

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту: 76 с., 31 рис., 10 табл., 17 джерел.

ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, СИСТЕМА ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, КОНТУР СТРУМУ, КОНТУР ШВИДКОСТІ, МОДЕЛЮВАННЯ, ОХОРОНА ПАРЦІ

Об'єкт дослідження - електропривод механізму переміщення козлового крана.

Метою дипломного проекту є розробка тиристорного електроприводу, розрахунок необхідної потужності двигуна, динамічних характеристик приводу, а також дослідження на математичній моделі реакції приводу при варіаціях параметрів і в аварійних режимах.

У проекті розрахована силова частина системи приводу переміщення крана, розроблена двоконтурна система електроприводу з підпорядкованим регулюванням координат і раціональної динамікою. Система забезпечує необхідну точність і заданий діапазон регулювання швидкості.

Проведено дослідження синтезованої системи на математичній моделі з використанням системи MATLAB.

Ефективність розробленої системи управління визначається застосуванням раціональної динаміки, а також використанням сучасної елементної бази, в тому числі силового перетворювача.

Розроблена система управління може бути використана в електроприводах механізмів переміщення кранів.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Технологічні й технічні данні крана.....	7
1.1 Опис конструкції крана.....	7
1.2 Технічні характеристики	8
1.3 Механізм пересування крана.....	11
2 Розрахунок потужності і вибір приводного електродвигуна.....	15
2.1 Вимоги, які пред'являються до електроприводів і системі електропостачання.....	15
2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна.....	18
3 Вибір системи електроживлення	26
3.1 Вибір комплектного електроприводу.....	26
3.2 Вибір струмообмежувального реактора.....	36
3.3 Вибір згладжуювального реактора	36
3.4 Розрахунок параметрів об'єкта керування	37
4 Розрахунок системи підпорядкованого регулювання	39
4.1 Математичний опис об'єкта управління	39
4.2 Розрахунок регулятора струму.....	41
4.3 Розрахунок регулятора швидкості.....	45
4.4 Розрахунок задавача інтенсивності швидкості	49
5 Моделювання електропривода в MATLAB/SIMULINK.....	52
6 Охорона праці	64
6.1 Вимоги до персоналу	64
6.2 Вимоги техніки безпеки до електрообладнання крану	64
6.3. Заходи з охорони праці	65
Висновки.....	73
Перелік джерел посилання	74

ВСТУП

На сьогоднішній день козлові крани є найпоширенішими видами кранів. Вони використовуються в різних видах будівництва і виробництва. Велика популярність цих кранів обумовлюється практичністю, відносно невисокою ціною, хорошою вантажопідйомністю і простотою в експлуатації. Затрати роботи козлового крана значно нижче ніж у баштових та гусеничних кранів з аналогічною вантажопідйомністю. Козлові крани отримали широке застосування в обслуговуванні складів і цехів, завантаження, розвантаження і переміщення в основному штучних вантажів, для монтажу і демонтажу різних будівельних і промислових споруд і секційного монтажу в суднобудуванні, а також в обслуговуванні ГЕС. Для монтажу великих виробів (наприклад, в суднобудуванні) застосовують крани з 2 вантажними візками, що дозволяють кантувати вантаж у всякому положенні. Крани будівельного призначення, що мають змінне місце роботи, виконуються баштові. Термін роботи крана оцінюється в 20-25 років.

Стандартне виконання і пристрій козлового крана характеризується вантажопідйомністю в межах від 5 до 60 тонн, а також наявністю широкого прольоту 10-50 метрів. Нестандартні моделі можуть мати ряд технічних особливостей, а також здатні здійснювати підйом і переміщення вантажу вагою від 60 до 500 тонн. Пристрій козлового крана дозволяє використовувати його практично в будь-яких умовах. В основі конструкції даного механізму лежить балочний міст, закріплений на рейковому шляху і таль. Працює такий кран за допомогою електродвигуна, який встановлений на галереї моста. Конструктивна особливість козлового крана полягає в наявності опор, пролітної балки, талі з механізмом пересування, електрообладнання, ходових візків і пульта, або кабіни управління. Пересування кранового візка, на якій розміщено підйомний пристрій, здійснюється за допомогою рейок. Кранові ж візки закріплені через кінцеві кран-балки. При необхідності збільшення прольоту крана, можуть

застосовуватися додаткові балки. За допомогою козлових кранів можна здійснювати підйом і транспортування великогабаритних вантажів. При цьому крани даного виду вважаються одними з найбезпечніших, надійних і довговічних.

Можна виділити наступні основні типи козлових кранів: універсальні або загального призначення і спеціальні. Універсальні крани використовуються для обслуговування різних будівельних і складських майданчиків зі схожими умовами експлуатації. Конструкційними особливостями таких кранів є: довжина проліт - від 12 до 32 метрів, висота підйому вантажу - від 7 до 9 метрів, робочий виліт консолі - в межах 6-8 метрів. Широко використовуються козлові крани, опори яких складаються з роздільних стояків, рознесених на відстань, необхідне для пропуску вантажного візка. Також козлові крани розрізняються залежно від характеру опори. Козлові крани з жорсткими опорами конструктивно простіші, ніж крани з однією жорсткою і однією еластичною опорами, але при цьому зменшуються їх згинальні моменти від перекосного і горизонтального динамічного навантаження.

У козлових кранах можуть використовуватися такі вантажозахватні пристрої: грейфер, гак і магніт та ін. Грейфер - пристрій, який являє собою черпак, який прикріплюється до підйимального механізму крана і служить для захоплення і вивантаження різних матеріалів (вугілля, коксу, піску, землі, гірських порід і т.п.). Крюк - пристрій для пересування штучних вантажів закріплених на тросах. Магніт - пристрій для пересування металевих вантажів.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ Й ТЕХНІЧНІ ДАННІ КРАНА

1.1 Опис конструкції крана

Козловий ККС-10 є краном загального призначення. Знаходить широке застосування для оперативного обслуговування відкритих складів і навантажувальних майданчиків. Даний кран знайшов широке використання також 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 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 ККС-10 комплектується знімними вантажозахоплювальними пристроями (траверсами, канатними стропами) і вантажопідйомними електромагнітами і грейферами, а також пристосуваннями для монтажу. Пристосування для монтажу крана складаються з чотирьох поліспастів, чотирьох гальмових башмаків.

Живлення крана ККС-10 здійснюється від мережі трифазного змінного струму напругою 380 В, частотою 50 Гц.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд козлового крана ККС-10

1.2 Технічні характеристики

Кран козловий ККС-10 електричний володіє вантажопідйомністю в 10 тонн з підвісним вантажним монорельсовим візком. Проліт крана козлового становить 14,0 - 32,0, висота підйому 9,0 метрів; 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°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- стандартні групи режиму роботи крана - ЗК, кліматичне виконання - У1;
- необхідна напруга 380 В;
- обладнання не призначене для роботи над місцями зберігання вибухових речовин.

Кран ККС-10 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 контактної апаратури за рахунок зниження числа включення приводу при здійсненні доводочних операцій.

На рисунку 1.2 наведено габаритне креслення крана ККС-10, а його технічні характеристики наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики крана ККС-10

Найменування	Значення
1. Вантажопідйомність Q, т	10
2. Висота підйому H, м	9
3. Проліт L, м	14 - 32
4. Виліт консолі L _к , м	6,3
5. База ходової частини крана B, м	11,9
6. Будівельні довжини консолей L _{с1} / L _{с2} , м	10,93/10,93
7. Швидкість підйому V _{под} , м / хв	8,4
8. Скорість пересування крана V _к , м / хв	31,6
9. Швидкість пересування візка V _т , м / хв	30,8
10. Група режиму роботи крана	A3
11. Навантаження на ходове колесо при роботі крана, кН	220
12. Тип кабіни	СК/ПК
13. Число приводних візків механізму пересування крана, шт.	4
14. Конструктивна маса, т	27

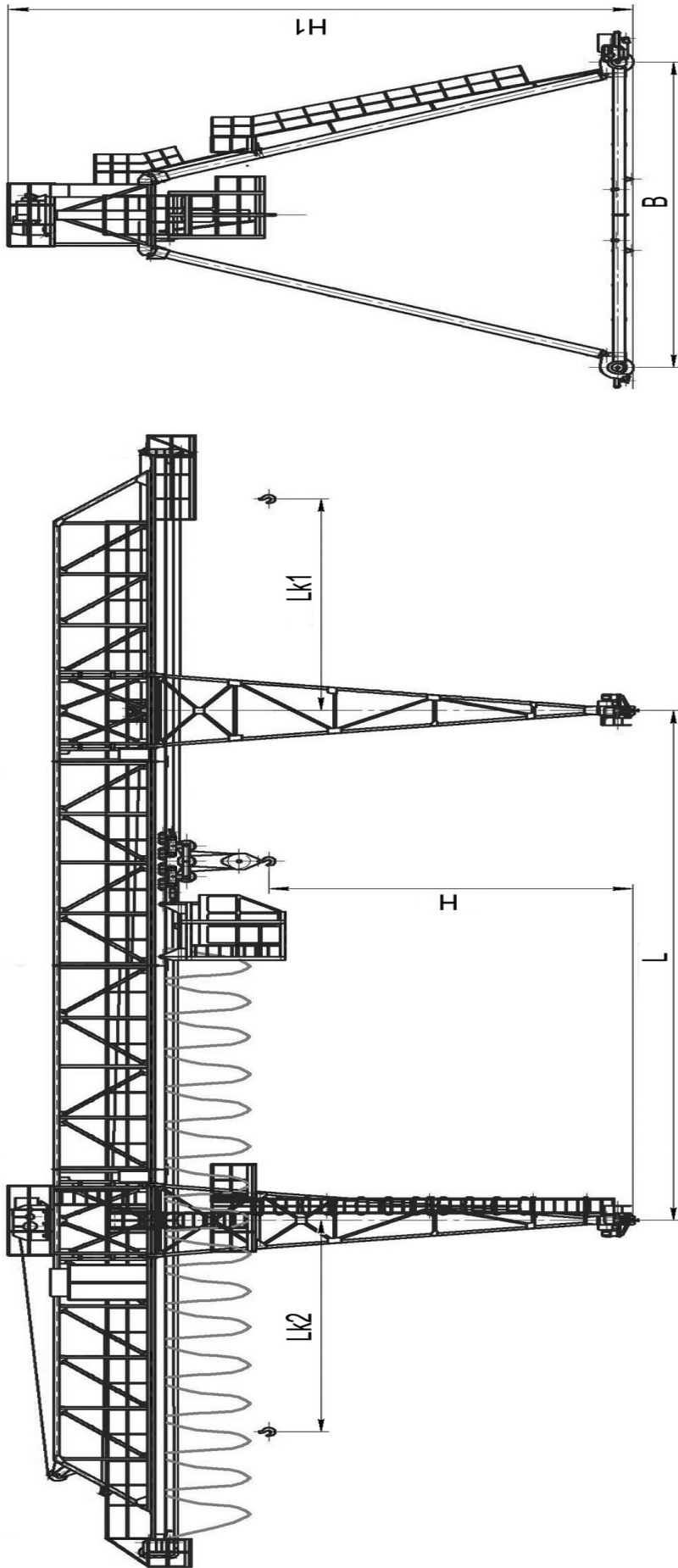


Рисунок 1.2 – Габаритне креслення козлового крана

1.3 Механізм пересування крана

Конструкція ходової візки козлового крана показана на рисунку 1.3. Всі вузли і механізми візка змонтовані на його рамі трапецеподібні, звернені малим підставою вниз. Чотири вертикальні стінки рами зварені з верхніми та нижніми майданчиками. В похилі грані стінок, крім металевих пластин, уварені полугнезда буксових вузлів. Візок має два ходових колеса: провідне і ведене. На маточини коліс напесовані і заштіфтовані зубчасті вінці. Провідне колесо закріплено на валу, змонтованому в буксових вузлах через сферичні самоустановлювальні підшипники кочення. Так само, але тільки на осі змонтовано і ведене колесо. Обертання з ведучого колеса на ведене передається за допомогою зачеплення їх зубчастих вінців з проміжним зубчастим колесом. Останнє вільно обертається на спарених підшипниках кочення відносно нерухомої осі, закріпленої в стінках рами. Вал ведучого колеса пов'язаний з вихідним валом вертикального редуктора. Обертання швидкохідному валу редуктора повідомляється електродвигуном за допомогою зубчастих муфт і вала-вставки, які закривають кожухом. Муфта виконана з вбудованим гальмівним шківом, на якому встановлено гальмо.

На рисунку 1.3 застосовані наступні позначення:

1-зубчаста муфта; 2-кожух муфти; 3-вал-вставка; 4-муфта шків; 5-гальма; 6-електродвигун; 7-планка кріплення осі; 8-захисний козирок; 9-редуктор; 10-кожух гальма; 11-щоби балансірні; 12-рама візка; 13-буксових вузол; 14-провідне ходове колесо; 15-зубчастий вінець; 16-підшипник; 17-вал; 18-проміжне зубчасте колесо; 19-вісь; 20-підшипники; 21-ведене ходове колесо.

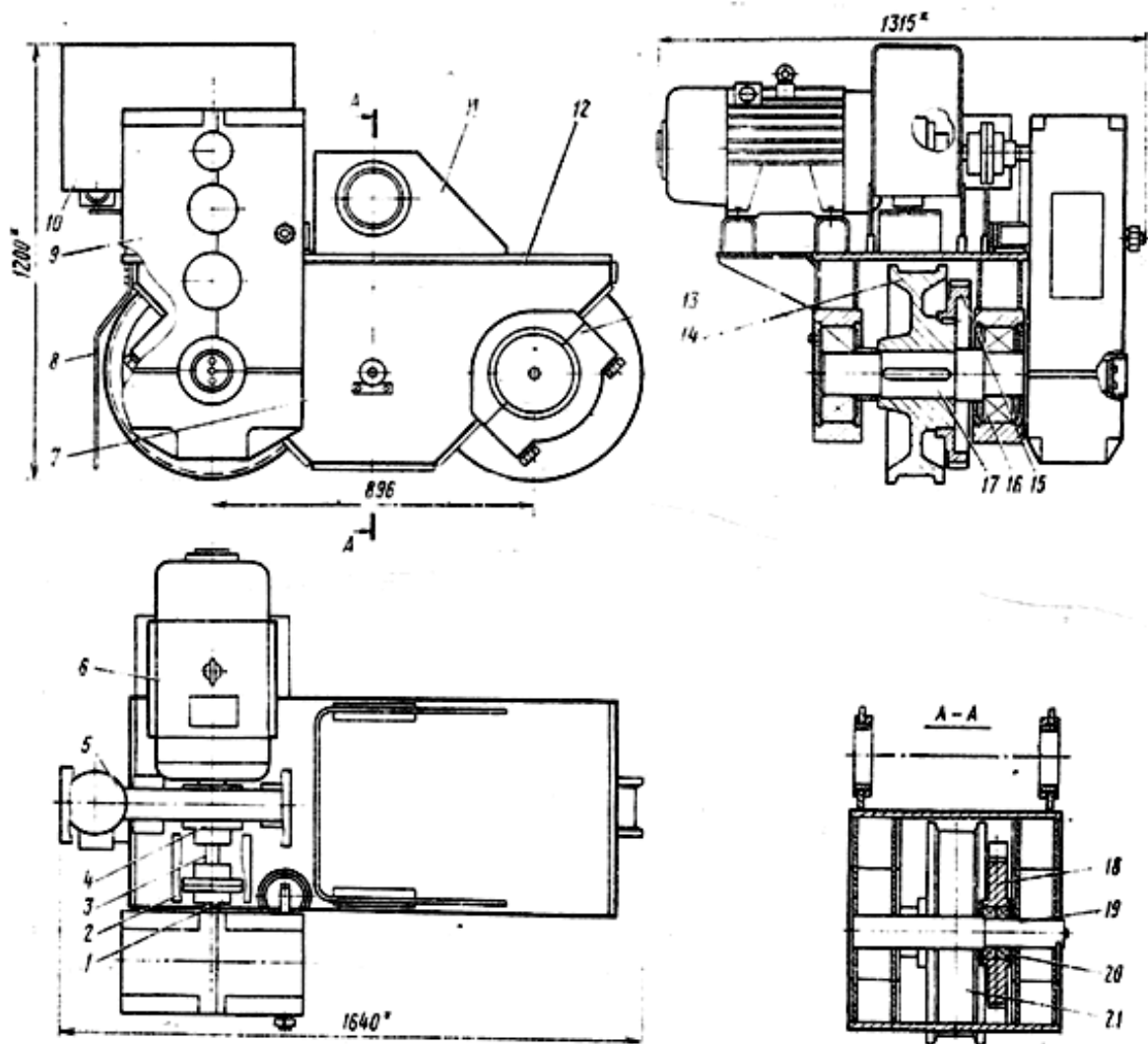


Рисунок 1.3 - Конструкція ходової візка крана

Кінематична схема механізму вантажного візка козлового крана ККС-10 наведена на рисунку 1.4. Параметри складових частин механізму пересування зведені в таблицю 1.2.

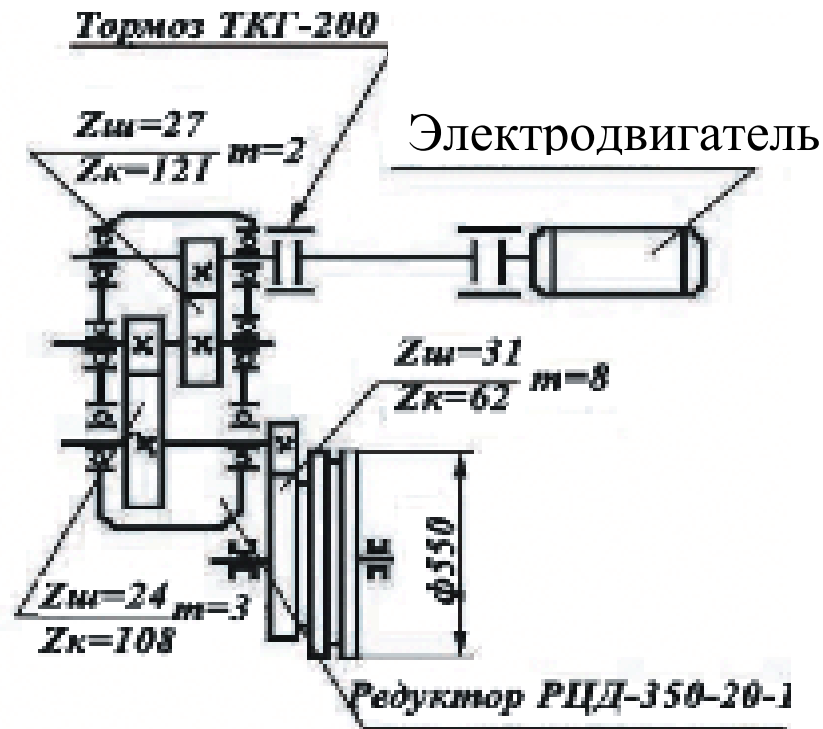


Рисунок 1.4 – Кінематична схема механізму пересування крана

Таблиця 1.2 – Складові частини механізму пересування крана

Муфта зубчаста в зборі $z = 30$ $m = 2,5$ КС.26.00.000, КС.37.00.00 (візок ведуча, лебідка візки)
Редуктор РЦД-350
Редуктор 1Ц2У200 (аналог РЦД-350) (механізм пересування)
Муфта зубчаста в зборі $z = 40$ $m = 3$ КС.18.01.000 (візок ведуча)
Шестерня $z = 31$ $m = 8$ КС.07.08.004
Зубчастий вінець $z = 62$ $m = 8$ КС.07.05.002 (колесо приводное)
Шків гальмівний $d = 200$ mm 260.3-19100 (хід крана)
Колесо ходове КС.07.05.001 (Колесо ходове К.12,5.01.04.110)
Колесо ходове приводне КС.07.05.001 в зборі з Вінцем зубчастим $m = 8$ $z = 62$ КС.07.05.002 (Колесо ходове в зборі з вінцем К.12,5.01.04.100)

Визначимо загальне передавальне число редуктора механізму пересування козлового крана використовуючи дані таблиці 1.2 і рисунка 1.4:

$$i_p = \frac{z_{k1}}{z_{ш1}} \cdot \frac{z_{k2}}{z_{ш2}} \cdot \frac{z_{k3}}{z_{ш3}} = \frac{121}{27} \cdot \frac{108}{24} \cdot \frac{62}{31} = 40.33 \quad (1.1)$$

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Системи керування електроприводом і механізмів пересування повинні забезпечувати: оптимальні прискорення і уповільнення, яких припускаються за умовами технологічного процесу; надійне аварійне механічне гальмування; надійне робоче електричне гальмування без небезпечної розгойдування вантажів; регулювання швидкості пересування в необхідному діапазоні; розгін механізму без пробуксовування ходових коліс і гальмування.

Для механізмів пересування кранів при режимах Т і ВТ застосовуються системи електроприводів, як постійного, так і змінного струму.

2.1 Вимоги, які пред'являються до електроприводів і системі електропостачання

2.1.1 Вимоги 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) момент, що розвивається, двигуна повинен бути такий, щоб була повна можливість забезпечення роботи механізму з заданою інтенсивністю;
- 4) при заданих частоті і числі включень в годину двигуна не повинно бути перегріву обмоток, через якого можливий 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 противосиростну 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) 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, які пред'являються до автоматичного керування електроприводами

Механізми мостових кранів, як правило, працюють в дуже напружених режимах: велике число включень в 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 те, що потужності двигунів кранових установок досить великі, управління ними за допомогою ручної 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 «вперед» 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 живлення 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 живлення крана, якщо потрібно знаходження людини на поверхні моста або візки.

2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна

У завдання вибору двигуна кранового механізму входять попередній вибір двигуна, розрахунок його 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 параметрами навантаження (струму, моменту, потужності) або середнім втратам дають достовірні результати тільки тоді, коли досить точно відома навантажувальна 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.

Максимальна статична потужність, при переміщенні вантажу

$$\begin{aligned}
 P_c &= \frac{(G + Q) \cdot v_k}{\eta_{\text{мех}}} \cdot \left(\frac{\varphi_n \cdot d_{\text{ст}} + 2 \cdot \mu}{D_k} \cdot K_{\text{рб}} + \beta \right) \cdot g = \\
 &= \frac{(27000 + 10000) \cdot 0.53}{0.85} \cdot \left(\frac{0.015 \cdot 0.1375 + 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}}{0.55} \cdot 1.35 + 0.05 \right) \cdot 9.81 = \quad (2.1) \\
 &= 13016 \text{ (Вт)} = 13 \text{ (кВт)}
 \end{aligned}$$

де Q - маса вантажу, що піднімається (вантажопідйомність),

$Q = 10000$ кг;

G - сумарна маса крана, $G = 27000$ кг;

v_k - необхідна швидкість пересування крана:

$$v_k = 31.6 \text{ м / мин} = \frac{31.6}{60} = 0.53 \text{ м / с};$$

$\eta_{\text{мех}}$ - ККД механізму пересування, $\eta_{\text{мех}} = 0.85$;

φ_n - коефіцієнт тертя в підшипниках кочення маточин коліс,

$\varphi_n = 0,015$;

D_k - діаметр ходового колеса, $D_k = 0.55$ м;

$d_{\text{ст}}$ - діаметр маточини ходового колеса,

$$d_{\text{ст}} = 0.25 \cdot D_k = 0.25 \cdot 0.55 = 0.1375 \text{ м};$$

μ - коефіцієнт тертя кочення, $\mu = 0.5 \cdot 10^{-3}$;

K_{p6} – коефіцієнт форми ходового колеса, що враховує тертя реборд ходового колеса, $K_{p6} = 1.3 \div 1.4$;

β – ухил шляху крана, $\beta = 0.05$;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$.

Статична потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{c1} = \frac{P_c}{n} = \frac{13}{4} = 3.25 \text{ (кВт)} \quad (2.2)$$

де $n = 4$ - кількість приводних візків механізму пересування.

