

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| Вступ..... | 6 |
| 1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ КРАНА | 8 |
| 1.1 Опис конструкції крана..... | 8 |
| 1.2 Кран козловий грейферний типу ККД г/п 15т | 9 |
| 1.3 Механізм пересування крана..... | 12 |
| 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ПРИВОДНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА | 14 |
| 2.1 Вимоги, які висуваються до електроприводів і системі електропостачання | 14 |
| 2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна..... | 17 |
| 3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ | 25 |
| 3.1 Вибір комплектного електроприводу | 25 |
| 3.2 Вибір струмообмежувального реактора..... | 38 |
| 3.3 Вибір згладжувального реактора | 39 |
| 3.4 Розрахунок параметрів об'єкта керування | 40 |
| 4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ КРАНА | 42 |
| 4.1 Математичний опис об'єкта керування | 42 |
| 4.2 Розрахунок регулятора струму..... | 45 |
| 4.3 Розрахунок регулятора швидкості | 48 |
| 4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості | 52 |
| 5 ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK..... | 54 |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ | 67 |
| 6.1 Загальні положення..... | 67 |
| 6.2 Обов'язки кранівника перед пуском крана в роботу..... | 69 |
| 6.3 Обов'язки кранівника під час роботи крана | 72 |

| | |
|--|----|
| | 5 |
| 6.4 Додаткові вимоги при роботі козлових кранів | 76 |
| 6.5 Обов'язки кранівника після закінчення роботи крана | 77 |
| 6.6 Обслуговування крана..... | 77 |
| 6.7 Відповідальність кранівника..... | 78 |
| 6.8 Електробезпека при роботі з кранами | 78 |
| Висновок..... | 80 |
| Перелік посилань..... | 82 |

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. Витрати праці 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 так само в обслуговуванні ГЕС. Для монтажу великих виробів (наприклад, в суднобудуванні) застосовують крани з 2 вантажними візками, що дозволяють кантувати вантаж на вазі. 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 і пристрій козлового крана полягає в наявності опор, пролітної балки, талі з механізмом пересування, електрообладнання, ходових візків і пульта, або кабіни управління. Пересування кранового візка, на якому 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 прольоту - 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, необхідну для пропуску вантажного візка. Також козлові крани розрізняються залежно від характеру опори. Козлові крани з жорсткими опорами конструктивно простіші, ніж крани з одною жорсткою і одною еластичною опорами, але при цьому зменшуються їх згинальні моменти від перекосного і горизонтального динамічного навантаження.

У козлових кранах можуть використовуватися такі вантажозахватні пристрої: грейфер, крюк і магніт і ін. Грейфер - пристрій, який являє собою черпак, який прикріплюється до підйомального 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.

Метою дипломного проекту є розробка тиристорного електроприводу механізму пересування грейферного козлового крана ККД15.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ДАНІ КРАНА

1.1 Опис конструкції крана

Крани козлові грейферні призначені для перевантаження сипучих і навалочних вантажів за допомогою канатного або приводного ковшового грейфера або знімного моторного або електрогідравлічного грейфера. На рисунку 1.1 наведено загальний вигляд козлового грейферного крана.



Рисунок 1.1 – Грейферний козловий кран

Крани, оснащені многочелюстним канатним або приводним грейфером, використовуються для перевантаження брухту чорних і кольорових металів. Канатні грейфери можуть мати як поздовжнє, так і поперечне розкриття щодо підкранових колій. Крани з канатними грейферами використовуються, як правило, на спеціалізованих складах сипучих і навалочних вантажів з великим вантажообігом.

Грейферні крани, в основному, застосовуються в металургійній і вугільній промисловості, промисловості будівельних матеріалів та на підприємствах з переробки брухту чорних і кольорових металів. Вантажопідйомність крана характеризується сумарною масою вантажу і грейфера.

У таблиці 1.1 наведені основні технічні характеристики козлових грейферних кранів.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики козлових грейферних кранів

| Найменування параметрів і розмірів | | Величина (діапазон) параметра |
|---|---------------------|----------------------------------|
| Вантажопідйомність, т | підйом 1 (грейфера) | 5,0 ... 75 |
| | - | - |
| Проліт, м | | 8 ... 70 |
| Консолі, м | | до 15 |
| Швидкість механізму, м / с (м / хв) | підйом 1 і 2 | 0,125 ... 1,5 (7,5 ... 90) |
| | пересування візка | 0,2 ... 2,0 (12,0 ... 120) |
| | пересування крана | 0,2 ... 2,0 (12,0 ... 120) |
| Частота обертання вантажозахоплювального органа (вантажного візка), об / хв | | - |
| Висота підйому від рівня головки підкранової рейки, м | | до 30 |
| Глибина опускання від рівня головки підкранової рейки, м | | до 20 |
| Максимальне навантаження на колесо, кН | | 100 ... 500 задається замовником |
| Група класифікації (режиму) роботи крана по ISO 4301-1: +1986 | | A6 ... A8 (6К-8К) |

1.2 Кран козловий грейферний типу ККД г/п 15т

Кран козловий грейферний типу ККД г/п 15т призначений для вантажно-розвантажувальних робіт штучних, сипучих або навалочних вантажів на матеріальних базах і складах за допомогою канатного або моторного ковшового грейфера.

Козлові грейферні крани, в основному, застосовуються в металургійній і вугільній промисловості, промисловості будівельних матеріалів та на підприємствах з переробки брухту чорних і кольорових металів. Технічні характеристики козлового грейферного крана ККД-15 наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 -Технічні характеристики козлового грейферного крана ККД-

15

| Характеристика | Значення |
|--|-----------------|
| 1 | 2 |
| Вантажопідйомність, т | 15 |
| Ємність грейфера V, м ³ і насипна щільність вантажу g, т / м ³ : | |
| - V = 3 м ³ | 2,0 <g <2,5 |
| - V = 4 м ³ | 1,5 <g <1,8 |
| - V = 5 м ³ | 1,0 <g <1,5 |
| Група режиму роботи крана по ІСО 4301/1 | A4 |
| Підведення живлення: | |
| - до візка | гнучкий кабель |
| - до крана | гнучкий кабель |
| Маса крана, т | 150 |
| Тиск на підкранових шлях, кН | 350 |
| Тип підкранової рейки | P65 ГОСТ8161 |
| Швидкість пересування, м / с (м / хв): | |
| - крана | 0,43 (25,8) |
| - візки | 0,6 (36) |
| Сумарна номінальна потужність електродвигунів, встановлених на крані, кВт, не більше | 215 |
| Механізм підйому і замикання грейфера: | |
| - швидкість підйому, м / с (м / хв) | 0,42 (25) |
| - група режиму роботи крана по ІСО 4301/1: | M5 |
| - швидкість замикання грейфера, м / с (м / хв) | 0,21 (12,5) |

Зовнішній вигляд і габаритні розміри козлового грейферного крана г/п 15т наведені на рисунку 1.2.

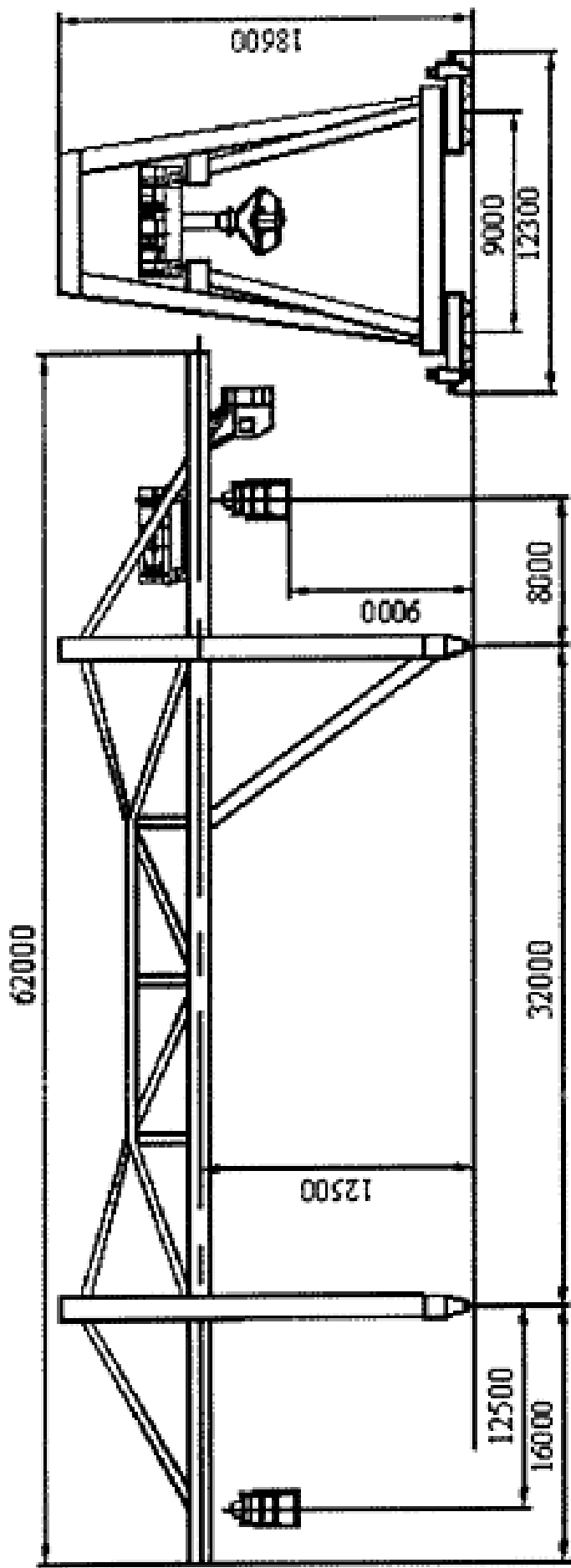


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд і габаритні розміри козлового грейферного крана Г / п 15т

1.3 Механізм пересування крана

Конструкція ходового візка козлового крана показана на рисунку 1.3. Всі вузли і механізми візки змонтовані на його рамі трапецеподібної форми, зверненою малою основою вниз. Чотири вертикальні стінки рами зварені з верхнім та нижнім майданчиками. В похилі грані стінок, крім металевих пластин, уварені напівгнезда буксових вузлів. Візок має два ходових колеса: ведуче і ведене. На маточини коліс напресовані і заштіфтовані зубчасті вінці. Ведуче 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 – щоки балансірні; 12 – рама візка;
 13 – буксових вузол; 14 – ведуче ходове колесо; 15 – зубчастий вінець;
 16 – підшипник; 17 – вал; 18 – проміжне зубчасте колесо; 19 – вісь;
 20 – підшипники; 21 – ведене ходове колесо.

