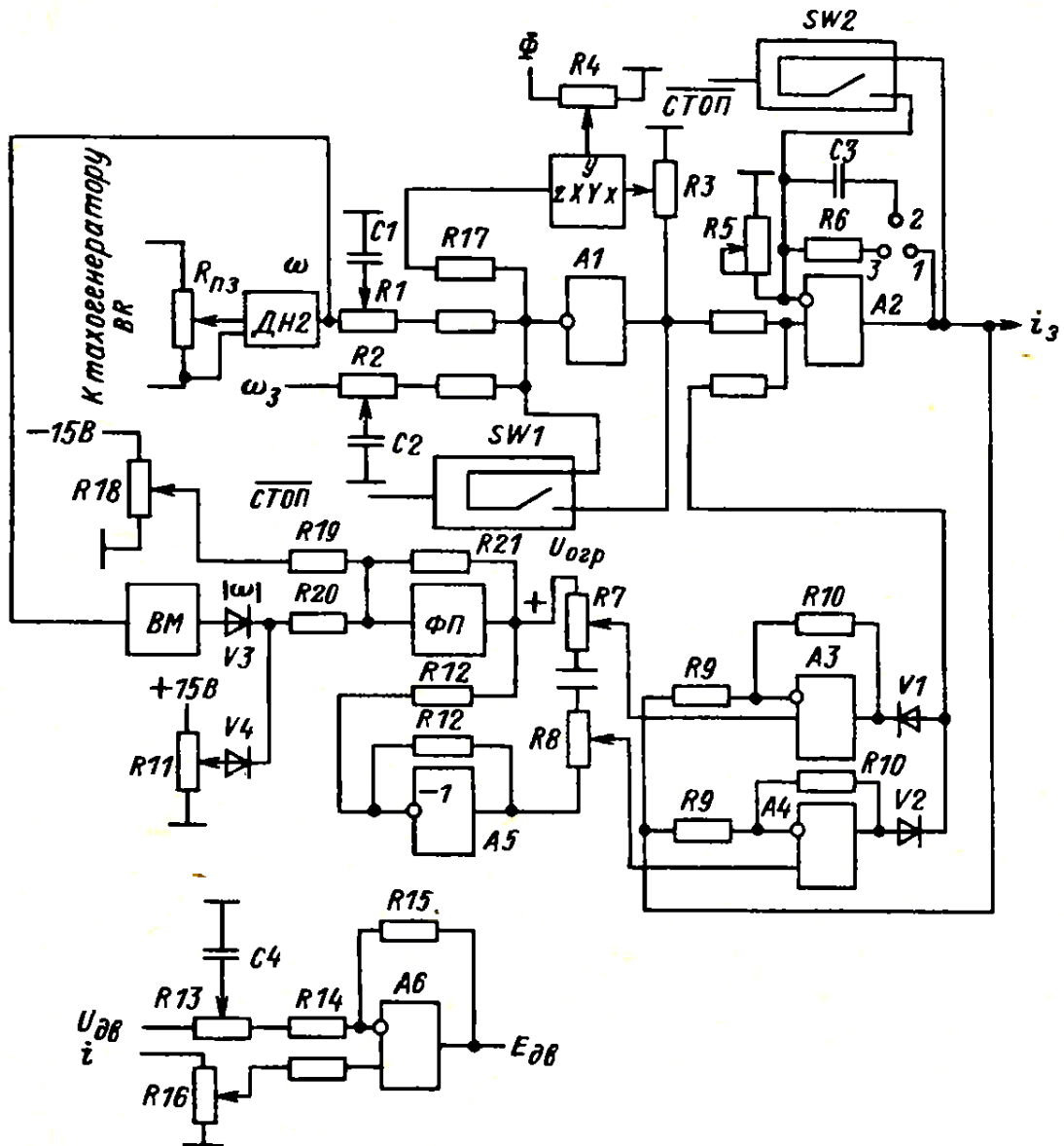


Рисунок 4.7 – Схема регулятора швидкості

Підсилювач А2 може працювати в пропорційному режимі при установці перемички 1-3 і пропорційно-інтегральному при установці перемички 1-2. Установка коефіцієнта посилення в першому випадку або постійної інтегрування в другому здійснюється резистором R5. У ланцюзі зворотного зв'язку підсилювача А2 є вузол точного обмеження, виконаний на підсилювачах А3, А4. Рівень обмеження визначається положеннями движків резисторів R7, R8. Часто значення обмеження залежить від частоти обертання двигуна. Наприклад, для двигунів серії Д при номінальній напрузі на якорі 220 В допускається перевантаження, рівна 2,6-3, а при збільшенні

частоти обертання в 2 рази за рахунок збільшення напруги до 440 В перевантаження дорівнює 1,5.

Зниження перевантаження в функції частоти обертання в схемі забезпечується пристроєм, що складається з осередку виділення модуля ВМ, осередки нелінійного перетворення ФП, підсилювача-інвертора А5, діодів V3, V4 і вузла точного обмеження. Пристрій працює наступним чином. Поки напруга на виході ВМ менше напруги, що задається потенціометром R11, діод V3 закритий, V4 відкритий. Напруги на вході і виході ФП постійні (не залежить від ω). При цьому на виході ФП сигнал $U_{\text{огр}}$ позитивної полярності (за рахунок напруги, що знімається з потенціометра R18), а на виході А5 - негативною.

Коли сигнал $|\omega|$ перевищить напруга, що знімається з движка R11, сигнал $U_{\text{огр}}$ на виході ФП почне зменшуватися, що призводить до зниження напруги, що живить потенціометри R7, R8 і, отже, до зниження рівня обмеження струму. За допомогою ФП може бути реалізована необхідна нелінійна залежність значення перевантаження від частоти обертання.

У ланцюзі зворотного зв'язку підсилювачів А7, А2 встановлені безконтактні ключі SW1, SW2, призначення яких таке ж, як і ключів SW2, SW3 в схемі регулятора струму. На схемі показаний також вузол вимірювання ЕРС двигуна $E_{\text{дв}}$, виконаний на підсилювачі А6. Напруга $E_{\text{дв}}$ використовується в системі управління полем двигуна. Якщо не пред'являються високі вимоги до точності регулювання швидкості, замість напруги тахогенератора можна використовувати $E_{\text{дв}}$ при цьому вихід підсилювача А6 використовується замість сигналу - з. Вимірювання ЕРС здійснюється вирахуванням з напруги на якорі двигуна $U_{\text{дв}}$ напруги, пропорційного струму якоря i , так як в сталому режимі $E_{\text{дв}} = U_{\text{дв}} - I_{\text{д}} \cdot R_{\text{дв}}$, де $I_{\text{д}}$ - середнє значення струму, $R_{\text{дв}}$ - опір якірного ланцюга двигуна. Фільтр, постійна часу якого визначається ємністю конденсатора С4 і потенціометром

R13, служить для компенсації падіння напруги в якірного ланцюга, викликаного індуктивністю цього ланцюзі при зміні струму якоря.

Підсилювачі A1 - A4, A6, ключі SW1, SW2 розміщені в осередку регулятора швидкості РС-1АІ.

4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

Для розгону і гальмування двигуна з динамічним струмом, меншим уставки струмообмеження застосовуємо задатчик інтенсивності, що перетворює ступінчастий сигнал завдання швидкості в лінійно змінюється в часі.

Стале значення напруги виходу задатчика інтенсивності, яке подається на вхід регулятора швидкості, так само вхідного сигналу, тобто задатчик інтенсивності швидкості необхідний для обмеження струму двигуна в перехідних процесах.

Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості наведена на малюнку 4.8.

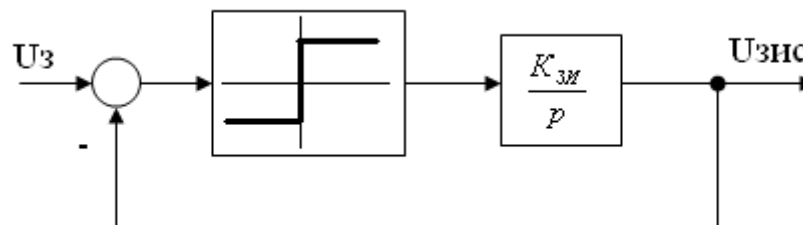


Рисунок 4.8 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Динамічний струм обмежимо на рівні $I_j = 1.5 \cdot I_H = 1.5 \cdot 74 = 111 \text{ A}$.

Динамічний момент відповідно складе:

$$M_j = C\Phi_H \cdot I_j = 6.78 \cdot 111 = 753 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.16)$$

Час розгону двигуна при цьому буде наступним:

$$t_p = J_\Sigma \frac{\omega_H}{M_j} = 4.72 \cdot \frac{62.8}{753} = 0.4 \text{ с} \quad (4.17)$$

Коефіцієнт передачі ЗІС:

$$K_{\text{И}} = \frac{U_{3\text{MAX}}}{t_p} = \frac{10}{0.4} = 25 \frac{\text{В}}{\text{с}}. \quad (4.18)$$

На рисунку 4.9 представлена функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості.

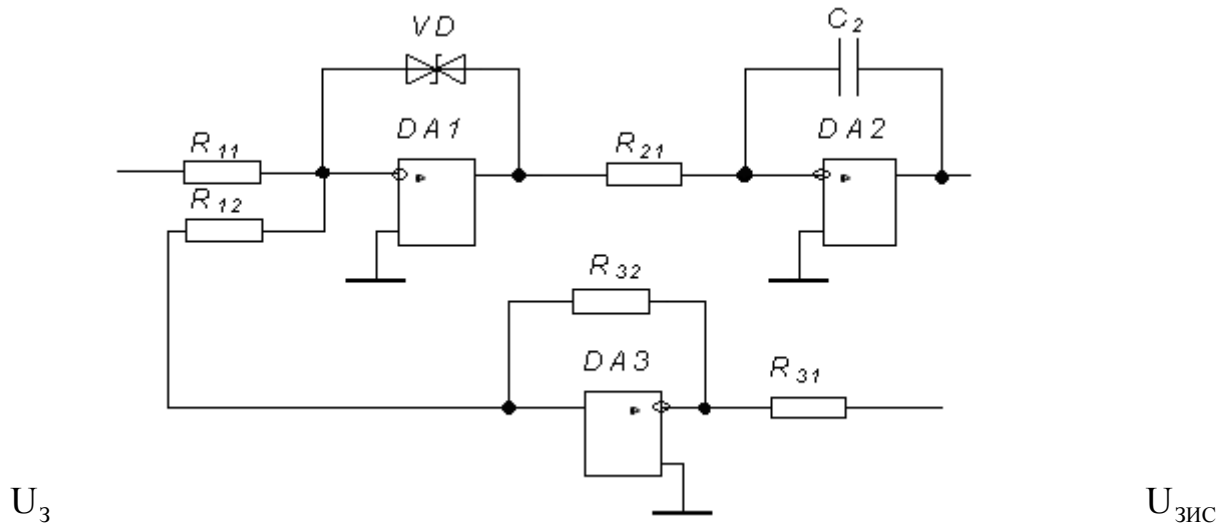


Рисунок 4.9 – Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості

Приймаємо конденсатор C_2 ємністю 2 мкФ.

Приймаємо:

$$R_{11} = R_{12} = 20 \text{ кОм};$$

$$R_{31} = R_{32} = 10 \text{ кОм}.$$

$$R_{21} = \frac{1}{K_{\text{И}} \cdot C_2} = \frac{1}{25 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ кОм}. \quad (4.19)$$

Вибираємо резистори R_{11} і R_{12} марки МЛТ-0.125, опором 20 кОм.

Вибираємо резистори R_{31} і R_{32} марки МЛТ-0.125, опором 10 кОм.

Вибираємо резистор R_{21} марки МЛТ-0.125, опором 16 кОм.

Вибираємо конденсатор C_{008} марки К50-6, ємністю 2 мкФ.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС210Б:

- напруга стабілізації - 10 В.

4.5 Вузол завдання швидкості КТЕ

Схема вузла завдання швидкості перетворювача КТЕ відображена на рис. 4.10. Сукупний сигнал завдання швидкості ω_3 формується на виході підсилювача A , в колі зворотного зв'язку якого встановлено вузол обмеження завдання. При індивідуальному завданні швидкості електроприводу використовується безступінчатий задатчик на основі сельсинового типу або ступінчастий контактний задатчик типу. У першому випадку для перетворення положення задатчика в напругу завдання використовується комірка $СЛЗ$, а в другому – комірка $СЗ$. Вихідна напруга однієї комірки надходить на вхід задатчика інтенсивності $ЗІ$.

Задатчик інтенсивності взаємодіє з вузлом зміни прискорення $УИУ$, призначеним для створення різних темпів розгону і гальмування. У випадку відсутності цього вузла значення прискорення при розгоні і гальмуванні однакові. В той же час, при прискоренні динамічний момент, що визначає значення прискорення, дорівнює різниці між моментом двигуна і моментом опору, а при уповільненні – сумі. Максимальний момент двигуна є заданою величиною і допустимий струм машини може бути перевищений. Якщо момент опору при розгоні і гальмуванні достатньо великий, допустимий динамічний момент при гальмуванні може бути помітно більшим, ніж при прискоренні, тобто значення a_T може бути суттєво більшим, ніж значення a_Y .

Вузол $УМУ$ забезпечує швидше зміну вихідної напруги $ЗІ$ при гальмуванні, ніж при прискоренні. Значення a_Y і a_T встановлюються незалежно один від одного за допомогою резисторів в узлі $УИУ$.

Можливість встановлення або коригування швидкості з інших схем передбачена за допомогою сигналів ω_{31} або ω_{32} , які подаються на потенційні роздільники $ПП1$, $ПП2$. Напругу ω_{32} можна подавати на вхід сумуючого підсилювача A або безпосередньо (за допомогою перемички $1-2$) або через задатчик інтенсивності (встановлюється перемичка $1-3$). Напруга ω_{31} подається на вхід підсилювача A через ключ $SW1$, для замикання якого

необхідно на його вхід управління подати логічний сигнал «робота» (активний рівень 0).

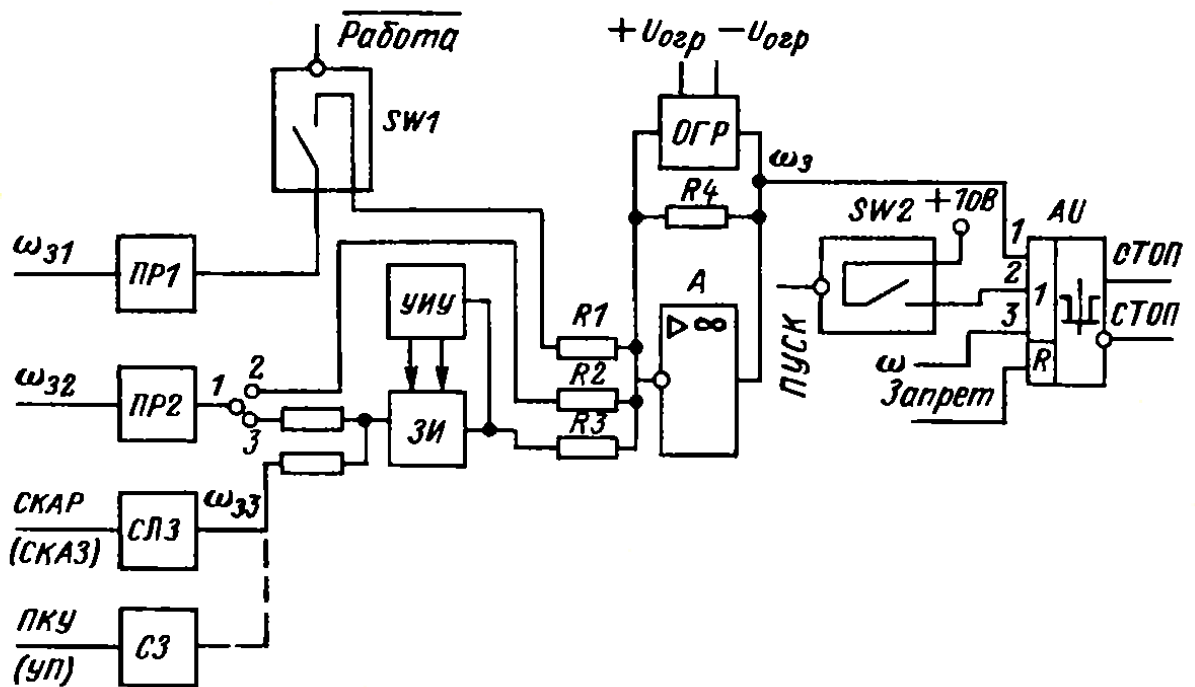


Рисунок 4.10 – Схема вузла завдання швидкості КТЕ

Вузол, що формує логічний сигнал «стоп» у схемах регуляторів струму та швидкості, виконаний на нуль-органі AU (під нуль-органом розуміється компаратор, у якого напруга порівняння дорівнює нулю, тобто нуль-орган спрацьовує при відмінності вхідної напруги від нуля). Логічний сигнал «стоп» генерується, якщо всі три вхідні сигнали AU рівні нулю. В якості двох з них використовуються сигнали заданої швидкості та фактичної швидкості. Таким чином, «стоп» може виникнути лише в тому випадку, коли як задана, так і фактична швидкості рівні нулю. Третій сигнал подається на вхід нуль-органа через ключ $K2$. Призначення цього ланцюга таке. До початку розгону сигнали і рівні нулю.

Вузол, який формує логічний сигнал «стоп» у схемах регуляторів струму і швидкості, втілено на нуль-органі AU (до нуль-органа слід розуміти компаратор, де напруга порівняння рівна нулю, тобто нуль-орган спрацьовує,

якщо вхідна напруга відрізняється від нуля). Логічний сигнал «стоп» формується, коли всі три вхідні сигнали AU рівні нулю. Два з них представлені сигналами заданої швидкості ω_3 та фактичною швидкістю ω . Таким чином, «стоп» активується лише у тому випадку, коли обидві задана і фактична швидкості рівні нулю. Третій сигнал поступає на вхід нуль-органа через ключ $K2$. Роль цієї схеми полягає в тому, що перед початком розгону сигнали і дорівнюють нулю. Якщо третій сигнал відсутній в системі, виникає логічний сигнал «стоп», підсилювачі регуляторів струму і швидкості короткозамкнуті, і керуючі імпульси відсутні в обох випрямних мостах. При з'яві сигналу на вході ZI його вихідна напруга лінійно зростає від нуля (при наявності інших схем напруга завдання, наприклад ω_{31} , також плавно змінюється від нуля). Чутливість нуль-органу AU (напруга, при якій він спрацьовує) становить приблизно 100-200 мВ. Поки не зросте до цього значення, система регулювання залишається вимкненою. При виході за межі цього порогу система активується. При спрацьовуванні AU може відбутися різке збільшення струму і ривок у механізмі, оскільки увімкнення системи регулювання відбувається при ненульовому вхідному напрузі. Для уникнення цього при з'яві сигналу завдання виробляється логічний сигнал «пуск», при цьому з'єднується ключ $SW2$, на вхід AU постачається напруга 10 В, і сигнал «стоп» знімається.