Швидкість і частота обертання двигуна складуть:

$$\omega_{дв} = \frac{i_p \cdot V_k}{0.5D_k} = \frac{40,33 \cdot 0,53}{0,5 \cdot 0,55} = 77,73 \text{ с}^{-1}, \quad (2.3)$$

$$n_{дв} = \frac{30 \cdot \omega_{дв}}{\pi} = \frac{30 \cdot 77,73}{3,14} = 743 \text{ об / мин.}$$

Наведений момент інерції поступально рухомих мас в розрахунку на один двигун:

$$J'_{пост1} = \frac{(G + Q)}{n} \cdot \left(\frac{0.5D_k}{i_p} \right)^2 = \frac{(27000 + 10000)}{4} \cdot \left(\frac{0.5 \cdot 0.55}{40.33} \right)^2 =$$

$$= 0.43 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (2.3)$$

Розрахункова потужність приводу переміщення:

$$P_p = \frac{1}{k_n \cdot \gamma_n} \cdot \left[\frac{(G + Q) \cdot v_k \cdot \alpha' \cdot a}{\eta_{мех}} + P_c \right] =$$

$$= \frac{1}{0.9 \cdot 2} \cdot \left[\frac{(27000 + 10000) \cdot 0.53 \cdot 2 \cdot 0.25}{0.85} + 13016 \right] =$$

$$= 13640 \text{ (Вт)} = 13.6 \text{ (кВт)} \quad (2.4)$$

де k_n – коефіцієнт використання двигуна по пусковому моменту, згідно [1, табл. 6.2] $k_n = 0.9$;

γ_n – кратність відношення максимального пускового моменту до номінального моменту двигуна, згідно [1, табл. 6.2] $\gamma_n = 2$;

α' – відношення моментів інерції загального до наведеного моменту інерції поступально рухомих частин, попередньо приймаєм:

$$\alpha' = \frac{J_{\Sigma}}{J'_{\text{пост}}} = 2;$$

a - прискорення крана при пуску, приймаємо $a = 0.25 \text{ м / с}$.

Розрахункова потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{p1} = \frac{P_p}{n} = \frac{13.6}{4} = 3.4 (\text{кВт}) \quad (2.5)$$

Так як $P_{p1} > P_{c1}$, то для подальших розрахунків приймаємо P_{p1} . По таблиці 6.5 з [1] коефіцієнт $k_p = 0.75$ для прийнятої системи електроприводу з регульованим перетворювачем. Отже необхідна розрахункова потужність двигуна складе:

$$P_{\text{ном.т1}} = \frac{P_{p1}}{k_p} = \frac{3.4}{0.75} = 4.53 (\text{кВт}) \quad (2.5)$$

Попередньо вибираємо двигун постійного струму краново-металургійної серії ДЗ1 з паспортними даними наведеними в таблиці 2.1. Дані взяті з [1].

Таблиця 2.1 - Паспортні дані двигуна ДЗ1

1. Номінальна потужність P_H , кВт при ПВ, 40%	6.8
2. Номінальна потужність P_H , кВт при ПВ, 25%	8.5
3. Напряга живлення якоря U_H , В	220
4. Струм якоря номінальний I_H , А	37
5. Номінальна частота обертання n_H , об / мин	880
6. Момент інерції $J_{\text{дв}}$, кг · м ²	0,3
7. Опір якоря і додаткових полюсів $r_{\text{я}}$, Ом	0,42

Номинальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 880}{30} = 92,1 \text{ c}^{-1}. \quad (2.4)$$

Визначаємо сумарний момент інерції в розрахунку на один двигун:

$$J_{\Sigma 1} = 1,2 \cdot J_{ДВ} + J'_{пост1} = 1,2 \cdot 0,3 + 0,43 = 0,79 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.5)$$

Еквівалентну ККД визначається за формулою:

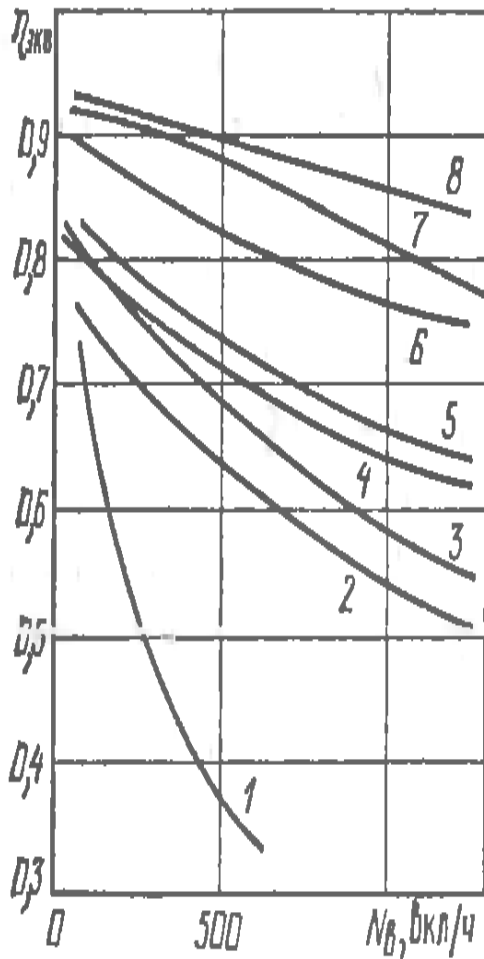
$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{1 + \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ.Н}}}{\eta_{\text{ЭКВ.Н}}} \cdot \frac{J_{\Sigma 1}}{1,2 \cdot J_{ДВ}} \cdot \left(\frac{n_{\text{МАХ}}}{1000}\right)^2}, \quad (2.6)$$

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

$n_{\text{МАХ}} = 1,05 \cdot n_H = 1,05 \cdot 880 = 924$ об / мин - максимальна частота обертання двигуна (при однозонному регулюванні дорівнює швидкості холостого ходу);

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

При числі включень в годину $N_B = 200$ для тиристорного електроприводу 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 двухскоростных короткозамкнутых двигателей; 7 — гирнсторный привод постоянного тока; 8 — частотно-управляемые односкоростные короткозамкнутые двигатели

Рисунок 2.1 — Залежності $\eta_{\text{ЭКВ}.N} = f(N_B)$

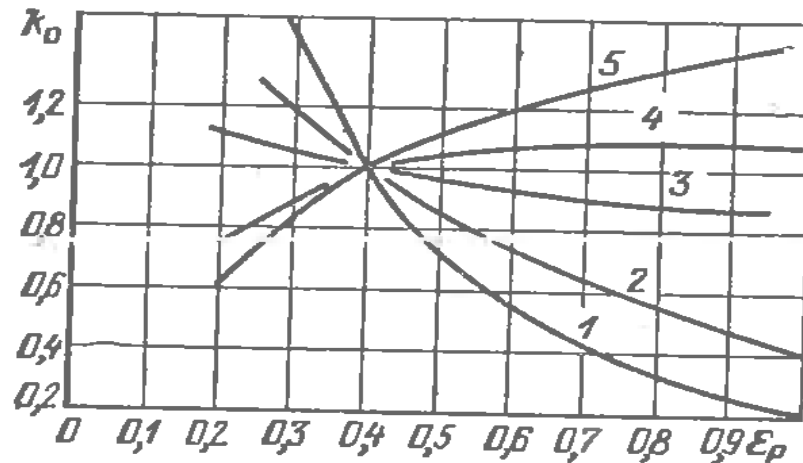
В результаті отримаємо:

$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{0,94}{1 + \frac{0,94 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{0,79}{1,2 \cdot 0,3} \cdot \left(\frac{880}{924}\right)^2} = 0,9. \quad (2.7)$$

Перевіряємо двигун по тепловому режиму:

$$\begin{aligned} P_{\text{НОМ.Т}} &= \frac{K_3 \cdot K_{\text{ЭКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_H}}}{K_O \cdot K_P} \cdot \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - K_D \cdot (\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ}})} \cdot P_{\text{cl}} = \\ &= \frac{1 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{0,4}}}{1 \cdot 1} \cdot \frac{0,94}{0,94 - 1,25 \cdot (0,94 - 0,9)} \cdot 3,25 = 2,75 \text{ кВт} \end{aligned} \quad (2.8)$$

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], $K_0 = 1$ по рисунку 2.2 взятому з [1].



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

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

Оскільки $P_{\text{НОМ.Т}} < P_H$, то двигун Д31 підходить по тепловому режиму.

Перевіряємо двигун за умовами зчеплення. З цією метою визначаємо швидкість пересування крана з вибраним двигуном:

$$V_H = \frac{0.5 \cdot D_K \cdot \omega_H}{i_p} = \frac{0.5 \cdot 0.55 \cdot 92.1}{40.33} = 0.63 \text{ м/с.} \quad (2.8)$$

Максимально допустиме прискорення визначаємо за формулою з [1], з урахуванням роботи механізму на відкритому повітрі (мокрі рейки):

$$a_{\text{max}} = 0.85 \cdot \beta - 0.2 = 0.85 \cdot 1 - 0.2 = 0.65 \text{ (м/с}^2\text{)}, \quad (2.9)$$

де β – відношення числа провідних коліс до загальної кількості коліс,
 $\beta = 1$.

Знаходимо реальне відношення моментів інерції механізму:

$$\alpha'_p = \frac{J_{\Sigma 1}}{J'_{\text{пост}1}} = \frac{0.79}{0.43} = 1.84. \quad (2.10)$$

Визначаємо забезпечується двигуном прискорення:

$$\begin{aligned} a_p &= \frac{k_p \cdot \gamma_p \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot P_n - P_{cl}}{0.25 \cdot (G + Q) \cdot v_n \cdot \alpha'_p} = \frac{0.9 \cdot 2 \cdot 0.85 \cdot 6.8 \cdot 10^3 - 3.25 \cdot 10^3}{(27000 + 10000) \cdot 0.63 \cdot 1.84} = \\ &= 0.667 \text{ (м / с}^2\text{)}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Так як $a_p > a_{\text{max}}$, то для забезпечення умови зчеплення необхідно обмежити прискорення застосувавши задавач інтенсивності швидкості.

Остаточно приймаємо двигун Д31 як приводний для механізму пересування крана ККС-10.

3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

3.1 Вибір комплектного електроприводу

Виходячи з вимог, що пред'являються до механізму підйому крана, обраний 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) більш м'яка 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 тій ж 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 трифазного 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 двох обмотувальний трансформатор меншої потужності. Перевага перехресної схеми в тому, що в даній схемі аварійні процеси при одночасному включенні тиристорних груп протікають легше,

тому цю схему 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 переводиться 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 рівняння виконується за умови $\alpha_B + \alpha_U = 180^\circ$. При цьому способі управління в зрівняльному 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 інверторна 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 протікання невеликого зрівняльного струму сприятливо позначається на статичних характеристиках ТП. Таким чином переваги спільного управління:

- 1) Відсутність необхідності в перемиканні силового кола;
- 2) Висока швидкодія при переході з одного режиму в інший і постійна готовність до цього переходу;

3) Однозначність в статичних характеристиках ТП.

У електроприводі застосуємо перетворювач з роздільним управлінням вентильними 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 розробляється ТП застосуємо синусоїдальна опорна напруга.

Для вирівнювання навантажень в межах однієї осі (передній або задній) і відповідно зменшення перекосів при русі включаємо приводні двигуни по ланцюгу якоря послідовно і заживлюємо від одного перетворювача. Ланцюги збудження обох двигунів однієї осі підключаємо до збудника паралельно. Це дозволить в необхідних межах підлаштувати механічні характеристики двигунів. Схема включення електроприводів пересування козлового крана приведена на рисунку 3.1.

З огляду на, що обрані двигуни мають номінальну напругу $U_H = 220\text{В}$ і включаються по два послідовно, живлення тиристорних перетворювачів здійснюємо від мережі 380В через струмообмежуючі реактори.

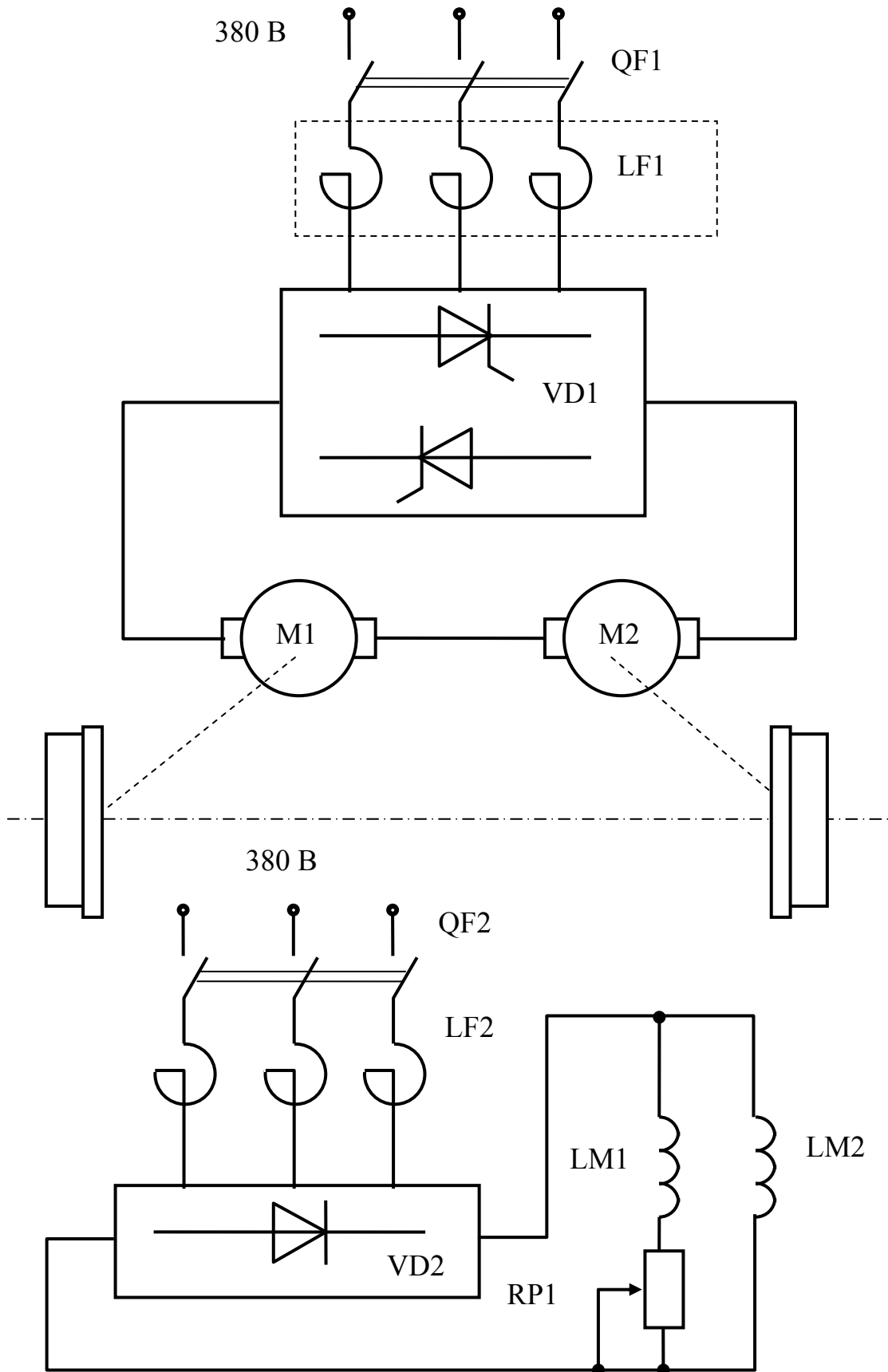


Рисунок 3.1 – Схема включення електропривода однієї осі

Для живлення двигуна вибираємо комплектний електропривод серії КТЕ. Електроприводи комплектні тиристорні постійного струму (КТЕ) з природним і примусовим повітряним охолодженням призначені для споживачів постійного струму, що вимагають автоматичного регулювання швидкості обертання, положення вала, потужності, випрямленої напруги, ЕРС двигуна, струму збудження, натягу матеріалу.

КТЕ використовуються в металургійній промисловості та інших галузях народного господарства. На струми 2500 А і вище випускаються також тиристорів з примусовим водяним охолодженням.

Структура умовного позначення

КТЕ Х / Х Х Х-Х Х Х-Х-Х Х Х Х Х-Х УХЛ4:

КТЕ - комплектний тиристорний електропривод;

Х / Х номінальний струм електроприводу, групи "ВПЕРЕД" / групи "НАЗАД" *;

Х - номінальна напруга двигуна, В;

Х - виконання: М - модернізований (до 1000 А; 750 В), Е - посиленої ізоляції, з природним охолодженням, В - посиленої ізоляції, з вбудованим вентилятором;

Х - виконання КТЕ за кількістю питомих двигунів: 1 – з одним двигуном, 2 - з двома двигунами, 0 - збудник **;

Х - режим роботи: 1 - нереверсивний, 2 - реверсивний;

Х - зв'язок з мережею живлення: Р - реакторна, Т - трансформаторна (Т2 - для 12-пульсної схеми випрямлення), Н - безпосередня, 0 - поставка без трансформатора і реактора (02 - для 12-пульсної схеми випрямлення);

Х - умовне позначення системи автоматичного регулювання (САР): 4 - швидкості (ЕРС), однозонна, 5 - положення, однозонна, 8 - швидкості, двузонна, 2 - індивідуального виконання на вимогу замовника;

Х - наявність вбудованого лінійного контактора: 0 - немає, К - є;

X - наявність вбудованого пристрою динамічного гальмування: 0 - немає, Д - є;

X - наявність вбудованого пристрою живлення електромагніту механічного гальма: 0 - немає, М - є;

X - наявність пристрою живлення обмотки збудження тахогенератора: 0 - немає, Т - є;

X - виконання вбудованого збудника (таблиця);

X - кількість КТЕ в одній шафі;

УХЛ4 - кліматичне виконання і категорія розміщення по ГОСТ 15150-69.

* Струм групи "Назад" вказується для реверсивних несиметричних КТЕ.

** У КТЕ-збудників вбудовані пристрої відсутні (відповідні індекси не ставляться).

Перетворювачі випускаються на наступні напруги і струми:

- номінальний випрямлений струм, А - 10; 25; 50; 100; 200; 320; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000;

- номінальне випрямлена напруга, В - 220; 440; 600; 750; 930
Номінальна напруга трифазної мережі силових ланцюгів, В - 205; 380; 410; 6000, 10 000.

З огляду на параметри обраного двигуна, вибираємо КТЕ 50. 440. М-2 + 2 Р-4 УХЛ4, тобто перетворювач на струм 50А і випрямлену напругу 440 В модернізований, дводвигуновий, реверсивний з живленням від мережі 380 В через струмообмежувальний реактор. Система регулювання ЕРС або швидкості.

На рисунку 3.2 представлена функціональна схема КТЕ.

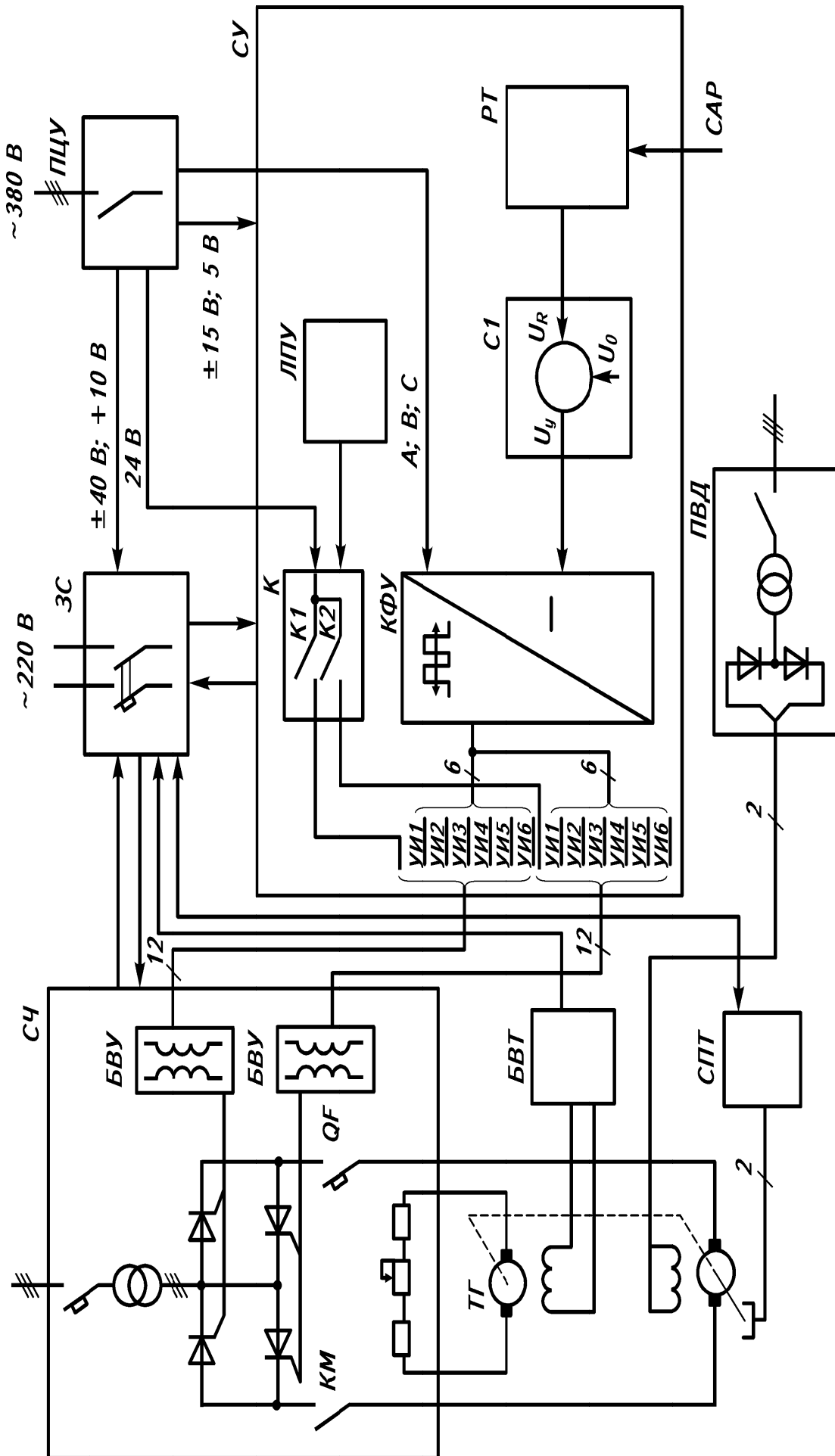


Рисунок 3.2 – Функціональна схема КТЕ

На рисунку 3.2 прийняті наступні позначення:

ЛПУ - логічне перемикаючий пристрій;

К - ятка ключів перемикаючих імпульсів;

ПВД - живлення збудження двигуна;

СПТ - система живлення електромагнітного гальма;

ПЦУ - живлення ланцюгів управління;

УІ1-УІ6 - імпульси управління;

БВУ - блок вихідних пристроїв;

КФУ - канал фазового управління;

ТГ - тахогенератор;

С1 - ятка зв'язку;

КМ - силовий контактор;

РТ - регулятор струму;

U_y, U_R, U_0 - зовнішні сигнали;

QF - автоматичний вимикач.