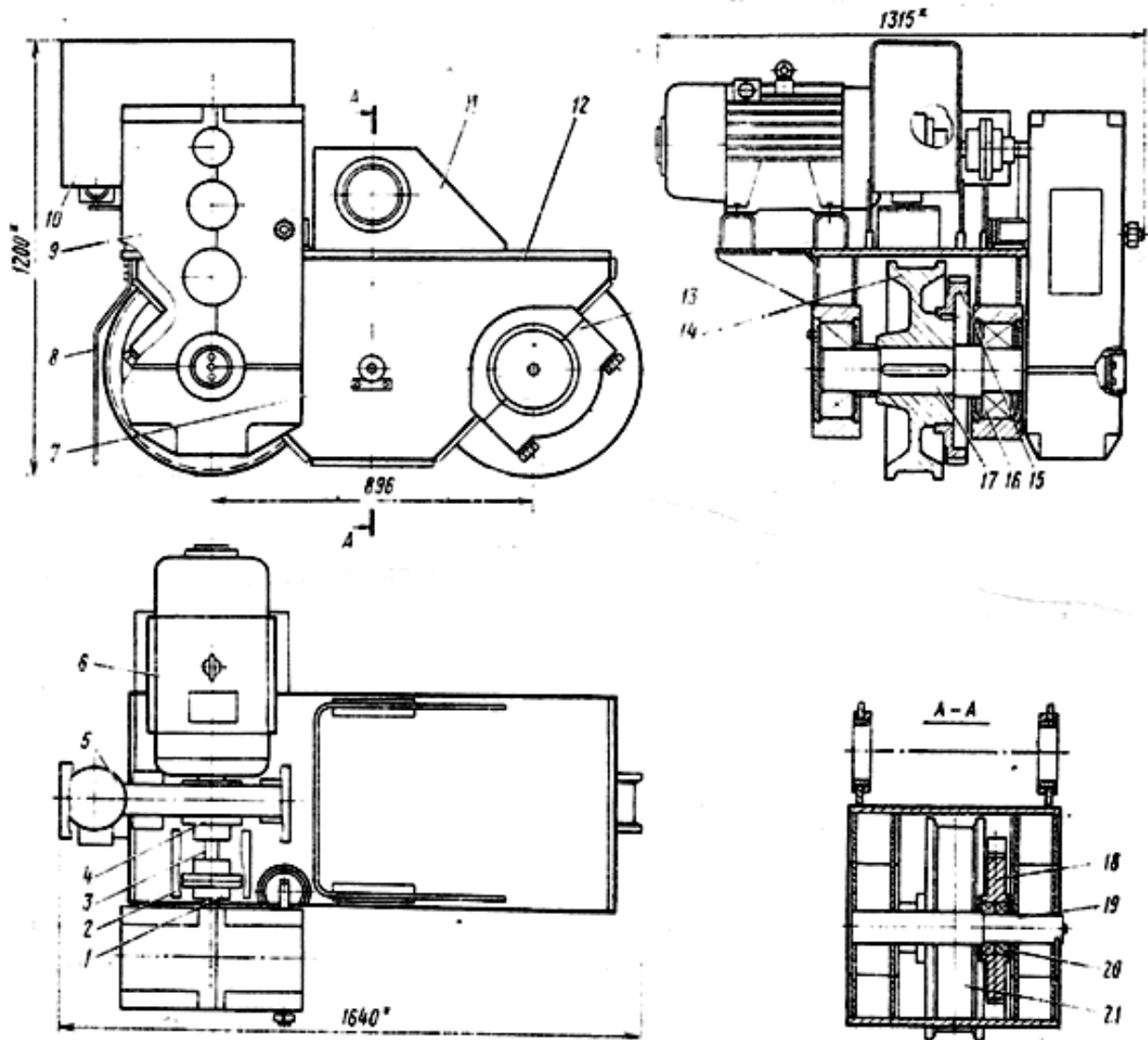


Рисунок 1.3 – Конструкція ходового візка крана

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 висуваються до електроприводів і системі електропостачання

2.1.1 Вимоги, які висуваються до електродвигунів підйомних установок.

Залежно від характеру окремих операцій підйомних пристроїв до приводних двигунів висуваються наступні основні вимоги:

- 1) забезпечення можливості пуску в хід механізму, реверсування напрямку переміщення вантажів і останов механізмів належною точністю;
- 2) в окремих випадках двигун повинен регулюватися в певному діапазоні швидкості відповідно до вимог технологічних процесів;
- 3) створюваний момент двигуна повинен бути такий, щоб була повна можливість забезпечення роботи механізму із заданою інтенсивністю;
- 4) при заданих частоті і числі включень в годину двигуна не повинно бути перегріву обмоток, через якого може бути тривалий останов підйомного механізму;
- 5) при особливих умовах роботи (підвищена температура, велика вологість, наявність газів і парів хімічних речовин, запиленість навколишнього середовища, наявність вибухонебезпечної суміші і т. п.) двигун повинен мати

відповідну конструкцію, а його обмотки – термостійкою і просиростною ізоляцією;

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 здатностях;

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

З перерахованих основних вимог, що висуваються до приводних двигунів, видно, якою важливою 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 висуваються 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. Враховуючи, що потужності двигунів кранових установок досить великі, управління ними за допомогою ручного дії вкрай важко. Тільки перехід на автоматичне керування електродвигунами механізмів кранів може дати належний ефект. Основні вимоги, що висуваються до автоматизації управління кранових механізмів, можуть бути наступними:

11) система автоматичного управління повинна мати просту структурну схему;

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

13) 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;

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

15) в схемі необхідно передбачати неможливість пускають 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;

16) 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;

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

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

19) при переміщенні вантажів на всіх напрямках в схемі автоматичного управління необхідно передбачити обмежувачі ходу, що відключають

харчування двигунів, коли пересування вантажу небезпечно; при роботі декількох кранів в одному прольоті цеху слід передбачати між ними блокування, що виключають можливість зіткнення кранів;

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

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

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

2.2 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна

У завдання вибору двигуна кранового механізму входять попередній вибір двигуна, розрахунок його на забезпечення теплового режиму, а також перевірка на забезпечення заданих прискорень (забезпечення пускового режиму і запасу зчеплення для механізмів пересування).

Найбільшу складність представляє розрахунок теплового режиму двигуна. Загальноприйняті методи теплового розрахунку по еквівалентним параметрам навантаження (струму, моменту, потужності) або середнім втратам дають достовірні результати тільки тоді, коли досить точно відома навантажувальна діаграма роботи електродвигуна. Для кранових електроприводів в більшості випадків характерною 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:

$$P_c = \frac{(G + Q) \cdot v_k}{\eta_{\text{мех}}} \cdot \left(\frac{\varphi_n \cdot d_{cm} + 2 \cdot \mu \cdot K_{p\bar{b}} + \beta}{D_k} \right) \cdot g = \frac{(150000 + 15000) \cdot 0,43}{0,85} \times$$

$$\times \left(\frac{0,015 \cdot 0,1375 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,55} \cdot 1,35 + 0,05 \right) \cdot 9,81 = 47098 \text{ (Вт)} = 47,1 \text{ (кВт)} \quad (2.1)$$

де Q - маса вантажу, що піднімається (вантажопідйомність), $Q = 15000$ кг;

G - сумарна маса крана, $G = 150000$ кг;

v_k - необхідна швидкість пересування крана: $v_k = 0,43$ 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_{cm} - діаметр маточини ходового колеса,

$$d_{cm} = 0,25 \cdot D_k = 0,25 \cdot 0,55 = 0,1375 \text{ м};$$

μ - коефіцієнт тертя кочення, $\mu = 0,5 \cdot 10^{-3}$;

$K_{p\bar{b}}$ - коефіцієнт форми ходового колеса, що враховує тертя реборд ходового колеса, $K_{p\bar{b}} = 1,3 \div 1,4$;

β - ухил шляху крана, $\beta = 0,05$;

g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с².

Статична потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{c1} = \frac{P_c}{n} = \frac{47,1}{4} = 11,8 \text{ (кВт)} \quad (2.2)$$

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

Розрахункова потужність приводу переміщення:

$$\begin{aligned}
 P_p &= \frac{1}{k_n \cdot \gamma_n} \cdot \left[\frac{(G + Q) \cdot v_k \cdot \alpha' \cdot a}{\eta_{мех}} + P_c \right] = \\
 &= \frac{1}{0,9 \cdot 2} \cdot \left[\frac{(150000 + 15000) \cdot 0,43 \cdot 2 \cdot 0,25}{0,85} + 47098 \right] = \\
 &= 49352 (Вт) = 49,4 (кВт)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

де k_n – коефіцієнт використання двигуна по пусковому моменту, згідно [1, табл. 6.2] $k_n = 0,9$;

γ_n – кратність відносини 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 двіжущіхся частей, попередньо приймаємо:

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

a - прискорення крана при пуску, приймаємо $a = 0,25 \text{ м/с}^2$.

Розрахункова потужність припадає на один приводний двигун:

$$P_{p1} = \frac{P_p}{n} = \frac{49,4}{4} = 12,35 (кВт) \tag{2.4}$$

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:

$$P_{ном.м1} = \frac{P_{p1}}{k_p} = \frac{12,35}{0,75} = 16,47 (кВт) \tag{2.5}$$

Попередньо вибираємо двигун постійного струму краново-металургійної серії Д806 з паспортними даними наведеними в таблиці 2.1. Дані взяті з [1].

Номінальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 710}{30} = 74,3 \text{ с}^{-1}. \quad (2.6)$$

Таблиця 2.1 – Паспортні дані двигуна Д806

| | |
|--|-------|
| 1. Номінальна потужність $P_H, \text{кВт}$ при ПВ, 40% | 17 |
| 2. Номінальна потужність $P_H, \text{кВт}$ при ПВ, 25% | 20 |
| 3. Напруга живлення якоря $U_H, \text{В}$ | 220 |
| 4. Струм якоря номінальний $I_H, \text{А}$ | 84 |
| 5. Номінальна частота обертання $n_H, \text{об / мин}$ | 710 |
| 6. Момент інерції $J_{ДВ}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ | 1 |
| 7. Опір якоря і додаткових полюсів $r_{Я}, \text{Ом}$ | 0,047 |

Загальний радіус приведення механізму переміщення складе:

$$R = \frac{V_{\kappa}}{\omega_H} = \frac{0,43}{74,3} = 0,0058 \text{ м} \quad (2.7)$$

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

$$J'_{\text{пост1}} = \frac{(G + Q)}{n} \cdot R^2 = \frac{(150000 + 15000)}{4} \cdot 0,0058^2 = 1,39 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (2.8)$$

Визначаємо сумарний момент інерції в розрахунку на один двигун:

$$J_{\Sigma 1} = 1,2 \cdot J_{ДВ} + J'_{\text{пост1}} = 1,2 \cdot 1 + 1,39 = 2,59 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.9)$$

Еквівалентний ККД визначається за формулою:

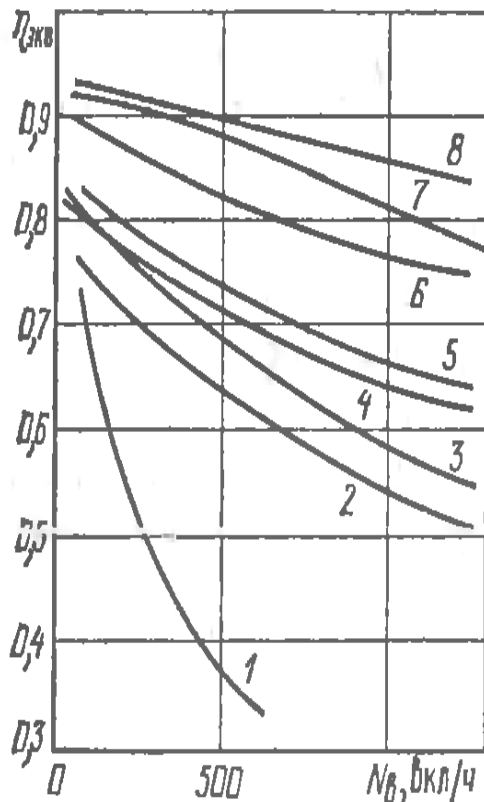
$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}}}{1 + \frac{\eta_{\text{ЭКВ.БАЗ}} - \eta_{\text{ЭКВ.Н}}}{\eta_{\text{ЭКВ.Н}}} \cdot \frac{J_{\Sigma 1}}{1,2 \cdot J_{\text{ДВ}}} \cdot \left(\frac{n_{\text{МАХ}}}{1000} \right)^2}, \quad (2.10)$$

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

$n_{\text{МАХ}} = 1,05 \cdot n_H = 1,05 \cdot 710 = 746 \text{ об / мин}$ - 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 $\eta_{ЭКВ.N} = f(N_B)$

В результаті отримаємо:

$$\eta_{ЭКВ} = \frac{0,94}{1 + \frac{0,94 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{2,59}{1,2 \cdot 1} \cdot \left(\frac{746}{1000}\right)^2} = 0,916. \quad (2.11)$$

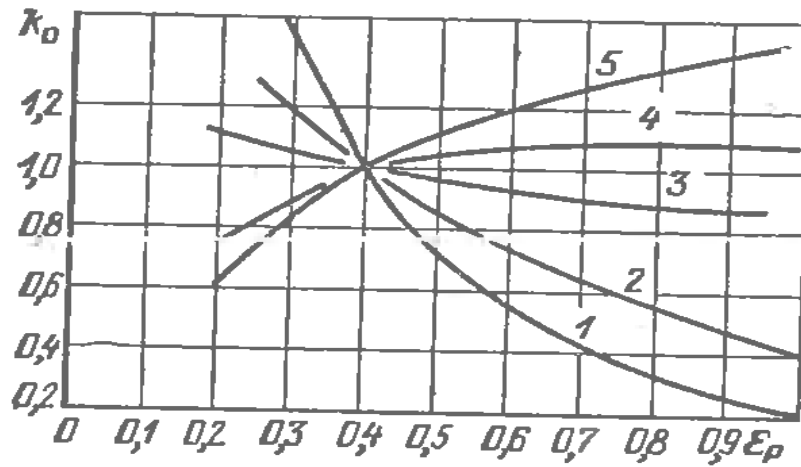
Перевіряємо двигун по тепловому режиму:

$$P_{НОМ.Т} = \frac{K_3 \cdot K_{ЭКВ} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_H}}}{K_O \cdot K_P} \cdot \frac{\eta_{ЭКВ.БАЗ}}{\eta_{ЭКВ.БАЗ} - K_D \cdot (\eta_{ЭКВ.БАЗ} - \eta_{ЭКВ})} \cdot P_{P1} =$$

$$= \frac{1 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{0,4}}}{1 \cdot 1} \cdot \frac{0,94}{0,94 - 1,25 \cdot (0,94 - 0,916)} \cdot 12,35 = 10,2 \text{ кВт} \quad (2.12)$$

тут коефіцієнти $K_3 = 1$, $K_{ЭКВ} = 0,8$, $\varepsilon_P = 0,4$ 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 — невентилюємиє асинхронні; 2 — постійного тока; 3 и 4 — вентилюємиє відповідно тихходніє и быстроходніє с фазным ротором; 5 — вентилюємиє быстроходніє короткозамкнутые

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

Оскільки $P_{НОМ.Т} < P_H$, то двигун Д806 підходить по тепловому режиму.

Перевіряємо двигун за умовами зчеплення. Максимально допустимий прискорення визначаємо за формулою з [1], з урахуванням роботи механізму на відкритому повітрі (мокрі рейки):

$$a_{\max} = 0.85 \cdot \beta - 0.2 = 0.85 \cdot 1 - 0.2 = 0.65 \quad (\text{м} / \text{с}^2), \quad (2.13)$$

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

Знаходимо реальне відношення моментів інерції механізму:

$$\alpha'_P = \frac{J_{\Sigma 1}}{J'_{ном1}} = \frac{2,59}{1,39} = 1,86. \quad (2.14)$$

Визначаємо прискорення, яке забезпечується двигуном:

$$\begin{aligned}
 a_p &= \frac{k_n \cdot \gamma_n \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot P_n - P_{c1}}{0.25 \cdot (G + Q) \cdot v_n \cdot \alpha'_p} = \\
 &= \frac{0.9 \cdot 2 \cdot 0.85 \cdot 17 \cdot 10^3 - 11.8 \cdot 10^3}{0.25 \cdot (150000 + 15000) \cdot 0.43 \cdot 1.86} = 0,43 \text{ (м / с}^2\text{)}.
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

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

Остаточно приймаємо двигун Д806 як приводного для механізму пересування крана ККД-15.

Статичний момент опору (повний на два двигуна) визначимо, виходячи зі статичної потужності

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_n} = \frac{47,1 \cdot 10^3}{74,3} = 634 \text{ (Нм)}.$$

3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

3.1 Вибір комплектного електроприводу

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

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

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

Недоліки системи ТП-Д:

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

Переваги системи ТП-Д:

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

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

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

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

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

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

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

В розроблюваному електроприводі застосуємо перетворювач з роздільним управлінням 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 розроблюваному ТП застосуємо синусоїдальну опорну напругу.

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, харчування тиристорних перетворювачів здійснюємо до мережі 380 В через струмообмежуючі реактори.

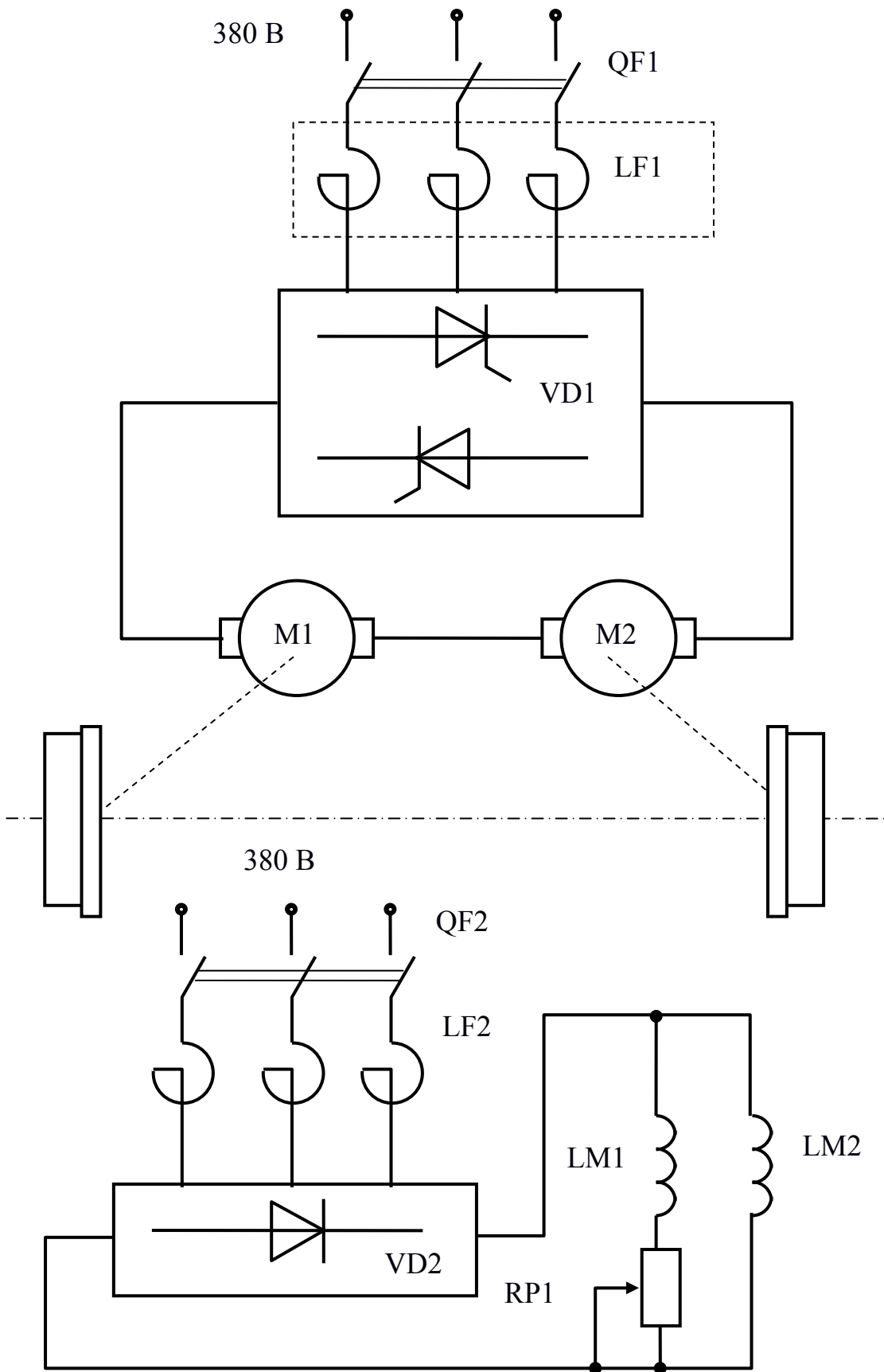


Рисунок 3.1 – Схема вмикання електропривода одної осі

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 X / X X X-X X X-X-X X X X X-X УХЛ4:

КТЕ – комплектний тиристорний електропривод;

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

X – номінальна напруга двигуна, В;

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

X – виконання КТЕ за кількістю питомих двигунів: 1 – одnodигунний, 2 – з двома двигунами, 0 – збудник **;

X – режим роботи: 1 – нереверсивний, 2 – реверсивний;

X – 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);

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

X – наявність вбудованого лінійного контактора: 0 – відсутній, К – наявний;

X – наявність вбудованого пристрою динамічного гальмування: 0 – відсутній, Д – наявний;

X – наявність вбудованого пристрою живлення електромагніту механічного гальма: 0 – відсутній, М – наявний;

X – наявність пристрою живлення обмотки збудження тахогенератора: 0 – відсутній, Т – наявний;

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.