Якщо встановлюється завдання або генерується в системі управління технологічним агрегатом, то в цій самій системі також має бути сформований логічний сигнал «пуск». При завданні швидкості від СКАР або ПКУ (УП) для створення сигналу «пуск» може бути використаний один контакт $ПКУ$ або мікроперемикач положення командоапарата $СКАР$. Також можна подати на вхід AU вихідну напругу $C3$ або $СЛЗ$, обходячи $SW2$, оскільки вона змінюється стрибком. При подачі логічного сигналу «заборона» на вхід R нуль-органу AU логічний сигнал «стоп» формується незалежно від вхідних напруг AU .

4.6 Функціональна схема системи електроприводу

Функціональна схема електроприводу механізму підйому крана представлена на рис. 4.11. Ця схема розроблена відповідно до раніше наведених схем вузлів системи автоматичного регулювання.

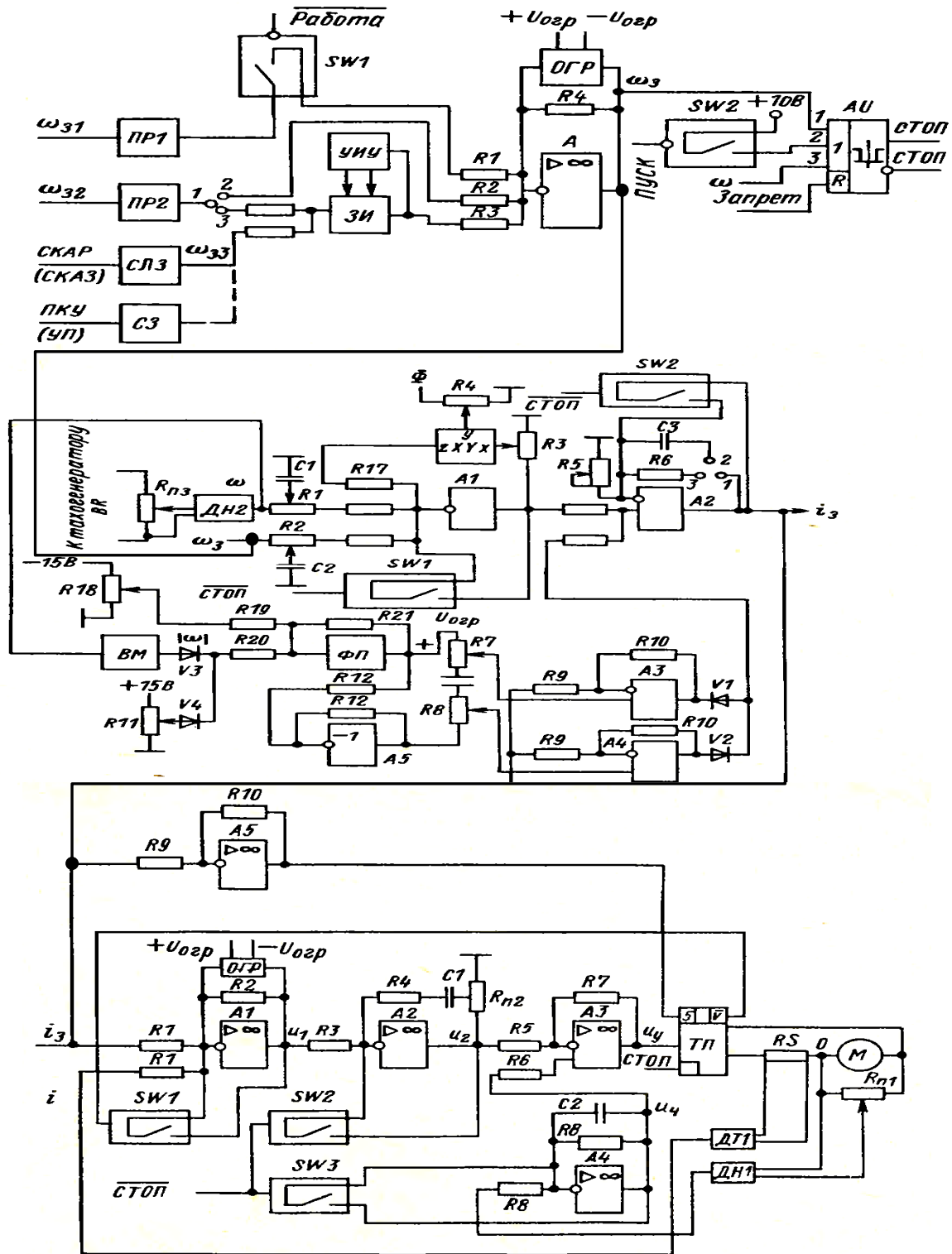


Рисунок 4.11 – Функціональна схема системи ЕП

4.7 Моделювання електропривода в середовищі MATLAB / SIMULINK

На рис. 4.12-4.15 представлена модель електроприводу підйому козлового крана, розроблена в середовищі моделювання динамічних систем Matlab / Simulink.

На рисунках 4.16 і 4.17 приведені результати моделювання роботи ЕП при розгоні і гальмуванні на холостому ході. На малюнку 4.18 представлені графіки пуску і гальмування електроприводу під навантаженням.

На рис. 4.19 - 4.22 наведені результати моделювання роботи ЕП при зміні параметрів об'єкта управління в межах $\pm 50\%$, що може бути викликано, наприклад, недообліку опору силових кабелів, сезонними коливаннями температури зовнішнього середовища, загустієм мастила і т.п.

Отримані перехідні процеси свідчать про правильність настройки системи. Досліджуваний електропривод з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним вимогам, що пред'являються до електроприводу при вихідних параметрах ОУ. При варіації (зменшення і збільшення) постійної часу T_3 , моменту інерції в широких межах система залишається працездатною. Ряд проведених варіацій призводять до незначної коливальності як ірнного струму електродвигуна, яка викликає його додатковий нагрів і вібрацію механічної частини технологічного обладнання.

Найбільш небезпечним режимом є обриви зворотних зв'язків за струмом та швидкості (рис. 4.23 - 4.24). Для виключення подібних аварійних режимів проєктований електропривод повинен бути оснащений системою захистів і сигналізації, яка відключає силовий перетворювач від мережі в цих випадках. У крайніх положеннях переміщення крана має контролюватися кінцевими вимикачами.

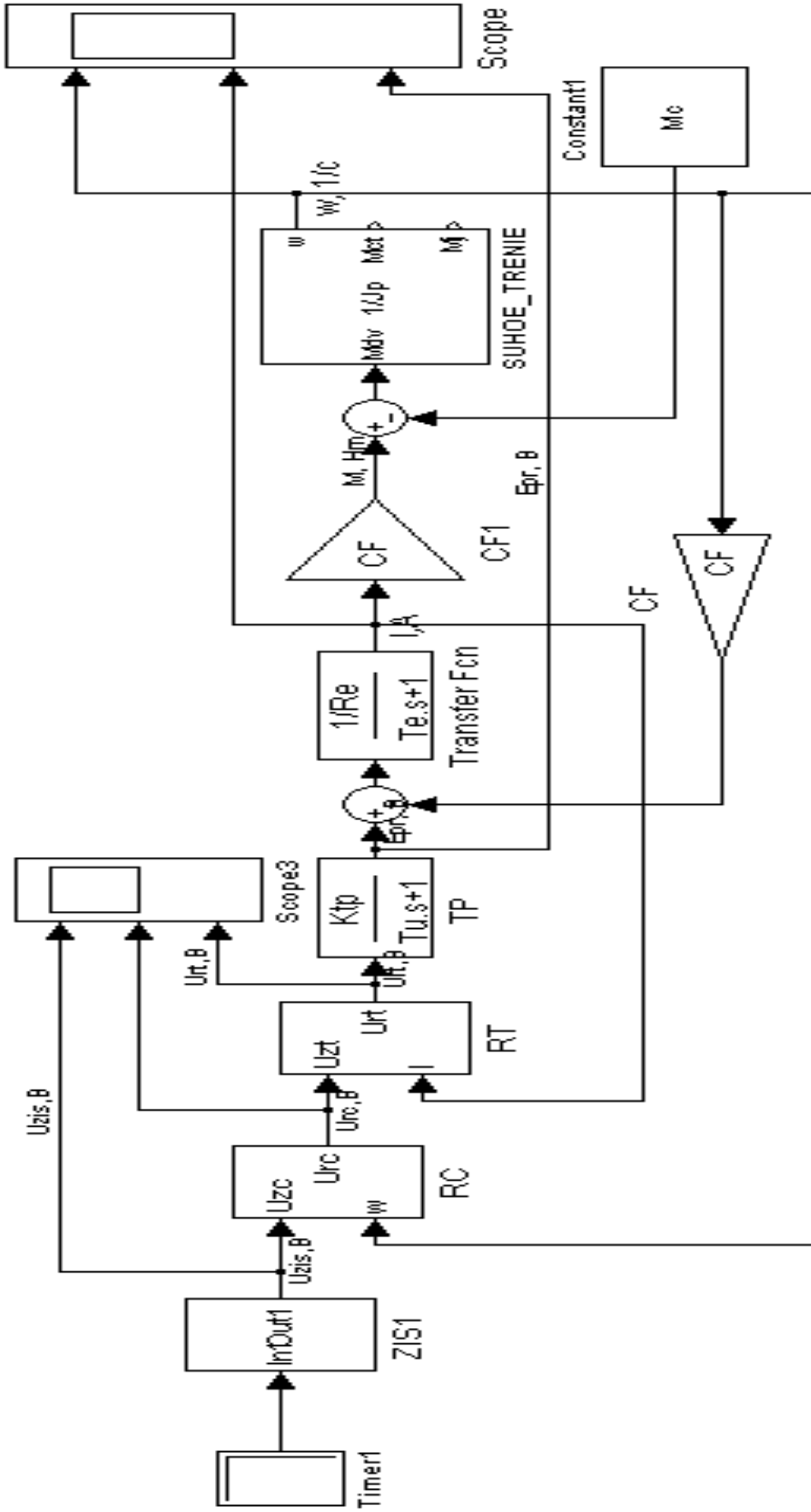


Рисунок 4.12 - Математична модель системи електроприводу

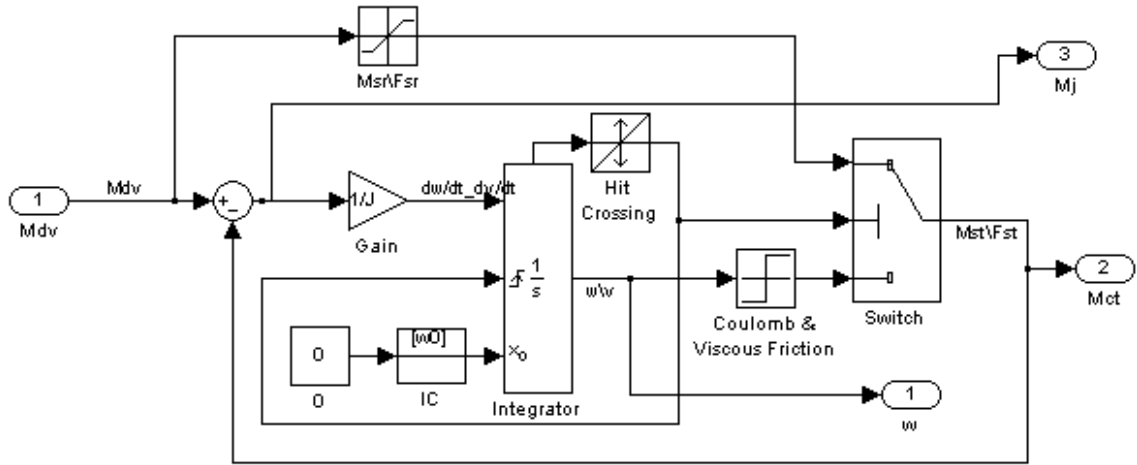


Рисунок 4.13 – Модель механічної частини приводу для уточненого моделювання сил сухого тертя

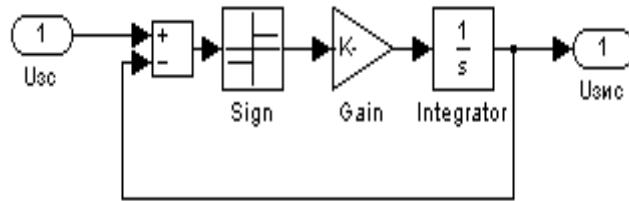


Рисунок 4.14 - Задатчик інтенсивності швидкості

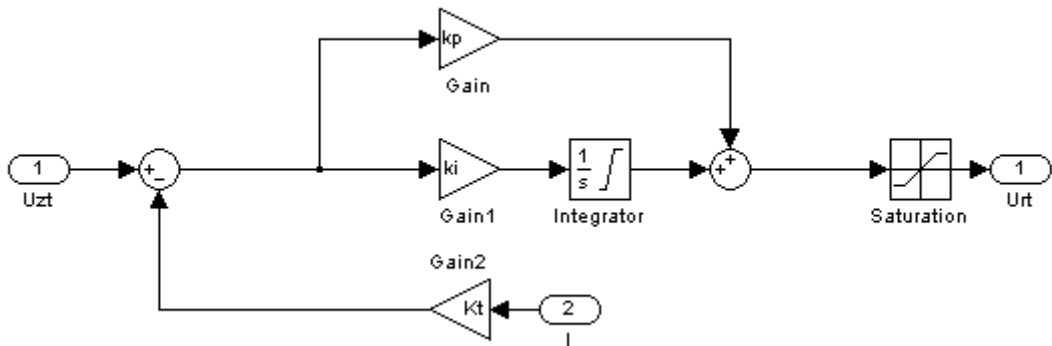


Рисунок 4.15 - Регулятор струму

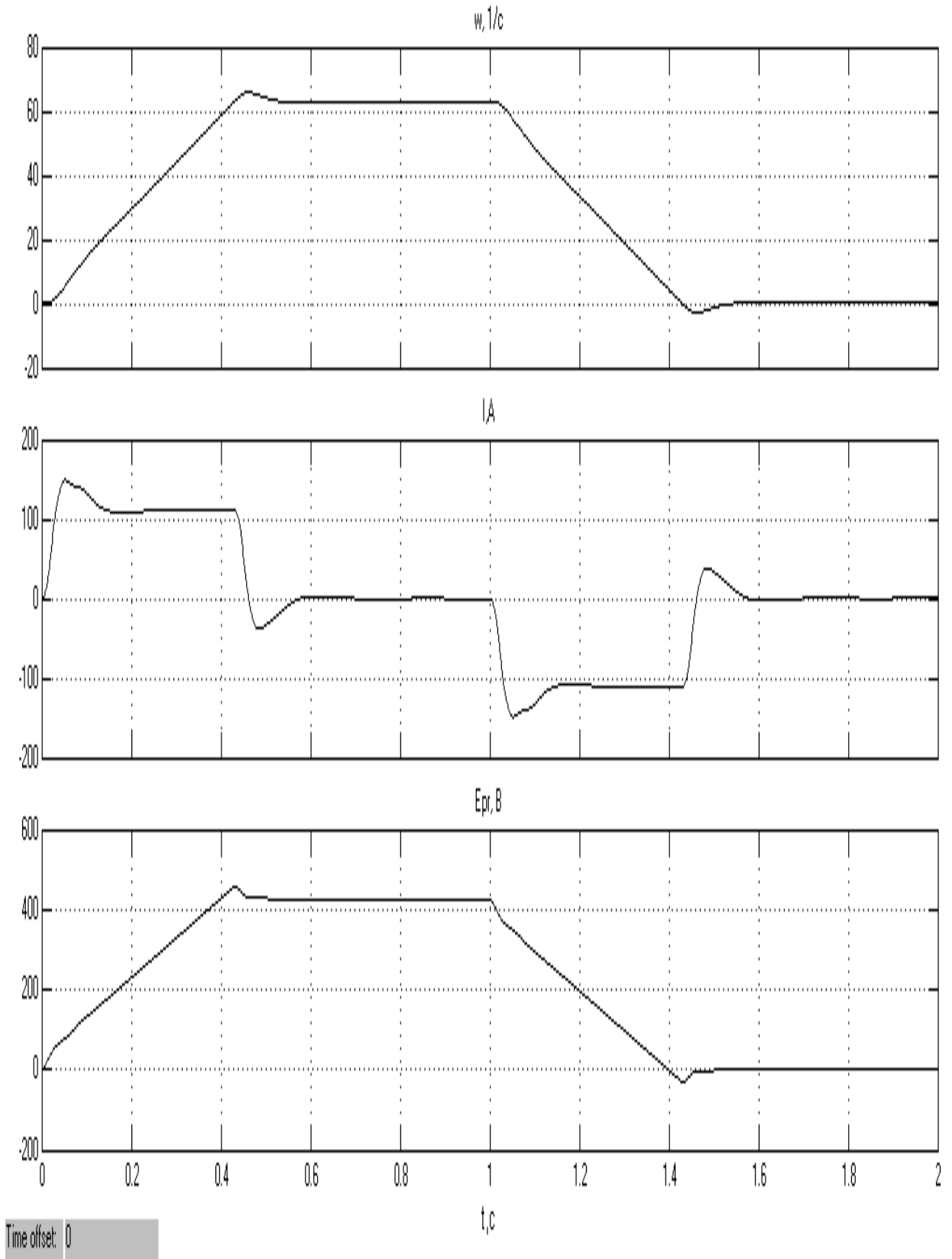


Рисунок 4.16 - Перехідні процес швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і гальмуванні на холостому ході