На рисунку 3.3 приведена функціональна схема системи автоматичного регулювання швидкості реверсивного однозонного електроприводу серії КТЕ. На рисунку 3.3 позначено:

ZI_c - задавач інтенсивності швидкості;

$U_{зи}$ - напруга задавача інтенсивності;

Σ - суматор;

d_n - прискорення;

$\Sigma_{n_{\max}}$ - сумарний сигнал, який відповідає максимальне значення швидкості;

Σ_n - сумарне значення швидкості;

РС - регулятор швидкості;

i_{\max} - сигнал, який відповідає максимальному значенню струму двигуна;

П-режим - пропорційний режим;

ПІ-режим - пропорційно-інтегральний режим;

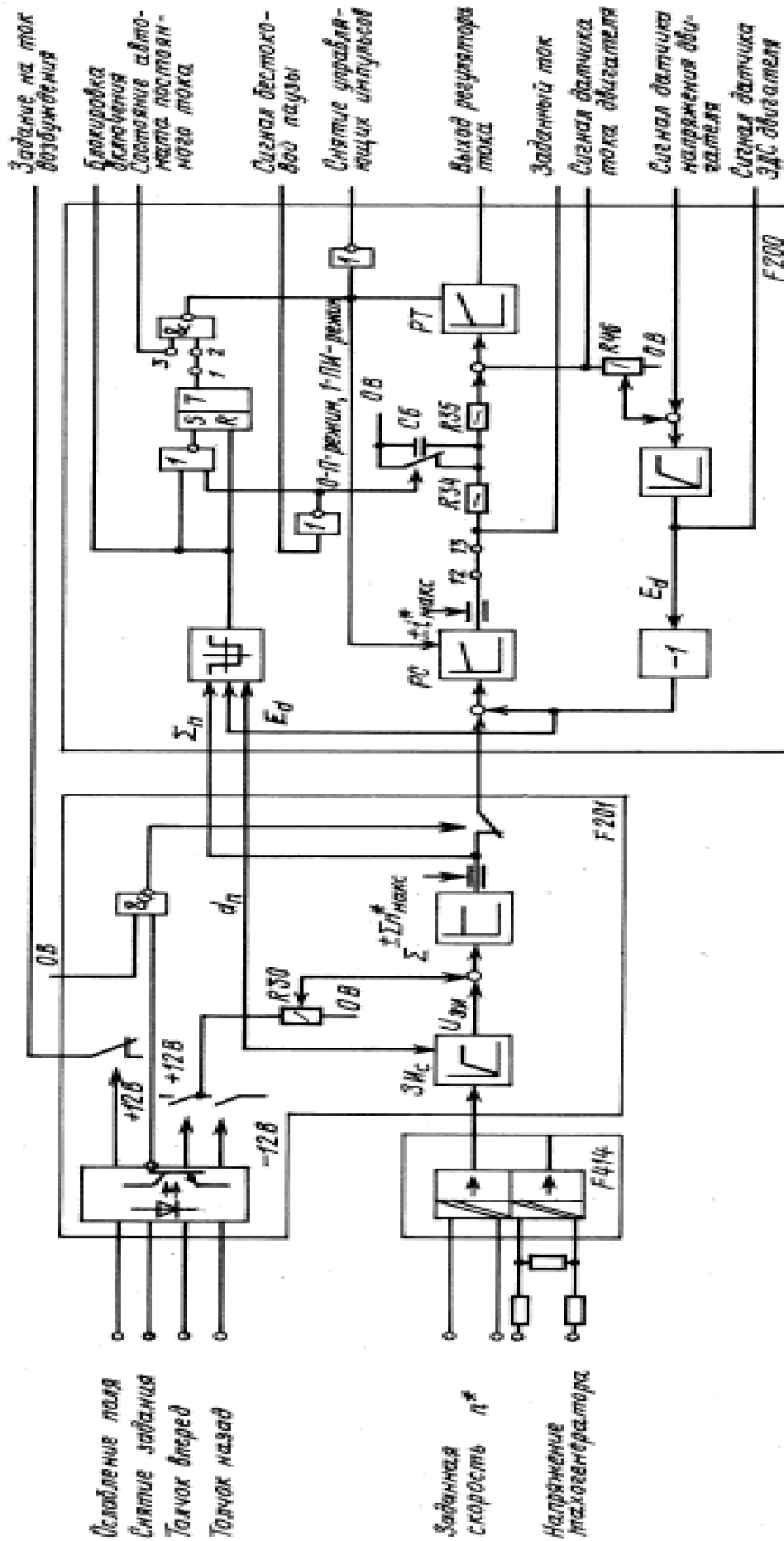


Рисунок 3.3 – Функциональная схема САР электропривода серии КТЕ

- РТ - регулятор струму;
- F200 - ятка регулювання;
- F201 - ятка завдання швидкості;
- F414 - ятка гальванічної розв'язки.

3.2 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 ГЛЦІ671334 на 50А.

Параметри струмообмежувального реактора ГЛЦІ671334:

- лінійна напруга мережі живлення $U_L = 380 \text{ В}$;
- струм навантаження тиристорного перетворювача $I_{\text{ТП}} = 50 \text{ А}$;
- номінальна індуктивність $L_{\text{ТОР}} = 0.55 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$;
- активний опір $r_{\text{ТОР}} = 9.1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

3.3 Вибір згладжувального реактора

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

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

$$E_{\text{д0}} = 1.35 \cdot U_{2\text{л}} = 1.35 \cdot 380 = 513 \text{ (В)}. \quad (3.1)$$

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

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

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

m - пульсність перетворювача (для мостовий трифазної схеми $m = 6$)

$$L_{\text{э}(\text{min})} = \frac{0.13}{0.15} \cdot \frac{513}{6 \cdot 314 \cdot 37} = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (3.3)$$

Індуктивність якоря двигуна визначимо використовуючи формулу Уманського-Лінвілля:

$$L_{\text{яд}} = \frac{0.25 \cdot U_H}{I_H \cdot \omega_H \cdot p} = \frac{0.25 \cdot 220}{37 \cdot 92.1 \cdot 2} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.4)$$

Розрахункова індуктивність реактора, що згладжує (два двигуна послідовно):

$$\begin{aligned} L_{\text{ср}} &= L_{\text{э}(\text{min})} - 2 \cdot L_{\text{тор}} - 2 \cdot L_{\text{яд}} = 6.4 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.55 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = \\ &= -10.7 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

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

3.4 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:

$$R_{я} = k_t \cdot r_{я} = 1.38 \cdot 0.42 = 0.58 \text{ Ом}. \quad (3.6)$$

де $k_t = 1.38$ - температурний коефіцієнт.

Еквівалентний опір якірного ланцюга:

$$R_{\text{э}} = 2 \cdot R_{я} + 2 \cdot r_{\text{тор}} + \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{н}}} = 2 \cdot 0.58 + 2 \cdot 0.0091 + \frac{2}{37} = 1.23 \text{ (Ом)}. \quad (3.7)$$

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

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга:

$$L_{\text{э}} = 2 \cdot L_{\text{яд}} + 2 \cdot L_{\text{тор}} = (2 \cdot 8 + 2 \cdot 0.55) \cdot 10^{-3} = 17.1 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (3.8)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{э}}}{R_{\text{э}}} = \frac{0.0171}{1.23} = 0.014 \text{ (с)}. \quad (3.9)$$

Потокозчеплення машини

$$C\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{я}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 37 \cdot 0.58}{92.1} = 2.16 \text{ (В} \cdot \text{с)}. \quad (3.10)$$

Електромеханічна постійна часу (при розрахунку враховуємо що два двигуни з'єднані послідовно по якору і працюють на одне навантаження):

$$T_{\text{м}} = \frac{2 \cdot J_{\Sigma 1} \cdot R_{\text{э}}}{(2 \cdot C\Phi)^2} = \frac{2 \cdot 0.79 \cdot 1.23}{(2 \cdot 2.16)^2} = 0.1 \text{ (с)}. \quad (3.11)$$

Статичний коефіцієнт посилення тиристорного перетворювача:

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

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

Приймаємо малу некомпенсовану постійну часу $T_{\mu} = 0,005 \text{ с}$.

4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Математичний опис об'єкта управління

При синтезі системи управління приймаються звичайні для систем електроприводу допущення, 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 постійні 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 провідив струм тиристора в 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 аперіодичною ланкою з коефіцієнтом $k_{\text{тп}}$ і постійної часу $\tau_{\mu} = \frac{\pi}{m\omega_0}$ і імпульсна. Надалі, при синтезі САК 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 та припадає на одну вісь крана (навантаження двох двигунів). Так як J_{Σ} розраховуються в розрахунку на один двигун, то в структурній схемі його значення подвоюється.

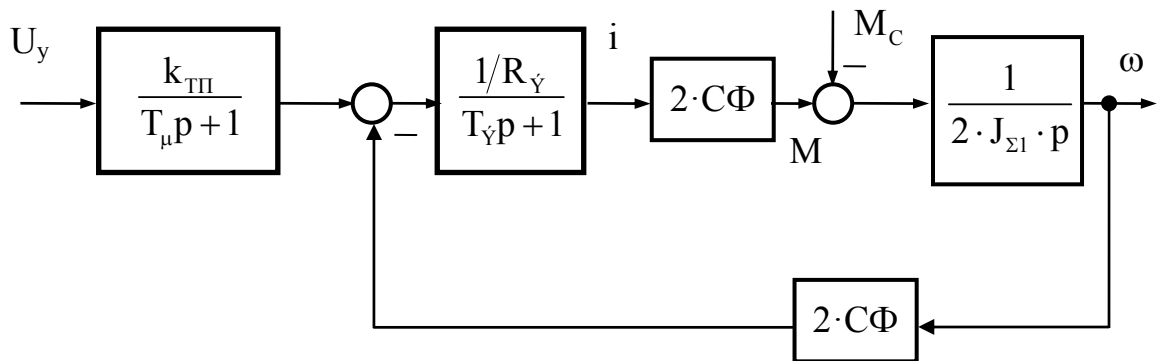


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електроприводу

Одним із сучасних методів побудови уніфікованих систем автоматичного керування електроприводом є принцип підпорядкованого регулювання параметрів. При цьому об'єкт управління представляється в вигляді ланцюга 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 постійною часу має відповідати ланка зі зворотною функцією передачі в складі регулятора. Тоді, якщо не враховувати впливу малих постійних часу, передавальна функція розімкнутої

системи є безінерційна ланка. Виходячи з вищесказаного, складемо структурну схему системи регулювання швидкості, яка приведена на рис. 4.2.

4.2 Розрахунок регулятора струму

На рисунку 4.3 представлена структурна схема контуру струму.

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

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

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

$$K_{PT} = \frac{R_{\Delta} \cdot T_{\Delta}}{K_{ТП} \cdot K_{OT} \cdot T_{OT}} = \frac{1.23 \cdot 0.014}{51.3 \cdot 0.135 \cdot 0.01} = 0.249, \quad (4.2)$$

де $T_{OT} = 2T_{\mu} \cong 0.01$ с.;

$$K_{OT} = \frac{U_{ЗТМАХ}}{I_{МАХ}} = \frac{10}{74} = 0.135 \text{ В/А} - \text{коефіцієнт передачі ланки зворотного}$$

зв'язку по струму з урахуванням що:

- максимальний сигнал завдання на струм $U_{ЗТМАХ} = 10$ В;
- максимально допустимий струм якоря двигуна $I_{МАХ} = \lambda_1 \cdot I_H = 2 \cdot 37 = 74$ А.

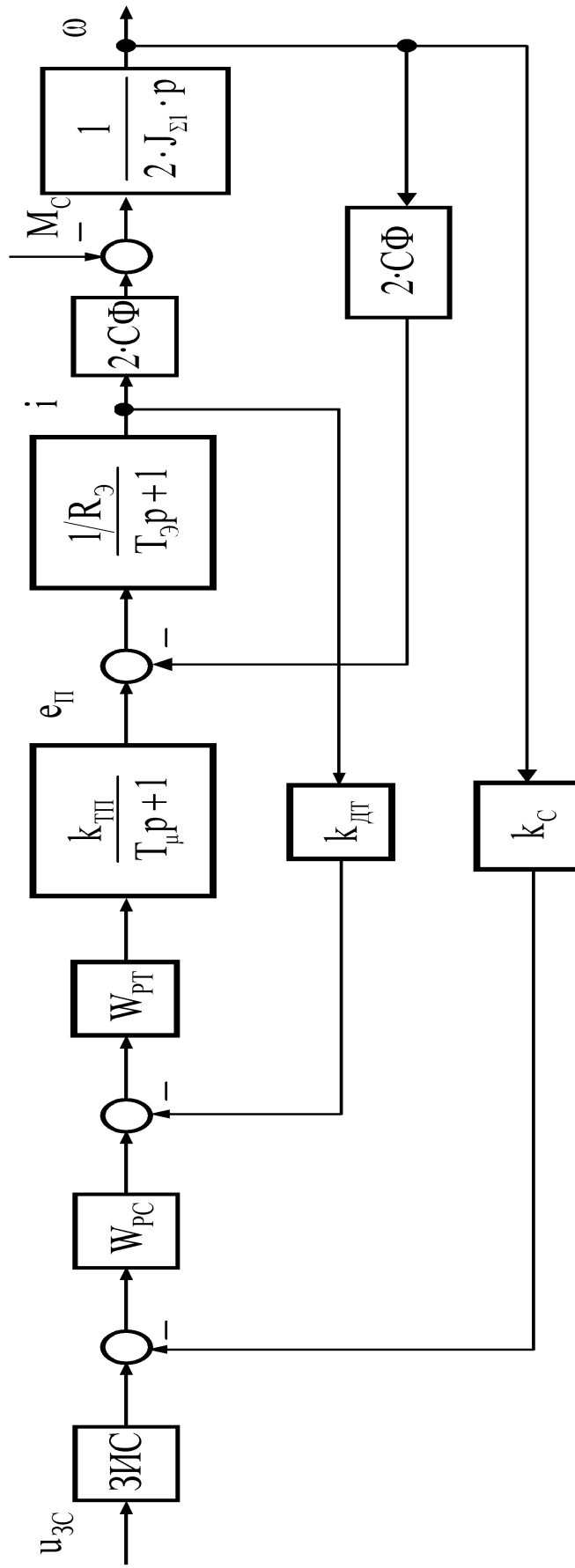


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи управління

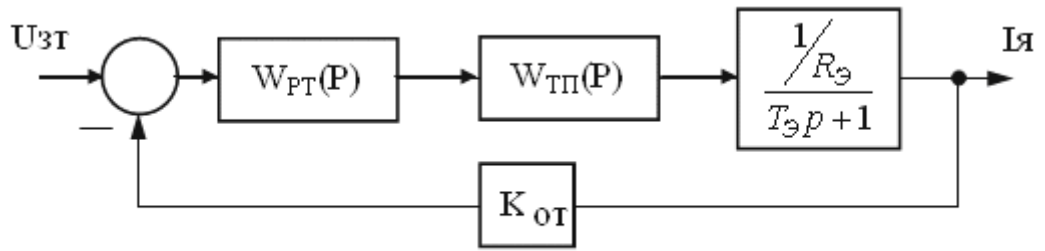


Рисунок 4.3 – Структурна схема контуру струму

На рисунку 4.4 представлена функціональна схема регулятора струму.

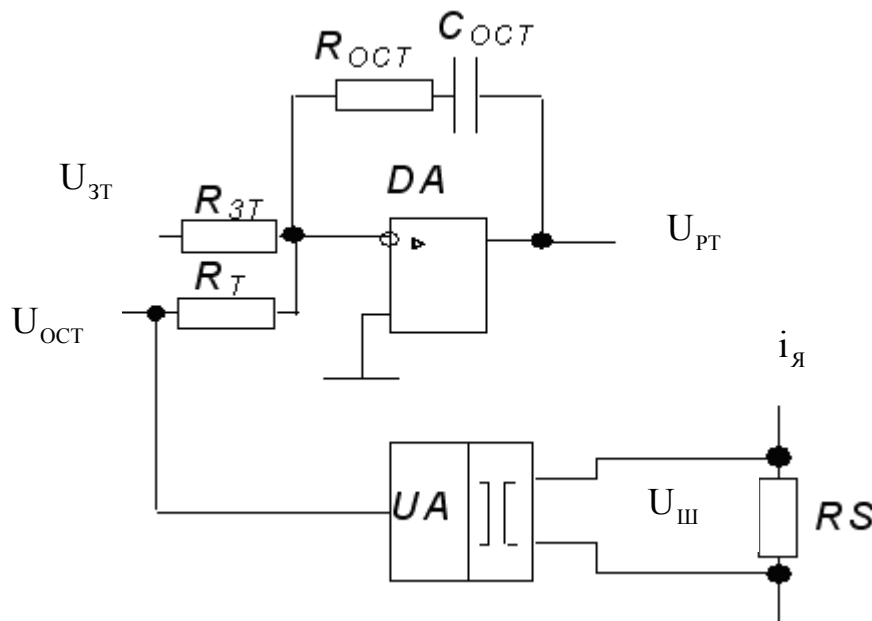


Рисунок 4.4 – Функціональна схема регулятора струму

На рисунку 4.5 представлена структурна схема регулятора струму.

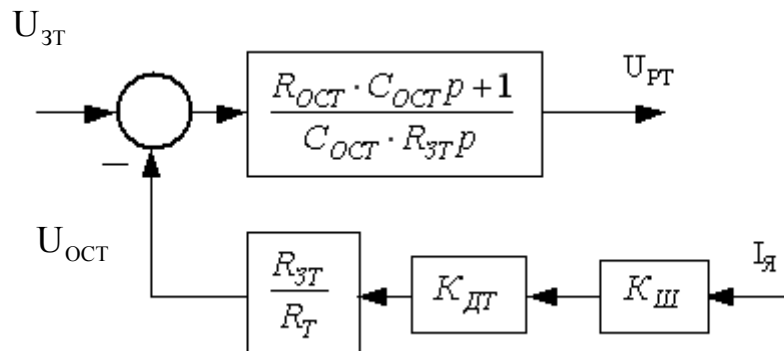


Рисунок 4.5 – Структурна схема регулятора струму

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора струму по наступним співвідношенням:

$$\begin{cases} T_{\text{э}} = R_{\text{ост}} \cdot C_{\text{ост}}; \\ \frac{K_{\text{ш}} \cdot K_{\text{т}}}{R_{\text{э}}} T_{\text{от}} = R_{\text{зт}} \cdot C_{\text{ост}}; \\ K_{\text{от}} = \frac{R_{\text{зт}}}{R_{\text{т}}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ш}}, \end{cases} \quad (4.3)$$

В якості шунта RS вибираємо шунт типу 75ШС, який має такі параметри: номінальна вихідна напруга на шунті $U_{\text{нш}} = 75$ мВ при струмі $I_{\text{нш}} = 100$ А. Отже коефіцієнт передачі шунта:

$$K_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{нш}}}{I_{\text{нш}}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{100} = 7.5 \cdot 10^{-4} \text{ В/А}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{\text{дт}} = \frac{K_{\text{от}}}{K_{\text{ш}}} = \frac{0.135}{7.5 \cdot 10^{-4}} = 180. \quad (4.5)$$

В якості стандартного датчика струму UA вибираємо датчик струму з системи УБСР-АІ типу ДТ-ЗАІ. Цей датчик призначений для формування і введення в систему регулювання аналогового сигналу, пропорційного струму в ланцюзі якоря. Датчик підключається до шунта в коло якоря двигуна і забезпечує гальванічну розв'язку між вхідними та вихідними ланцюгами з різницею потенціалів між ними до 1000 В.

Установки сенсора ДТ-ЗАІ, позначеного на схемі як UA:

- вихідна напруга 10 В;
- коефіцієнт посилення $53 \div 200$;

- похибка 1%;
- смуга пропускання 1.5 кГц;
- напруга живлення постійним струмом 12.6 В.

Приймаємо конденсатор $C_{ост}$ ємністю 2 мкФ.

$$R_{ост} = \frac{T_{\text{Э}}}{C_{ост}} = \frac{0.014}{2 \cdot 10^{-6}} = 7000 \text{ Ом} = 7 \text{ кОм}. \quad (4.6)$$

$$R_{зг} = \frac{K_{ш} \cdot K_{от} \cdot T_{от}}{R_{\text{Э}} \cdot C_{ост}} = \frac{51.3 \cdot 0.135 \cdot 0.01}{1.23 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 28 \text{ кОм} . \quad (4.7)$$

$$R_{т} = \frac{R_{зг} \cdot K_{ш} \cdot K_{дт}}{K_{от}} = \frac{28000 \cdot 7.5 \cdot 10^{-4} \cdot 180}{0.135} = 28 \text{ кОм} \quad (4.8)$$

Вибираємо резистор $R_{ост}$ марки МЛТ - 0.125, опором 6.8 кОм.

Вибираємо резистор $R_{зг}$ марки МЛТ-0.125, опором 27 кОм.

Вибираємо резистор $R_{т}$ марки МЛТ-0.125, опором 27 кОм.

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

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б:

- напруга стабілізації - 10 В;
- розкид напруги стабілізації - 0,7 В;
- мінімальний струм стабілізації - 3мА;
- максимальний струм стабілізації – 14 мА;
- диференційний опір - 22 Ом.

4.3 Розрахунок регулятора швидкості

До контуру 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:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{\frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{от}}p} \cdot \frac{1}{K_{\text{от}}}}{1 + \frac{1}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1}{T_{\text{от}}p}} = \frac{\frac{1}{K_{\text{от}}}}{T_{\text{от}}T_{\mu}p^2 + T_{\text{от}} + 1} \quad (4.9)$$

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:

$$W_{\text{КТ}}(p) = \frac{1/K_{\text{от}}}{T_{\text{от}}p+1}. \quad (4.10)$$

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

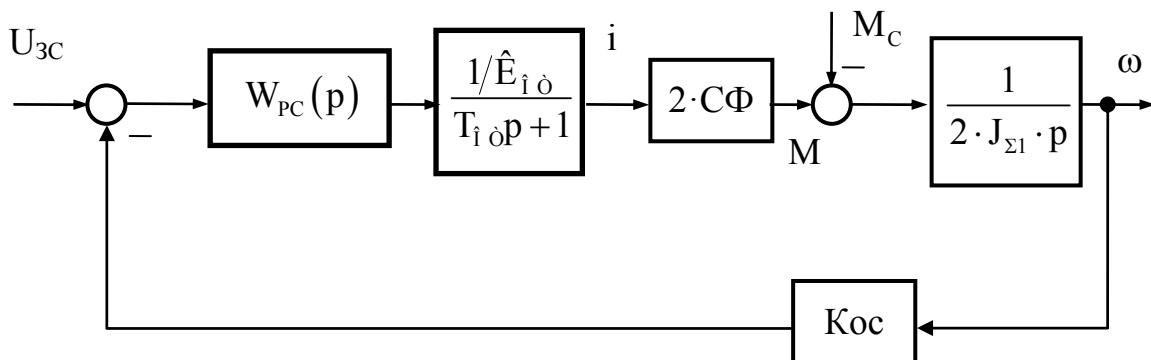


Рисунок 4.6 – Структурна схема контуру швидкості

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

Для систем підпорядкованого регулювання швидкості пересування крана застосовується ПІІІ - регулятор.

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

$$W_{PT}(P) = K_{PC} \cdot \frac{4 \cdot T_{OT}P + 1}{4 \cdot T_{OT}P} \quad (4.11)$$

Статичний коефіцієнт посилення регулятора швидкості:

$$K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot J_{\Sigma 1}}{2T_{OT} \cdot C\Phi_H \cdot K_{OC}} = \frac{0.135 \cdot 0.79}{2 \cdot 0.01 \cdot 2.16 \cdot 0.109} = 22.65$$

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

$$K_{OC} = \frac{U_{ЗСМАХ}}{\omega_{МАХ}} = \frac{10}{92.1} = 0.109 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад} - \text{коефіцієнт передачі ланки}$$

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

- максимальний сигнал завдання на швидкість $U_{ЗТМАХ} = 10\text{В}$.

На рисунку 4.7 представлена функціональна схема регулятора швидкості.

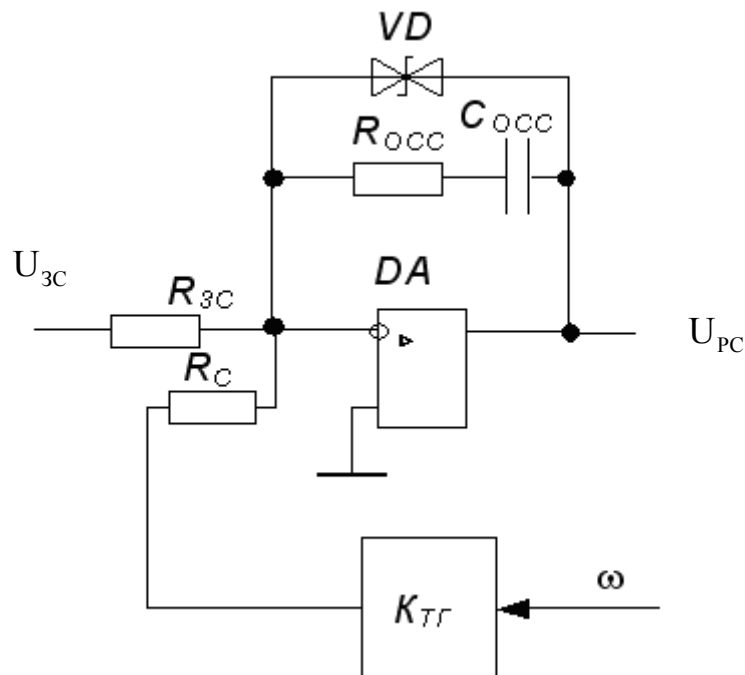


Рисунок 4.7 – Функціональна схема регулятора швидкості

На рисунку 4.8 представлена структурна схема регулятора швидкості.