** В КТЕ-збудниках 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;

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

Враховуючи параметри обраного двигуна, вибираємо **КТЕ 100. 440. М-2 2 Р-4- УХЛ4**, тобто перетворювач на струм 100 А і випрямлену напругу 440 В модернізований, дводвигуновий, реверсивний з живленням від мережі 380 В через струмообмежувальним реактор. Система регулювання ЕРС або швидкості.

На рисунку 3.2 представлена функціональна схема КТЕ

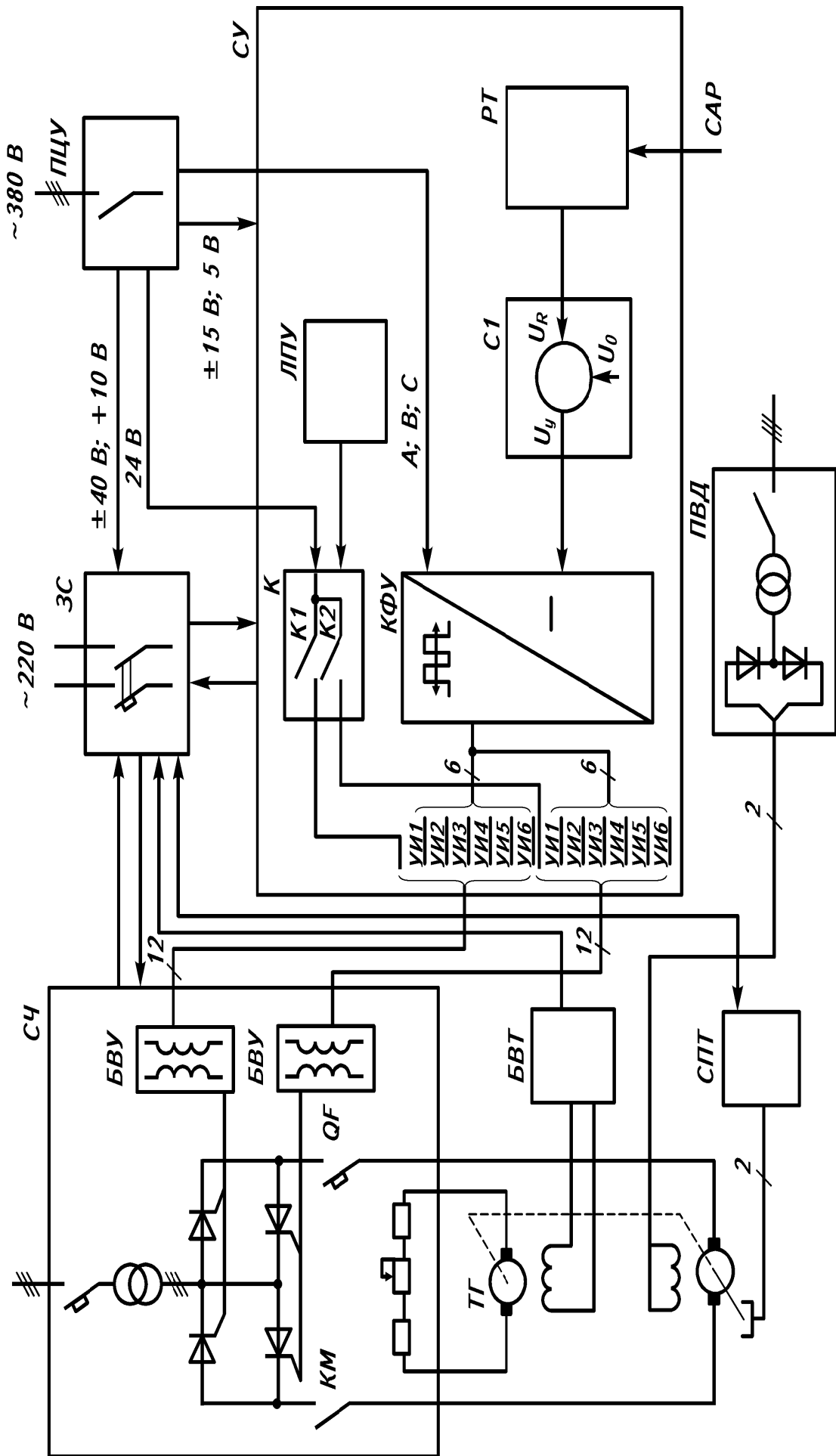


Рисунок 3.2 – Функціональна схема комплектного тиристорного електроприводу

На рисунку 3.2 прийняті наступні позначення:

- ЛПУ – логічний перемикаючий пристрій;
- К – ятка ключів перемикаючих імпульсів;
- ПВД – живлення збудження двигуна;
- СПТ – система живлення електромагнітного гальма;
- ПЦУ – живлення ланцюгів управління;
- УИ1-УИ6 – 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 – задатчик інтенсивності швидкості;
- $U_{зи}$ – напруга задатчика інтенсивності;
- Σ – сумматор;
- d_n – прискорення;
- Σn_{\max} – сумарний сигнал, який відповідає максимальному значенню 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;

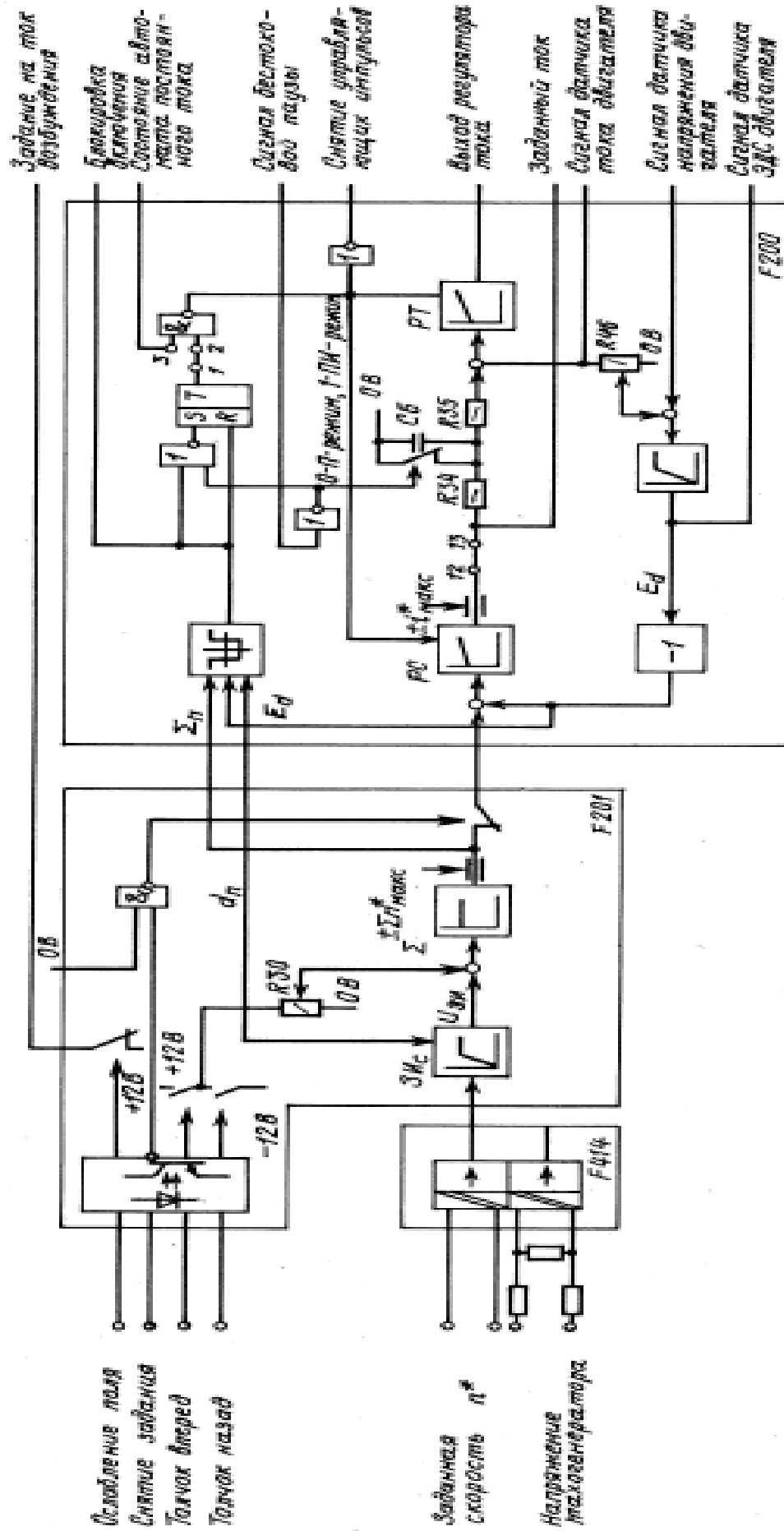


Рисунок 3.3 – Функціональна схема САР електропривода серії КТЕ

РТ – регулятор струму;

F200 – ятка регулювання;

F201 – ятка завдання швидкості;

F414 – ятка гальванічної розв'язки.

Структура умовного позначення комплектних тиристорних перетворювачів 5-го покоління:

- призначення: А - для якірного ланцюга двигуна постійного струму;
- конструктивне виконання: С - шафове виконання;
- номінальний вихідний струм: 800 А;
- номінальна вихідна напруга: 440 В;
- вид охолодження: Е - природне повітряне;
- спосіб підключення до силової мережі живлення: Т - трансформаторне;
- виконання силової схеми: 2 - 6-пульсна реверсивна схема.

На рис. 3.4 наведена схема підключення перетворювача до двигуна.

Системи керування (СК) - мікропроцесорні, уніфіковані між собою, і з іншими виробами (інтелектуальними пультами керування, компенсаторами реактивної потужності, системами діагностики, пристроями віддаленого вводу-виводу, збудниками синхронних двигунів, незалежними системами збудження і самозбудження турбо- і гідрогенераторів, пускателями).

Загальна площа друкованих плат СК значно зменшена (більш ніж в 3,5 рази) за рахунок використання сучасної елементної бази з високим ступенем інтеграції.

Системи керування і регулювання дозволяють приймати і обробляти сигнали будь-яких датчиків - імпульсних, кодових, сельсинов, датчиків температури й ін., В тому числі датчиків з послідовними каналами зв'язку.

Комплектація СК, в тому числі низьковольтні (реле, клемні присоединітелі й ін.), виконана з елементів провідних світових виробників - Intel, Burr Brown, Motorola, Texas Instruments й ін.