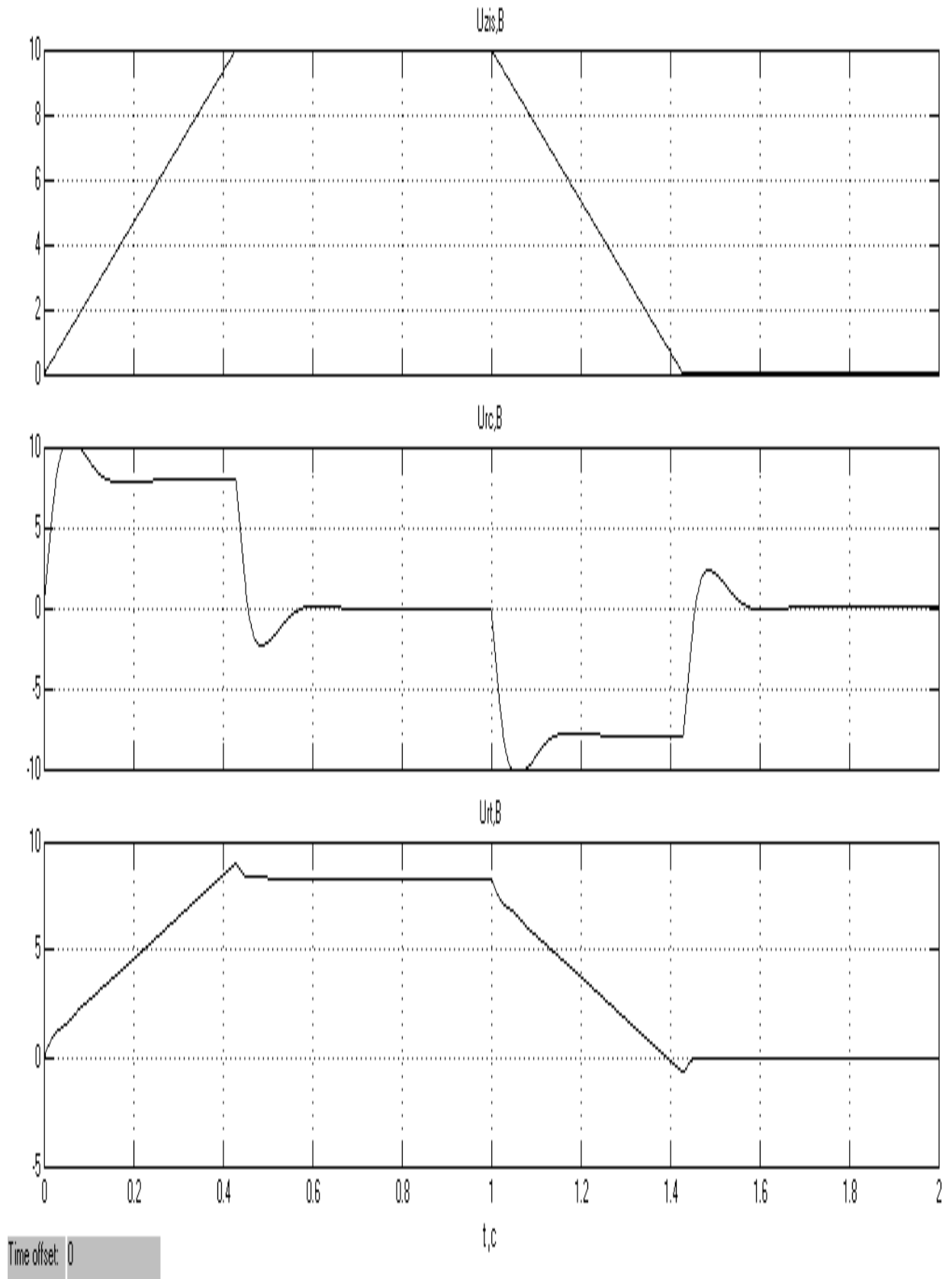


Рисунок 4.17 - Перехідні процеси напруги на виході ЗІС, регулятора швидкості та струму

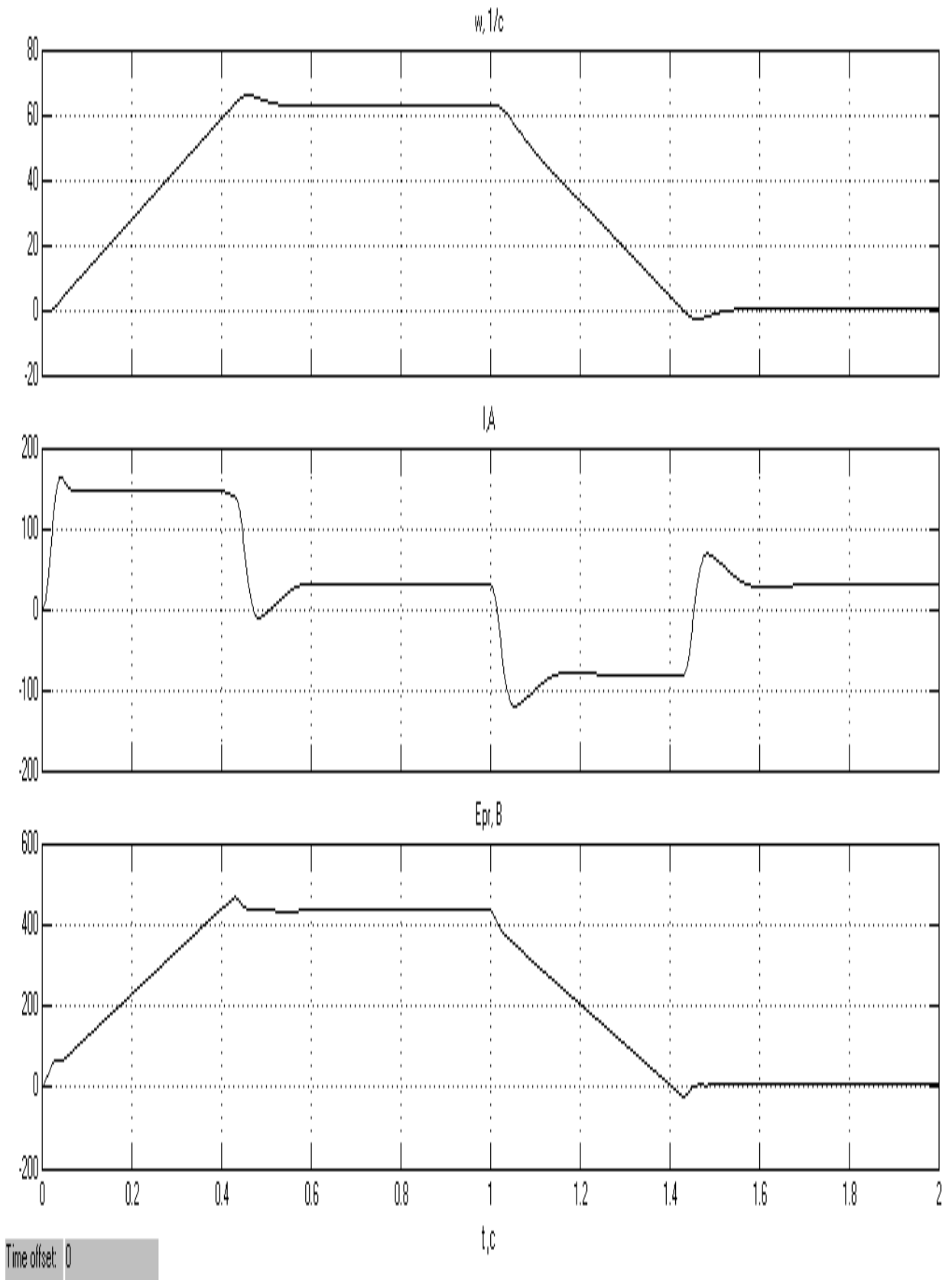


Рисунок 4.18 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і гальмуванні під навантаженням