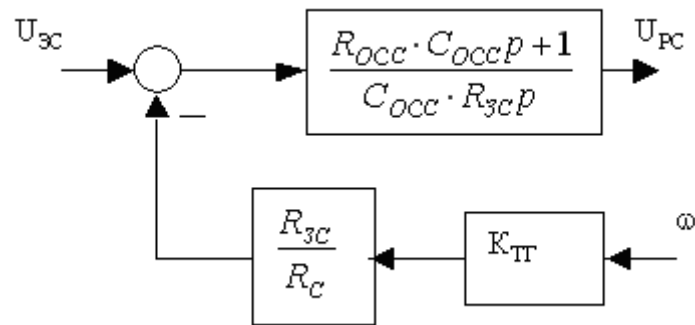


Рисунок 4.8 – Структурна схема регулятора швидкості

Як датчик швидкості вибираємо тахогенератор типу ТП 214

$$n_H = 1000 \text{ об/хв.}$$

$$U_H = 100 \text{ В;}$$

$$K_{ТГ} = \frac{U_{H.ТГ}}{\omega_{H.ТГ}} = \frac{100}{3.14 \cdot 1000 / 30} = 0.96 \text{ В} \cdot \text{с.} \quad (4.12)$$

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора швидкості по наступним співвідношенням

$$\begin{cases} K_{PC} = \frac{R_{OCC}}{R_{ЗС}}; \\ K_C = K_{ТГ} \cdot \frac{R_{ЗС}}{R_C}; \\ U_{ЗС MAX} = K_C \cdot \omega_H. \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\text{Прийmemo } C_{OCC} = 2 \text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Завдання на швидкість подаємо з задавача інтенсивності швидкості.

Тому задаємося $R_{ЗС} = 51 \text{ кОм}$. Як $R_{ЗС}$ вибираємо резистор типу МЛТ-0.125 опором 51 кОм.

Розрахуємо R_{OCC} :

$$R_{OCC} = K_{PC} \cdot R_{3C} = 22.65 \cdot 51 = 1.2 \text{ МОм.} \quad (4.14)$$

Вибираємо резистор R_{OCC} типу МЛТ-0.125 1.2 МОм.

Розрахуємо R_C :

$$R_C = \frac{K_{TG} \cdot R_{3C}}{K_{OC}} = \frac{0.96 \cdot 51}{0.109} = 450 \text{ кОм.} \quad (4.15)$$

Вибираємо резистор типу МЛТ-0.125 470 кОм.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б:

- напруга стабілізації - 10 В;
- розкид напруги стабілізації - 0,7 В.
- мінімальний струм стабілізації - 3мА;
- максимальний струм стабілізації – 14мА;
- диференційний опір - 22Ом.

4.4 Розрахунок задавача інтенсивності швидкості

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

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

Структурна схема задавача інтенсивності швидкості наведена на рисунку 4.9.

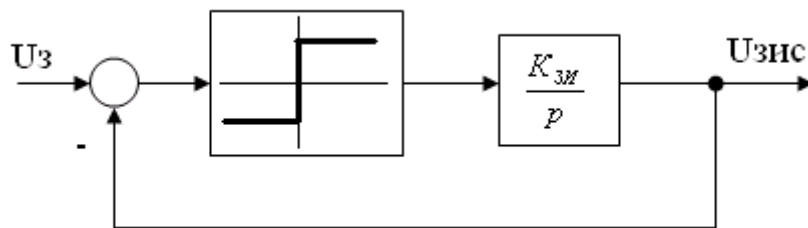


Рисунок 4.9 - Структурна схема задавача інтенсивності швидкості

У відповідність з розрахунками наведеними в розділі 2 за умовами зчеплення електропривод повинен забезпечувати прискорення $a_p < 0.65 \text{ (м/с}^2\text{)}$. Прийmemo $a_p = 0.63 \text{ (м/с}^2\text{)}$. Час розгону при цьому складе:

$$t_p = \frac{V_H}{a_p} = \frac{0.63}{0.63} = 1 \text{ с} \quad (4.16)$$

Коефіцієнт передачі ЗИС:

$$K_{И} = \frac{U_{3\text{MAX}}}{t_p} = \frac{10}{1} = 10 \frac{\text{В}}{\text{с}}. \quad (4.17)$$

На рисунку 4.10 представлена функціональна схема задавача інтенсивності швидкості.

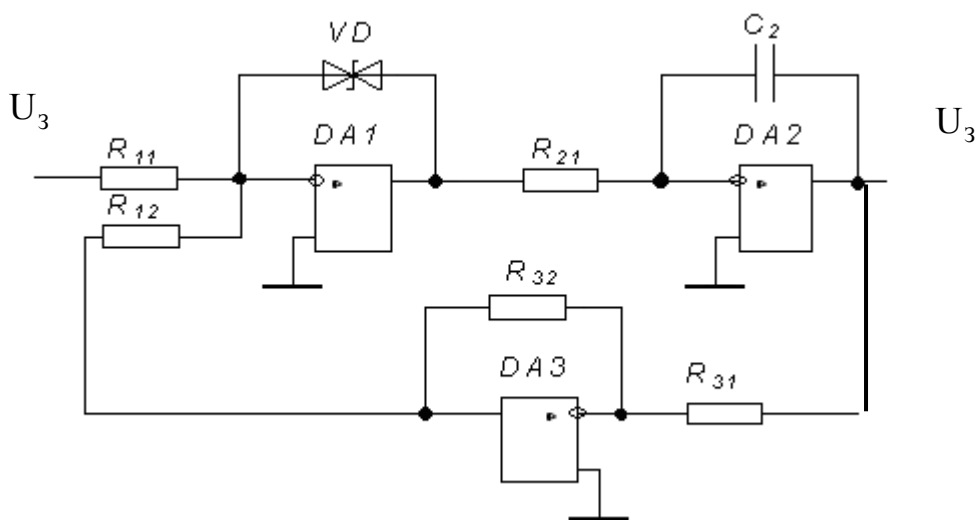


Рисунок 4.10 – Функціональна схема задавача інтенсивності швидкості

Приймем конденсатор C_2 ємністю 2 мкФ.

Приймем:

$$R_{11} = R_{12} = 20 \text{ кОм};$$

$$R_{31} = R_{32} = 10 \text{ кОм}.$$

$$R_{21} = \frac{1}{K_{\text{И}} \cdot C_2} = \frac{1}{10 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ кОм}. \quad (4.19)$$

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 51 кОм.

Вибираємо конденсатор $C_{\text{оос}}$ марки К50-6, ємністю 2 мкФ.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС210Б:

- напруга стабілізації - 10 В.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В MATLAB/SIMULINK

На рис. 5.1-5.4 представлена модель електроприводу пересування козлового крана, розроблена в середовищі моделювання динамічних систем Matlab / Simulink. На рисунках 5.5 і 5.7 приведені результати моделювання роботи ЕП при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході. На рисунку 5.8 представлені графіки пуску, реверса і гальмування електроприводу під навантаженням.

На рис. 5.9 - 5.11 наведені результати моделювання роботи ЕП при зміні параметрів об'єкта управління в межах $\pm 50\%$, що може бути викликано, наприклад, недообліком опору силових кабелів, сезонними коливаннями температури зовнішнього середовища, загущенням мастила і т.п.

Отримані перехідні процеси свідчать про правильність розробки 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, моменту інерції в широких межах система залишається працездатною. Ряд проведених варіацій призводять до незначних коливань якірного 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. 5.12 - 5.13). Для виключення подібних аварійних режимів проєктований електропривод повинен бути оснащений системою захистів і сигналізацією, яка відключає силовий перетворювач від мережі в цих випадках. У крайніх положеннях переміщення крана має контролюватися кінцевими вимикачами.

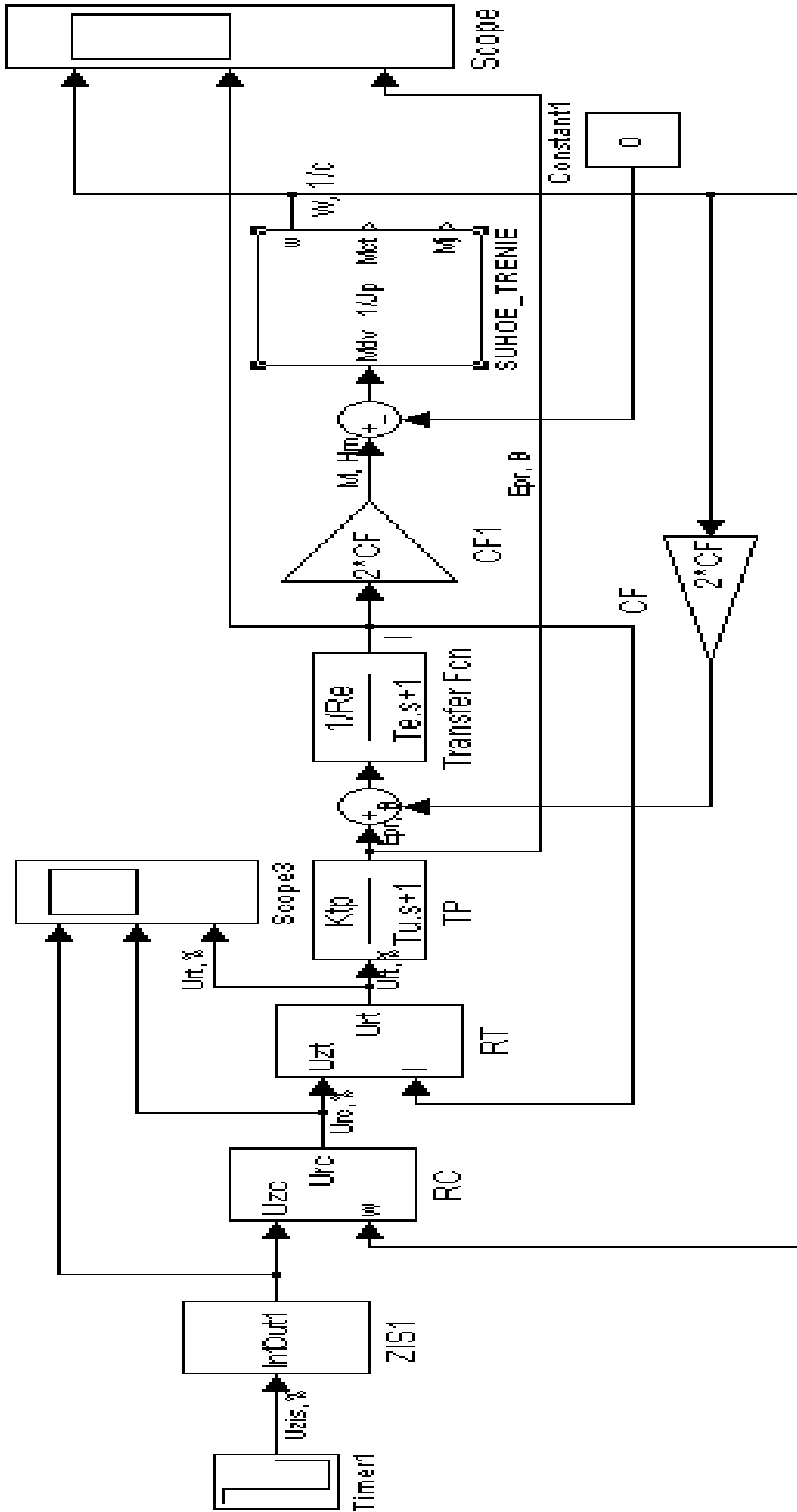


Рисунок 5.1 - Математична модель системи електропривода

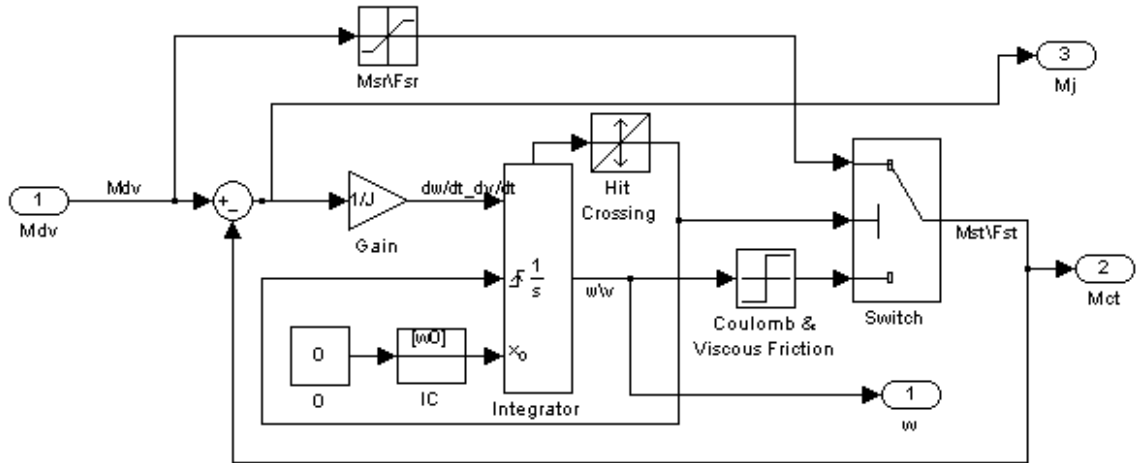


Рисунок 5.2 – Модель механічної частини приводу для уточненого моделювання сил сухого тертя

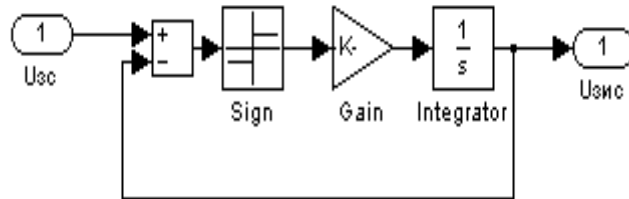


Рисунок 5.3 - Задавач інтенсивності швидкості

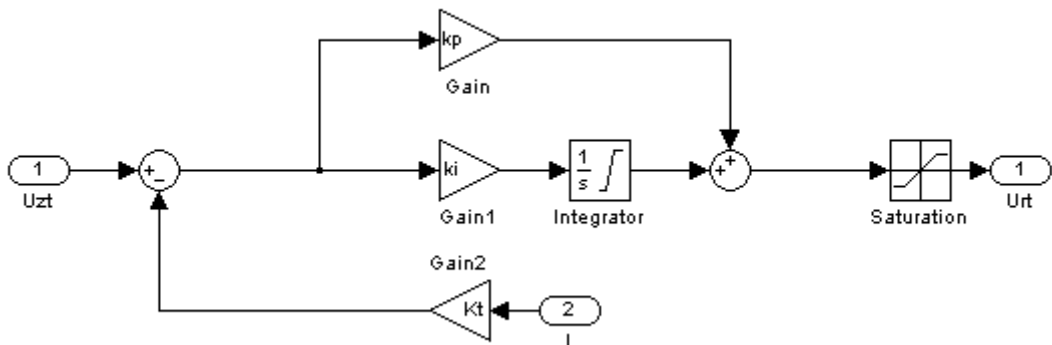


Рисунок 5.4 – Регулятор струму

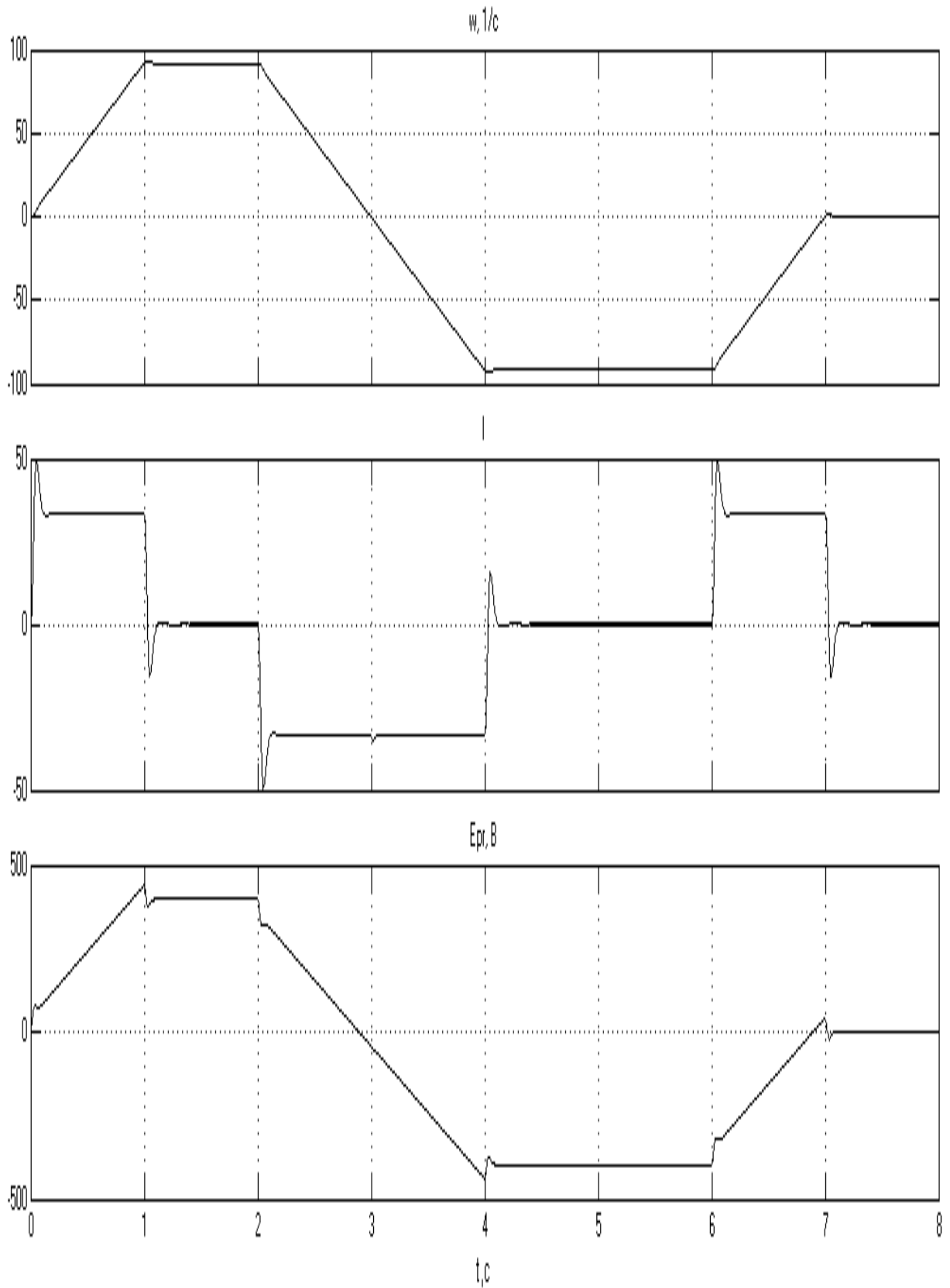


Рисунок 5.5 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

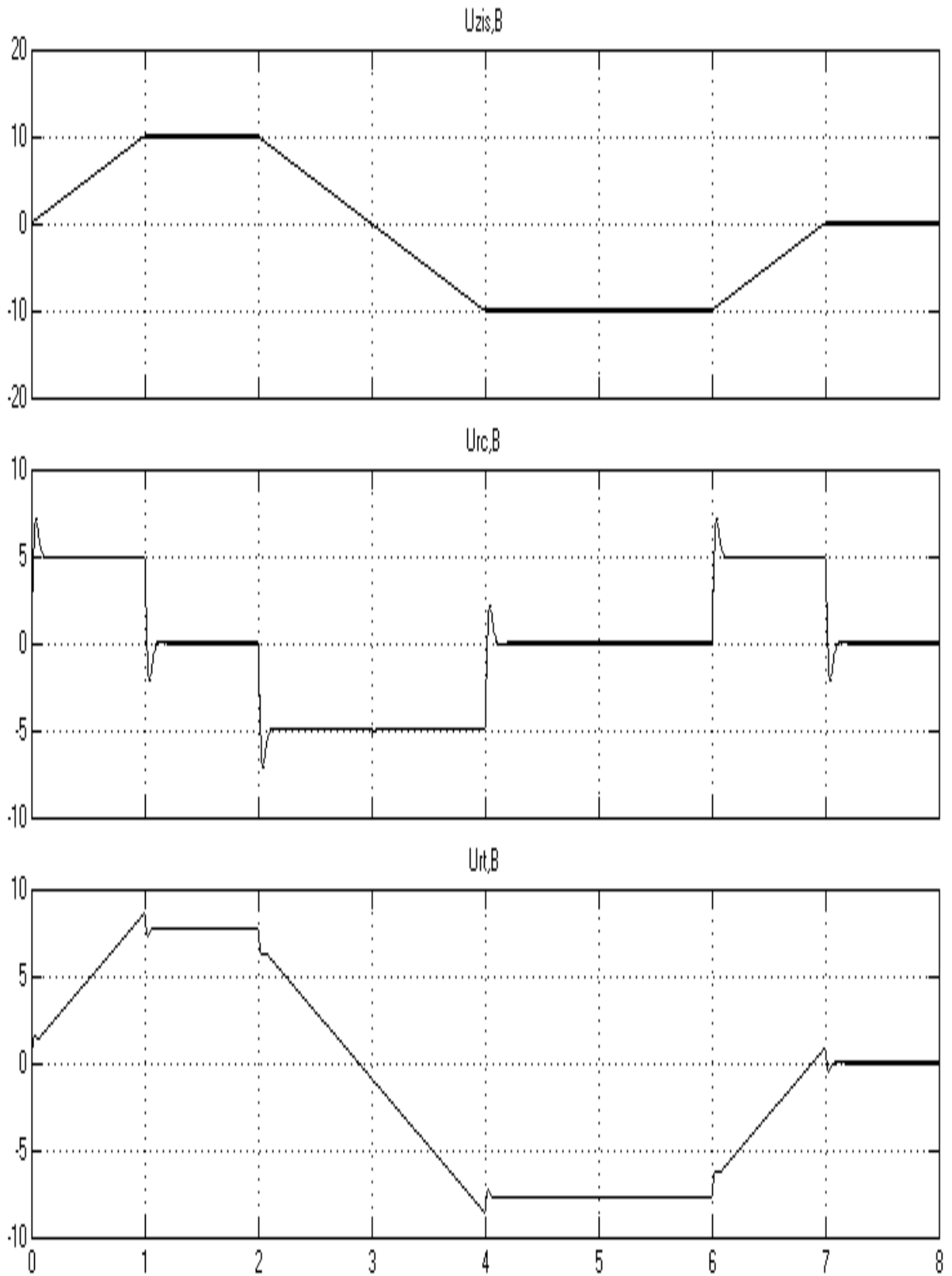


Рисунок 5.6 – Перехідні процеси на виході регуляторів і ЗІС при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