СК має швидкодіючі двопровідні інтерфейси для зв'язку з обладнанням верхнього рівня, в тому числі інших постачальників.

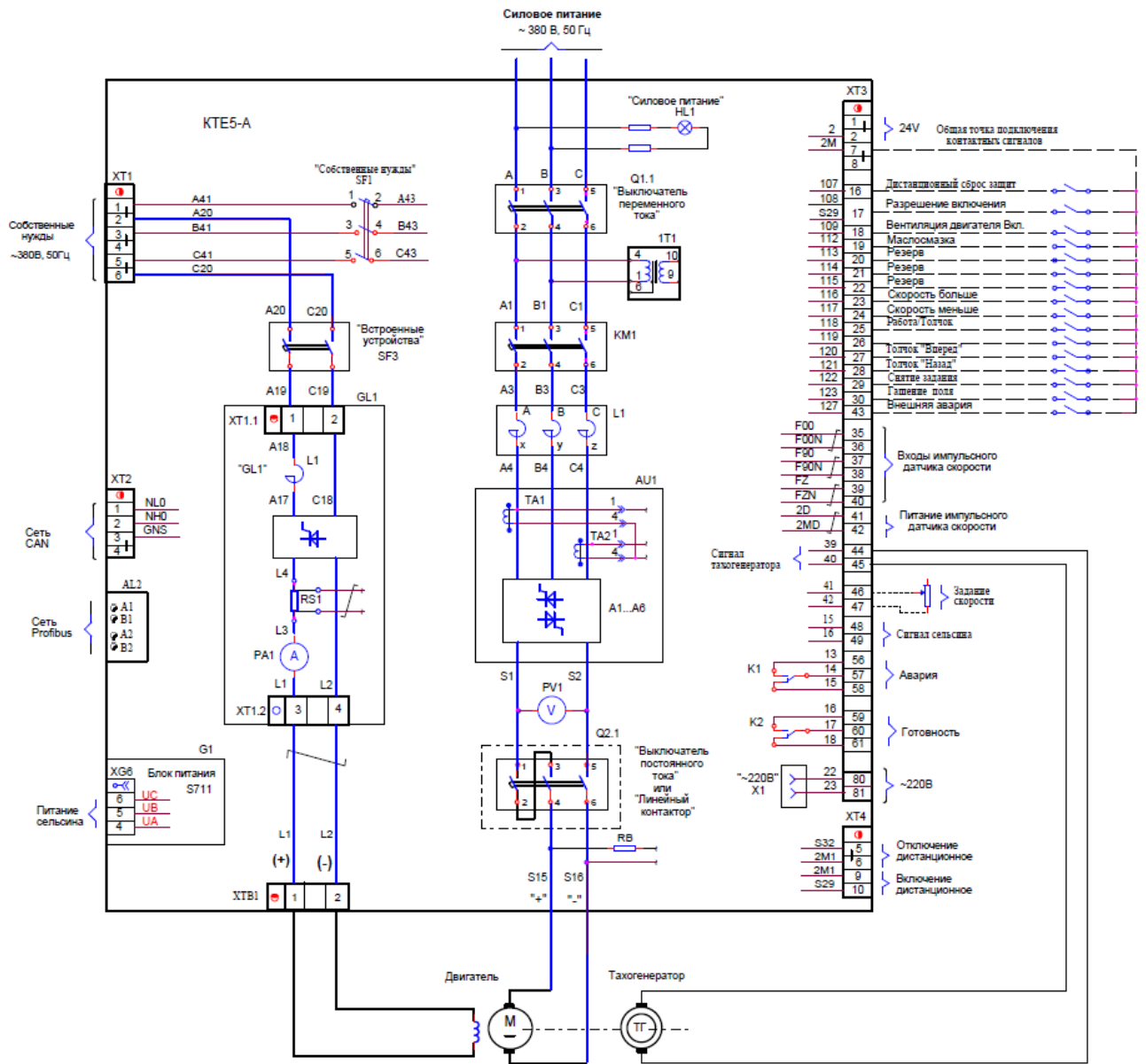


Рисунок 3.4 – Схема підключення комплектного перетворювача до двигуна

Зв'язок з електрообладнанням інших постачальників - датчиками, ПКУ, пультами, системами автоматизації - виконується радіально, прийомом і передачею стандартних, нормалізованих дискретних і аналогових сигналів і по швидкодіючій інформаційній мережі послідовної зв'язку.

У комплексних поставках, де постачальник є виробником КТЕ, пультів і засобів автоматизації використовується мережа CAN, контролер якої вбудований в плату процесора всіх систем керування. Передача сигналів по мережі відповідає стандарту ISO 11898.

За вимогами замовника КТЕ можуть бути адаптовані для зв'язку з обладнанням інших постачальників по мережах Profibus, Modbus й ін.

Для включення в інформаційну мережу сигналів реле, технологічних датчиків встановлюваних на механізмах і т.п., в окремих конструктивах поставляються пристрої віддаленого вводу/виводу (ПВВ). ПВВ виконані на уніфікованій з КТЕ елементній базі і дозволяють з найменшими витратами кабельної продукції підключати віддалені від КТЕ джерела сигналів.

Базові системи керування мають вбудовані апаратні засоби для прийому сигналів датчиків з'єднаних з валом двигуна - тахогенераторів, імпульсних датчиків з різною кількістю імпульсів на оберт, сельсинов. Сигнали імпульсних датчиків використовуються для регуляторів швидкості та положення. Для прийому сигналів тахогенераторів КТЕ мають подільники напруги, а для імпульсних датчиків - вбудоване джерело живлення.

Склад КТЕ наведено на рисунку 3.5. Детальна система курування КТЕ наведена у додатку А.

В основі виробу - шестипульсний тиристорний керований перетворювач з системою керування, що дозволяє регулювати напругу постійного струму в широкому діапазоні.

Крім того, виріб має систему допоміжних пристроїв (пристрій живлення обмотки збудження, пристрій керування електромагнітним гальмом, пристрій живлення обмотки збудження тахогенератора), систему автоматичного регулювання струму, напруги, ЕРС, частоти обертання, натягу, положення, системи захисту і сигналізації перетворювача і електроприводу.

Комплектний пристрій, повністю готовий до підключення, що складається з одного або декількох шаф, в яких скомпоновано необхідне обладнання. Шафи, що входять до складу електроприводу, являють собою металеву конструкцію каркасного типу.

Q1 - трьохполюсний автоматичний вимикач;
 Q2 - двополюсний автоматичний вимикач
 КМ - лінійний контактор
 В - пристрій живлення обмотки збудження
 М - пристрій живлення електромагнітного гальма;
 Д - динамічний гальмо;
 Т1 - трансформатор (за вказівкою в замовленні - поставка високовольтного трансформатора і шафи високовольтного введення);
 Т - блок живлення тахогенератора;
 ZZ - сельсин датчик кута повороту

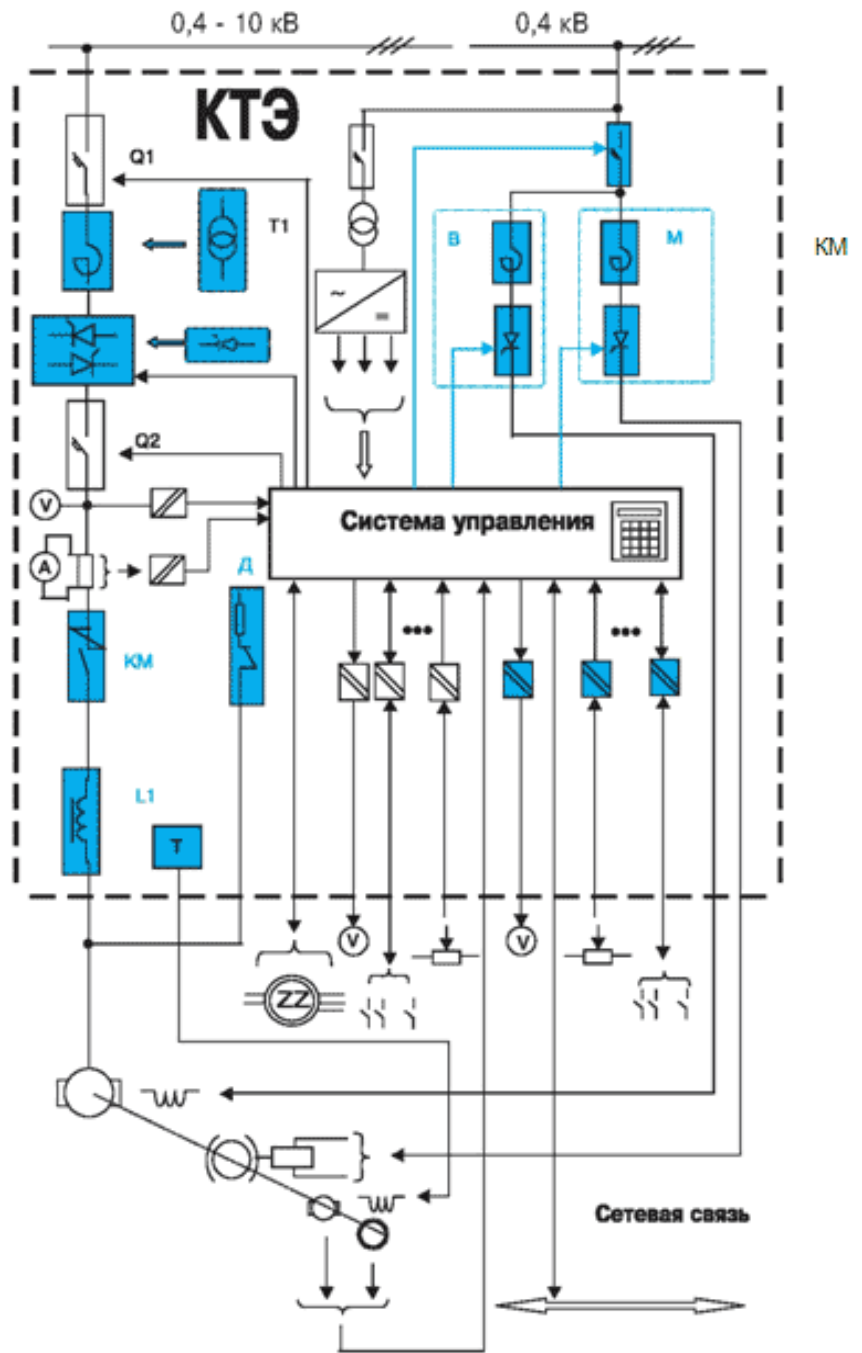


Рисунок 3.5 - Склад перетворювача шафового виконання

3.2 Вибір струмообмежувального реактора

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

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

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

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

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 згладжувального реактора якщо коефіцієнт пульсацій струму $k_{I(\partial on)}$ не перевищує 15%. При $k_{I(\partial on)} = 15\%$ номінальна потужність знижується не більше ніж на 3%.