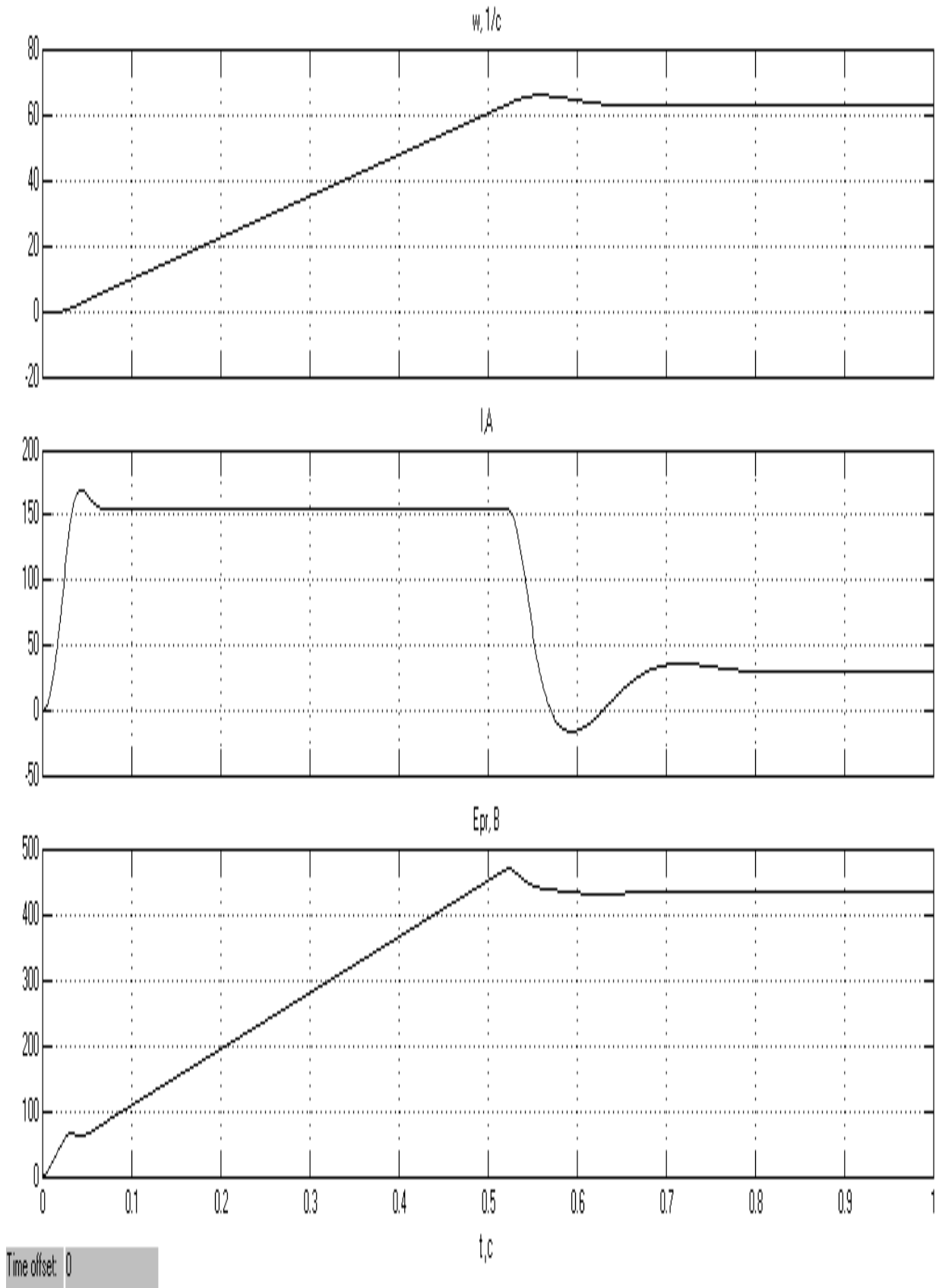


Рисунок 4.19 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

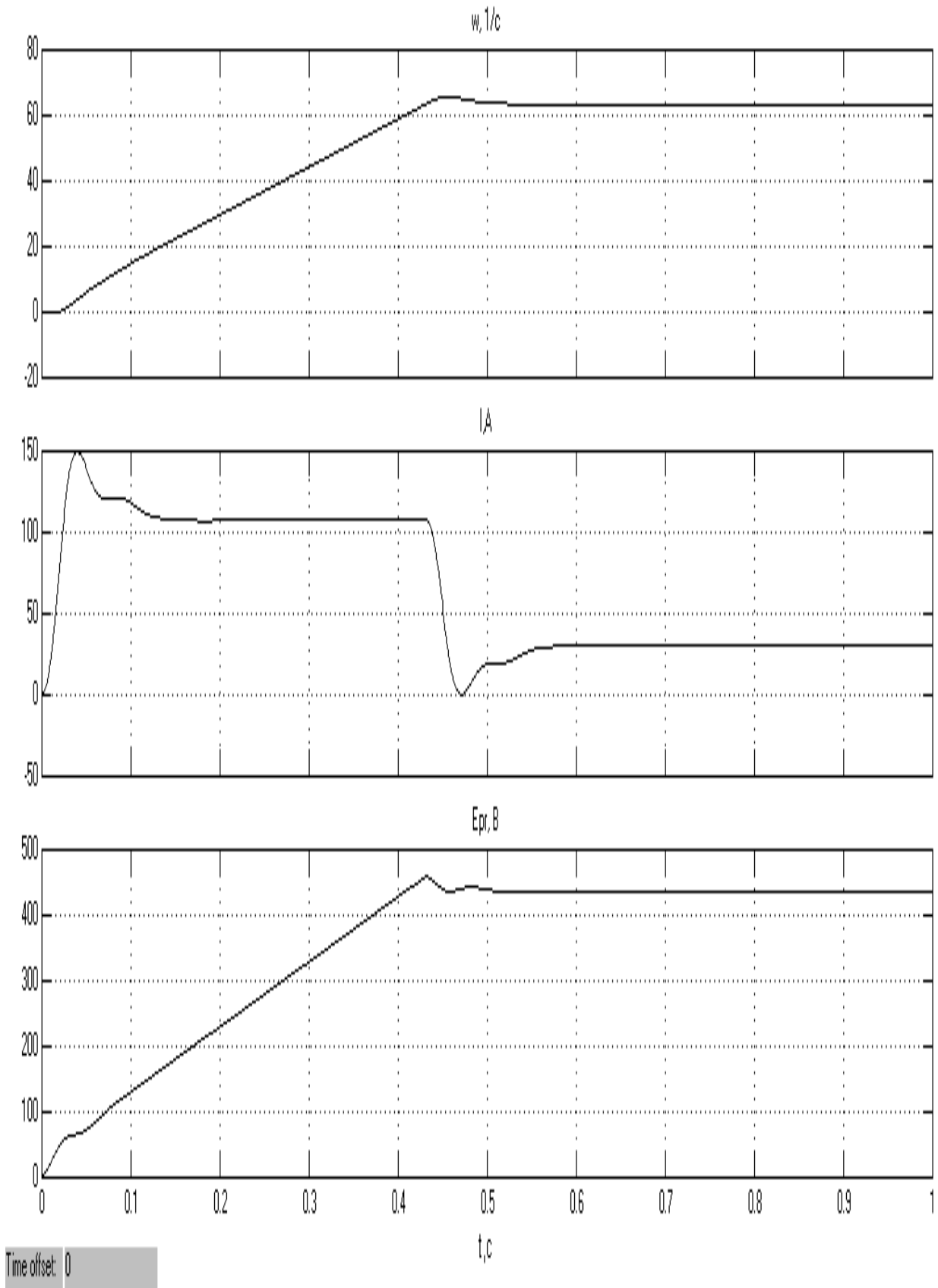


Рисунок 4.20 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

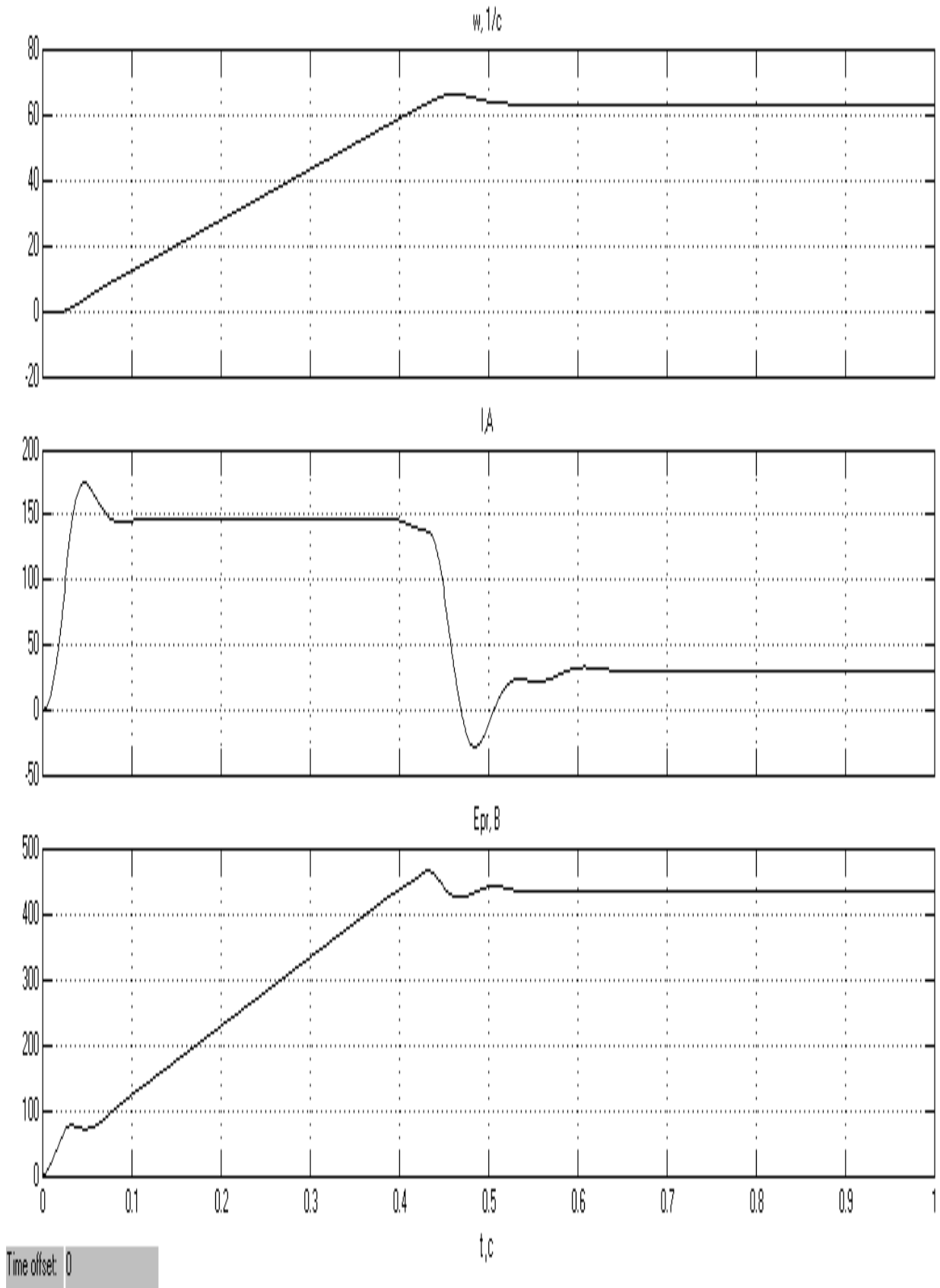


Рисунок 4.21 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,5 \cdot T_s$

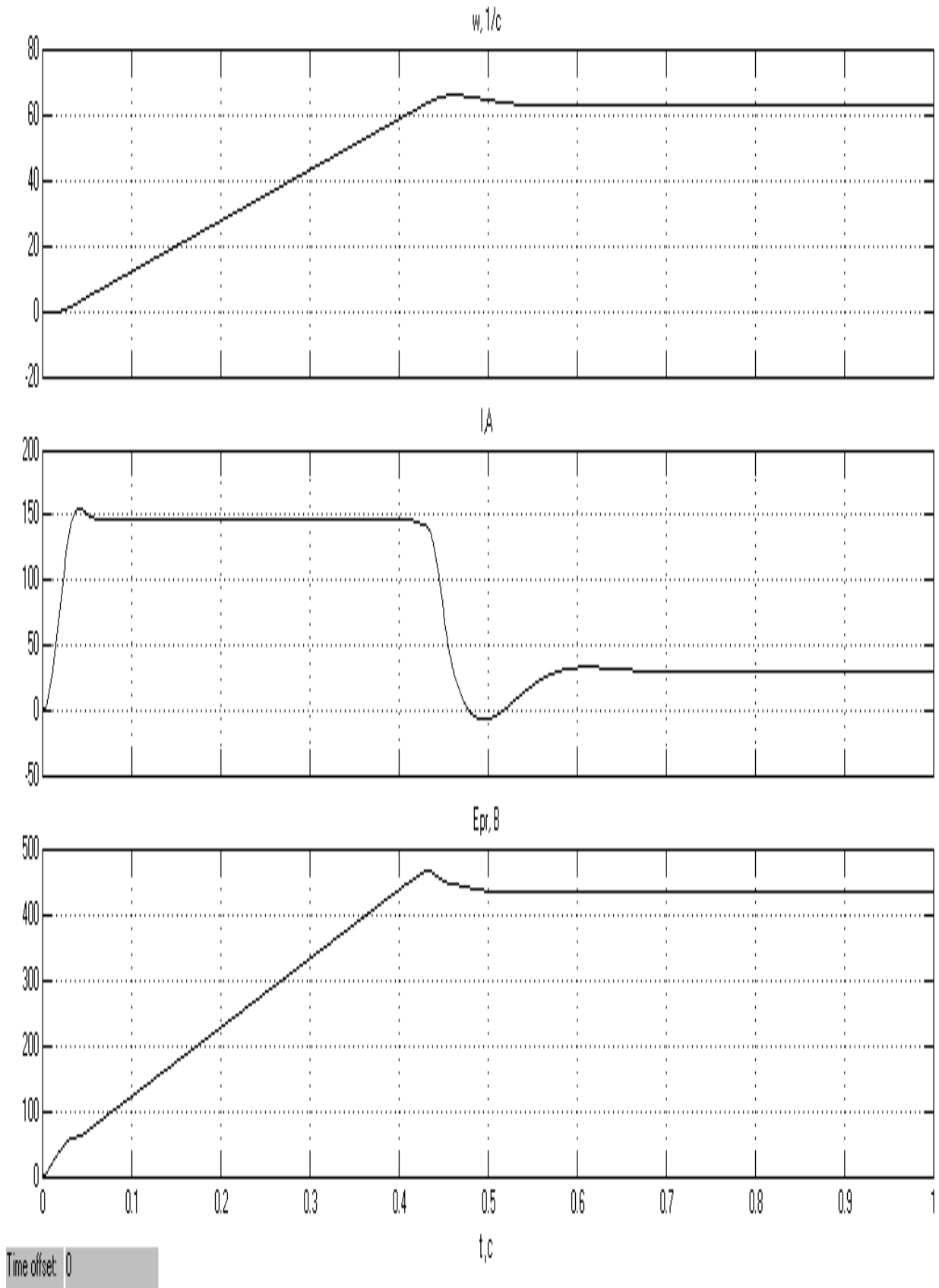


Рисунок 4.22 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot T_s$

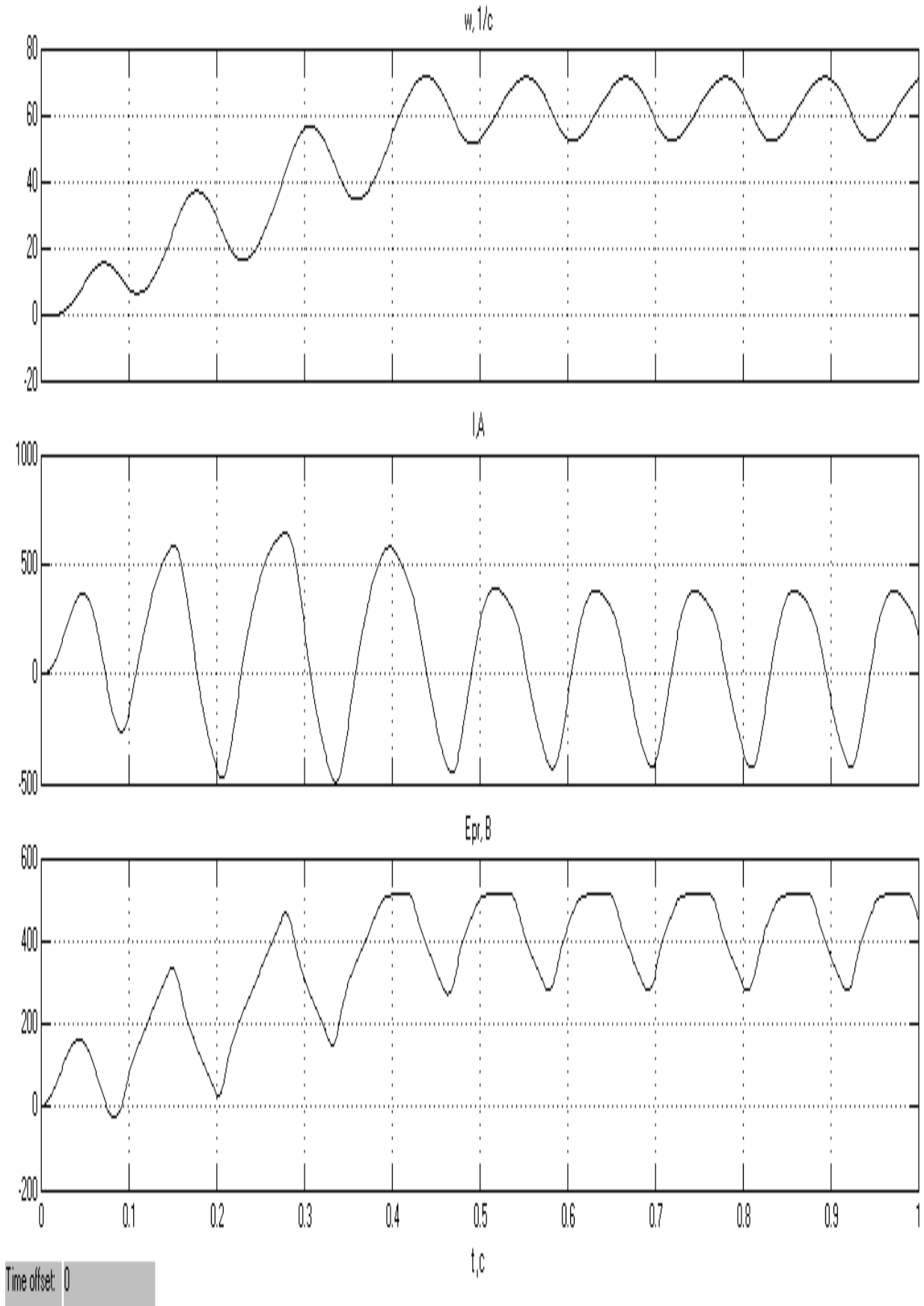


Рисунок 4.23 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку по струму

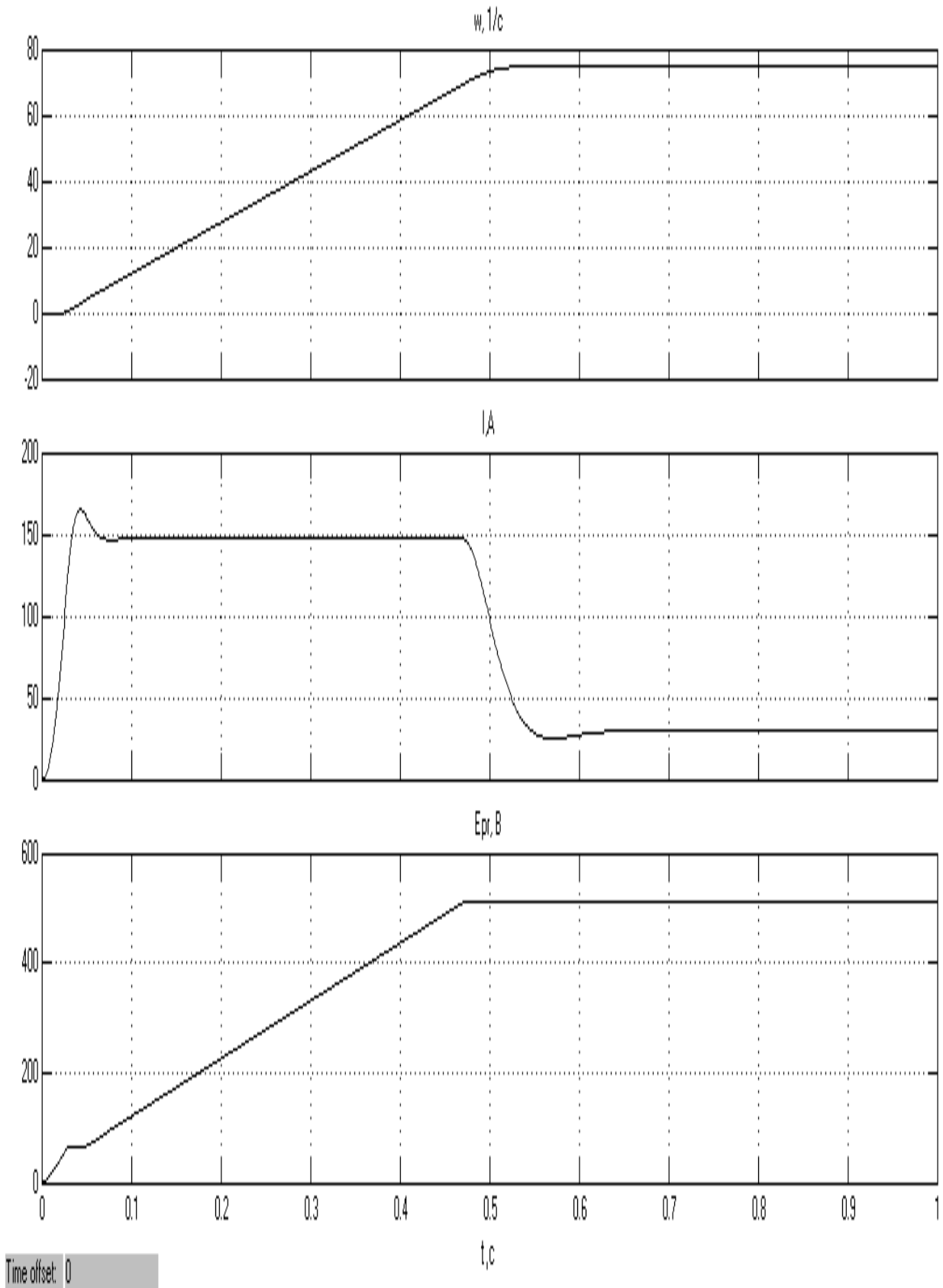


Рисунок 4.24 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку по швидкості

5 СИНТЕЗ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ В ПРОСТОРИ 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. Беллмана. 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 змінному режимі, дозволяє без втрат стійкості отримати дуже великі коефіцієнти посилення. Тим самим забезпечується не тільки оптимізація управління, але інваріантність системи до параметричних збурень.

5.1 Синтез регулятора струму в просторі природних координат

Синтез контуру струму проведемо в просторі ЕРС перетворювача, струму і швидкості. Для цього запишемо систему рівнянь, що описує контур струму:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_g \\ (T_g p + 1) \cdot I = (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) / R_g \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{mn} \cdot U_y \end{cases} \quad (5.1)$$

Запишемо систему (5.1) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_g}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_g} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_g \cdot T_g} \cdot \omega + \frac{1}{R_g \cdot T_g} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (5.2)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{i}{I_m}; \quad x_2 = \frac{\omega}{\omega_m}; \quad x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; \quad u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (5.3)$$

де $I_m = 2.5 \cdot I_H$ – максимально допустимий струм якоря;

$\omega_m = \omega_0$ – швидкість ідеального холостого ходу;

E_{nm} – максимальна ЕРС перетворювача;

$U_{ym} = 10 \text{ В}$ – максимальне значення керуючого впливу.

З урахуванням (6.3) система (6.2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_3 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{де } b_{11} &= -\frac{1}{T_{\text{э}}}, \quad b_{12} = -\frac{C\Phi_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{м}}}{R_{\text{э}} \cdot T_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}}, \quad b_{13} = \frac{E_{\text{пм}}}{R_{\text{э}} \cdot T_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}}, \\ b_{21} &= \frac{R_{\text{э}} \cdot I_{\text{м}}}{T_{\text{м}} \cdot C\Phi_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{м}}}, \quad b_{33} = -\frac{1}{T_{\mu}}, \quad n_3 = \frac{k_{\text{тп}} \cdot U_{\text{ум}}}{T_{\mu} \cdot E_{\text{пм}}}. \end{aligned}$$

Для зменшення трудомісткості виконання дипломного проекту розрахунок коефіцієнтів системи (5.4) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою прикладної програми MATLAB.

Перейдемо до відносним одиницям, тобто

$$\eta_i = x_i^* - x_i, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

де x_i^* - деяка стабілізуюча траєкторія.

В цьому випадку ми переходимо в фазовий простір обуреного руху:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{11} \cdot \eta_1 + b_{12} \cdot \eta_2 + b_{13} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (5.5)$$

Перед нами стоїть завдання знайти управління, обмежене умовою $|u| \leq 1$ і оптимізує функціонал виду:

$$J = \int_0^{\infty} (k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2) dt,$$

де k_{11} , k_{22} і k_{33} - коригуючі коефіцієнти, що обмежують координати η_1 , η_2 і η_3 відповідно.

Для вирішення поставленого завдання необхідно знайти функцію Ляпунова V , яка є рішенням функціонального рівняння Беллмана:

$$\min \left[k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \left(\sum_{j=1}^4 b_{ij} \cdot \eta_j + n_4 \cdot u \right) \right] = 0.$$

У цьому випадку управління шукається у вигляді:

$$u = -\text{sign} \left(\sum_{i=1}^4 n_i \cdot \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \right),$$

$$\text{де } V = \sum_{i=1}^4 A_{ij} \cdot \eta_i \cdot \eta_j \quad (A_{ij} = A_{ji}).$$

Для визначення коефіцієнтів функції Ляпунова скористаємося векторним рівнянням Барбашина:

$$C \cdot A = -K \quad (5.6)$$

де C – матриця Барбашина

$$C = \begin{bmatrix} C_{11,11} & C_{12,11} & \dots & C_{ij,11} & \dots & C_{mm,11} \\ C_{11,12} & C_{12,12} & \dots & C_{ij,12} & \dots & C_{mm,12} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{11,kl} & C_{12,kl} & \dots & C_{ij,kl} & \dots & C_{mm,kl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{11,mm} & C_{12,mm} & \dots & C_{ij,mm} & \dots & C_{mm,mm} \end{bmatrix}$$

$$C_{ij,kl} = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq k \text{ у } j \neq l; \\ b_{jl}, & \text{при } i = k \text{ у } j \neq l; \\ b_{ii} + b_{jj}, & \text{при } i = k \text{ у } j = l; \\ b_{ii}, & \text{при } i = j = k = l \end{cases} \quad (5.7)$$

A – вектор-стовпець коефіцієнтів Ляпунова;

K – вектор-стовпець обмежують коефіцієнтів.

Для нашого випадку рівняння (5.7) набуде вигляду:

$$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{11} & 0 & b_{21} & 0 & 0 \\ b_{13} & 0 & b_{11} + b_{33} & 0 & b_{21} & 0 \\ 0 & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{13} & b_{12} & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & b_{13} & 0 & 0 & b_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{33} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Для даної системи:

$$V = A_{11} \cdot \eta_1^2 + 2 \cdot A_{12} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 + 2 \cdot A_{13} \cdot \eta_1 \cdot \eta_3 + A_{22} \cdot \eta_2^2 + 2 \cdot A_{23} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 + A_{33} \cdot \eta_3$$

Таким чином, управління має вигляд:

$$u = -\text{sign}(A_{31} \cdot \eta_1 + A_{32} \cdot \eta_2 + A_{33} \cdot \eta_3) \quad (5.8)$$

Відповідно до (5.8) структурна схема контуру струму набуде вигляду, наведений на рисунку 5.1.