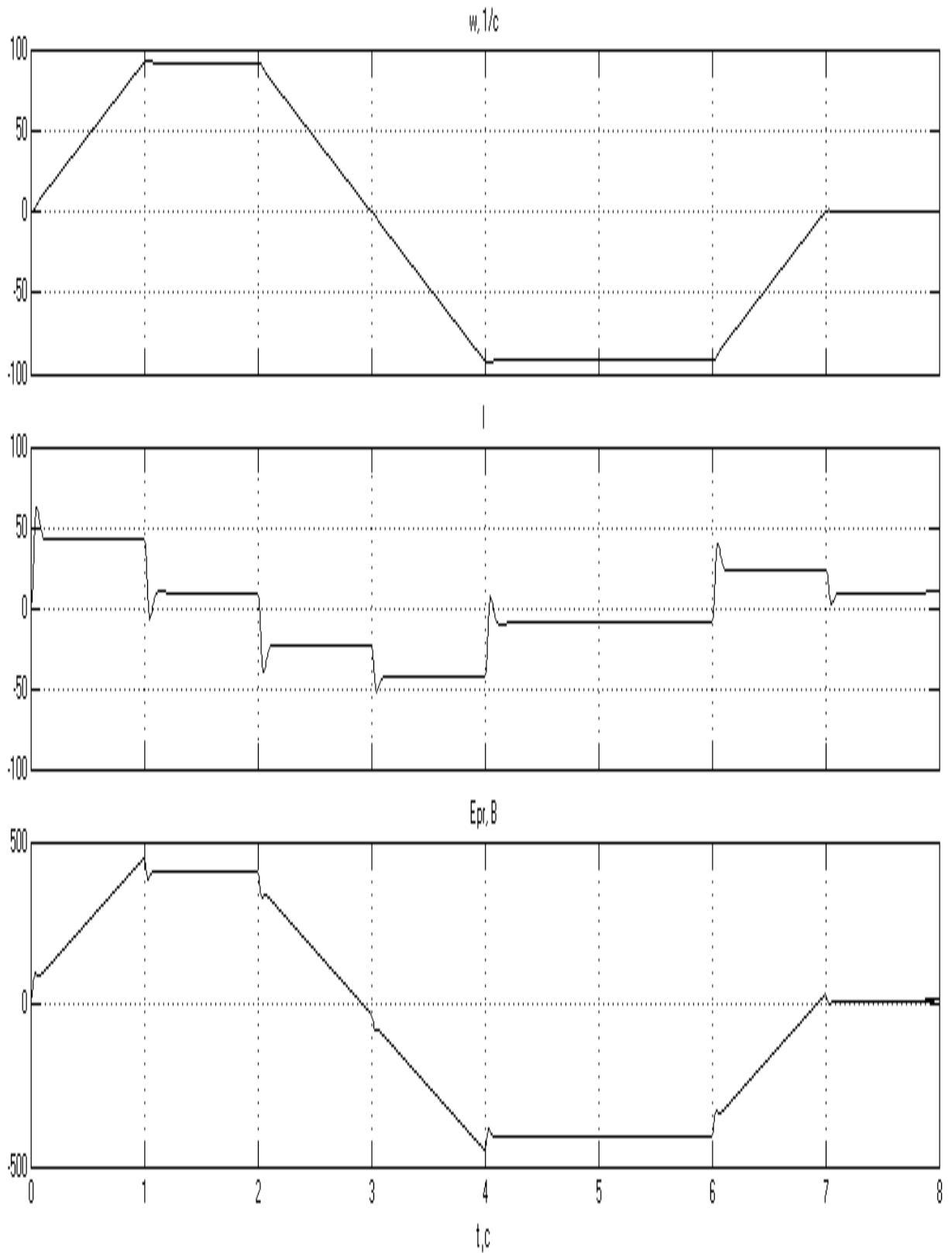


Рисунок 5.7 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні під навантаженням

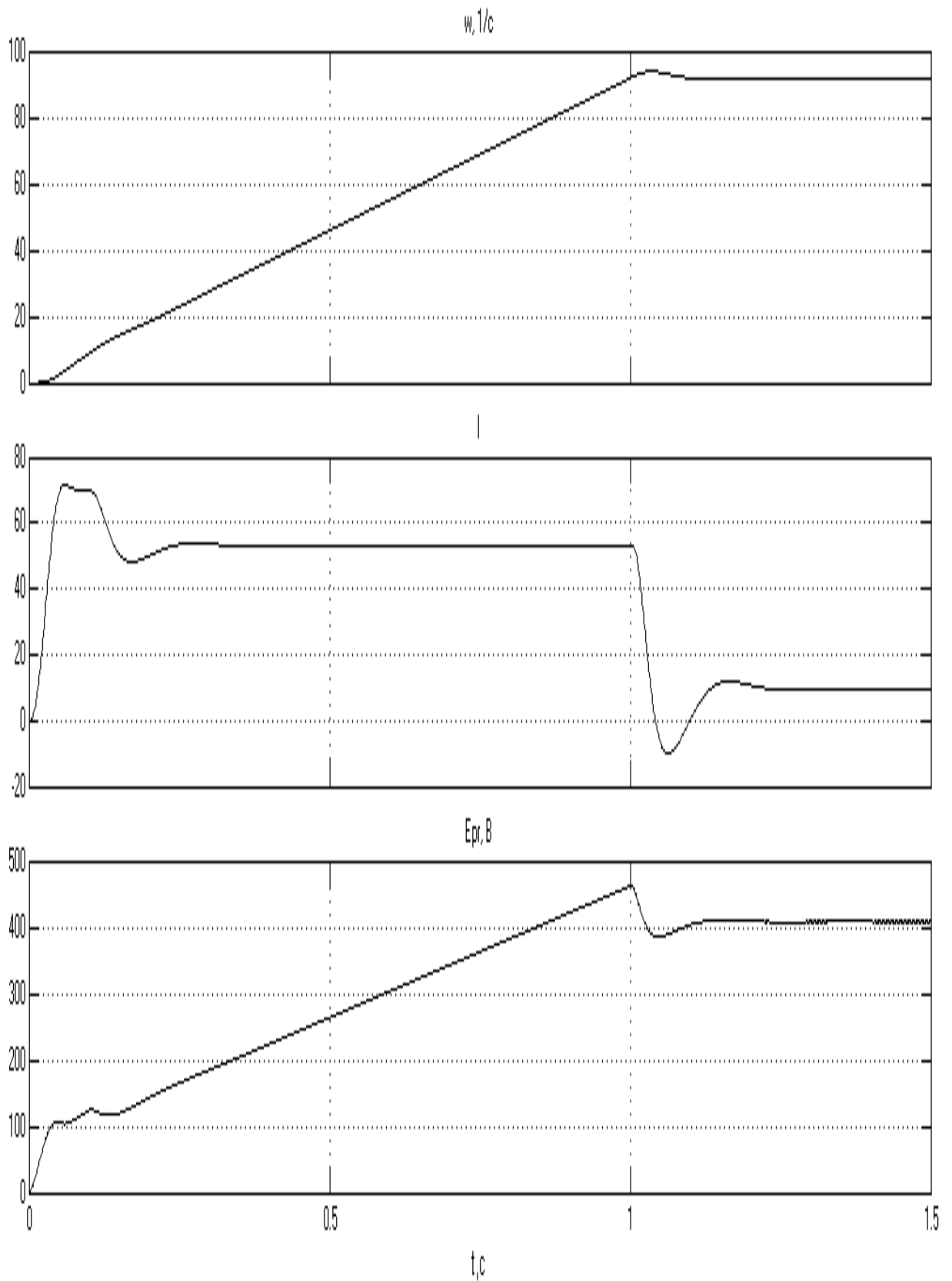


Рисунок 5.8 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні й $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

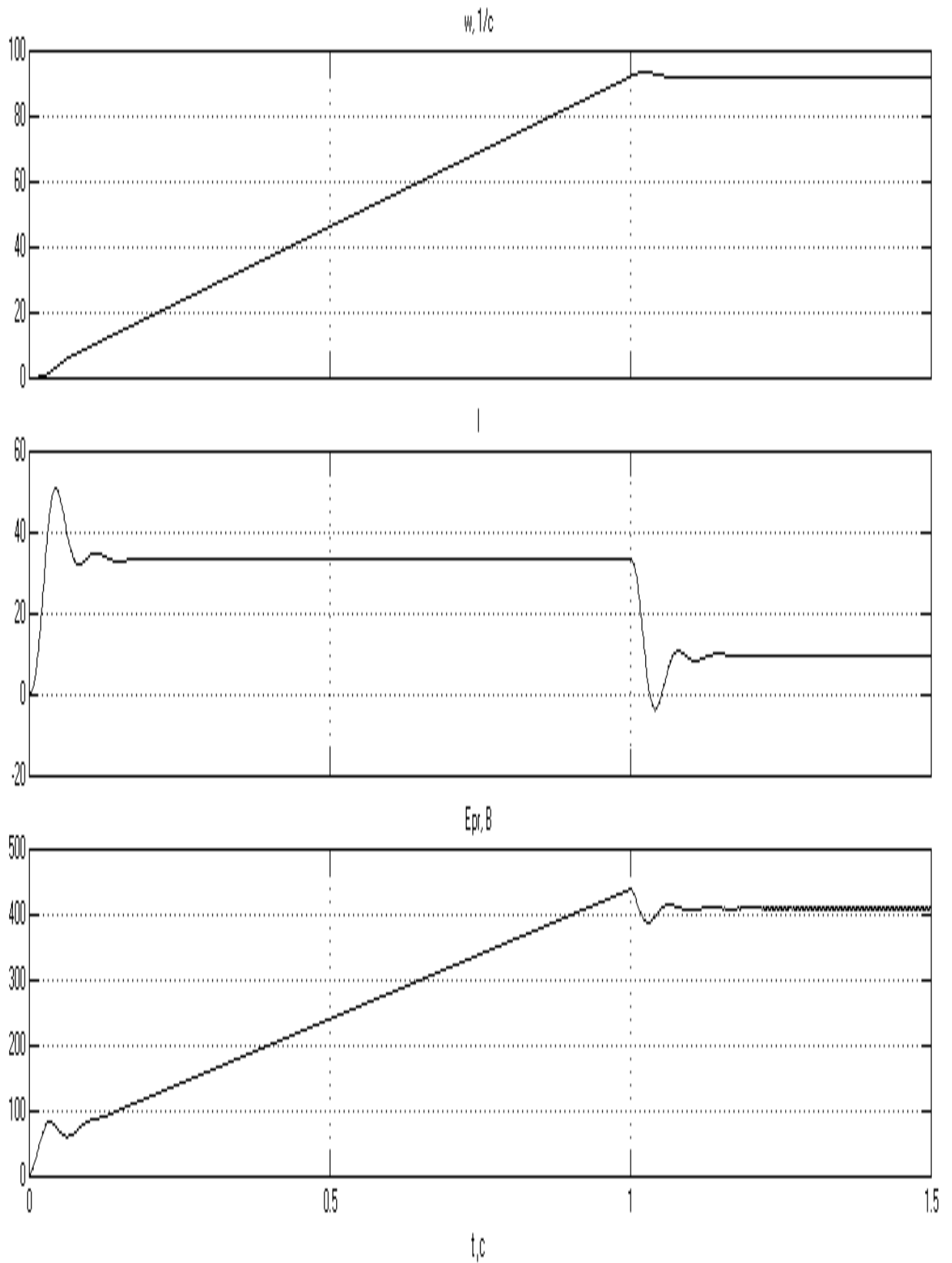


Рисунок 5.9 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні й $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

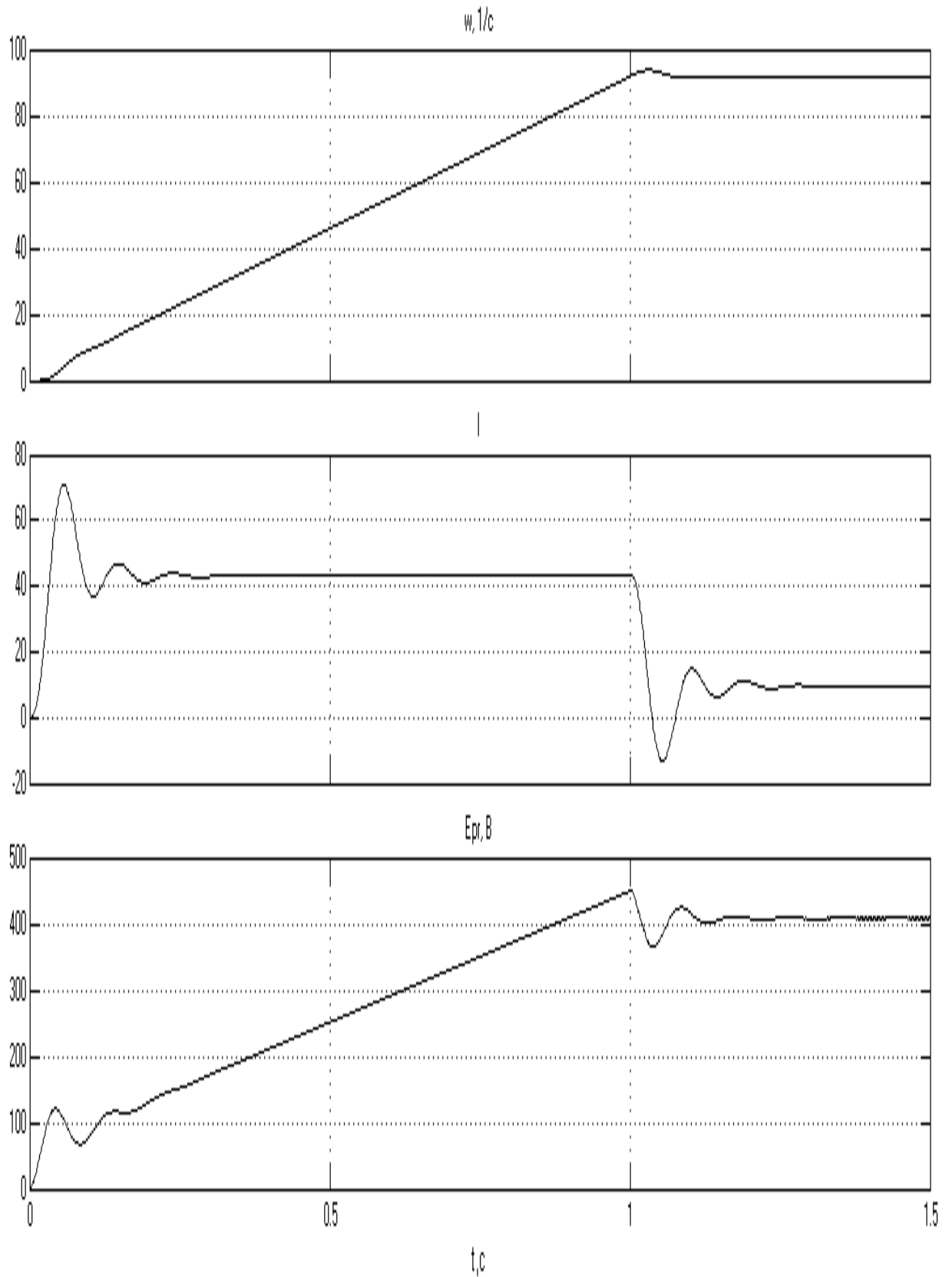


Рисунок 5.10 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні й $1,5 \cdot T_{\Omega}$

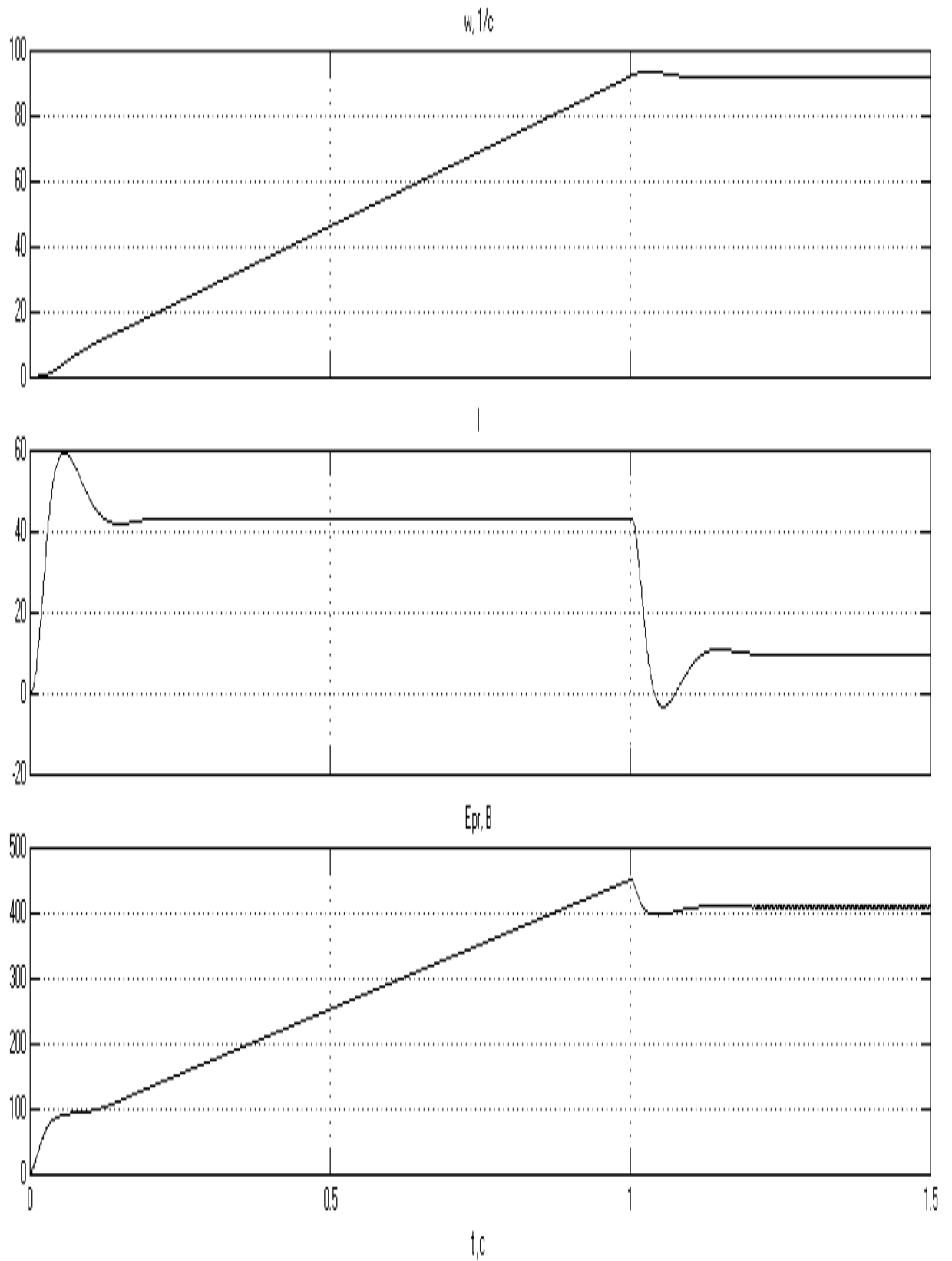


Рисунок 5.11 – Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні й $0,7 \cdot T_d$

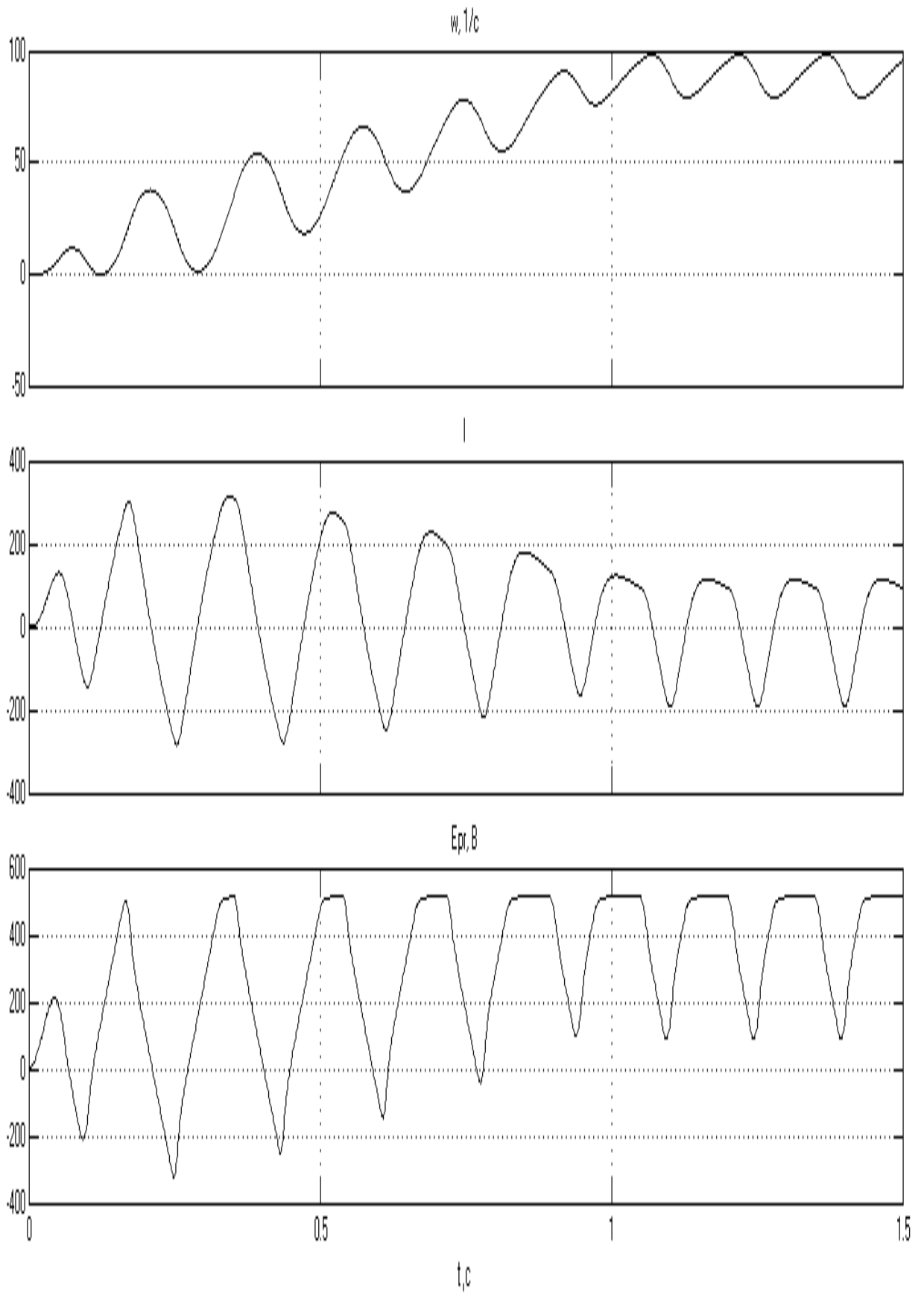


Рисунок 5.12 – Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку по струму

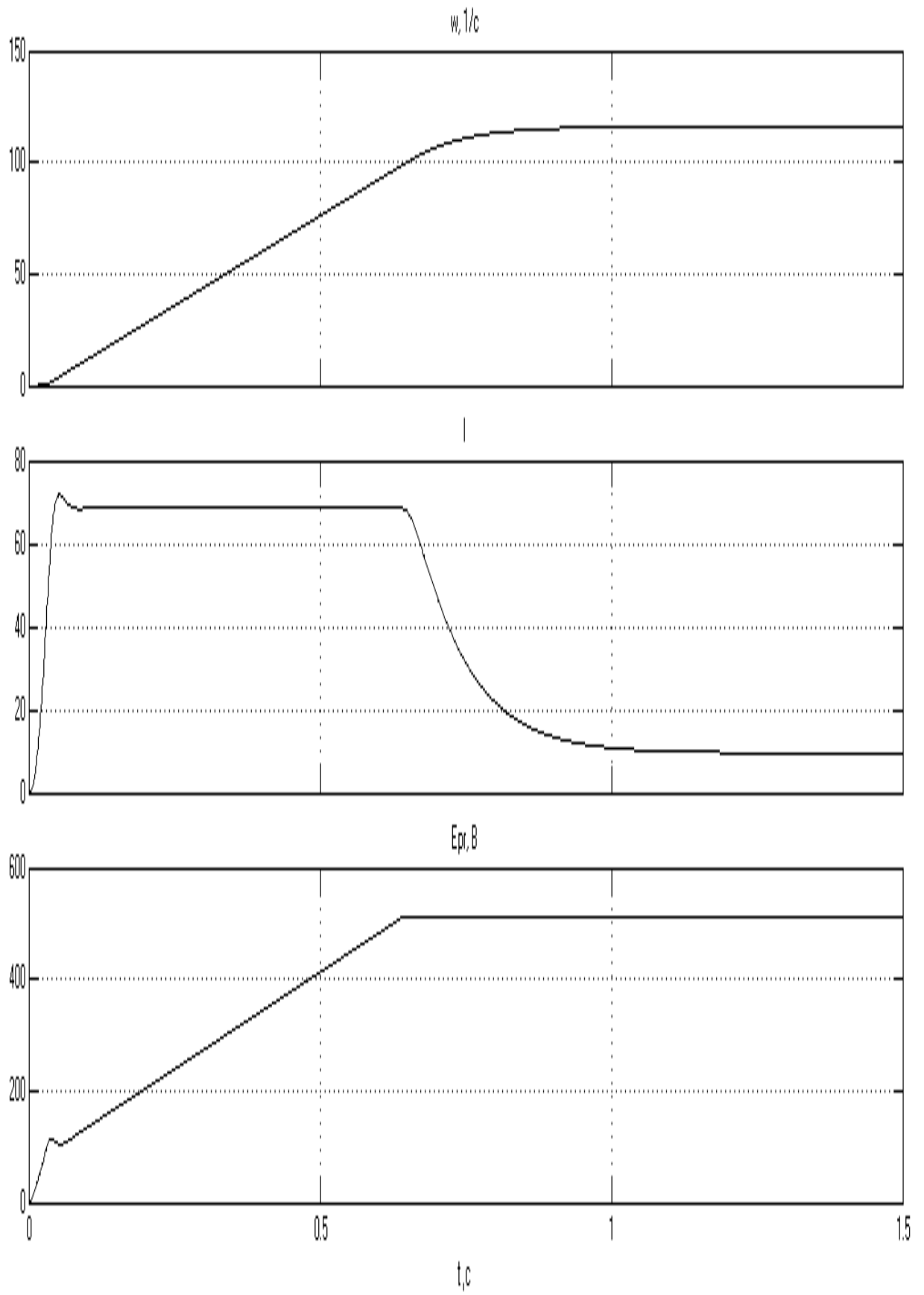


Рисунок 5.13 – Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку по швидкості

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Вимоги до персоналу

До робіт з експлуатації та ремонту електрообладнання допускаються особи, які пройшли спеціальне навчання і відповідають вимогам, що пред'являються до персоналу, обслуговуючому електроустановки, згідно з Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів і Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів, що мають, відповідно, кваліфікацію з техніки безпеки при обслуговуванні електроустановок.