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

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

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

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

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

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

$$L_{\partial(\min)} = \frac{0.13}{0.15} \cdot \frac{513}{6 \cdot 314 \cdot 84} = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (3.3)$$

Індуктивність якоря двигуна визначимо використовуючи формулу Уманського-Лінвілл:

$$L_{\text{яд}} = \frac{0,25 \cdot U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}} \cdot p} = \frac{0,25 \cdot 220}{84 \cdot 74,3 \cdot 4} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.4)$$

Розрахункова індуктивність згладжувального реактора (два двигуна послідовно):

$$\begin{aligned} L_{\text{ср}} &= L_{\text{э}(\text{min})} - 2 \cdot L_{\text{тор}} - 2 \cdot L_{\text{яд}} = \\ &= 2,8 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,145 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = -1,89 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Так як розрахункова індуктивність виявилася негативною, згладжує реактор не потрібно. Власної індуктивності якорного 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:

$$R_{\text{я}} = k_t \cdot r_{\text{я}} = 1,38 \cdot 0,047 = 0,065 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

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

Еквівалентний опір якорного ланцюга:

$$R_{\text{э}} = 2 \cdot R_{\text{я}} + 2 \cdot r_{\text{тор}} + \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{н}}} = 2 \cdot 0,065 + 2 \cdot 0,029 + \frac{2}{84} = 0,211 \text{ (Ом)} \quad (3.7)$$

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

Еквівалентна індуктивність якорного ланцюга:

$$L_{\text{э}} = 2 \cdot L_{\text{яд}} + 2 \cdot L_{\text{тор}} = (2 \cdot 2,2 + 2 \cdot 0,145) \cdot 10^{-3} = 4,69 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)} \quad (3.8)$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{4,69 \cdot 10^{-3}}{0,211} = 0,022 (c) \quad (3.9)$$

Потокозчеплення машини:

$$C\Phi_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{я}}{\omega_H} = \frac{220 - 84 \cdot 0,065}{74,3} = 2,88 (B \cdot c) \quad (3.10)$$

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

$$T_M = \frac{2 \cdot J_{\Sigma 1} \cdot R_3}{(2 \cdot C\Phi_H)^2} = \frac{2 \cdot 2,59 \cdot 0,211}{(2 \cdot 2,88)^2} = 0,033 (c) \quad (3.11)$$

Статичний коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача:

$$k_{\text{тп}} = \frac{E_{d0}}{U_y} = \frac{513}{10} = 51,3. \quad (3.12)$$

де $U_y = 10 B$ - максимальна напруга управління.

Приймаємо малу некомпенсовану сталу часу $T_\mu = 0,005 c$.

4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ КРАНА

4.1 Математичний опис об'єкта керування

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

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

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

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

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

Таким чином, два послідовно з'єднаних електродвигуна представимо у вигляді трьох типових ланок (рис. 4.1): аперіодичної ланки першого порядку

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

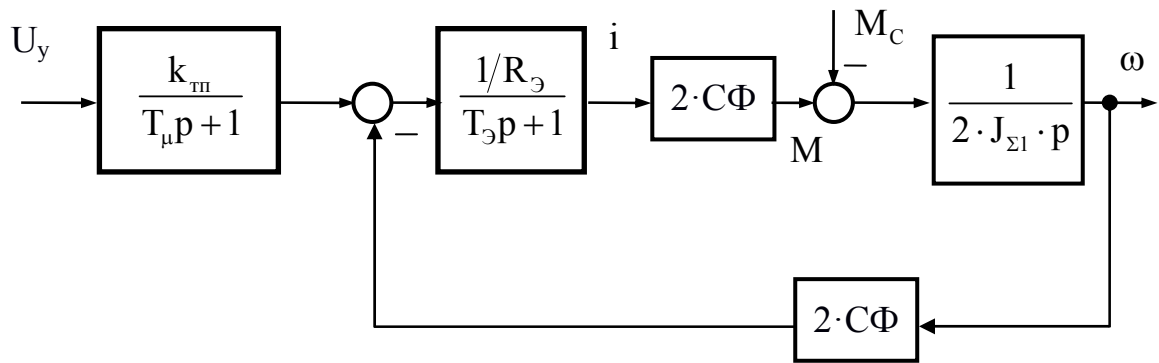


Рисунок 4.1 – Структурна схема силової частини електропривода

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

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

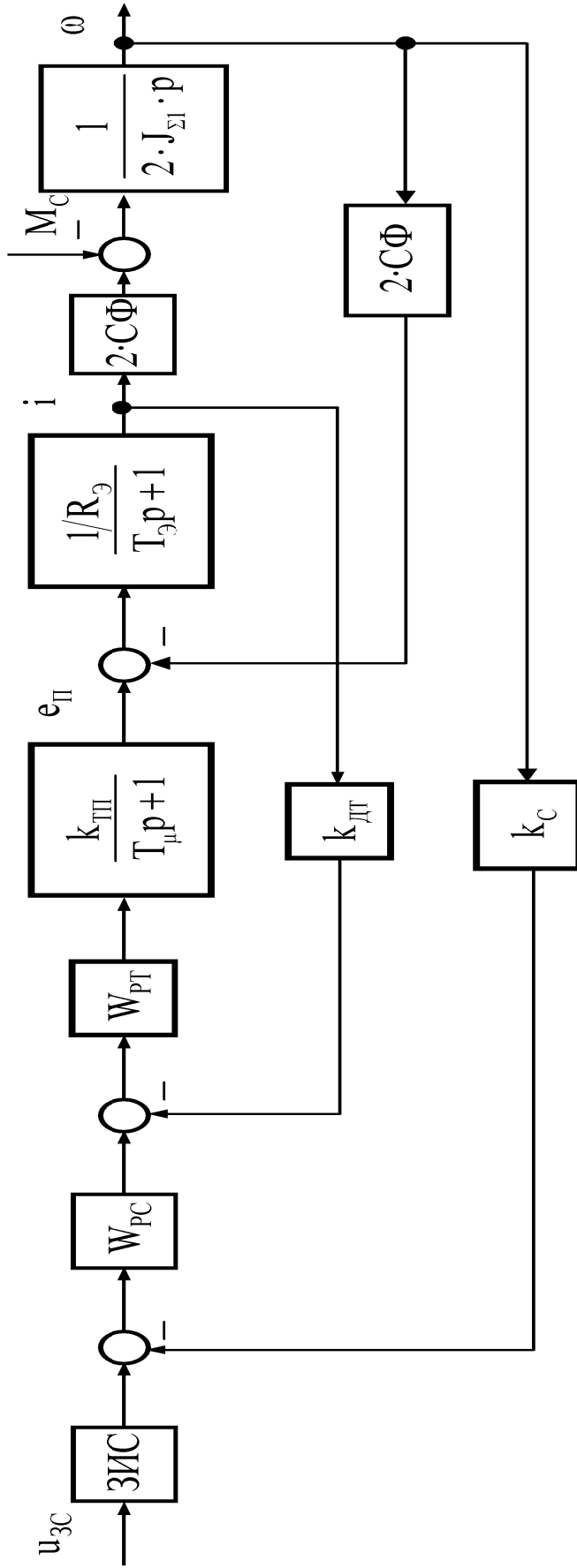


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи підпорядкованого керування електроприводом

4.2 Розрахунок регулятора струму

На рисунку 4.3 представлена структурна схема контуру струму.

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

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

Як видно з формули (4.1) регулятор струму – ПІ регулятор. Статичний коефіцієнт підсилення регулятора струму:

$$K_{PT} = \frac{R_{\Theta} \cdot T_{\Theta}}{K_{ТП} \cdot K_{ОТ} \cdot T_{ОТ}} = \frac{0,23 \cdot 0,022}{51,3 \cdot 0,048 \cdot 0,01} = 0,205, \quad (4.2)$$

де $T_{ОТ} = 2T_{\mu} \cong 0.01$ с ;

$K_{ОТ} = \frac{U_{ЗТМАХ}}{I_{МАХ}} = \frac{10}{210} = 0,048$ В/А - коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку за струмом з урахуванням що:

зв'язку за струмом з урахуванням що:

- максимальний сигнал завдання на струм $U_{ЗТМАХ} = 10$ В ;
- максимально допустимий струм якоря двигуна

$$I_{МАХ} = \lambda_I \cdot I_H = 2.5 \cdot 84 = 210 \text{ А}.$$

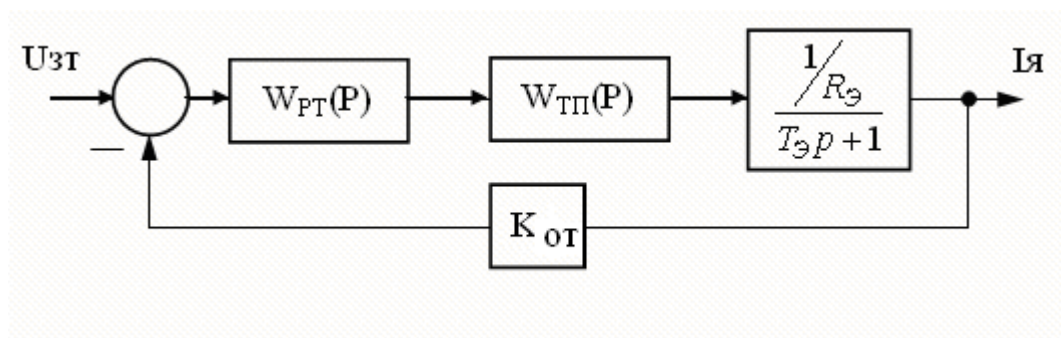


Рисунок 4.3 - Структурна схема контуру струму

На рисунку 4.4 представлена функціональна схема регулятора струму.