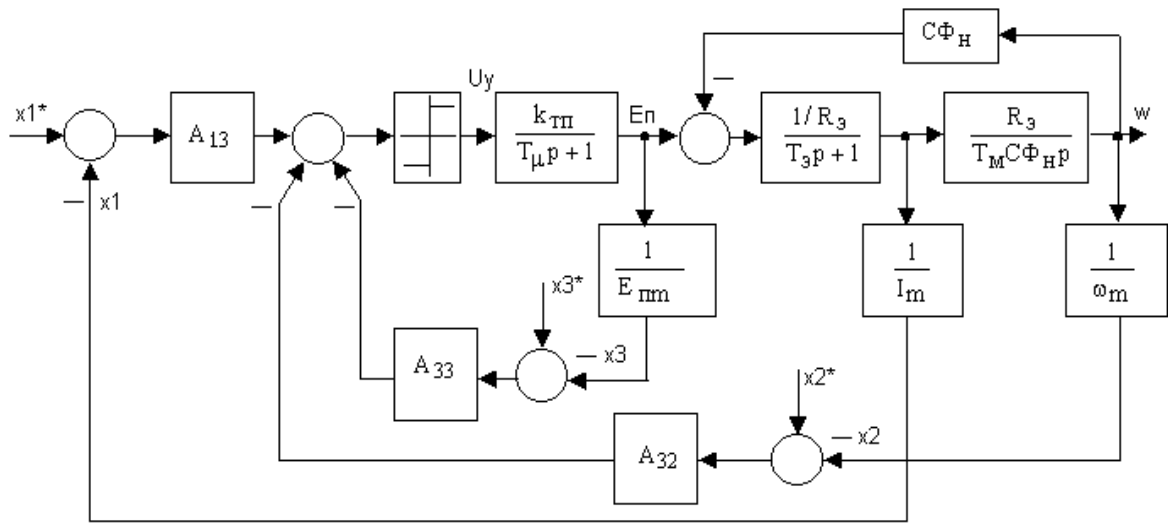


Рисунок 5.1 - Структурна схема блоку регулятора струму

Функціональна схема релейного регулятора струму зображена на рисунку 5.2. Підсилювач DA2 формує сигнал пропорційний першій похідній струму.

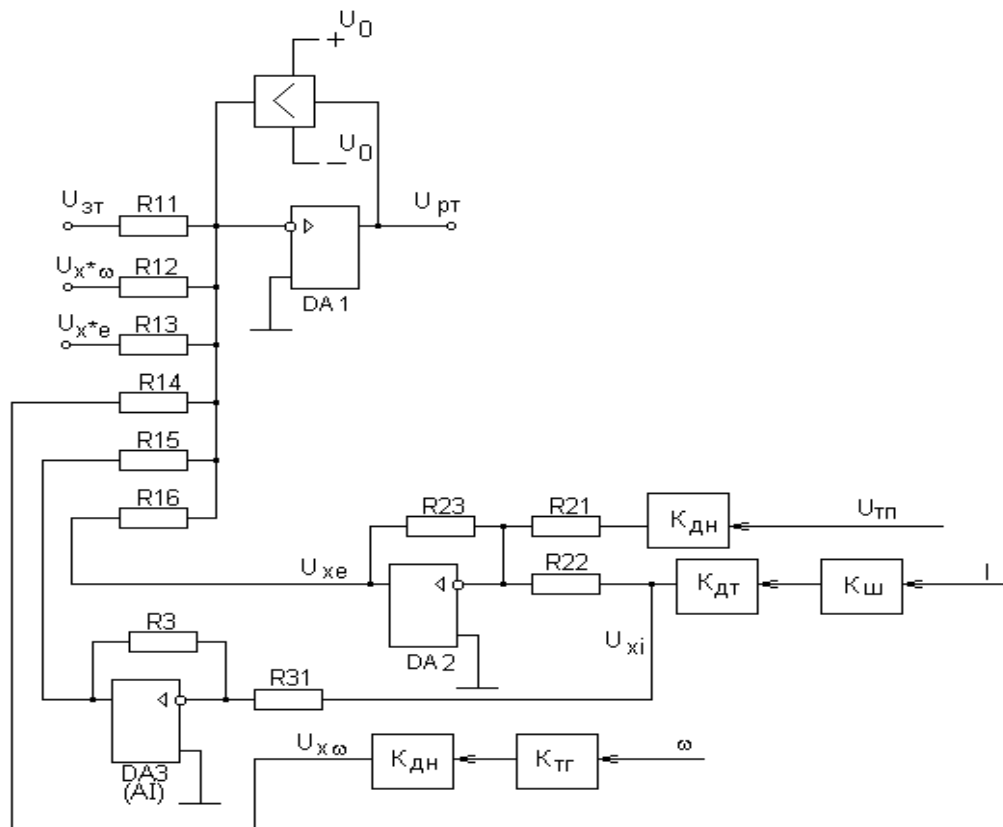


Рисунок 5.2 - Функціональна схема релейного регулятора струму

Для отримання інформації про ЕРС ТП в схемі застосований підсумовує підсилювач DA2, на виході якого складаються сигнали датчиків струму і напруги. Якщо максимальна вихідна напруга датчика напруги ТП одно 10В, то його коефіцієнт передачі:

$$K_{ДН} = \frac{U_{ДН\max}}{U_{ТП\max}} = \frac{U_{ДН\max}}{E_{ТП\max}} \quad (5.9)$$

Вихідна напруга DA2 визначається виразом:

$$U_{оэ} = \frac{R_2}{R_{21}} \cdot k_{ДН} \cdot U_{ТП} + \frac{R_2}{R_{21}} \cdot k_{ДТ} \cdot k_{ш} \cdot I \quad (5.10)$$

Нехай $R_2=33 \text{ кОм}$

$$R_{22} = \frac{R_2 k_{дн} k_{ш} I_n}{U_{оэ} - \frac{R_2}{R_{21}} k_{дн} E_{mn}} = \frac{33000 \cdot 133 \cdot 0,001 \cdot 74}{10 - \frac{33000}{33000} 0,0322 \cdot 230} = 125400 \text{ Ом} \quad (5.11)$$

Опір інвертора, виконаного на операційному підсилювачі DA3, рівним $R_3=R_{31}=100$ кОм.

$$R_{11} = \frac{U_{zt.макс}}{k \cdot A_{13}} = \frac{10}{1,5 \cdot 0,025} = 266,66 \text{ Ом}$$

$$R_{12} = \frac{k_{mz} \omega_{макс}}{k |A_{23}|} = \frac{1,752 \cdot 62,8}{1,5 \cdot 0,003091} = 23730,4 \text{ Ом}$$

$$R_{13} = \frac{k_{om} k_{u} I_{макс}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,001 \cdot 185}{1,5 \cdot 0,025} = 1578 \text{ Ом}$$

$$R_{14} = \frac{k_{on} \cdot E_{mn.макс}}{k \cdot A_{33}} = \frac{0,0195 \cdot 513}{1,5 \cdot 0,004883} = 1370,3 \text{ Ом}$$

де $k=1.5$ – деякий коефіцієнт пропорційності.

Приймаємо резистори типу МЛТ-0,125 опором 270 Ом, 24 кОм, 1,6 кОм и 1,37 кОм відповідно.

5.2 Синтез регулятора швидкості в просторі природних координат

Запишемо систему рівнянь, що описує контур швидкості:

$$\begin{cases} T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega \cdot p = I \cdot R_s \\ (T_s p + 1) \cdot I = \frac{1}{R_s} (E_n - C\Phi_n \cdot \omega) \\ E_n \cdot (T_\mu p + 1) = k_{mn} \cdot U_y \end{cases} \quad (5.12)$$

Запишемо систему (5.12) в наступному вигляді:

$$\begin{cases} p \cdot \omega = \frac{R_s}{T_m \cdot C\Phi_n} \cdot I \\ p \cdot I = -\frac{1}{T_s} \cdot I - \frac{C\Phi_n}{R_s \cdot T_s} \cdot \omega + \frac{1}{R_s \cdot T_s} \cdot E_n \\ p \cdot E_n = -\frac{1}{T_\mu} \cdot E_n + \frac{k_{mn}}{T_\mu} \cdot U_y \end{cases} \quad (5.13)$$

Перейдемо до відносних координат:

$$x_1 = \frac{\omega}{\omega_m}; x_2 = \frac{I}{I_m}; x_3 = \frac{E_n}{E_{nm}}; u = \frac{U_y}{U_{ym}} \quad (5.14)$$

де $I_m = 2,5 \cdot I_n$ – максимально допустимий струм якоря;

$\omega_m = \omega_0$ – швидкість ідеального холостого ходу;

E_{nm} – максимальна ЕРС перетворювача;

$U_{ym} = 10$ В – максимальне значення керуючого впливу.

З урахуванням (5.14) система (5.13) набуде вигляду:

$$\begin{cases} p \cdot x_1 = b_{12} \cdot x_2 \\ p \cdot x_2 = b_{21} \cdot x_1 + b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 \\ p \cdot x_3 = b_{33} \cdot x_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (5.15)$$

$$\text{де } b_{12} = \frac{R_3 \cdot I_m}{T_m \cdot C\Phi_n \cdot \omega_m}, \quad b_{22} = -\frac{1}{T_3}, \quad b_{21} = -\frac{C\Phi_n \cdot \omega_m}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m}, \quad b_{23} = \frac{E_{nm}}{R_3 \cdot T_3 \cdot I_m},$$

$$b_{33} = -\frac{1}{T_\mu}, \quad n_3 = \frac{k_{mm} \cdot U_{ym}}{T_\mu \cdot E_{nm}}.$$

Для зменшення трудомісткості виконання дипломного проекту розрахунок коефіцієнтів системи (5.15) і всі подальші розрахунки виконані за допомогою прикладної програми MATLAB.

Перейдемо до відносним одиницям, тобто

$$\eta_i = x_i^* - x_i, \quad i=1, 2, 3, 4,$$

де x_i^* – деяка стабілізуюча траєкторія.

В цьому випадку ми переходимо в фазовий простір обуреного руху:

$$\begin{cases} p \cdot \eta_1 = b_{12} \cdot \eta_2 \\ p \cdot \eta_2 = b_{21} \cdot \eta_1 + b_{22} \cdot \eta_2 + b_{23} \cdot \eta_3 \\ p \cdot \eta_3 = b_{33} \cdot \eta_3 + n_3 \cdot u \end{cases} \quad (5.16)$$

Перед нами стоїть завдання знайти управління, обмежене умовою $|u| \leq 1$ і оптимізує функціонал виду:

$$J = \int_0^{\infty} (k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2) dt,$$

де k_{11} , k_{22} і k_{33} - коригуючі коефіцієнти, що обмежують координати η_1 , η_2 і η_3 відповідно.

Для вирішення поставленого завдання необхідно знайти функцію Ляпунова V , яка є рішенням функціонального рівняння Беллмана:

$$\min \left[k_{11} \cdot \eta_1^2 + k_{22} \cdot \eta_2^2 + k_{33} \cdot \eta_3^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \left(\sum_{j=1}^4 b_{ij} \cdot \eta_j + n_4 \cdot u \right) \right] = 0.$$

У цьому випадку управління шукається у вигляді:

$$u = -\text{sign} \left(\sum_{i=1}^4 n_i \cdot \frac{\partial V}{\partial \eta_i} \right),$$

$$\text{де } V = \sum_{i=1}^4 A_{ij} \cdot \eta_i \cdot \eta_j \quad (A_{ij} = A_{ji}).$$

Для визначення коефіцієнтів функції Ляпунова скористаємося векторним рівнянням Барбашина.

Для нашого випадку рівняння набуде вигляду:

$$\begin{vmatrix} 0 & b_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{22} & 0 & b_{21} & 0 & 0 \\ 0 & b_{23} & b_{33} & 0 & b_{21} & 0 \\ 0 & b_{12} & 0 & b_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{12} & b_{23} & b_{33} + b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{23} & b_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{33} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Для даної системи:

$$V = A_{11} \cdot \eta_1^2 + 2 \cdot A_{12} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 + 2 \cdot A_{13} \cdot \eta_1 \cdot \eta_3 + \\ + A_{22} \cdot \eta_2^2 + 2 \cdot A_{23} \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 + A_{33} \cdot \eta_3^2$$

Таким чином, управління має вигляд:

$$u = -\text{sign}(A_{31} \cdot \eta_1 + A_{32} \cdot \eta_2 + A_{33} \cdot \eta_3) \quad (5.17)$$

Відповідно до (5.17) структурна схема контуру швидкості прийме вигляд, представлений на рис. 5.3.

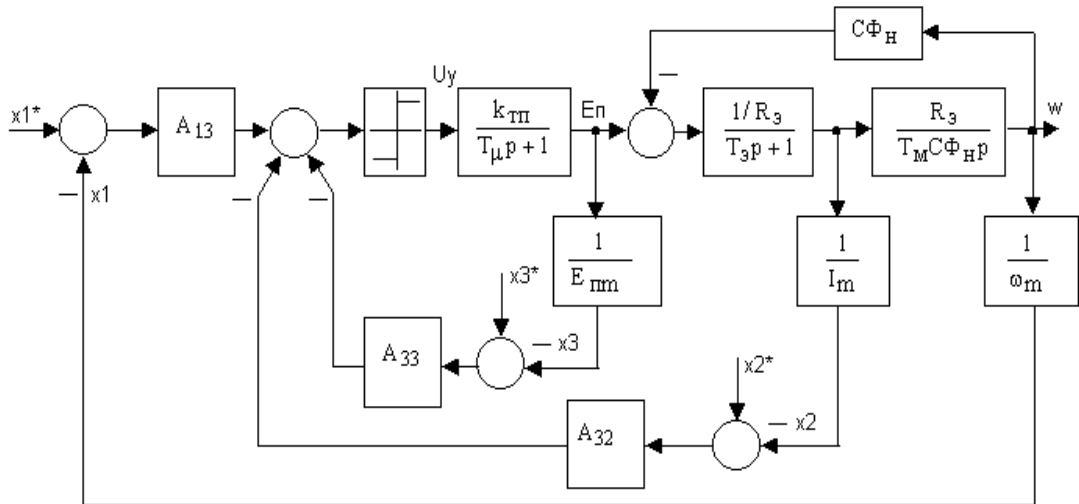


Рисунок 5.3 - Структурна схема контуру швидкості

Функціональна схема регулятора швидкості така ж, як і у регулятора струму, з тією різницею, що регулятор швидкості виробляє завдання на регулятор струму.

В результаті змінюються лише опору, причому приймаємо, що вхідний опір $R_{11}=10$ кОм, тоді:

$$R_{12} = \frac{k_{mz} \omega_{\max}}{k |A_{23}|} = \frac{1,752 \cdot 62,8}{1,5 \cdot 0,006076} = 12072 \text{ Ом} \quad (5.18)$$

$$R_{13} = \frac{k_{\text{ом}} k_{\text{ш}} I_{\max}}{k \cdot A_{13}} = \frac{320 \cdot 0,001 \cdot 185}{1,5 \cdot 0,007161} = 5511 \text{ Ом} \quad (5.19)$$

$$R_{14} = \frac{k_{\text{он}} \cdot E_{\text{мн.макс}}}{k \cdot A_{33}} = \frac{0,0195 \cdot 513}{1,5 \cdot 0,001164} = 5729 \text{ Ом} \quad (5.20)$$

Приймаємо $R_{12}=12$ кОм, $R_{13}=5,5$ кОм, $R_{14}=5,7$ кОм.

Повна структурна і функціональна схеми релейного системи електроприводу представлені на малюнках 5.4 і 5.5 відповідно.