До персоналу, обслуговуючому електроустановки грейферного крану відносяться: електромонтери, електрослюсарі, електромеханіки та інші особи, що проводять ремонт, наладку і випробування електрообладнання, допоміжних пристроїв і електропроводки, а також особи, відповідальні за справний їх стан. Зазначеним особам надається відповідна знанням і навичкам кваліфікаційна група з техніки електробезпеки, не нижче III.

6.2 Вимоги техніки безпеки до електрообладнання крану

Електробезпека - система організаційних і технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електричного магнітного поля і статичної електрики. У зв'язку з цим все електрообладнання (включаючи провідникові вироби та матеріали) за своєю конструкцією, виду виконання, способу встановлення і класу ізоляції, повинні відповідати призначенню, номінальній напрузі електроустановки і чинникам навколишнього середовища.

У зв'язку з цим існують певні вимоги:

- електрообладнання, яке встановлюється в місцях, схильних до впливу атмосферних опадів, а також у місцях перебування людей, повинні бути закритого виконання;
- у комутаційної апаратури повинні бути чіткі написи, що вказують призначення вмикаємого ланцюга. Перемикачі вимірювальних приладів повинні мати індекси, які визначають вмикаємий струмоприймач;
- апарати на щитках слід розташовувати так, щоб забезпечувався доступ до обслуговуваного обладнання;
- вимикачі, призначені для включення і відключення струму навантаження, повинні бути захищені негорючими кожухами без отворів і щілин або мати дистанційне керування; забороняється установка відкритих плавких вставок в запобіжники, які знаходяться під напругою.

Для того, щоб забезпечити безпеку людини від ураження струмом, металеві частини електропристроїв, які можуть опинитися під напругою внаслідок порушення ізоляції проводів і інших несправностей, повинні бути надійно заземлені.

6.3. Заходи з охорони праці

Електрослюсарі при виробництві робіт згідно наявної кваліфікації зобов'язані виконувати вимоги безпеки, викладені в "Типовій інструкції по охороні праці для працівників будівництва, промисловості будівельних матеріалів і житлово-комунального господарства", справжній типовій інструкції, розробленій з урахуванням будівельних норм і правил України, Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів, а також вимоги інструкцій заводів-виготівників по експлуатації обслуговуваного устаткування і технологічного оснащення.

Вимоги безпеки перед початком роботи

1. Перед початком роботи електрослюсарі зобов'язані.

а) пред'явити керівникові посвідчення про перевірку знань безпечних

методів робіт і пройти інструктаж на робочому місці по специфіці виконуваної роботи;

б) надіти спецодяг, спецвзуття і каску встановленого зразка

2. Після отримання завдання у бригадира або керівника робіт електрослюсарі зобов'язані:

а) підготувати необхідні засоби індивідуального захисту, перевірити їх справність;

б) перевірити робоче місце і підходи до нього на відповідність вимогам безпеки, при необхідності виконати заходи, вказані в наряді-допуску;

в) підібрати інструмент, устаткування і технологічне оснащення, необхідні при виконанні робіт, перевірити їх справність і відповідність вимогам безпеки.

3. Електрослюсарі не повинні приступати до роботи при наступних порушеннях вимог безпеки:

а) несправності технологічного оснащення, пристосувань і інструменту, вказаних в інструкціях заводів-виготівників, при яких не допускається їх застосування;

б) невчасному проведенні чергових випробувань засобів захисту або закінченні терміну їх експлуатації, встановленого заводом-виготівником;

в) відсутності огорож небезпечних зон неізольованих частин електроустановок;

г) відсутності або несправності лісів, настилів, подмостей або інших засобів підмоцнування, наявності необгороджених отворів і перепадів по висоті в зоні виробництва робіт;

д) відсутності видимих розривів електричних ланцюгів, по яких може бути подане напруга на місце робіт, і захисного заземлення відключеної частини електроустановки;

е) недостатній освітленості або при загроможеності робочих місць і підходів до них.

Виявлені порушення вимог безпеки повинні бути усунені власними

силами, а при неможливості зробити це самостійно електрослюсарі зобов'язані повідомити бригадира або керівника робіт.

Вимоги безпеки під час роботи

4. В процесі роботи електрослюсарі зобов'язані дотримувати наступні вимоги безпеки:

- а) надягати захисні окуляри при рубці металу зубилом;
- б) обпилювати кромки металевих деталей і очищати їх від задирок при обробці;
- в) розрізати труби з пластмас ручними або механізованими ріжучими інструментами. Не допускається застосування абразивних відрізних кругів для різання труб з пластмаси;
- г) проводити заготівку сталевих або пластмасових труб на стендах або підлозі. Забороняється заготовлювати і гнути труби на настилах засобів підмоцнування;
- д) перевіряти металевим стрижнем збіг отворів при стиковці шин, шаф і вузлів устаткування.

5. Для перенесення і зберігання інструментів і дрібних деталей електрослюсарі зобов'язані використовувати індивідуальні сумки або портативні інвентарні ручні ящики.

6. При застосуванні вантажопідйомних механізмів строповку виробів, конструкцій і матеріалів повинні здійснювати електрослюсарі, що мають посвідчення стропальника.

7. Стропіть електрошафи, трансформатори і інше устаткування слідує за спеціальні підйомні крюки (рим-болти), передбачені заводом-виготівником.

8. Електрослюсарям забороняється проводити які-небудь роботи без зняття напруги або що відносяться до експлуатації електроустановок на будівельному майданчику.

До роботи з електроінструментом допускаються електрослюсарі, що мають кваліфікаційну групу по електробезпеці не нижче другий.

9. При роботі з електрифікованим інструментом електрослюсарям забороняється:

- а) передавати його для роботи неатестованим особам;
- б) працювати з приставних сходів;
- в) залишати електроінструмент без нагляду включеним в електричну мережу.

10. При роботі на заточних верстатах електрослюсарі зобов'язані:

- а) перед включенням верстата переконатися в наявності і надійності кріплення огорожі абразивного круга, а також в правильності установки зазору між робочою поверхнею круга і упором;
- б) користуватися захисними екранами або захисними щитами з оргстекла, а також захисними окулярами;
- в) підводити заточуваний інструмент або деталь до круга поступово для запобігання небезпеці заклинювання і розриву круга.

Забороняється проводити обробку деталей на бічних (торцевих) поверхнях абразивного круга.

11. При спільній роботі із зварювачем електрослюсарі зобов'язані:

- а) застосовувати захисні окуляри;
- б) оберегати газові балони від ударів, різких поштовхів і падінь, переміщати їх на призначених для цього носилках або візках;
- в) не допускати використання відкритого вогню поблизу генератора і контакту масла з кисневим балоном.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

12. При виникненні в зоні роботи небезпечних умов праці (порушення огорож, несправність заземлення, втрата стійкості конструкцій або засобів підмоцнення, поява запаху газу і тому подібне) електрослюсарі зобов'язані припинити роботи і повідомити про це бригадирові або керівникові робіт.

13. При загорянні матеріалів і устаткування електрослюсарі зобов'язані прийняти заходи до гасіння пожежі власними силами за допомогою углекислотних вогнегасників і інших підручних засобів (піску, повстяною

кошми і тому подібне). При неможливості ліквідації пожежі власними силами слід викликати пожежну охорону і повідомити бригадира або керівника робіт.

Вимоги безпеки після закінчення роботи

14. Після закінчення роботи електрослюсарі зобов'язані:

- а) відключити електроустаткування і інструмент від електромережі;
- б) привести в порядок робоче місце;
- в) прибрати плакати і інструмент у відведене для цього місце;
- г) прибрати засоби індивідуального захисту і спецодяг в місце зберігання;

д) про всі порушення вимог безпеки, що мали місце в процесі роботи, повідомити бригадира або керівника робіт.

3.2 Розрахунок захисного заземлення електроустановки.

Виміри проводились при сухому ґрунті. Напруга електроустановки $U=380$ В. Загальна довжина електрично зв'язаних кабельних ліній $l_k = 20$ км загальна довжина електрично зв'язаних повітряних ліній $l_g = 70$ км Ґрунт – суглинок. Вимірний питомий опір ґрунта $\rho = 100$ Ом*м Площа електроустановки $S=20*40$ м².

1. Найбільший допустимий опір захисних заземлювачів мережі з ізолюваною нейтраллю для електроустановок напругою вище 1000 В згідно з рекомендаціями, $R_0 < 10$ Ом Таким чином, приймаємо $R_0 \leq 10$ Ом. Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунта:

Ψ , кліматичний коефіцієнт питомого опору ґрунта при сухому ґрунті.

$$\rho = 100 * 1,4 = 140 \text{ Ом} * \text{м}.$$

Визначимо потрібний опір штучних заземлювачів $R_{ш}$ Якщо природні заземлювачі не використовуються, то потрібний опір штучних заземлювачів не повинен перевищувати допустимий опір заземлюючого пристрою, тобто:

$$R_{ш} \leq R_0, \text{ Ом}$$

ймаємо конфігурацію заземлювача у вигляді прямокутника розміром 20*40 м. В якості заземлювачів обираємо стрижневі вертикальні електроди в ґрунті та з'єднувальну полосу.

4. Визначаємо опір струмові розтікання одного стрижневого вертикального заземлювача в ґрунті згідно з таблицею 3[5]:

$$R_{з1} = \frac{\rho}{2 * \pi * l} \left(\ln \frac{2 * l}{d} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * t + l}{4 * t - l} \right), \text{ Ом} \quad (2).$$

l довжина вертикального електроду, м;

d діаметр вертикального електроду, м;

t_0 відстань від поверхні ґрунту до вертикального електроду, м

В якості вертикальних електродів приймаємо відрізки пруткової сталі довжиною 10 м та діаметром 14 мм, заглиблені в ґрунт на 0,7 м.

$$t = 0,7 + \frac{1}{2} * 10 = 5,7 \text{ м.}$$

Кількість паралельно з'єднаних вертикальних заземлювачів:

η_e коефіцієнт використання заземлювачів, що враховує взаємне екранування.

Кількість вертикальних заземлювачів для визначення η_e приймаємо $R_{з1} / R_{ш} 7,23 / 10 \approx 2$. Тоді $\eta_e = 0,54$.

Приймаємо кількість заземлювачів $n = 4$ а визначаємо фактичний коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_e = 0,556$. Довжина горизонтального електрода (прутка), що використовується для зв'язку вертикальних електродів при розташуванні заземлювачів по контуру:

α відстань між вертикальними електродами, м.

$$l_2 = 1,05 * 10 * 4 = 42 \text{ м.}$$

якості горизонтального електроду приймаємо пруткову сталь довжиною 42 м та діаметром 14 мм, заглиблену в ґрунт на 0,7 м.

7. Визначаємо опір струмові розтікання одного стрижневого горизонтального електрода в ґрунті згідно з таблицею 3[5]:

l_2 довжина горизонтального електрода, м;

d_e діаметр горизонтального електрода, м;

t_0 відстань від поверхні ґрунту до горизонтального електрода, м

$$t = 0,7 + \frac{1}{2} * 0,014 = 0,707 \text{ м.}$$

Еквівалентний опір струмові розтікання штучних заземлювачів:

$$R'_{uu} = \frac{17,23 * 6,4}{17,23 * 0,55 + 6,4 * 4 * 0,55} = 4,68 \text{ Ом.}$$

Отриманий опір штучних заземлювачів не перевищує потрібний.

9. Еквівалентний опір дорівнює опорів штучних заземлювачів (через відсутність природних заземлювачів), тобто:

$$R'_3 = R'_{uu}.$$

. У визначенні опору заземлюючих провідників немає необхідності через їх незначну протягненість. Загальний опір заземлення приймаємо рівним опорів штучних заземлювачів струмові розтікання ($R_3 = R'_3 = R'_{uu}$) (Загальний опір заземлення не перевищує допустимого опору ($4,68 < 10$) тобто виконується умова:

$$R_3 < R_0..$$

4. Заходи з пожежобезпеки.

До заходів з пожежобезпеки належать наступні :

- а) застосування засобів пожежної сигналізації;
- б) застосування засобів пожежегасіння;
- в) організаційні заходи.

Для пожежної сигналізації передбачений тепловий сповіщувач АТІМ – 1, у якому замикання контактів відбувається внаслідок теплової деформації біметалічної пластини. Він працює за температури 60 °С і має розрахункове обслуговування до 25 м². Крім того у кабіні крана встановлено кнопчний сповіщувач ручної дії, кнопка якого захищена склом, щоб уникнути випадкового натискання.

Засоби з пожежегасіння та їх кількість наведені в таблиці 6.1.

Вогнегасники перебувають в спеціально відведених для них місцях.

Як організаційні заходи передбачені також проведення на протипожежного інструктажу і призначення відповідальних осіб, що стежать за справним станом і постійною готовністю засобів пожежегасіння і сигналізації.

У холодний і перехідний періоди року кабіна опалюється електрообігрівачем, у теплий період провітрюється природною вентиляцією.

Таблиця 6.1 – Засоби з пожежегасіння

Приміщення	Площа, м ²	Вуглекисні, вогнегасники ручні (ВВ-5), шт.	Пінні вогнегасники (ВХП-10), шт.	Бочка з водою місткістю не менш 0,2 м ³ і цебро, шт.
В	9	1	1	--

ВИСНОВКИ

В ході проектування була розглянута технологія роботи, призначення і особливості роботи електроприводу пересування козлового крана ККС-10. Була розрахована потужність двигуна і проведена його перевірка по перевантажувальній здатності. В результаті розрахунку було обрано двигун краново-металургійної серії ДЗ1.

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

У проекті розраховані параметри двоконтурної системи підпорядкованого 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, недообліком опору силових кабелів, сезонними коливаннями температури зовнішнього середовища, загущення мастила і т.п.

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

У дипломі так само розглянуті заходи з охорони праці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с, ил.
2. Справочник по кранам: В 2т. 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.
4. А.Б. Царницкий, А.П. Шабатов. Мостовые краны общего назначения. М., 1968.
5. 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.
6. Иванченко Ф.К. и др. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин.— Киев, издательское объединение «Вища школа», Головное издательство, 1978, 576 с.
7. Коцюбинский В. С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2004, – 150 с.
8. Справочник по электрическим машинам. Под общей редакцией И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 465с.: ил.
9. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Евзеров И.Х., Горобец А.С. Под ред. Прельмутера В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1988
10. Капунцов Ю.Д., Ильяшенко Л.А., Елисеев В.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979
11. Система автоматизованого электропривода виробничих установок: Навч. посібник / І. С. Шевченко. – К.: ІСДО, 1994 – 256 с.

12. 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.

13. Т.Н. Краузе. Редукторы. Справочное пособие. 1965.

14. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. Изд. 4-е. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1972 .

15. Путевые машины и механизмы, отраслевой каталог. Часть 1. Москва 1982. – 87 с.

16. Ковалев А.П. Обеспечение экономичности разрабатываемых изделий машиностроения. – М.: Машиностроение, 1986.

17. НПАОП 0.00-1.03-02. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.

РОЗДІЛ 7 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Основою для аналізу режимів роботи електропривода є диференціальні рівняння руху одно-, дво- та тримасових розрахункових схем. В цілому рух механічної частини електропривода вірно описує одномасова схема, крім того, її найпростіше аналізувати. Цей рух описується основним рівнянням

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \quad (7.1)$$

Права частина рівняння визначає характер керуючої та збурюючої дій. Керуючою дією для механічної частини ЕП є момент двигуна M , а збурюючою – статичний момент навантаження M_c , створений робочим органом механізму. Права частина називається також динамічним моментом

$$M_{\text{дин}} = M - M_c. \quad (7.2)$$

Динамічний момент визначає прискорення двигуна та відповідно механізму

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{M - M_c}{J} = \frac{M_{\text{дин}}}{J}. \quad (7.3)$$

В залежності від значення динамічного моменту електропривод може знаходитися у статичному чи динамічному режимах.

Статичний режим має місце, якщо динамічний момент дорівнює нулю $M_{\text{дин}}=0$, тобто коли $M=M_c$. При цьому прискорення (7.3) також дорівнює нулю $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = 0$ і відбувається усталений рух із постійною швидкістю $\omega = \text{const}$ або електропривод не рухається $\omega=0$. Механічні частини з нелінійними кінематичними зв'язками (кривошипно-шатунний, кулісний механізми тощо) не мають статичного режиму.

Динамічний режим настає при $M_{\text{дин}} \neq 0$, тобто при $M \neq M_c$, і наявності прискорення $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon \neq 0$. В залежності від знаків динамічного моменту та швидкості механічна частина може розганятися, якщо

$$M_{\text{дин}} > 0; \frac{d\omega}{dt} > 0; \omega > 0 \quad \text{чи} \quad M_{\text{дин}} < 0; \frac{d\omega}{dt} < 0; \omega < 0,$$

або сповільнюватися

$$M_{\text{дин}} > 0; \frac{d\omega}{dt} > 0; \omega < 0 \quad \text{чи} \quad M_{\text{дин}} < 0; \frac{d\omega}{dt} < 0; \omega > 0.$$

Динамічний режим обумовлює динамічний перехідний процес чи усталений динамічний процес. Перехідний процес представляє перехід від одного статичного режиму до іншого в часі, тобто перехід від однієї до іншої точок рівноваги. Усталений динамічний процес має місце, якщо в процесі руху механічної частини момент двигуна M чи статичний момент M_c змінюються в часі, наприклад, у кривошипно-шатунного механізму.

На рис.7.1 показано процес руху механічної частини. На ділянці I електропривод знаходиться у динамічному режимі, здійснюючи розгін механізму, тобто перехід від нульової до кінцевої швидкості $\omega_{\text{кін}}$.

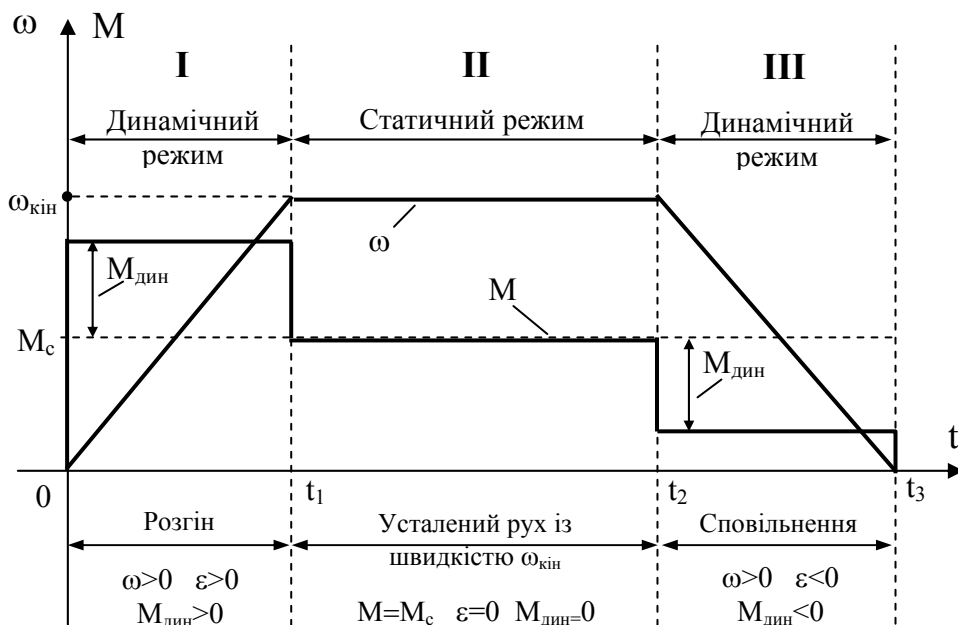


Рис.7.1

При розгоні момент двигуна згідно (7.1) дорівнює

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (7.4)$$

й іде на подолання моменту опору механізму M_c та збільшення запасу кінетичної енергії системи, тобто на забезпечення заданого прискорення

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{\omega_{\text{кін}} - 0}{t_1 - 0} = \frac{\omega_{\text{кін}}}{t_1} > 0. \quad (7.5)$$

На II ділянці електропривод працює у статичному режимі, рухаючись з усталеною швидкістю $\omega_{\text{кін}}$. Момент двигуна витрачається тільки на подолання моменту опору $M=M_c$. На ділянці III електропривод знову переходить у динамічний режим, сповільнюючи механізм до нульової швидкості. При цьому момент двигуна визначається величиною сповільнення

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{0 - \omega_{\text{кін}}}{t_3 - t_2} = \frac{-\omega_{\text{кін}}}{t_3 - t_2} < 0 \quad (7.6)$$

та моментом опору і дорівнює

$$M = M_c - J \left| \frac{d\omega}{dt} \right|. \quad (7.7)$$

7.1 Статичні режими роботи електропривода

У статичному режимі момент двигуна врівноважується статичним моментом $M=M_c$ та відсутнє прискорення $\frac{d\omega}{dt}=0$. Для описання статичних властивостей двигунів та механізмів використовуються механічні характеристики $\omega=f(M)$, тобто залежність швидкості від моменту. Механічні характеристики можуть мати вигляд кривих чи прямих ліній. На рис.7.2. представлено прямолінійні механічні характеристики двигуна постійного струму (ДПС), синхронного двигуна (СД) та механізму. Механічні характеристики характеризуються жорсткістю

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}. \quad (7.8)$$

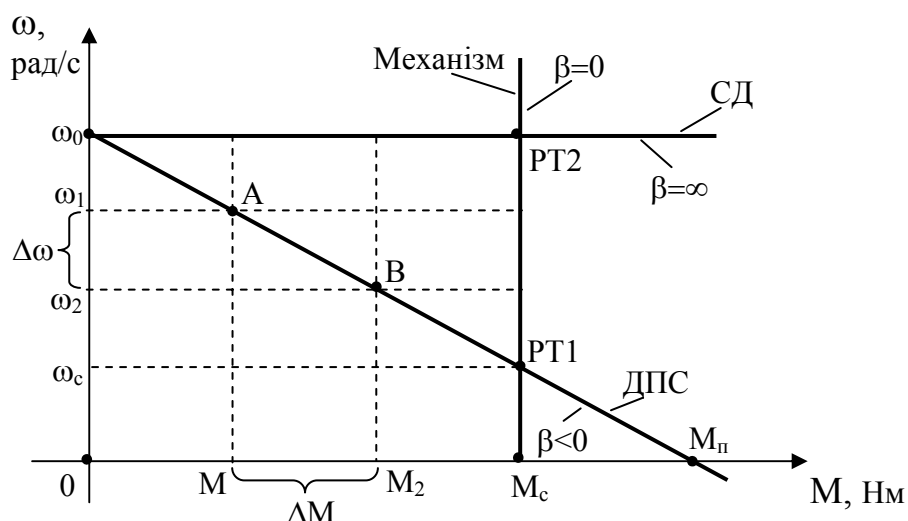


Рис.7.2

Для прямолінійних характеристик жорсткість можна визначити за допомогою приростів моменту та швидкості

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \quad (7.9)$$

Жорсткість механічної характеристики ДПС має від'ємне значення

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} < 0, \quad (7.10)$$

так як $\Delta M > 0$, а $\Delta \omega < 0$ для точок **A** та **B**. Синхронний двигун СД має абсолютно жорстку механічну характеристику, тобто рівну нескінченності

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_1}{\omega_0 - \omega_0} = \infty, \quad (7.11)$$

бо $\Delta M > 0$, а $\Delta \omega = 0$. Механічна характеристика представленого механізму абсолютно м'яка, тобто рівна нулю

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_c - M_c}{\omega_2 - \omega_1} = 0, \quad (7.12)$$

так як $\Delta M = 0$, а $\Delta \omega < 0$. Якісно жорсткість механічних характеристик у порівнянні описується словами “жорстка”, “м'яка”, “жорсткіша”, “м'якіша”.