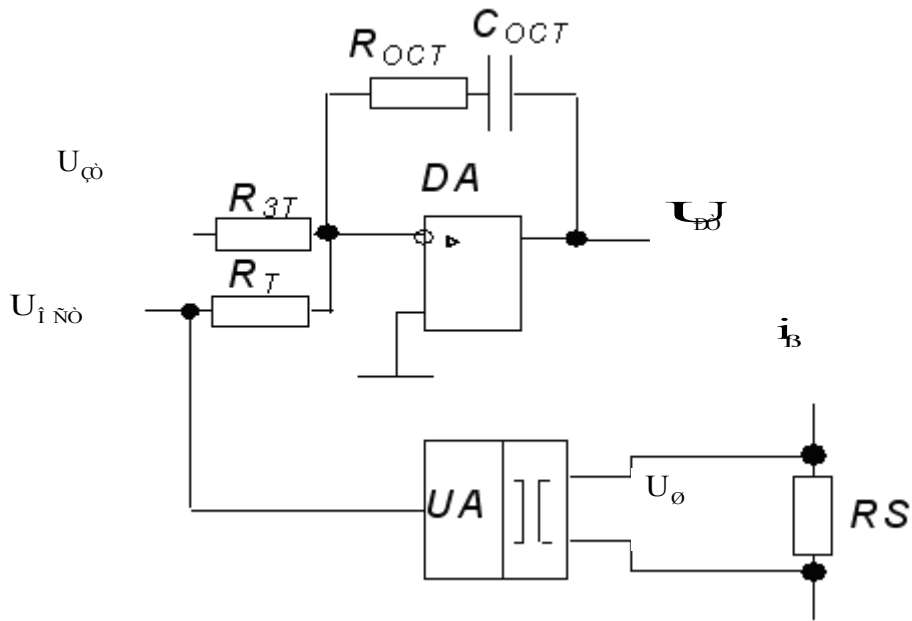


Рисунок 4.4 – Функціональна схема регулятора струму

На рисунку 4.5 представлена структурна схема регулятора струму.

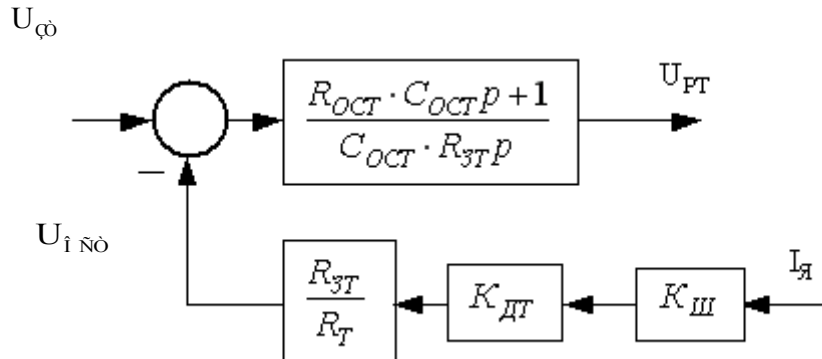


Рисунок 4.5 – Структурна схема регулятора струму

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора струму за наступними співвідношеннями:

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

Шунт RS вибираємо типу 75ШС, який має такі параметри: номінальна вихідна напруга на шунті $U_{\text{нш}}=75$ мВ при струмі $I_{\text{нш}}=250$ А. Отже коефіцієнт передачі шунта:

$$K_{\text{шт}} = \frac{U_{\text{нш}}}{I_{\text{нш}}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{300} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ В/А} \quad (4.4)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$K_{\text{дт}} = \frac{K_{\text{от}}}{K_{\text{шт}}} = \frac{0,048}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 192. \quad (4.5)$$

В якості стандартного датчика струму UA вибираємо датчик струму з системи УБСР-АІ типу ДТ-3АІ. Цей датчик призначений для формування і введення в систему регулювання аналогового сигналу, пропорційного струму в ланцюзі якоря. Датчик підключається до шунт в ланцюзі якоря двигуна і забезпечує гальванічну розв'язку між вхідними та вихідними ланцюгами з різницею потенціалів між ними до 1000 В.

Параметри давача ДТ-3АІ, позначеного на схемі як UA:

- вихідна напруга ± 10 В;
- коефіцієнт підсилення $53 \div 200$;
- похибка $\leq 1\%$;
- смуга пропускання 1.5 кГц;
- напруга живлення постійним струмом 12.6 В.

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

$$R_{\text{ост}} = \frac{T_{\text{э}}}{C_{\text{ост}}} = \frac{0,014}{2 \cdot 10^{-6}} = 7000 \text{ Ом} = 7 \text{ кОм} \quad (4.6)$$

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

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

Вибираємо резистор $R_{\text{ост}}$ марки МЛТ – 0,125, опором 11 кОм.

Вибираємо резистор $R_{\text{зт}}$ марки МЛТ – 0,125, опором 120 кОм.

Вибираємо резистор $R_{\text{т}}$ марки МЛТ – 0,125, опором 180 кОм.

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

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б:

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

4.3 Розрахунок регулятора швидкості

До контуру регулювання швидкості входять: об'єкт управління, що складається з оптимізованого контура 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 стала часу, то $T_{OT} T_\mu p^2 = 2T_\mu^2 p$ можна прирівняти нулю, тоді передавальна функція контуру струму набуде вигляду:

$$W_{KT}(p) = \frac{1/K_{OT}}{T_{OT}p + 1}. \quad (4.10)$$

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

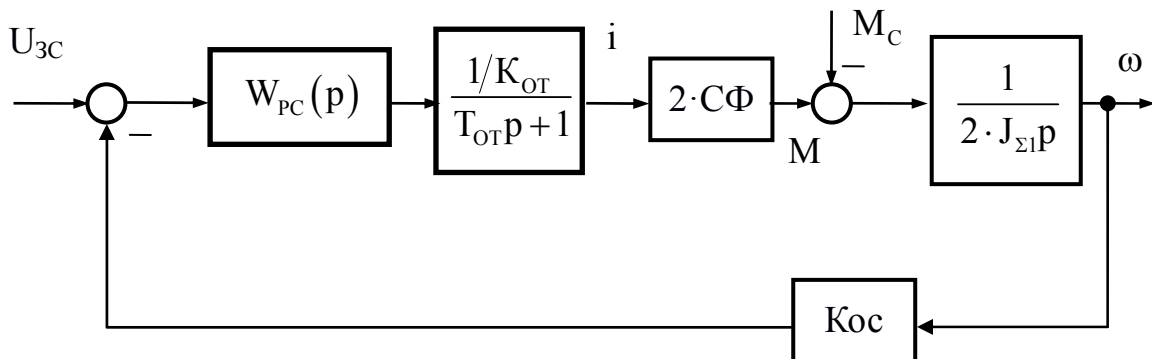


Рисунок 4.6 – Структурна схема контуру швидкості

Залежно від вимог, що висуваються технологією до електроприводу механізму, контур швидкості виконують одноразово інтегруючим (з П-регулятором) або дворазово інтегруючим (ПІ-регулятором).

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

Передавальна функція регулятора швидкості при оптимізації контура 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 підсилення регулятора швидкості:

$$K_{PC} = \frac{K_{OT} \cdot J_{\Sigma 1}}{2T_{OT} \cdot C\Phi_H \cdot K_{OC}} = \frac{0,048 \cdot 2,59}{2 \cdot 0,01 \cdot 2,88 \cdot 0,136} = 15,87$$

де K_{OC} - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$$K_{OC} = \frac{U_{3C\text{MAX}}}{\omega_{\text{MAX}}} = \frac{10}{74,3} = 0,136 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад} - \text{коефіцієнт передачі ланки}$$

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

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

На рисунку 4.7 представлена функціональна схема регулятора швидкості.

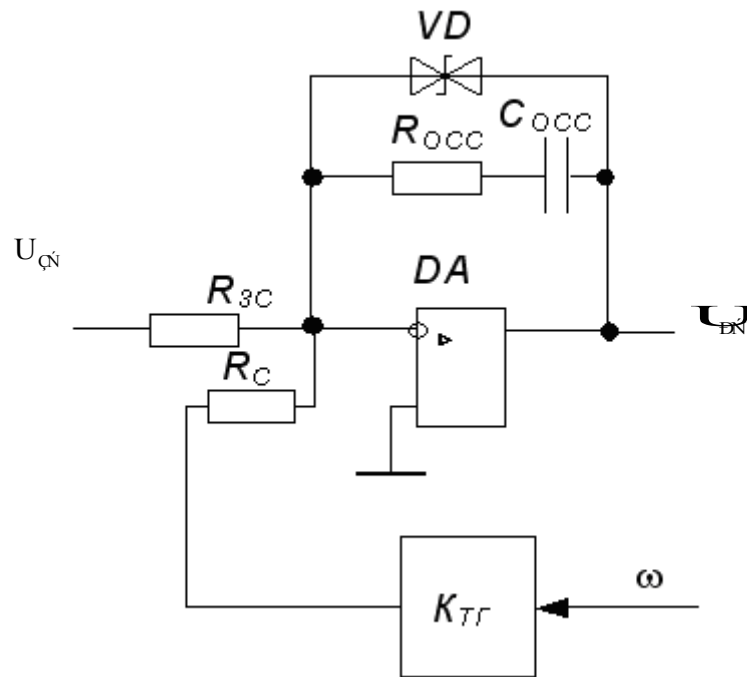


Рисунок 4.7 - Функціональна схема регулятора швидкості

На рисунку 4.8 представлена структурна схема регулятора швидкості.

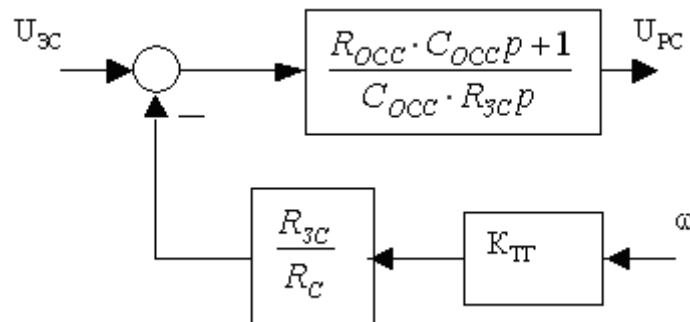


Рисунок 4.8 - Структурна схема регулятора швидкості

В якості датчика швидкості вибираємо тахогенератор типу ТП 214:

$n_H = 1000$ об/хв; $U_H = 100$ В;

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{U_{\text{H.ТГ}}}{\omega_{\text{H.ТГ}}} = \frac{100}{3,14 \cdot 1000 / 30} = 0,96 \text{ В} \cdot \text{с.} \quad (4.12)$$

Розраховуємо елементи функціональної схеми регулятора швидкості по наступних співвідношеннях:

$$\begin{cases} K_{\text{РС}} = \frac{R_{\text{ОСС}}}{R_{\text{ЗС}}}; \\ K_{\text{С}} = K_{\text{ТГ}} \cdot \frac{R_{\text{ЗС}}}{R_{\text{С}}}; \\ U_{\text{ЗС MAX}} = K_{\text{С}} \cdot \omega_{\text{H}}. \end{cases} \quad (4.13)$$

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

Завдання на швидкість подаємо з задатчика інтенсивності швидкості.

Тому задаємося $R_{\text{ЗС}} = 51$ кО. В якості $R_{\text{ЗС}}$ вибираємо резистор типу МЛТ – 0.125 опором 51 кОм.

Розраховуємо $R_{\text{ОСС}}$:

$$R_{\text{ОСС}} = K_{\text{РС}} \cdot R_{\text{ЗС}} = 15,87 \cdot 51 = 809 \text{ кОм} \quad (4.14)$$

вибираємо резистор $R_{\text{ОСС}}$ типу МЛТ-0.125 810 кОм.