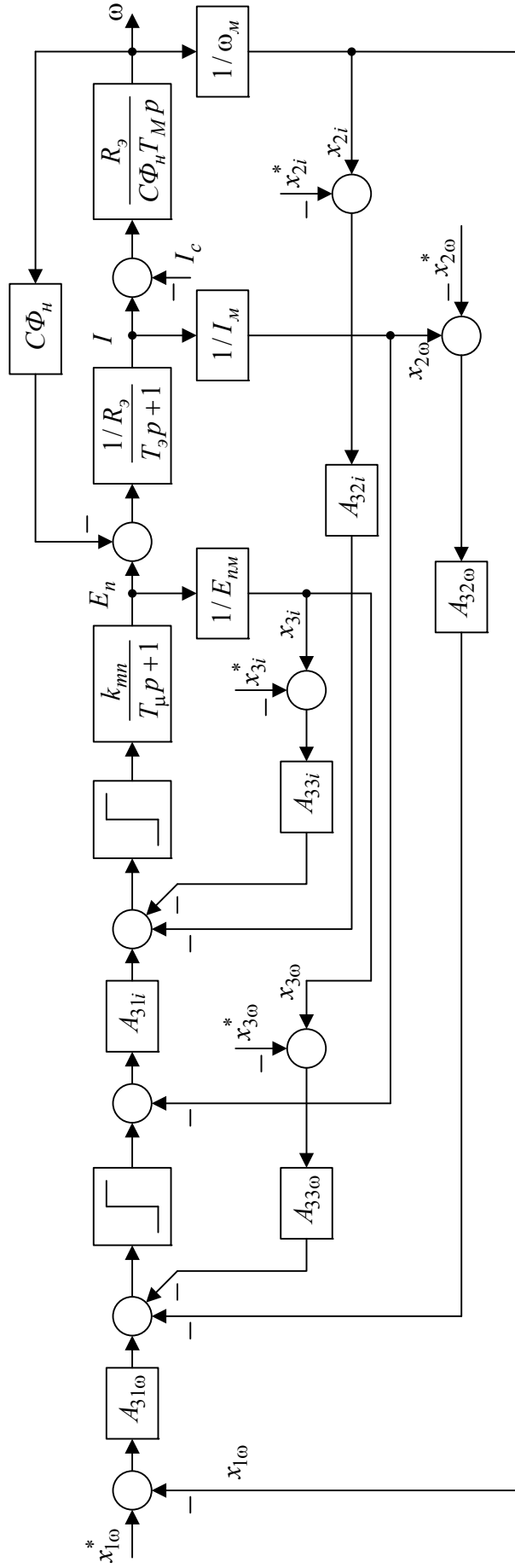


Рисунок 5.4 – Повна структурна схема релейної системи електроприводу

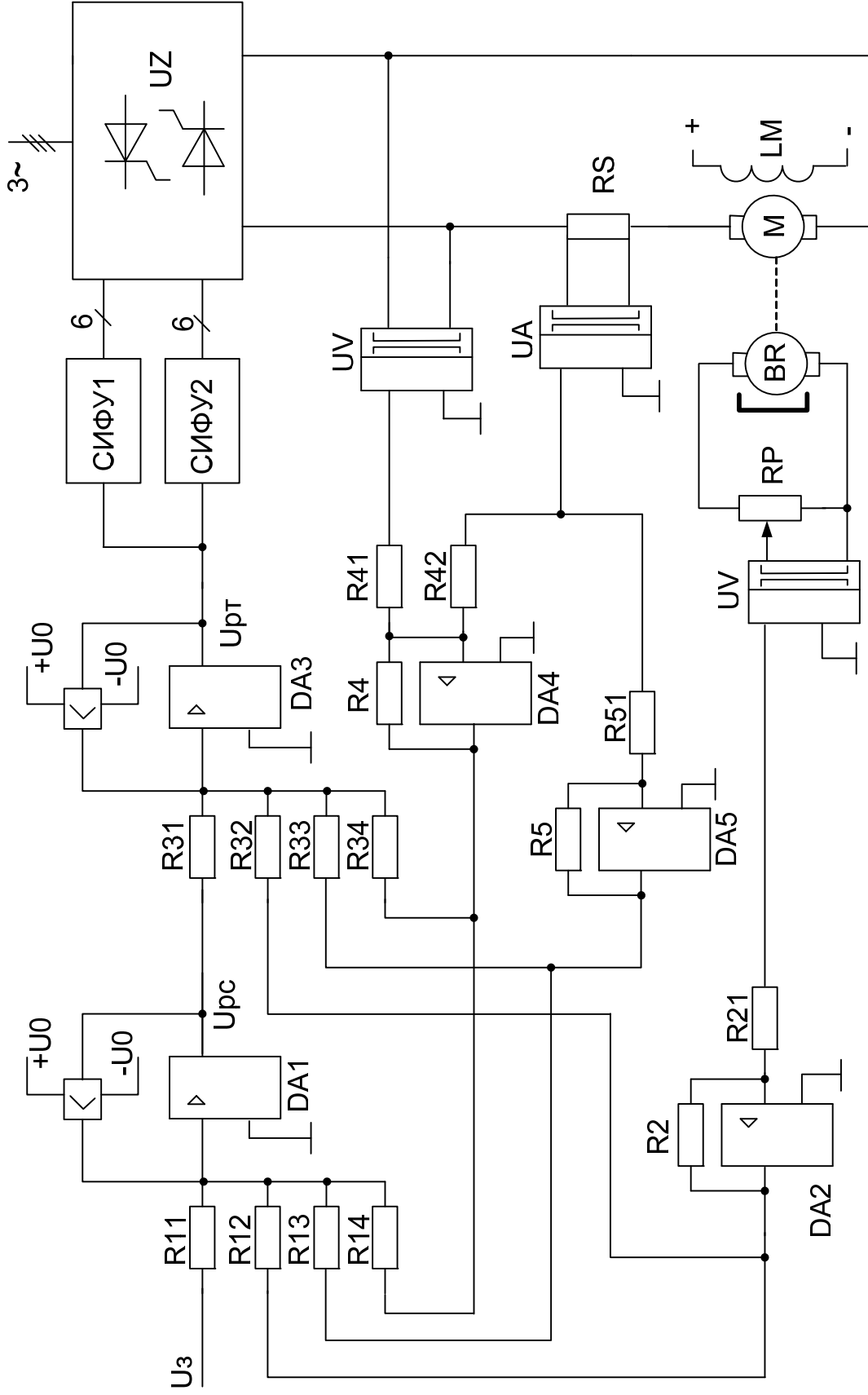


Рисунок 5.5 – Полна функціональна схема релейної системи електроприводу

5.3 Математичне моделювання ЕП з релейною (оптимальною) системою керування

Дослідження перехідних процесів у релейній (оптимальній) системі керування електроприводом, яка була синтезована в просторі похідних, виконано з використанням пакета прикладних програм MATLAB / Simulink. Математична модель системи представлена на рис.5.6. Порівняно з класичною системою підпорядкованого регулювання, дослідження роботи релейної системи також проведено за тією ж програмою.

Аналіз графіків перехідних процесів (рис. 5.7 - 5.13) демонструє, що в релейній системі процеси мають вищу якість, і система характеризується більшою точністю. Крім того, в релейній системі при зміні постійних часу фактично не відбувається суттєвого впливу на якість перехідних процесів.

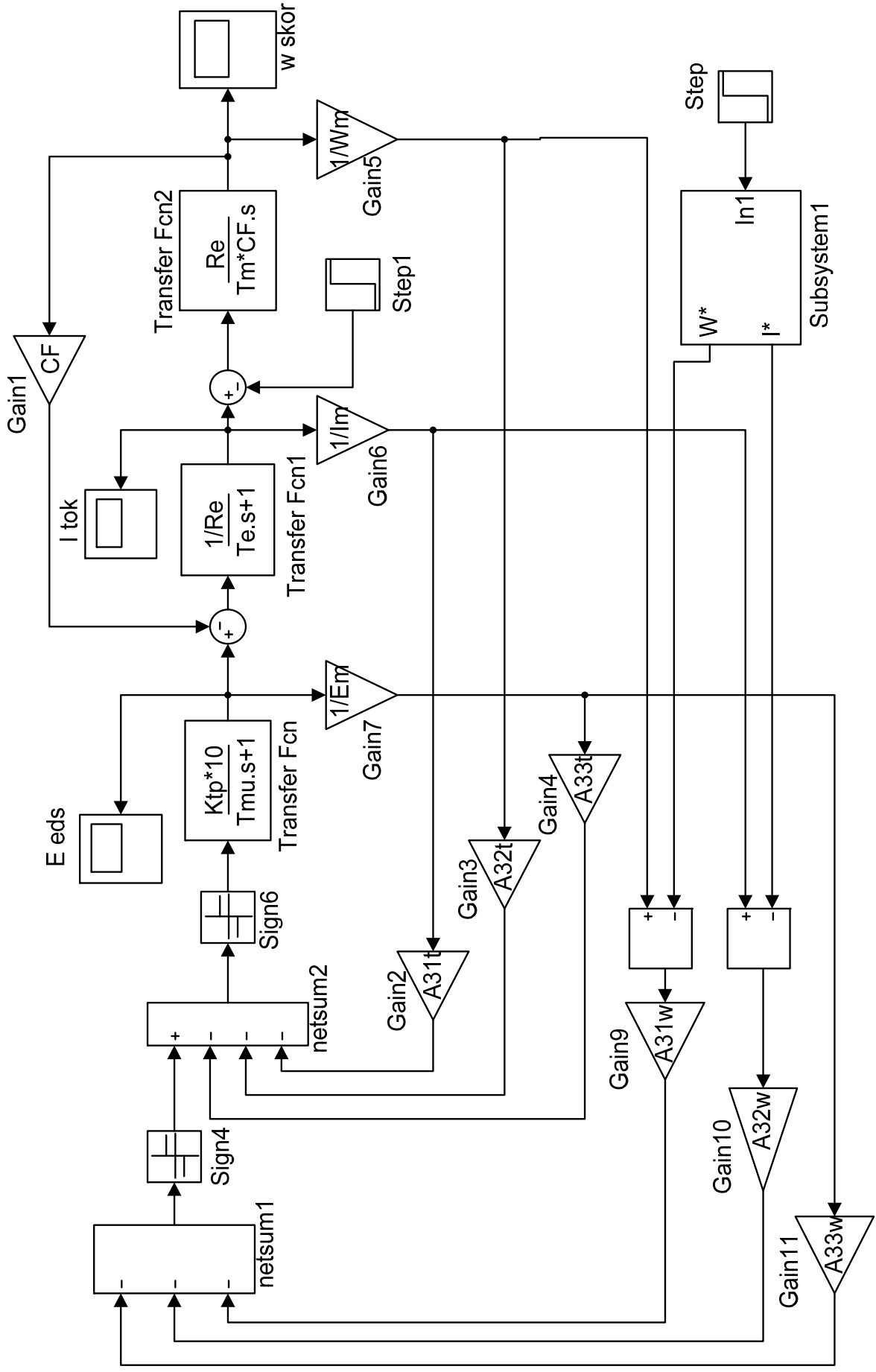


Рисунок 5.6 – Simulink-модель релейної (оптимальної) системи ЕП

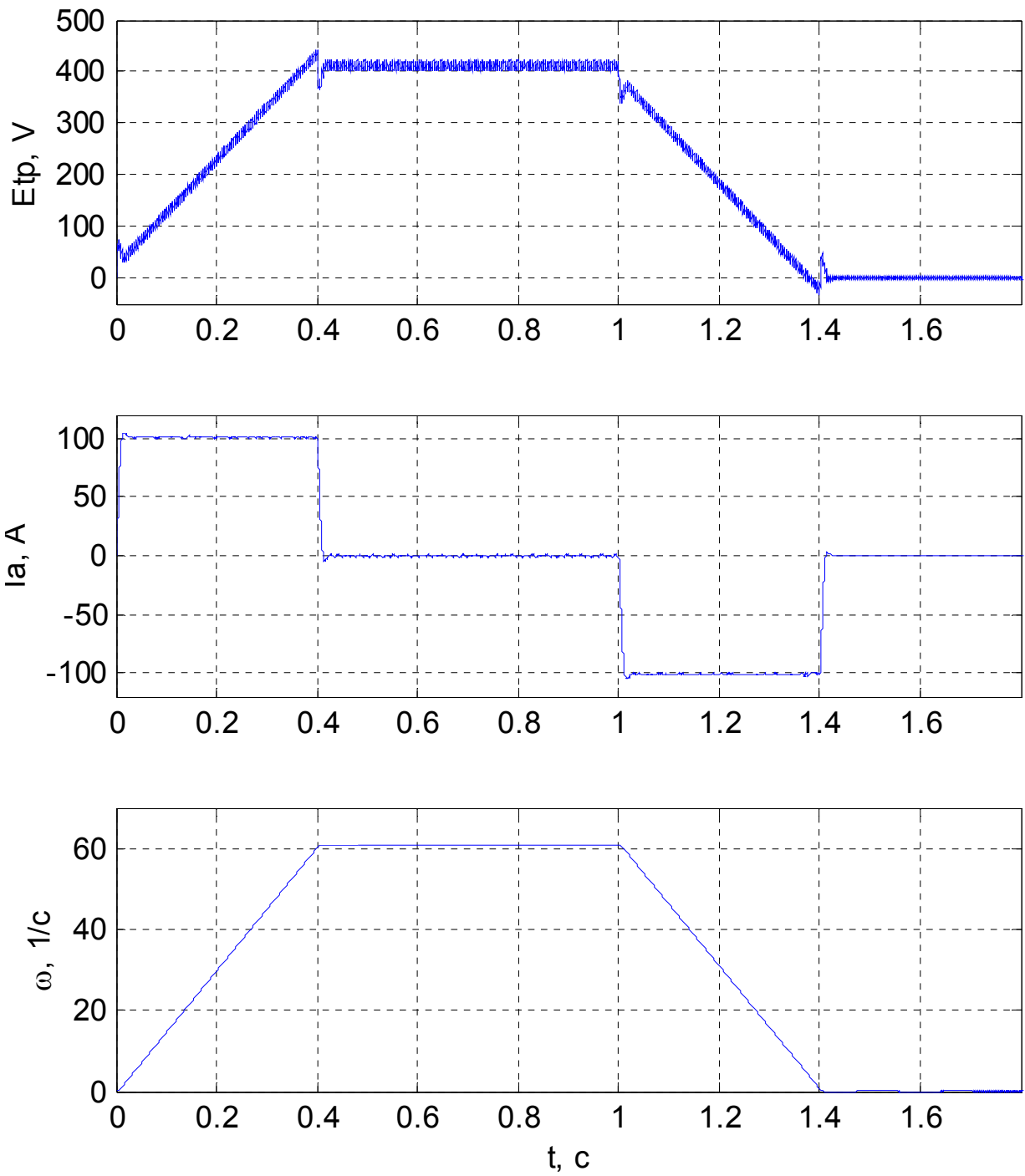


Рисунок 5.7 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску і гальмуванні без навантаження

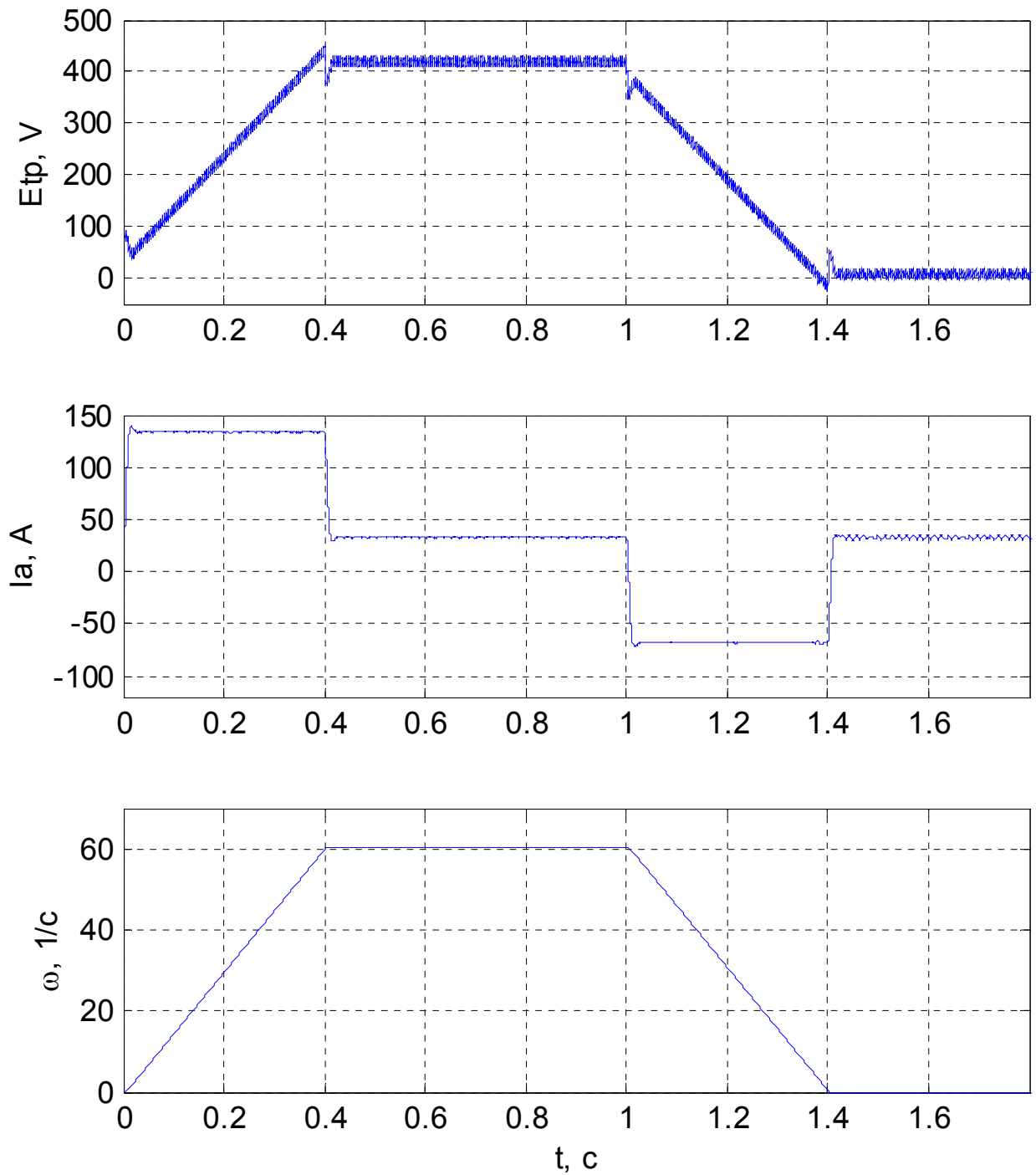


Рисунок 5.8 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску і гальмуванні з навантаженням (активного характеру)

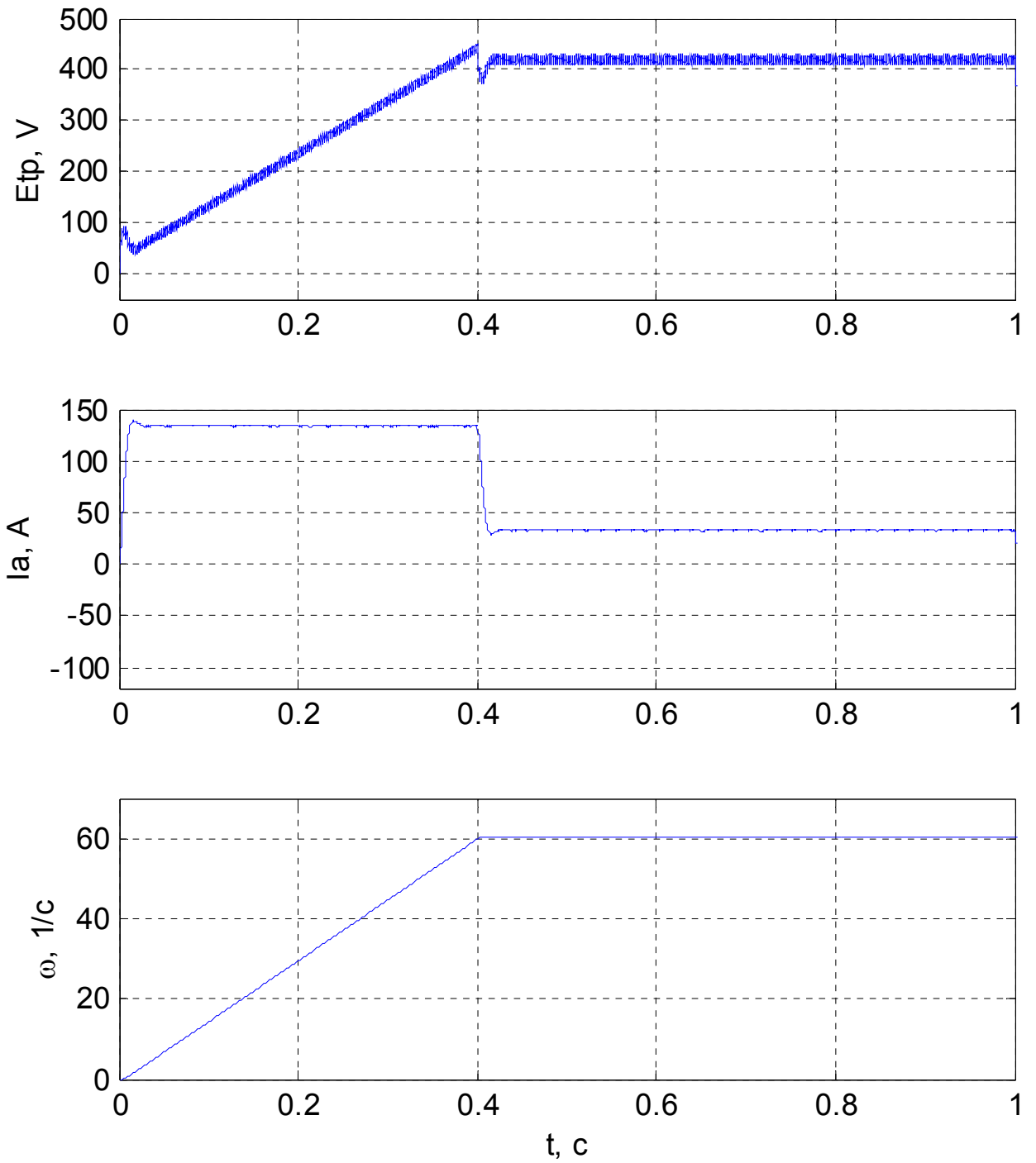


Рисунок 5.9 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску з навантаженням