Механічна характеристика двигуна характеризується також швидкістю ідеального холостого ходу ω_0 , пусковим моментом (моментом короткого замикання) M_n та номінальними швидкістю ω_n і моментом M_n .

Двигун чи механізм може працювати в будь-якій точці на своїй механічній характеристиці. Конкретна робоча точка визначається перетином механічних характеристик двигуна та механізму. В робочій точці момент двигуна дорівнює статичному моменту, який створює механізм $M = M_c$. Двигун постійного струму ДПС працює в точці РТ1 із швидкістю ω_c , а синхронний двигун СД – в точці РТ2 із швидкістю ω_0 .

Усталений рух у робочій точці може бути стійким чи нестійким. Умовою стійкого руху є

$$\beta_{дв} < \beta_{мех}, \quad (7.13)$$

тобто жорсткість механічної характеристики двигуна $\beta_{дв}$ повинна бути меншою жорсткості механічної характеристики механізму $\beta_{мех}$. Для ДПС ця умова виконується, бо в робочій точці РТ1

$$(\beta_{дв} < 0) < (\beta_{мех} = 0).$$

Осі механічних характеристик на площині створюють чотири квадранти або четверті **I-IV**, рис.7.3. Робоча точка двигуна в залежності від статичного моменту та режиму роботи може знаходитися в будь-якому квадранті. Якщо при цьому в робочій точці знаки швидкості та моменту співпадають, то двигун працює в рушійному режимі, передаючи енергію механізму, квадранти **I, III**.

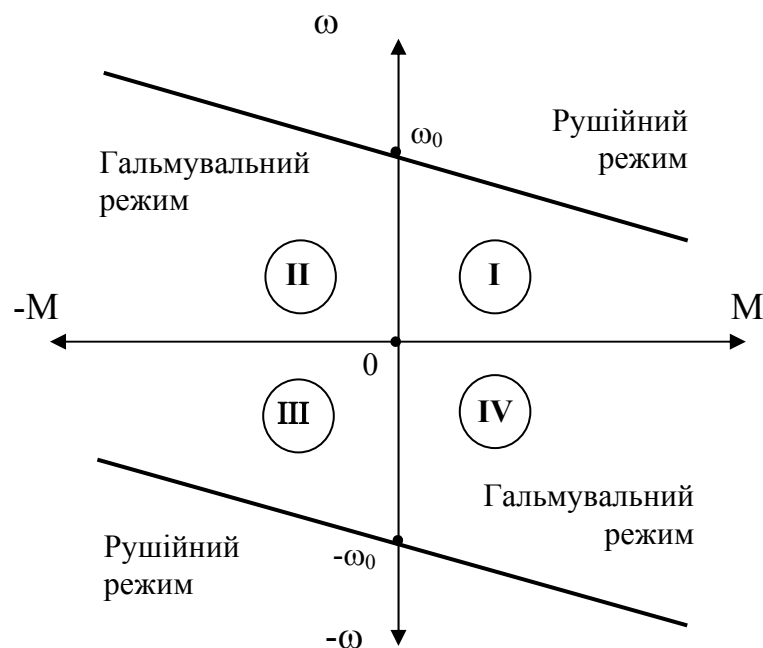


Рис.7.3.

Якщо знаки швидкості та моменту різні, то двигун знаходиться в гальмівному режимі, отримуючи енергію від механізму, квадранти **II, IV**. Механічні характеристики двигуна для прямого та зворотного напрямку руху симетричні відносно початку координат, рис.7.3.

Двигун має *природну* механічну характеристику, яка відповідає його підключенню до мережі на номінальні (паспортні) дані. Крім того, двигун може мати будь-яку кількість *штучних* механічних характеристик, які відповідають підключенню на неномінальні дані. Штучні характеристики використовуються для зміни режиму роботи, швидкості, моменту двигуна тощо.

7.2. Механічні перехідні процеси

Перехідний процес, який обумовлений дією моменту двигуна чи статичного моменту називається механічним. (Є також електромеханічні перехідні процеси, які враховують ще й електромагнітні перехідні процеси в електричних обмотках двигуна та елементах силових перетворювачів. Електромеханічні перехідні процеси будуть розглядатися пізніше.) Основне рівняння руху у цілому вірно описує механічні перехідні процеси

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c = M_{\text{дин}}. \quad (7.14)$$

В залежності від закону зміни динамічного моменту механічні перехідні процеси розрізняються на процеси:

- 1) з постійним динамічним моментом $M_{\text{дин}} = \text{const}$;
- 2) з динамічним моментом, який лінійно залежить від швидкості $M_{\text{дин}} = f(\omega)$;
- 3) з динамічним моментом, який довільно залежність від швидкості.

7.2.1. Перехідні процеси з постійним динамічним моментом

В даному випадку прискорення залишається незмінним

$$\varepsilon = \frac{M - M_c}{J} = \frac{M_{\text{дин}}}{J}. \quad (7.15)$$

Вирішення рівняння (7.14) за умови незмінних значень M , M_c , J , ε дозволяє отримати закон зміни швидкості при перехідному процесі

$$\begin{aligned} J d\omega &= (M - M_c) dt \Rightarrow d\omega = \frac{M - M_c}{J} dt \Rightarrow d\omega = \varepsilon dt \Rightarrow \\ \int_{\omega_{\text{поч}}}^{\omega} d\omega &= \varepsilon \int_0^t dt \Rightarrow \omega - \omega_{\text{поч}} = \varepsilon t \Rightarrow \\ \omega &= \omega_{\text{поч}} + \varepsilon t = \omega_{\text{поч}} + \frac{M - M_c}{J} t. \end{aligned} \quad (7.16)$$

Згідно (7.16) швидкість лінійно залежить від часу. Якщо відомі початкове та кінцеве значення швидкості, то з (7.16) знаходиться час перехідного процесу

$$t_{\text{пп}} = \frac{\omega_{\text{кін}} - \omega_{\text{поч}}}{\varepsilon} = J \frac{\omega_{\text{кін}} - \omega_{\text{поч}}}{M - M_c}. \quad (7.17)$$

Закон зміни положення визначається з урахуванням (1.88) на основі рівняння для кута

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \Rightarrow \int_{\varphi_{\text{поч}}}^{\varphi} d\varphi = \int_0^t \omega dt \Rightarrow \int_{\varphi_{\text{поч}}}^{\varphi} d\varphi = \int_0^t \omega_{\text{поч}} dt + \varepsilon \int_0^t t dt \Rightarrow$$

$$\varphi = \varphi_{\text{поч}} + \omega_{\text{поч}} t + \varepsilon \frac{t^2}{2} = \varphi_{\text{поч}} + \omega_{\text{поч}} t + \frac{M - M_c}{J} \frac{t^2}{2}. \quad (7.18)$$

Відповідно до (7.18) кут залежить у квадраті від часу. Графіки перехідних процесів швидкості $\omega=f(t)$ та кута $\varphi=f(t)$ при постійному динамічному моменті $M_{\text{дин}}$ показано на рис.7.4.

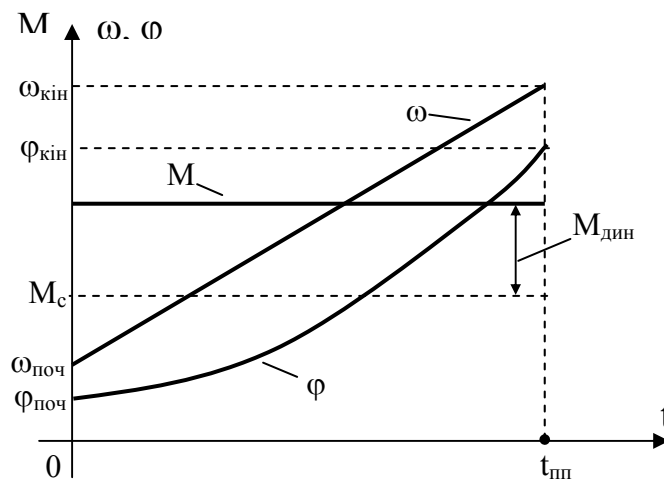


Рис.7.4.

Типові випадки механічних перехідних процесів із постійним динамічним моментом наступні:

- 1) Пуск вхолосту до швидкості $\omega_{\text{кін}}$ з різним прискоренням $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

В даному випадку початкова швидкість $\omega_{\text{поч}}=0$, статичний момент відсутній $M_c=0$, тому динамічний момент дорівнює моменту двигуна $M_{\text{дин}}=M$.

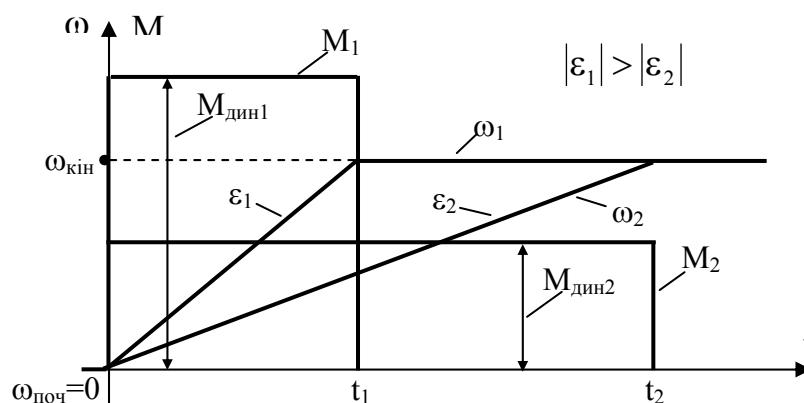


Рис.7.5.

Так як прискорення $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, то згідно (7.4) для їх забезпечення

$$M_1 = M_{\text{дин1}} = \varepsilon_1 J > M_2 = M_{\text{дин2}} = \varepsilon_2 J, \quad (7.19)$$

а час досягнення $\omega_{\text{кін}}$ відповідно до (7.17)

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{кін}} - 0}{\varepsilon_1} < t_2 = \frac{\omega_{\text{кін}} - 0}{\varepsilon_2}. \quad (7.20)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює нулю $M = M_c = 0$. Графіки перехідних процесів швидкостей $\omega_1 = f(t)$, $\omega_2 = f(t)$, побудованих згідно (7.16), та моментів двигуна $M_1 = f(t)$, $M_2 = f(t)$ приведено на рис.7.5.

2) Зупинка від початкової швидкості $\omega_{\text{поч}}$ з різним сповільненням $|\varepsilon_1| < |\varepsilon_2|$ при відсутності статичного моменту.

В цьому випадку кінцева швидкість $\omega_{\text{кін}} = 0$, статичний момент відсутній $M_c = 0$, тому динамічний момент (7.3) дорівнює моменту двигуна $M_{\text{дин}} = M$. Так як сповільнення мають від'ємні значення і $|\varepsilon_1| < |\varepsilon_2|$, то згідно (7.7) для їх забезпечення моменти також повинні бути від'ємними, з наступними абсолютними значеннями

$$|M_1| = M_{\text{дин1}} = |\varepsilon_1| J < |M_2| = M_{\text{дин2}} = |\varepsilon_2| J, \quad (7.21)$$

а час зупинки ідповідно до (7.17)

$$t_1 = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{\varepsilon_1} > t_2 = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{\varepsilon_2}. \quad (7.22)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює нулю $M = M_c = 0$. Графіки перехідних процесів швидкостей $\omega_1 = f(t)$, $\omega_2 = f(t)$, побудованих згідно (1.88), та моментів двигуна $M_1 = f(t)$, $M_2 = f(t)$ приведено на рис.7.6.

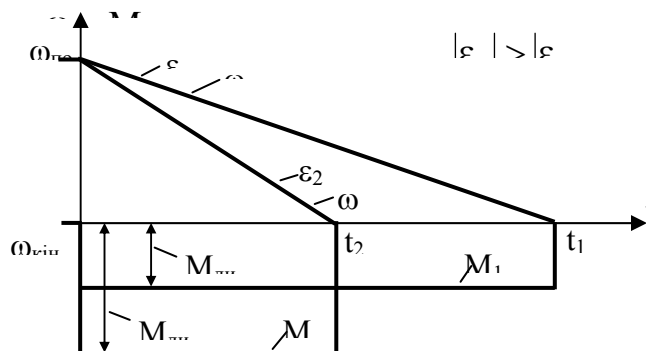


Рис.7.6

3) Пуск при реактивному статичному моменті M_c до швидкості $\omega_{кін}$ із заданим прискоренням ϵ .

В даному випадку початкова швидкість $\omega_{поч}=0$, динамічний момент згідно (7.2) дорівнює $M_{дин}=M-M_c$. Для забезпечення заданого прискорення момент двигуна згідно (7.6) дорівнює

$$M = M_c + \epsilon J, \quad (7.23)$$

а час досягнення $\omega_{кін}$ відповідно до (7.17)

$$t_1 = \frac{\omega_{кін}}{\epsilon}. \quad (7.24)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює статичному моменту $M=M_c$. Графіки перехідних процесів швидкості $\omega=f(t)$, побудованого за (7.16), та моменту двигуна $M=f(t)$ приведено на рис.7.7.

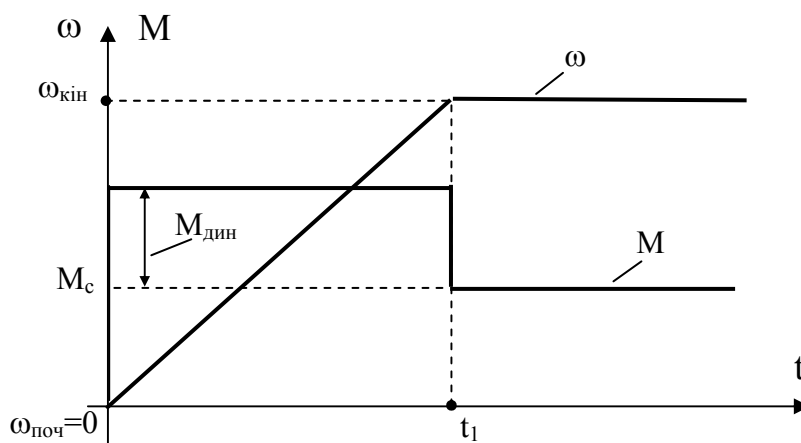


Рис.7.7

4) Зупинка від початкової швидкості $\omega_{поч}$ з різним сповільненням $|\epsilon_1| < |\epsilon_2|$ при наявності статичного моменту M_c .

Кінцева швидкість $\omega_{кін}=0$. Момент двигуна до початку перехідного процесу врівноважується статичним моментом $M=M_c$. Динамічний момент під час перехідного процесу згідно (7.3) дорівнює $M_{дин}=M-M_c$. Так як сповільнення мають від'ємні значення і $|\epsilon_1| < |\epsilon_2|$, то згідно (7.7) моменти визначаються наступним чином

$$M_1 = M_c - |\epsilon_1| J > M_2 = M_c - |\epsilon_2| J. \quad (7.25)$$

Як видно з (7.17) момент двигуна в залежності від величини сповільнення може змінювати знак чи дорівнювати нулю. В останньому випадку задане

сповільнення буде забезпечуватися статичним моментом. Час зупинки дорівнює

$$t_1 = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{-\varepsilon_1} > t_2 = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{-\varepsilon_2}. \quad (7.26)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює статичному моменту $M=M_c$. При зупинці механізму двигун можна вимкнути, якщо статичний момент є реактивним, тобто не рушійним. Якщо ж статичний момент є активним, то відключення двигуна призведе до руху механізму під його дією. Графіки перехідних процесів швидкостей $\omega_1=f(t)$, $\omega_2=f(t)$, побудованих згідно (7.16), та моментів двигуна $M_1=f(t)$, $M_2=f(t)$ приведено на рис.7.8.

5) Реверс (зміна напрямку руху) від початкової швидкості $\omega_{\text{поч}}$ до кінцевої швидкості $\omega_{\text{кін}}$ при заданому моменті двигуна M та при активному статичному моменті M_c .

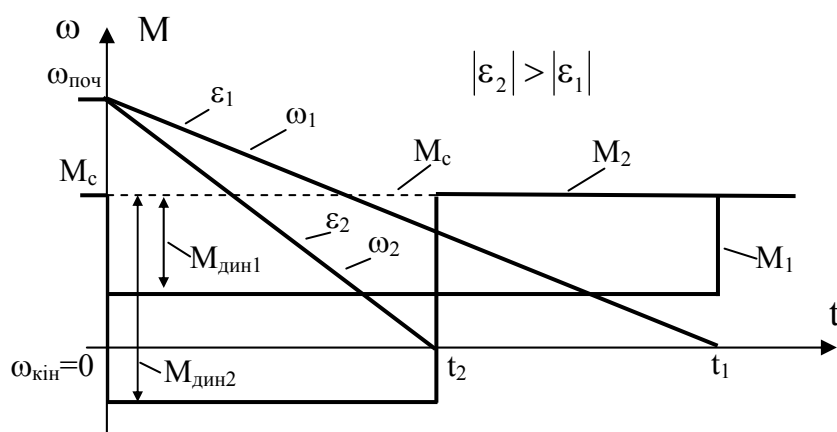


Рис.7.8

Момент двигуна до початку перехідного процесу врівноважується статичним моментом $M=M_c$. Останній не змінює свого знаку на протязі всього перехідного процесу, бо є активним. Для реалізації реверса напрямок моменту двигуна змінюється на протилежний, тому значення динамічного моменту на весь час перехідного процесу згідно (7.2) залишається незмінним $M_{\text{дин}}=|M+M_c|$. Цей динамічний момент забезпечує однакові значення сповільнення

$$\varepsilon = (-M - M_c)/J \quad (7.27)$$

та прискорення при розгоні у зворотному напрямку

$$\varepsilon = (M + M_c)/J. \quad (7.28)$$

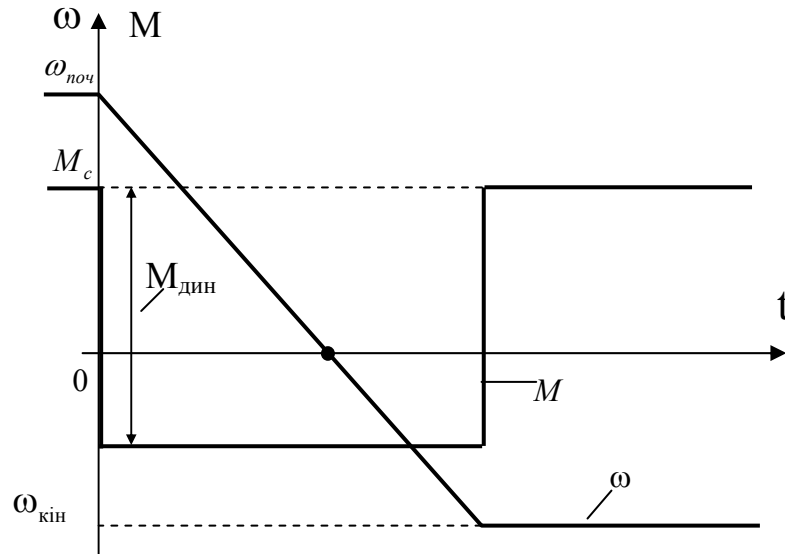


Рис.7.9

Час перехідного процесу складається з проміжків сповільнення та розгону

$$t = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{\varepsilon} + \frac{\omega_{\text{кін}} - 0}{\varepsilon}. \quad (7.29)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює статичному моменту $M=M_c$. Графіки перехідних процесів швидкості $\omega=f(t)$, побудованого згідно (7.16), та моменту двигуна $M=f(t)$ приведено на рис.7.9.

б) Реверс (зміна напрямку руху) від початкової швидкості $\omega_{\text{поч}}$ до кінцевої швидкості $\omega_{\text{кін}}$ при заданому моменті двигуна M та при реактивному статичному моменті M_c .

Момент двигуна до початку перехідного процесу врівноважується статичним моментом $M=M_c$. Для реалізації реверса напрямок моменту двигуна змінюється на весь час перехідного процесу на протилежний. При зміні знаку швидкості статичний момент також змінює своє значення на протилежне, бо за своєю природою він є реактивним. Адже динамічний момент при сповільненні $M_{\text{дин1}}=-M-M_c$ та при прискоренні $M_{\text{дин2}}=-M+M_c$ має різне значення, тому значення сповільнення

$$\varepsilon_1 = (-M - M_c)/J \quad (7.30)$$

більше за прискорення при розгоні у зворотному напрямку

$$\varepsilon_2 = (-M + M_c)/J, \quad (7.31)$$

що обумовлює злам прямої на графіку перехідного процесу швидкості, рис.7.10.

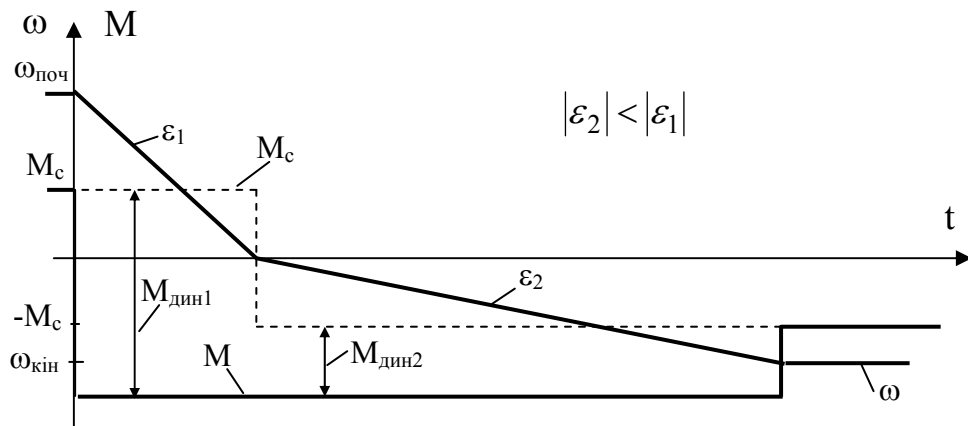


Рис.7.10

Час перехідного процесу складається з двох проміжків сповільнення та розгону

$$t = \frac{0 - \omega_{\text{поч}}}{\varepsilon_1} + \frac{\omega_{\text{кін}} - 0}{\varepsilon_2}. \quad (7.32)$$

Після завершення перехідного процесу момент двигуна дорівнює статичному моменту $M = M_c$.

Якщо момент двигуна при зупинці буде меншим за статичний момент $|M| < |M_c|$, то двигун зупиниться і розгону механізму у зворотному напрямку не буде, рис.7.11.

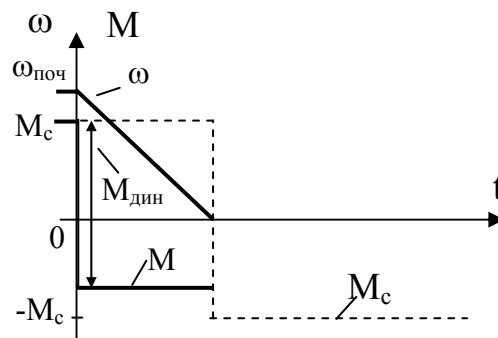


Рис.7.11

Перехідні процеси з постійним динамічним моментом часто використовуються для попередніх розрахунків поведінки механічної системи, бо потребують мінімум вихідних даних при вірному описі процесу в цілому. Реальні перехідні процеси з постійним динамічним

моментом найчастіше формуються за допомогою замкненої системи керування електропривода.

7.2.2. Перехідні процеси з динамічним моментом, який лінійно залежить від швидкості

Багато двигунів та механізмів мають механічні характеристики з лінійним зв'язком між моментом та швидкістю, рис 7.12.