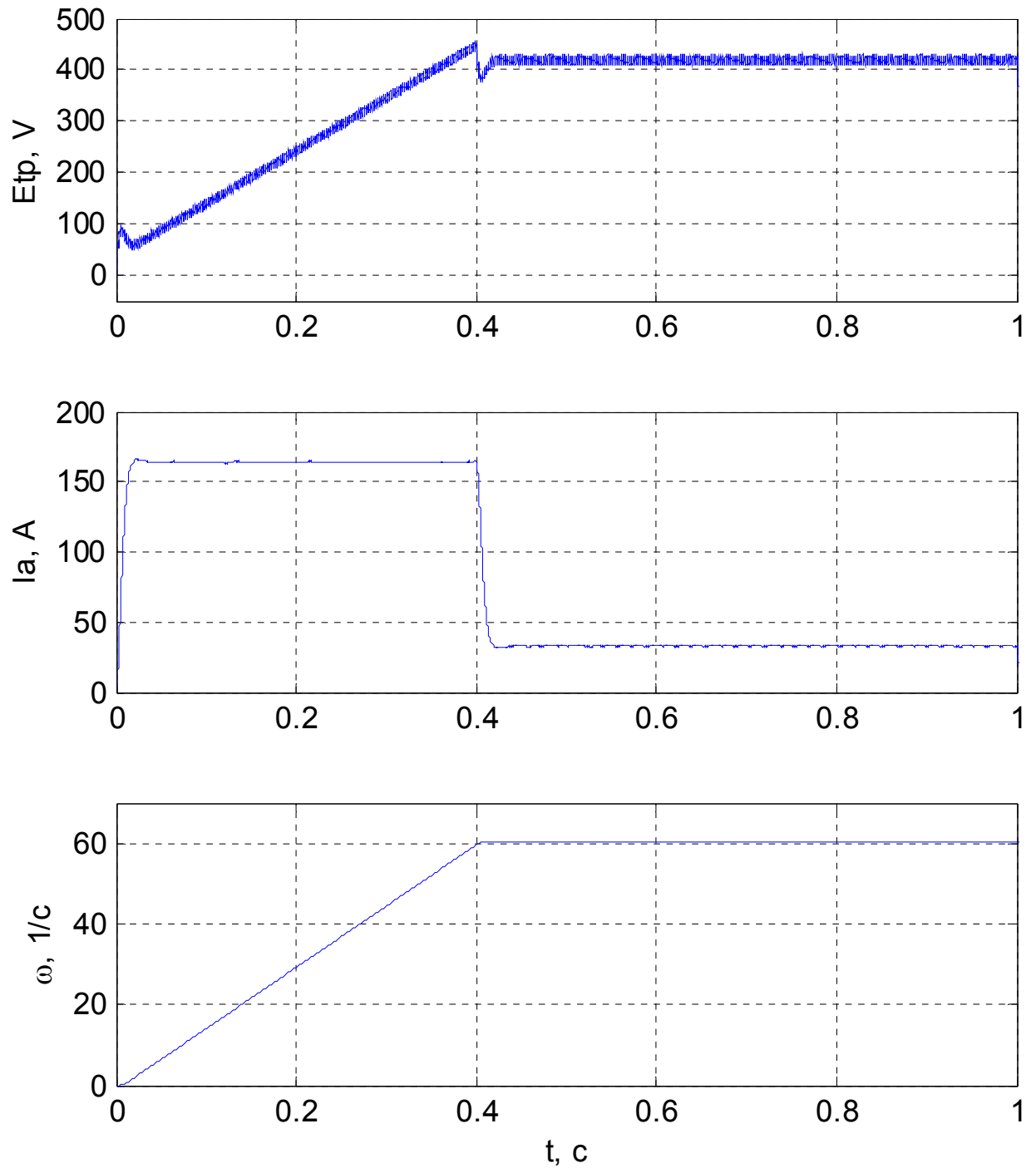


Рисунок 5.10 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску з навантаженням при збільшенні сумарного моменту інерції системи $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

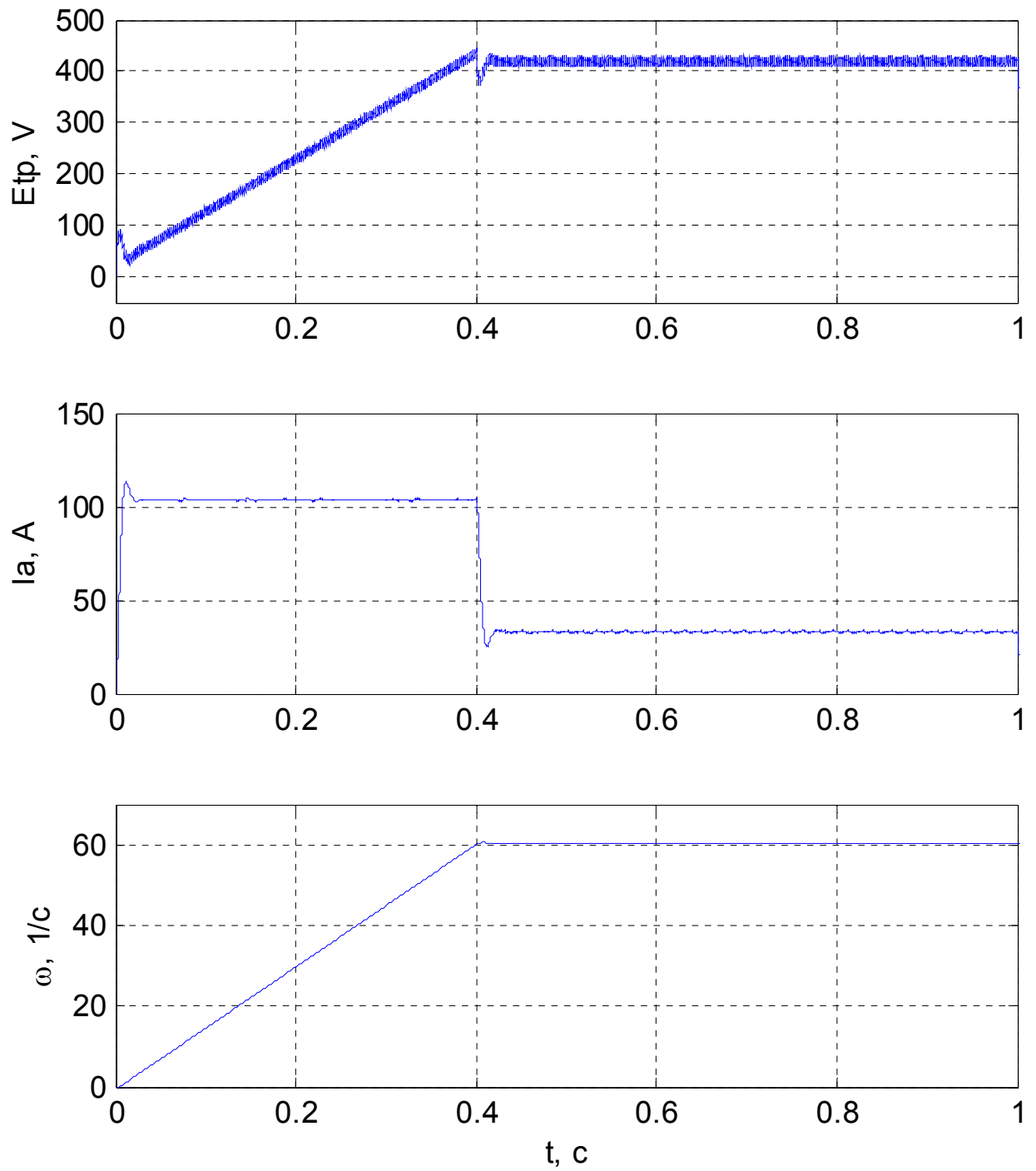


Рисунок 5.11 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску з навантаженням при зменшенні сумарного моменту інерції системи $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

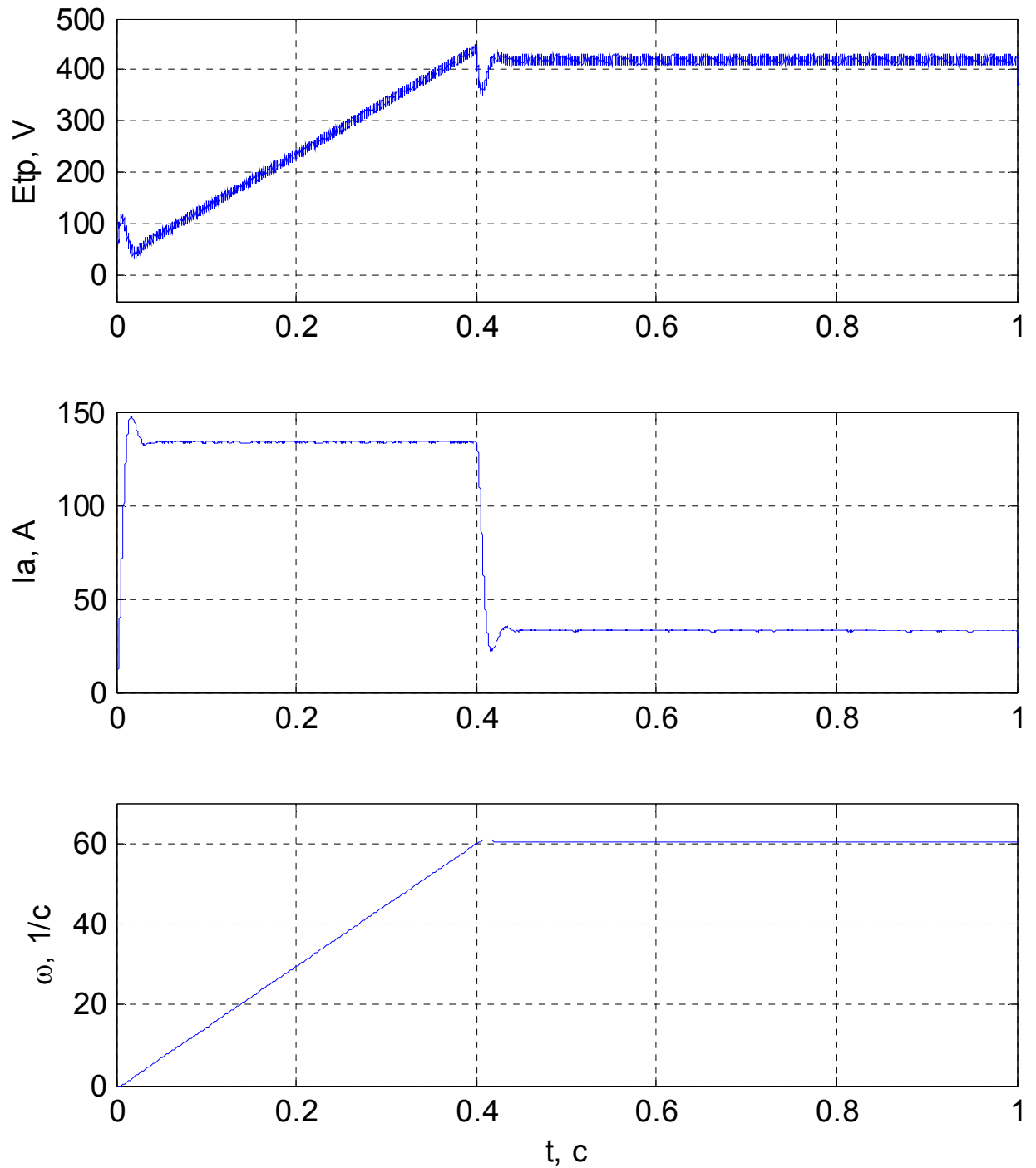


Рисунок 5.12 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску з навантаженням при збільшенні електромагнітної постійної часу системи $1,5 \cdot T_e$

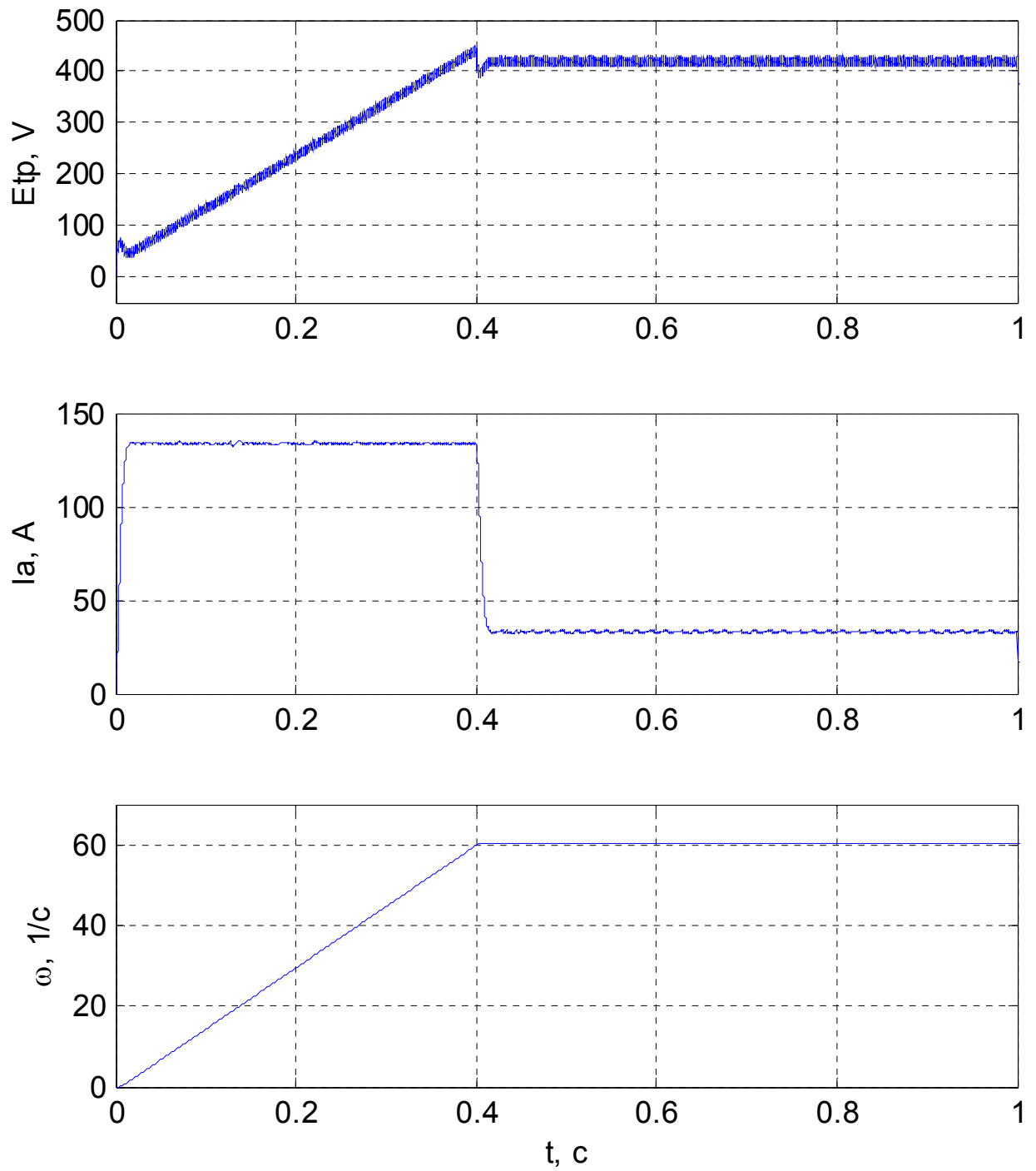


Рисунок 5.13 – Графіки перехідного процесу ЕРС, струму та швидкості двигуна при пуску з навантаженням при зменшенні електромагнітної постійної часу системи $0,7 \cdot T_e$

5.4 Оптимальне управління ЕП механізмів переміщення і підйому з урахуванням зміни довжини канату

Ефективність та якість численних технологічних процесів нерідко залежать від точності переміщення вантажів підйомно-транспортними машинами. Однак, коли вантажі підвішені на канаті, їх рух може супроводжуватися коливаннями, що істотно уповільнює технологічний процес позиціонування. У ході експлуатації підйомно-транспортних машин часто використовують операції переміщення, які поєднуються з підйомом або спуском, що породжує проблему гасіння коливань.

Науковці розробляють численні методи демпфірування коливань вантажів у підйомно-транспортних машинах. Проте, під час роботи механізми можуть піддаватися впливу змін різних факторів, що ставить питання створення адаптивної системи управління. Така система має здатність демпфірувати коливання та компенсувати вплив різноманітних факторів, що може значно підвищити ефективність та продуктивність транспортних операцій.

Одним із відомих методів управління, який вважається оптимальним з точки зору швидкодії, подано на рис. 5.14 [85]. У цьому методі час розгону складається з трьох інтервалів часу силового впливу, при цьому прискорення змінює свій знак. Однак такий підхід може викликати додаткові динамічні зусилля в механічних передачах [86].

Існує розмаїття методів для зменшення кількості коливань підвішеного вантажу, що дає можливість ефективно керувати його рухом при постійній довжині каната. У даному дослідженні акцент зроблений на оптимізації системи керування підйомно-транспортного механізму (ПТМ), особливо коли використовуються комбіновані механізми переміщення та підйому.

Зокрема, розглядається важлива проблема в управлінні ПТМ, де вантаж піднімається і переміщується одночасно. Такий сценарій може викликати непередбачувані коливання та динамічні зусилля в системі. Саме тому

актуальною стає задача оптимізації процесу керування для досягнення максимальної продуктивності та забезпечення безпеки під час руху вантажу.

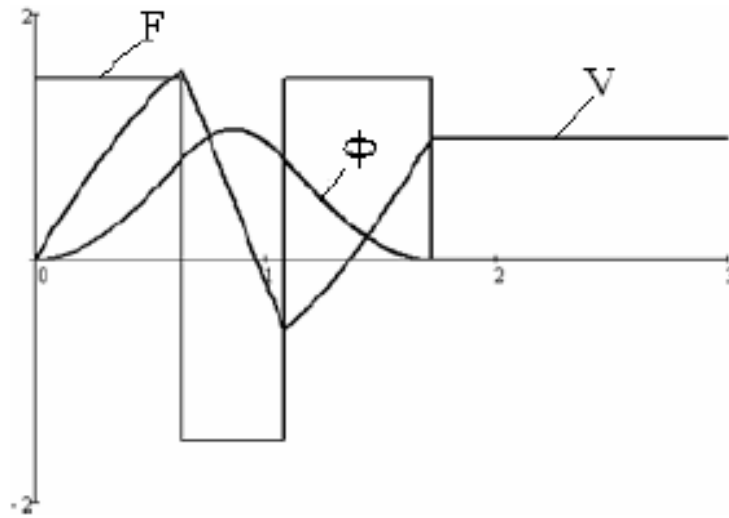


Рисунок 5.14 – Залежності зміни зусилля F , швидкості V та кута відхилення вантажу ϕ

Розглядається сучасний підхід до оптимізації управління, де зокрема враховується взаємодія між механізмами переміщення та підйому. Це ставить перед завданням розробку адаптивної системи керування, яка не лише зменшує коливання вантажу, але й компенсує вплив різноманітних факторів, що можуть впливати на ефективність та продуктивність транспортних операцій.

Такий підхід в управлінні ПТМ відкриває нові можливості для забезпечення стабільності та точності руху вантажу, підвищуючи загальну продуктивність технологічних процесів.

Розглянемо конкретний сценарій переміщення вантажу від точки А до точки F, як це показано на рисунку 5.15. На перегоні А-В вантаж переміщується вертикально, і відзначається відсутністю коливань. По ділянці В-С візок набирає максимальну швидкість, а вантаж піднімається до висоти L_c . Проходячи відсіч С-Д, візок рухається з максимальною швидкістю за постійної довжини каната. Сегмент D-E характеризується гальмуванням візка та опусканням вантажу. По відрізку E-F вантаж знову опускається, на цей раз

до точки F. Важливо забезпечити відсутність коливань при переміщенні вантажу в точках C і E.

У даному випадку великою вагомістю є завдання забезпечення стабільності та відсутності коливань вантажу під час його підняття та опускання. Технічно складність полягає у точному керуванні рухом візка, забезпеченні безпечного гальмування та зменшенні динамічних коливань вантажу на різних етапах переміщення. Це вимагає впровадження ефективних методів контролю і адаптивних стратегій управління для забезпечення оптимальної продуктивності та безпеки транспортного процесу.

Окрім того, дослідження може включати в себе врахування впливу зовнішніх факторів, таких як зміни ваги вантажу, стану каната та інших умов експлуатації, що можуть впливати на роботу системи.

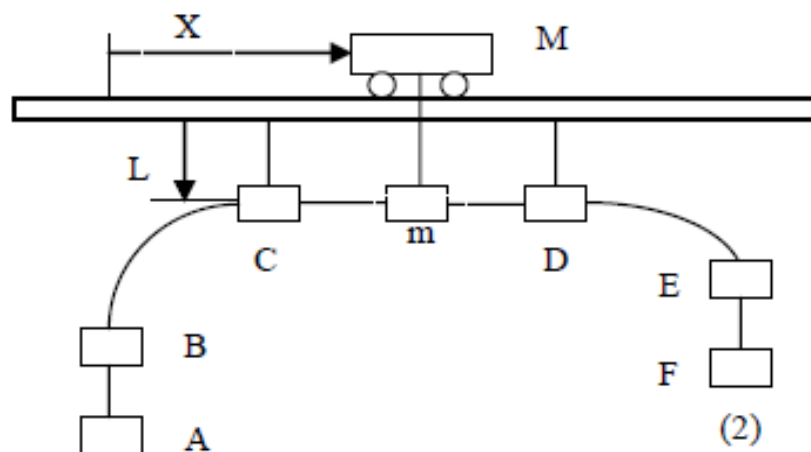


Рисунок 5.15 – Схема (траєкторія) переміщення вантажу

Розглянемо випадок, коли довжина каната залишається незмінною. Відповідні рівняння, які описують рух вантажу, можуть бути представлені у вигляді [73].

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = -\frac{m}{M} \cdot \varphi + F(t),$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{g}{L} \cdot \frac{m+M}{M} \cdot \varphi + \frac{F(t)}{L}.$$

Рішенням вказаних рівнянь є вирази

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \cos(\Omega t) + \frac{\varphi_0}{\Omega} \cdot \sin(\Omega t) + \frac{F(t)}{\Omega^2} \cdot (1 - \cos(\Omega t)),$$

$$\dot{\varphi}(t) = -\Omega \cdot a_0 \cdot \sin(\Omega t) + \dot{a}_0 \cdot \cos(\Omega t) + \frac{F(t)}{\Omega} \cdot \sin(\Omega t),$$

де Ω - частота власних коливань вантажу; a_0 і \dot{a}_0 початкові умови.

Визначимо інтервали часу силових впливів для діаграми зміни зусиль, яка складається з двох позитивних інтервалів (перший метод на рис. 5.16). Однак, на відміну від другого методу, оптимального за швидкодією, що базується на принципі максимуму Понтрягіна, перший метод виявляє трохи більший час перехідного процесу. За винятком цього нюансу, він характеризується значно меншими силами і амплітудою коливань.

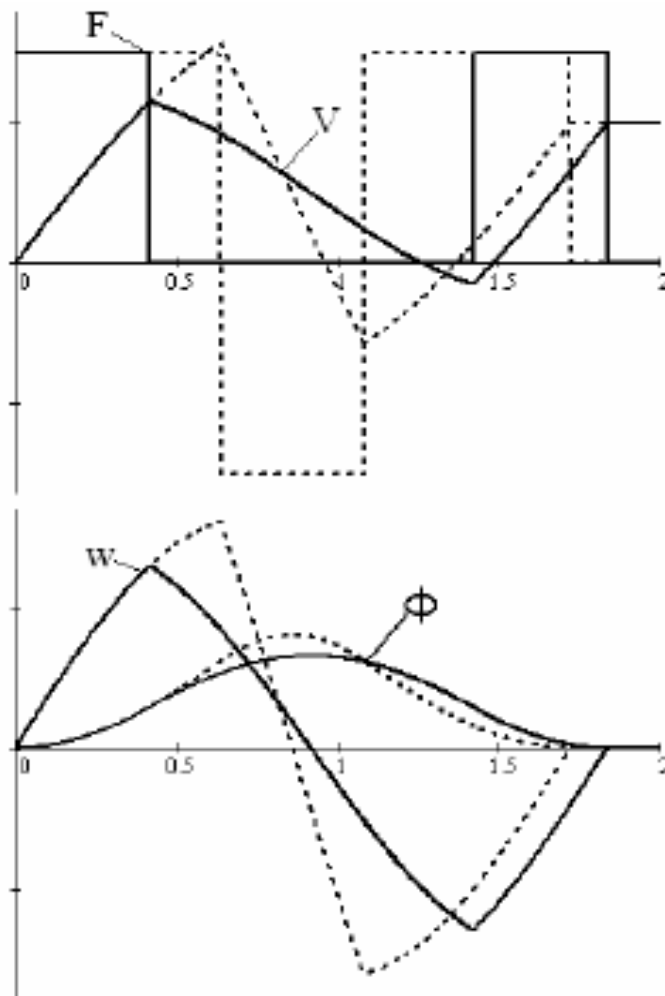


Рисунок 5.16 – Порівняння залежностей зміни зусилля, швидкості, кута коливань і його похідної

Для визначення інтервалів часу необхідно розглянути (скласти) рівняння (2) для конкретного відрізка часу. Інтервал часу t_1 відповідає часу наростання швидкості до значення, рівного половині максимальної:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{2 \cdot a},$$

де a - прискорення.

Для визначення інтервалу часу t_2 вирішимо рівняння (2) з урахуванням ненульових початкових умов:

$$t_2 = \frac{2}{\Omega} \cdot \arctan\left(\frac{\sin(\Omega t_1)}{1 - \cos(\Omega t_1)}\right) + t_1.$$

Тоді інтервал t_3 буде дорівнювати сумі:

$$t_3 = t_1 + t_2.$$

Подивимося на відрізок траєкторії В-С на рис. 5.14. При одночасній роботі двох механізмів, закон управління, отриманий за допомогою принципу максимуму, не забезпечить відсутність коливань в кінці перехідного процесу. Це пояснюється тим, що кут відхилення і швидкість його зміни не дорівнюють нулю в момент часу t_3 (рис. 5.17).

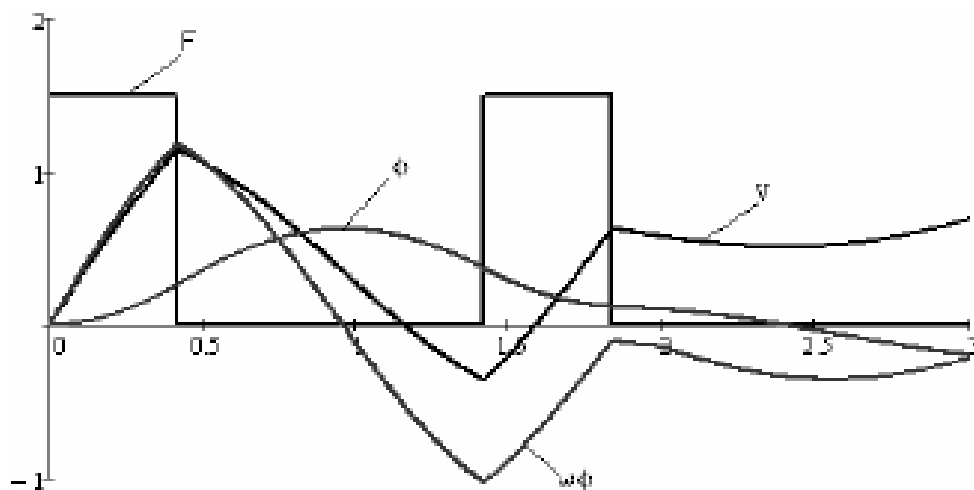


Рисунок 5.17 – Графіки залежності зміни зусилля F , швидкості V , кута відхилення вантажу ϕ і його швидкості при змінній довжині каната

Таким чином, пропонується використовувати фаззи-регулятор, який, враховуючи значення φ і φ^1 в момент часу t_3 , визначає коригувальні інтервали часу для силових впливів Δt_1 та Δt_2 (рис. 5.18).

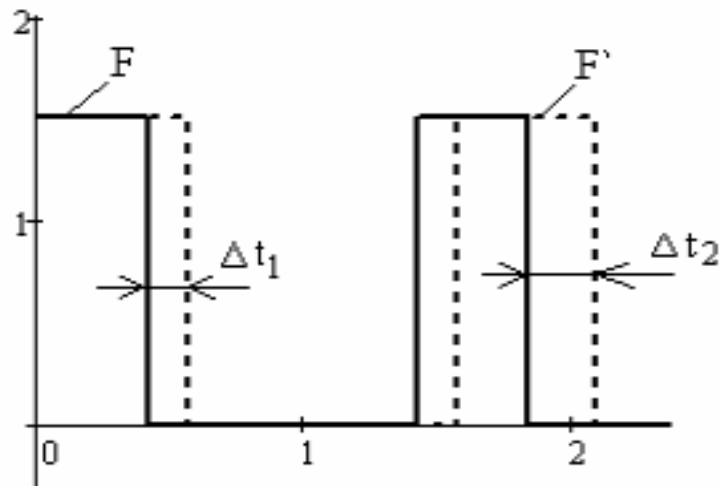


Рисунок 5.18 - Графіки залежності силових впливів з урахуванням коригуючих інтервалів часу Δt_1 та Δt_2

Функціональна схема системи управління, яка включає оптимальні випереджаючі управління (ОПУ), представлена на рис. 5.19. ОПУ включає блок формування завдання на момент (БФМ), вихід якого передається на математичну модель системи.

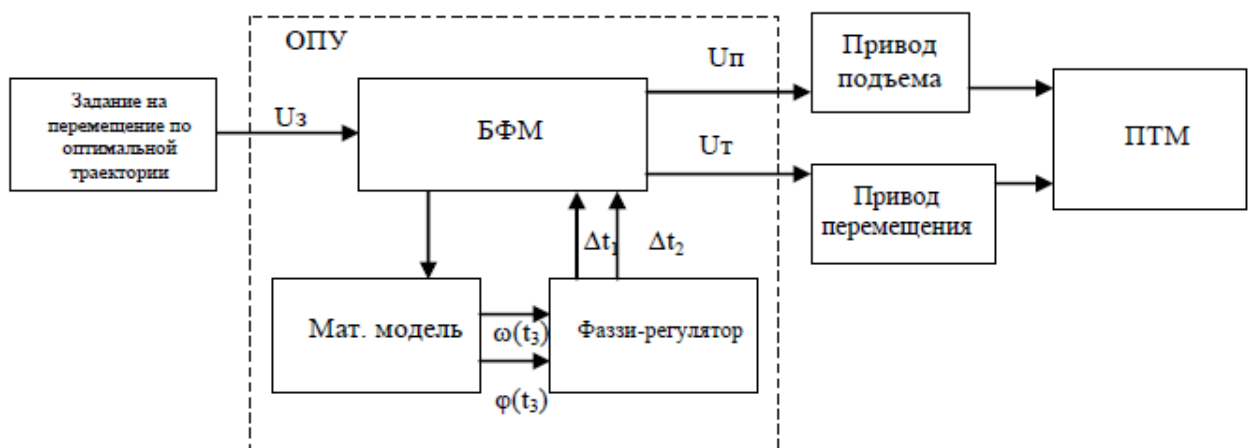


Рисунок 5.19 – Функціональна схема оптимальної системи управління

Вихідні дані математичної моделі, позначені як $\varphi(t_4)$ і $\varphi'(t_4)$, подаються на вхід фаззі-регулятора Δt_1 та Δt_2 . Вихідні дані цього регулятора передаються на блок формування завдання на момент (БФМ), який, у свою чергу, подає сигнал управління на привід механізму переміщення. Фаззі-регулятор генерує додаткові інтервали часу силових впливів, позначені як i .

Для створення фаззі-правил необхідно побудувати фазову траєкторію за двома координатами, а саме φ і φ^1 . При оптимальних показниках якості фазова траєкторія в момент часу повертається в нуль. Залежно від того, в якій чверті знаходиться траєкторія в момент часу, визначаються фаззі-правила.

Розроблений метод управління електроприводами механізмів переміщення і підйому гарантує високу швидкість реакції ПТМ без розгойдування вантажу.

ВИСНОВОК

В магістерській роботі було досліджено електропривод механізму підйому козлового крана з релейною системою керування. Була розглянута технологія роботи, призначення і особливості роботи електроприводу підйому козлового крана ККГЗ-25-32. Була розрахована потужність двигуна і проведена його перевірка по перевантажувальній здатності. В результаті розрахунку було обрано двигун краново-металургійної серії Д810.

Для живлення двигуна обраний комплектний тиристорний електропривод ТКЕ, призначений для живлення електродвигунів постійного струму.

У проекті розраховані параметри двухконтурної системи підлеглого управління, з зовнішнім контуром швидкості і внутрішнім контуром струму. На основі структурної схеми електропривода була розроблена математична модель в середовищі моделювання динамічних систем Matlab / Simulink. Проведено моделювання роботи ЕП при вихідних параметрах об'єкта управління і при їх зміні в межах $\pm 50\%$, що може бути викликано, наприклад, недообліку опору силових кабелів, сезонними коливаннями температури зовнішнього середовища, загустіння мастила і т.п.

Отримані перехідні процеси свідчать про правильність настройки системи. Досліджуваний електропривод з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним вимогам, що пред'являються до електроприводу при вихідних параметрах об'єкта керування та доступні їх відхиленнях.

У роботі синтезована релейний систем керування електроприводом, розроблені структурна і функціональна схеми даної системи, вироблено моделювання в пакеті MATLAB / Simulink. Дана система забезпечує більш якісні процеси при вихідних параметрах системи і при їх варіаціях.

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). Backnays I. Investigation on High Speed SRD Incorporating Amorphous Iron / Backnays 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 / Флюгге-Лотн 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.Л. - 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. –

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. – Алчесвк: 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. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с, ил.

72. Справочник по кранам: В 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. Под общ. ред. М. М. Гохберга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1988. – 536с.

73. А.Б. Царницкий, А.П. Шабатов. Мостовые краны общего назначения. М., 1968.

74. Электрооборудование и системы управления подъемно-транспортными машинами: Учебное пособие / П.А. Сорокин, Д.М. Крапивин М.Н. Хальфин, А.В. Редькин, В.П. Папирняк. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. – 380 с.

75. Иванченко Ф.К. и др. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин.— Киев, издательское объединение «Вища школа», Головное издательство, 1978, 576 с.

76. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2004, – 150 с.

77. Справочник по электрическим машинам. Под общей редакцией И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 465 с.: ил.

78. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Евзеров И.Х., Горобец А.С. Под ред. Прельмутера В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988

79. Капунцов Ю.Д., Ильяшенко Л.А., Елисеев В.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979

80. Система автоматизованого электропривода виробничих установок: Навч. посібник / І. С. Шевченко. – К.: ІСДО, 1994 – 256 с.

81. Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов Е.С. и др. Курсовое проектирование грузоподъемных машин: Учеб. пособие для студентов машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 319с.
82. Т.Н. Краузе. Редукторы. Справочное пособие. 1965.
83. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. Изд. 4-е. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1972 .
84. Путевые машины и механизмы, отраслевой каталог. Часть 1. Москва 1982. – 87 с.
85. J.J. Hamalainen, A.Marttien, L. Baharova, and J. Virkkunen, "Optimal Path Planning for a Trolley Crane : Fast and Smooth Transfer of Load," IEE Proc.-Control Theory and Appl., vol. 142, no. 1, pp.51-57, 1995.
86. Герасимьяк Р.П., Мельникова Л.В. Оптимальное управление крановым механизмом передвижения. // Автоматика. Автоматизация. Электротехн. Комплексы и системы. – 1999 - №1. – С. 87 – 94.
87. Панкратов А.И., Залятов А.Ф. Линеаризация электромеханической системы грузоподъемного механизма. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Днепродзержинск. 2007 г.