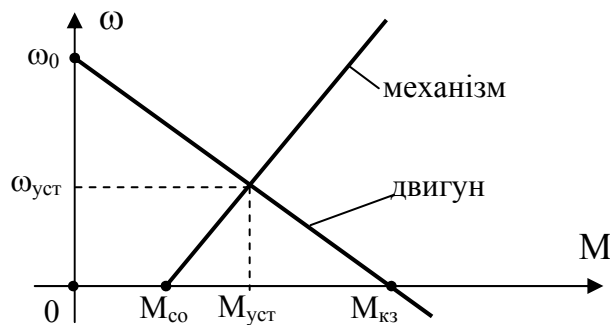


Рис.7.12

Рівняння механічних характеристик двигуна та механізму згідно рис.7.12 мають вигляд

$$\begin{aligned} M &= M_{кз} - \beta\omega \\ M_c &= M_{со} + \beta_c\omega \end{aligned} \quad (7.33)$$

де β – жорсткість механічної характеристики двигуна;
 β_c – жорсткість механічної характеристики механізму.

Сумісне вирішення рівнянь (1.105) з основним рівнянням динаміки (1.38)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

дає рівняння руху одномасової розрахункової схеми

$$J \frac{d\omega}{dt} + (\beta + \beta_c)\omega = M_{кз} - M_{со} \quad (7.34)$$

Після по-членного ділення (1.106) на $(\beta + \beta_c)$ отримується остаточне диференціальне рівняння руху механічної частини

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (7.35)$$

де $T_M = \frac{J}{\beta + \beta_c}$ - електромеханічна стала часу системи, [с];

$\omega_{уст} = \frac{M_{кз} - M_{со}}{\beta + \beta_c}$ - усталена швидкість, рис.1.53.

Якщо жорсткість механічної характеристики механізму $\beta_c = 0$, то електромеханічна стала часу визначається жорсткістю механічної характеристики двигуна $T_M = J/\beta = J\omega_0/M_{кз}$.

Розв'язок рівняння (1.107) визначається сумою загального і часткового рішень $\omega = \omega_{заг} + \omega_{част}$. Загальне рішення однорідного рівняння

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = 0 \quad (7.36)$$

знаходиться у вигляді

$$\omega_{заг} = Ae^{pt},$$

де A – невідома константа;

$p = -1/T_M$ – корінь характеристичного рівняння $T_M p\omega + \omega = 0$.

Остаточне загальне рішення приймає вид

$$\omega_{заг} = Ae^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (7.37)$$

Часткове рішення знаходиться при нульовій похідній $d\omega/dt = 0$ у рівнянні (1.107) і дорівнює

$$\omega_{част} = \omega_{уст}. \quad (7.38)$$

Таким чином, розв'язок рівняння (7.35) з урахуванням (7.37), (7.38) представляється у формі

$$\omega = A e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{уст}. \quad (7.39)$$

Константа A знаходиться з (7.39) при початкових умовах часу $t=0$ та початкової швидкості $\omega=\omega_{поч}$

$$A = \omega_{поч} - \omega_{уст},$$

після чого розв'язок остаточно матиме вигляд

$$\omega = \omega_{поч} e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}). \quad (7.40)$$

Рівняння 7.40 описує закон зміни швидкості під час перехідного процесу. Момент двигуна зв'язаний із швидкістю відомим рівнянням

$$M = M_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{уст} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}). \quad (7.41)$$

Закон зміни положення (кута) знаходиться з рівняння

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \Rightarrow d\varphi = \omega dt$$

шляхом інтегрування після підстановки в його (7.30)

$$\varphi = \varphi_{поч} + \omega_{уст} \cdot t + T_M (\omega_{поч} - \omega_{уст}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}). \quad (7.42)$$

Рівняння (7.40) та (7.41) дозволяють визначити час перехідного процесу від початкової швидкості $\omega_{поч}$ чи початкового моменту $M_{поч}$ до будь-якої точки ω_i чи M_i перехідного процесу

$$t_{пп} = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{поч} - \omega_{уст}}{\omega_i - \omega_{уст}} = T_M \cdot \ln \frac{M_{поч} - M_{уст}}{M_i - M_{уст}}. \quad (7.43)$$

Як видно з (7.43), суттєвий вплив на тривалість перехідного процесу має електромеханічна стала часу T_M . Фізична суть електромеханічної сталої часу – це час розгону двигуна при відсутності навантаження до швидкості ідеального холостого ходу ω_0 під дією незмінного моменту рівного моменту короткого замикання $M_{кз}$. Значення електромеханічної сталої можна знайти з графіка перехідного процесу відомим методом дотичної. Теоретично перехідний процес завершується при $t=\infty$. На практиці перехідний процес вважається завершеним, якщо перехідна координата

досягла 0,95-0,98 від усталеного значення. При цьому час перехідного процесу дорівнює відповідно $t_{\text{пп}}=(3\div 4)T_M$. Графіки перехідних процесів швидкості $\omega=f(t)$ та моменту двигуна $M=f(t)$, побудованих згідно (7.40) та (7.41), приведено на рис.7.13.

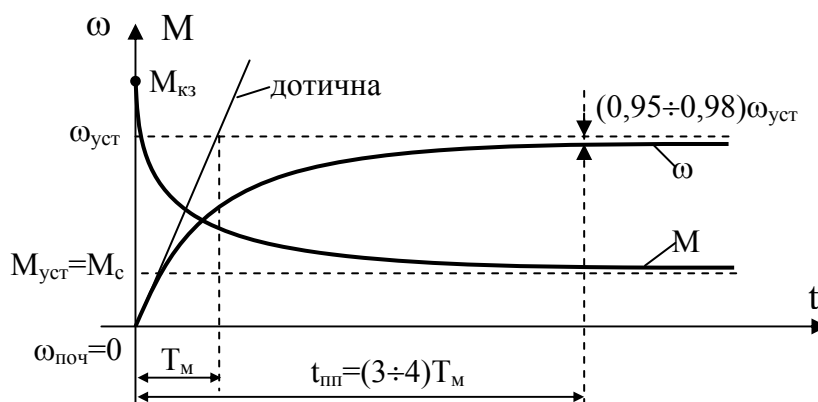


Рис.7.13

7.2.3. *Перехідні процеси з динамічним моментом, який довільно залежить від швидкості*

Нелінійна залежність динамічного моменту від швидкості характерна для асинхронних двигунів (АД), двигунів постійного струму з послідовним збудженням, а також струминних механізмів, рис.7.14.

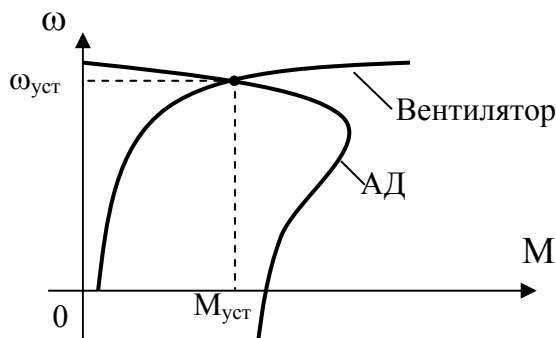


Рис.7.14

Вирішення відповідних диференціальних рівнянь у цьому випадку для отримання залежностей, які описують перехідні процеси швидкості, моменту та положення, найчастіше здійснюється числовими методами Ейлера, Рунге-Кутта тощо за допомогою ЕОМ. У простих випадках можна використати графічне інтегрування чи спрощені аналітичні залежності.

7.2.4. *Перехідний процес пуску електропривода, представленого двомасовою розрахунковою схемою*

Перехідні процеси у двомасовій розрахунковій схемі для зменшення громіздкості та підвищення наочності розглядаються без врахування внутрішнього в'язкого тертя та механічного зазору при відсутності статичних моментів та при незмінному моменті двигуна \mathbf{M} , рис.7.15.

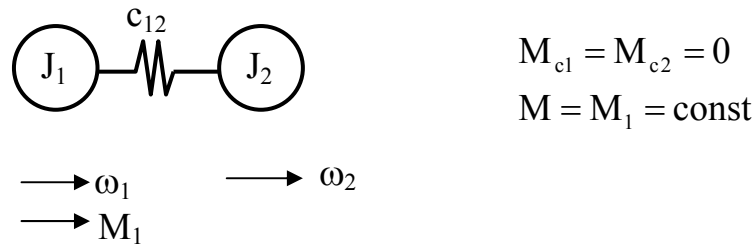
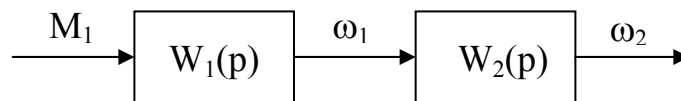


Рис.7.15

Дослідження здійснюється на основі раніше визначених



$$W_1(p) = \frac{\omega_1(p)}{M_1(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma}p} \cdot \frac{\left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2}\right)p^2 + 1}{\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2}\right)p^2 + 1}; \quad (7.44)$$

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_1(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma}p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2}\right)p^2 + 1}. \quad (7.45)$$

Після заміни $p \rightarrow \frac{d}{dt}$ в (7.44) отримується відповідне диференціальне рівняння

$$\left(\frac{J_{\Sigma}}{\Omega_{12}^2}\right) \cdot \frac{d^3\omega_1}{dt^3} + J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2}\right) \cdot \frac{d^2M_1}{dt^2} + M_1,$$

яке при діленні на сумарний момент інерції J_{Σ} з урахуванням того, що похідна за моментом дорівнює нулю, бо $M_1 = \text{const}$, приймає вигляд

$$\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) \cdot \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{\text{сеп}}, \quad (7.46)$$

де $\varepsilon_{\text{сеп}} = M_1 / J_{\Sigma}$ - середнє прискорення системи.

Три корені рівняння знайдено раніше. Нульовий корінь $p_1 = 0$ визначає рівноприскорений рух системи із швидкістю $\omega_1' = \varepsilon_{\text{сеп}} \cdot t$, а два уявні корені $p_{2,3} = \pm j\Omega_{12}$ - можливість незатухаючих коливань швидкості $\omega_1'' = A \cos \Omega_{12} t + B \sin \Omega_{12} t$ на частоті Ω_{12} . Вирішення рівняння (7.46) знаходиться у наступному вигляді

$$\omega_1 = \omega_1' + \omega_1'' = \varepsilon_{\text{сеп}} t + A \cos \Omega_{12} t + B \sin \Omega_{12} t. \quad (7.47)$$

Невідомі коефіцієнти **A** і **B** визначаються з початкових умов $t=0$, $\omega_1=0$, $d\omega_1/dt = M_1/J_1 = \gamma \varepsilon_{\text{сеп}}$

$$A = 0; \quad B = \frac{\varepsilon_{\text{сеп}} J_2}{J_1 \Omega_{12}} = \frac{\varepsilon_{\text{сеп}}}{\Omega_{12}} (\gamma - 1)$$

після чого закон зміни швидкості першої маси під час перехідного процесу приймає вигляд

$$\omega_1 = \varepsilon_{\text{сеп}} t + \frac{\varepsilon_{\text{сеп}} (\gamma - 1)}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t. \quad (7.48)$$

Аналогічно на основі передаточної функції (7.46) знаходиться закон зміни швидкості другої маси

$$\omega_2 = \varepsilon_{\text{сеп}} t - \frac{\varepsilon_{\text{сеп}}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12} t. \quad (7.49)$$

Як видно з (7.48) та (7.49) рух двомасової системи при постійному динамічному моменті проходить рівноприскорено, але обидві маси здійснюють коливання у протифазі, рис.7.16.

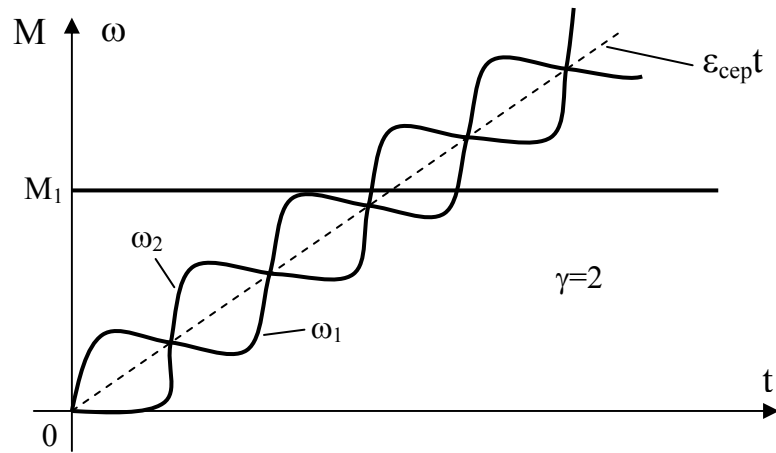


Рис.7.16

Коефіцієнти при тригонометричних функціях $\varepsilon_{\text{сеп}}(\gamma-1)/\Omega_{12}$ та $\varepsilon_{\text{сеп}}/\Omega_{12}$ визначають амплітуду цих коливань. При співвідношенні мас $\gamma=2$ амплітуда коливань обох мас однакова. Амплітуда коливань тим менше, чим менше прискорення $\varepsilon_{\text{сеп}}$ та чим більша частота коливань Ω_{12} , яка в свою чергу залежить від жорсткості зв'язку. На зменшення амплітуди коливань першої маси впливає зменшення моменту інерції другої маси.

В реальних системах завжди присутні дисипативні сили типу внутрішнього в'язкого тертя, які поглинають коливання. В такому випадку з трьох коренів характеристичного рівняння один є нульовим, а два інші – комплексно-спряжені

$$p_1 = 0; \quad p_{2,3} = -\alpha_{\text{вт}} \pm j\Omega_p$$

де $\alpha_{\text{вт}} = \frac{\beta_{12}(J_1 + J_2)}{2J_1J_2}$ - коефіцієнт демпфірування коливань;

$\Omega_p = \sqrt{\Omega_{12}^2 - \alpha_{\text{вт}}^2}$ - резонансна частота системи.

Механічна частина має властивості інтегруючої та коливальної ланок. Закони зміни швидкостей двох мас мають наступний вид

$$\omega_1 = \varepsilon_{\text{сеп}} t + B_1 e^{-\alpha_{\text{вт}} t} \cdot \sin \Omega_p t; \quad (7.50)$$

$$\omega_2 = \varepsilon_{\text{сеп}} t - B_2 e^{-\alpha_{\text{вт}} t} \cdot \sin \Omega_p t. \quad (7.51)$$

Проте природне затухання незначне, так логарифмічний декремент затухання дорівнює

$$\lambda = \frac{2\pi\alpha_{\text{вТ}}}{\Omega_p} = 0,1 \div 0,3$$

тобто коливання затухають за $10 \div 30$ періодів, рис.7.17.

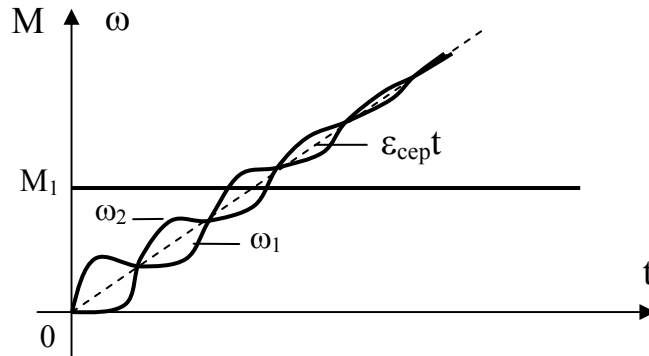


Рис.7.17

7.3. Динамічні навантаження електропривода

Динамічні навантаження виникають у перехідних процесах: пуск, зупинка, зміна швидкості, зміна навантаження тощо. Вони викликають короточасні перевантаження двигуна та елементів кінематичного ланцюга, тим самим зменшуючи надійність та довговічність ЕП та механізму. Якщо механічна частина представляється одномасовою схемою, то динамічне навантаження дорівнює динамічному моменту

$$M_{\text{дин}} = M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon. \quad (7.52)$$

Найчастіше за технологічними вимогами задається середнє чи максимальне прискорення механізму ε_{max} . В цьому випадку максимальний момент двигуна

$$M_{\text{max}} = M_c + J\varepsilon_{\text{max}} \leq M_{\text{max. доп.}}$$

не повинен перевершувати максимально допустимого значення, яке визначається паспортними даними $M_{\text{max. доп.}} = 2,2 \div 2,5M_{\text{ном}}$ чи $M_{\text{max. доп.}} = 6 \div 8M_{\text{ном}}$ для високомоментних двигунів. При прискоренні механізму динамічний момент є гальмівним, а при сповільненні - рушійним.

Динамічні навантаження на елементи механічної частини суттєво збільшуються при виникненні пружних коливань та ударів при виборі зазорів. Пуск електропривода, механічна частина якого представляється двомасовою розрахунковою схемою із зазором найчастіше проходить в три етапи:

- 1) Вибір зазору, тобто рух тільки першої маси;
- 2) Зрушення другої маси;
- 3) Сумісний рух двох мас.

1) *Вибір зазору.*

Якщо зазор повністю розімкнено (найгірший випадок), то при реактивному статичному моменті M_{c2} друга маса залишається нерухомою, а перша маса стрімко набирає швидкість під дією моменту двигуна ($M_{c1} \approx 0$, $M_{12} = 0$)

$$M = M_1 = \text{const}$$

До удару з другою масою перша маса досягає швидкості

$$\omega'_{1\text{поч}} = \sqrt{2\varepsilon_3 \cdot \Delta\varphi_3}$$

де $\varepsilon_3 = \frac{M_1 - M_{c1}}{J_1}$ - прискорення при виборі зазору.

2) *Зрушення другої маси.*

При ударі, тобто при замиканні зазору, друга маса залишається нерухомою поки пружний момент M_{12} не стане більше статичного моменту M_{c2} , тому швидкість першої маси ще збільшується до $\omega_{1\text{поч}}$.

3) *Сумісний рух двох мас.*

Після зрушення другої маси динамічне навантаження визначається пружним моментом. З відомої системи рівнянь, яка описує двомасову схему знаходиться рівняння пружного моменту у вигляді

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + M_{12} = J_2 \varepsilon_{\text{сеп}} + M_{c2}, \quad (7.53)$$

де $\varepsilon_{\text{сеп}} = \frac{M_1 - M_{c1} - M_{c2}}{J_1 + J_2}$ - середнє прискорення механічної частини, якби пружний зв'язок був абсолютно жорстким.

Рішення даного рівняння знаходиться як сума загального та часткового при коренях $p_{1,2} = \pm j\Omega_{12}$

$$M_{12} = J_2 \varepsilon_{\text{сеп}} + M_{c2} + A \cos \Omega_{12} t + B \sin \Omega_{12} t. \quad (7.54)$$

Коефіцієнти **A** та **B** знаходяться з початкових умов

$$t = 0; \quad M_{12} = M_{c2}; \quad \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}(\omega_1 + \omega_2) = C_{12}\omega_{1\text{поч}},$$

після чого закон зміни пружного моменту дорівнює

$$M_{12} = M_{12\text{сер}} - (M_{12\text{сер}} - M_{c2})\cos\Omega_{12}t + \frac{C_{12}\omega_{1\text{поч}}}{\Omega_{12}} \cdot \sin\Omega_{12}t, \quad (7.55)$$

де $M_{12\text{сер}} = J_2 \cdot \varepsilon_{\text{сер}} + M_{c2}$ - середній пружний момент;

або

$$M_{12} = M_{12\text{сер}} + \sqrt{(M_{12\text{сер}} - M_{c2})^2 + \frac{C_{12}^2\omega_{1\text{поч}}^2}{\Omega_{12}^2}} \cdot \sin(\Omega_{12}t - \psi), \quad (7.56)$$

де $\psi = \text{arctg} \frac{(M_{12\text{сер}} - M_{c2})\Omega_{12}}{C_{12}\omega_{1\text{поч}}}$ - фаза.

Графіки перехідних процесів швидкостей та моменту представлено на рис.7.18.

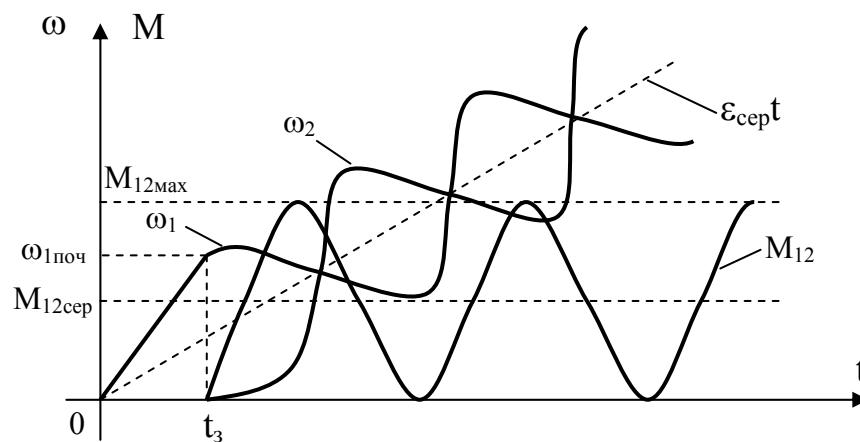


Рис.7.18 - t_3 - час замикання зазору.

Динамічне навантаження характеризується динамічним коефіцієнтом, як відношення максимального пружного моменту (7.56) при $\sin(\Omega_{12}t - \psi) = 1$ до середнього

$$K_{\text{дин}} = \frac{M_{12\text{мах}}}{M_{12\text{сер}}} = 1 + \left(1 - \frac{M_{c2}}{M_{12\text{сер}}}\right) \cdot \sqrt{1 + \frac{C_{12}^2\omega_{1\text{поч}}^2}{J_2^2\varepsilon_{\text{сер}}^2\Omega_{12}^2}}. \quad (7.57)$$

Згідно (7.77), якщо зазор до початку пуску було замкнено і $\omega_{1\text{поч}}=0$ та $M_{c2}=0$, то $K_{\text{дин}}=2$, тобто пружний момент вдвічі збільшує навантаження. Якщо ж зазор розімкнено $\omega_{1\text{поч}}\neq 0$, то перевантаження буде тим більше, чим більший момент інерції першої маси J_1 та жорсткість c_{12} . Таким чином, пружність зв'язку зменшує динамічні удари. При проектуванні ЕП та механізму потрібно забезпечити динамічний коефіцієнт, близький до $K_{\text{дин}}=1$, що дозволить збільшити надійність та довговічність механізму. В цілому динамічні коливання мас не впливають на тривалість перехідного процесу, але негативно позначаються на виконанні технологічних операцій, особливо на точності роботи.

7.4. Оптимізація передаточного числа кінематичного ланцюга (редуктора)

Безпосереднє з'єднання двигуна з робочим органом є найбільш надійним, проте не завжди можливим, бо двигуни випускаються на певні ряди швидкостей, а, крім того, більшість робочих органів рухається з невеликою швидкістю й виготовлення двигунів на такі швидкості неекономічне. Тому виникає задача про раціональне значення коефіцієнта передачі кінематичного ланцюга (редуктора) - i . Критерії оптимізації можуть бути різними. Для багатьох механізмів та слідкуючих систем потрібно забезпечити максимальне прискорення у перехідних процесах. Рівняння руху, записане відносно швидкості робочого органу ω_{po} , має вигляд

$$iM - M_{\text{po}} = (J_{\text{po}} + J_{\text{д}} i^2) \cdot \frac{d\omega_{\text{po}}}{dt}, \quad (7.58)$$

де M, M_{po} - момент двигуна та статичний момент робочого органу;
 $J_{\text{д}}, J_{\text{po}}$ - моменти інерції двигуна та робочого органу.

Прискорення згідно (7.78) дорівнює

$$\varepsilon_{\text{po}} = \frac{d\omega_{\text{po}}}{dt} = \frac{iM - M_{\text{po}}}{J_{\text{po}} + J_{\text{д}} i^2}. \quad (7.59)$$

Оптимальне значення коефіцієнта передачі редуктора, яке забезпечує максимальне прискорення, знаходиться відомим способом із рівняння похідної

$$\frac{d\varepsilon_{\text{po}}}{di} = 0.$$

Після перетворень оптимальне значення передаточного числа дорівнює

$$\dot{i} = \frac{M_{p0}}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_{p0}}{M}\right)^2 + \frac{J_{p0}}{J_d}}. \quad (7.60)$$

Вираз (7.90) вірний і для найбільшого сповільнення системи. Задача одночасного забезпечення максимальних прискорення та сповільнення однозначно вирішується тільки при відсутності статичного моменту, тобто при підстановці у (7.90) значення $M_{p0} = 0$.