Розраховуємо $R_{\text{С}}$:

$$R_{\text{С}} = \frac{K_{\text{ТГ}} \cdot R_{\text{ЗС}}}{K_{\text{ОС}}} = \frac{0,96 \cdot 51 \cdot 10^3}{0,136} = 360 \text{ кОм} \quad (4.15)$$

вибираємо резистор $R_{\text{С}}$ типу МЛТ-0.125 360 кОм.

Вибираємо стабілітрон VD типу КС 210Б: напруга стабілізації - 10 В;

4.4 Розрахунок задатчика інтенсивності швидкості

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

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

Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості наведена на рисунку 4.9.

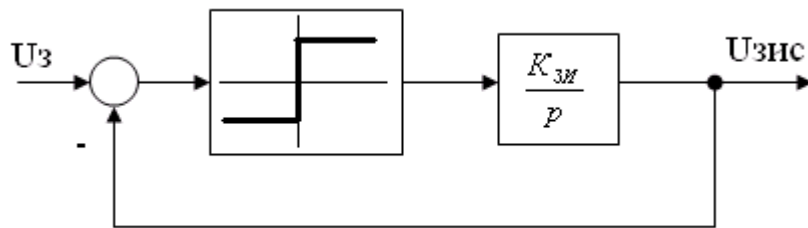


Рисунок 4.9 - Структурна схема задатчика інтенсивності швидкості

Відповідно до розрахунків наведеними в розділі 2 за умовами зчеплення електропривод повинен забезпечувати прискорення $a_p < 0,65 \text{ (м / с}^2\text{)}$. прийmemo $a_p = 0,25 \text{ (м / с}^2\text{)}$. Час розгону при цьому складе:

$$t_p = \frac{V_H}{a_p} = \frac{0,43}{0,25} = 1,72 \text{ с} \quad (4.16)$$

Коефіцієнт передачі ЗІС:

$$K_{И} = \frac{U_{zMAX}}{t_p} = \frac{10}{1,72} = 5,81 \frac{\text{В}}{\text{с}} \quad (4.17)$$

На рисунку 4.10 представлена функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості.

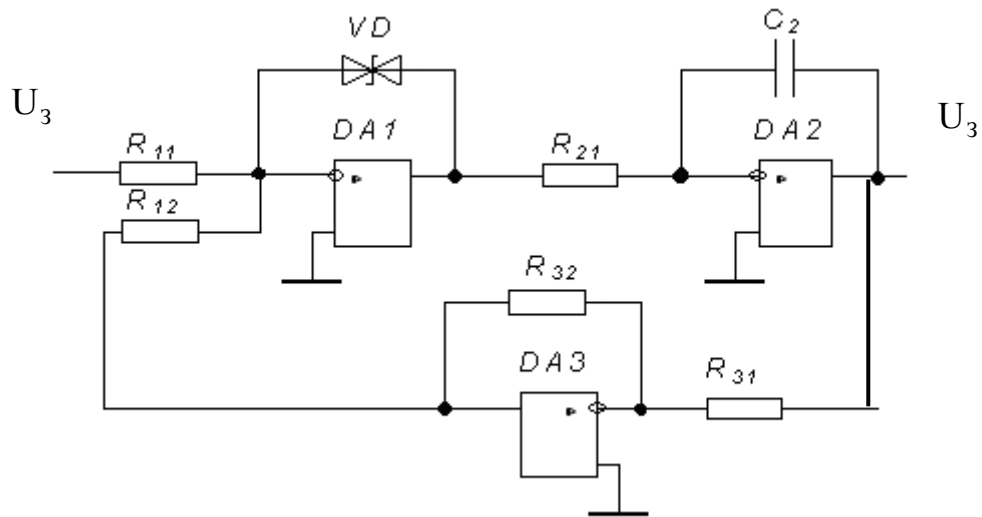


Рисунок 4.10 – Функціональна схема задатчика інтенсивності швидкості

Приймаємо конденсатор C_2 ємністю 2 мкФ.

Приймаємо: $R_{11} = R_{12} = 20$ кОм; $R_{31} = R_{32} = 10$ кОм.

$$R_{21} = \frac{1}{K_{\text{и}} \cdot C_2} = \frac{1}{5,81 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 86 \text{ кОм} \quad (4.19)$$

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 86 кОм.

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

Вибираємо стабілітрон VD типу КС210Б:

- напруга стабілізації - 10 В.

5 ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ У СЕРЕДОВИЩІ 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 на будівництва системи. Досліджуваний електропривод

з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним вимогам, що висувуються до електроприводу при вихідних параметрах ОУ. При варіації (зменшенні і збільшенні) сталої часу T_3 , моменту інерції в широких межах система залишається працездатною. Ряд проведених варіацій призводять до незначної коливальності 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 швидкістю (рис. 5.12 – 5.13). Для виключення подібних аварійних режимів проєктований електропривод повинен бути оснащений системою захистів і сигналізації, яка відключає силовий перетворювач від мережі в цих випадках. У крайніх положеннях переміщення крана має контролюватися кінцевими вимикачами.

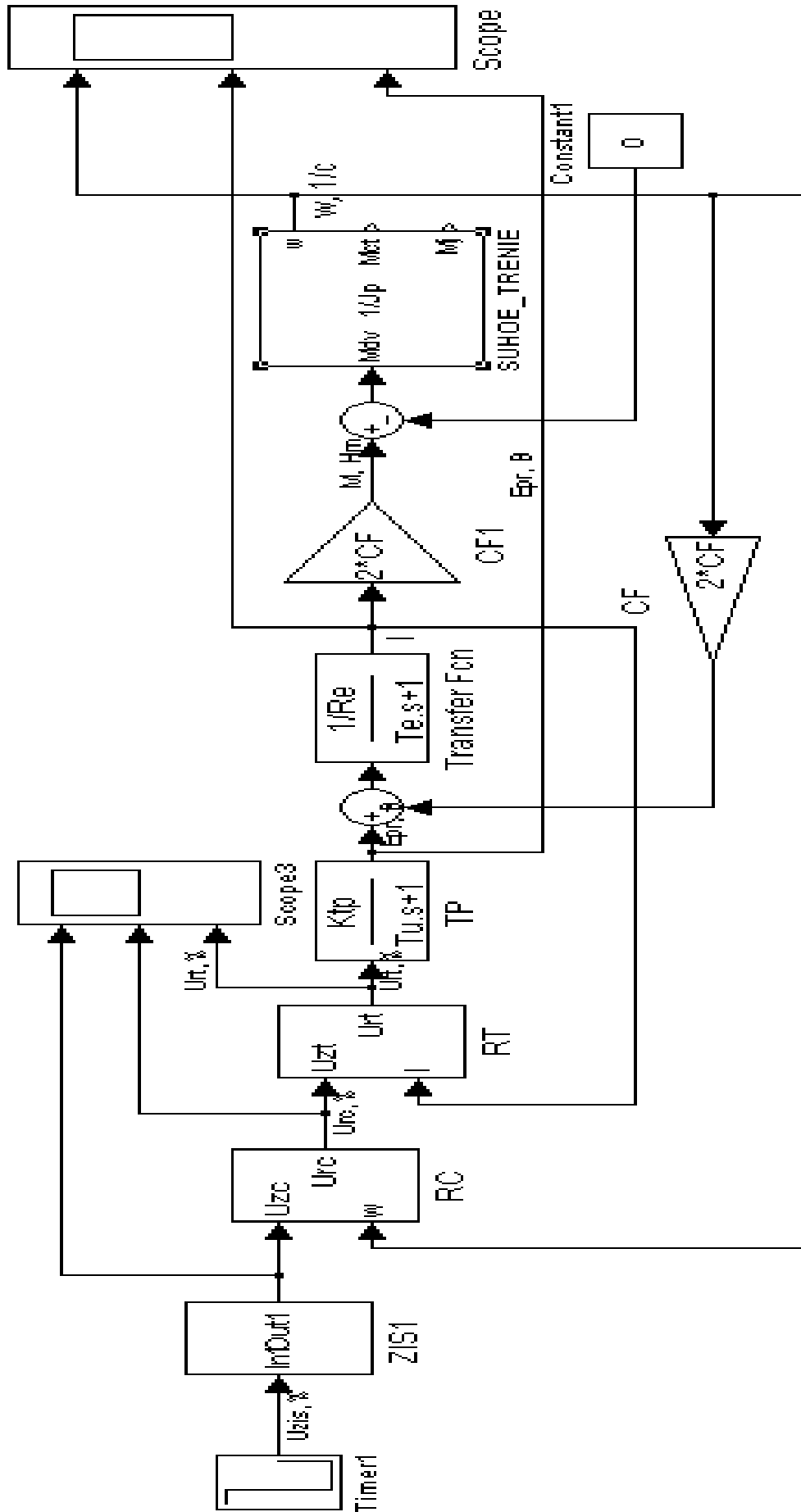


Рисунок 5.1 - Математична модель системи електропривода

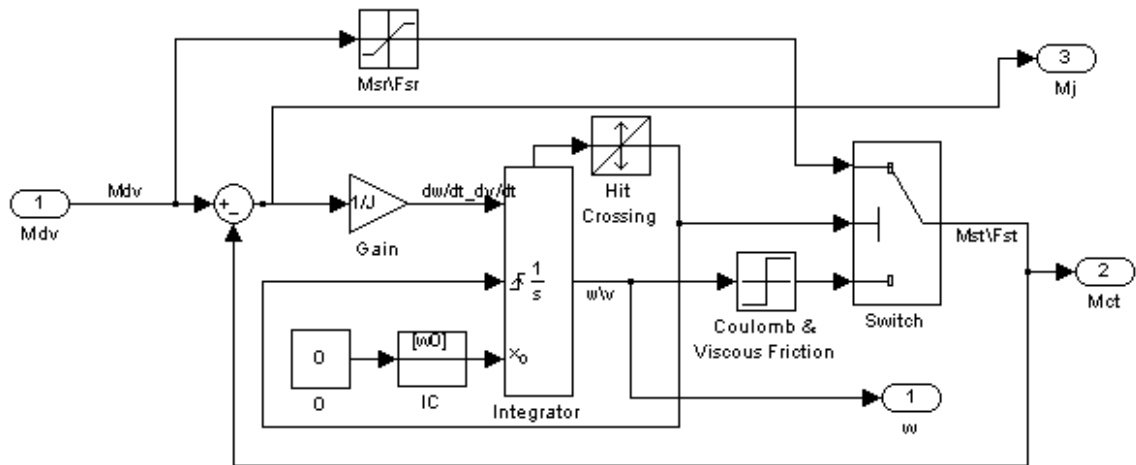


Рисунок 5.2 - Модель механічної частини приводу для уточненого моделювання сил сухого тертя

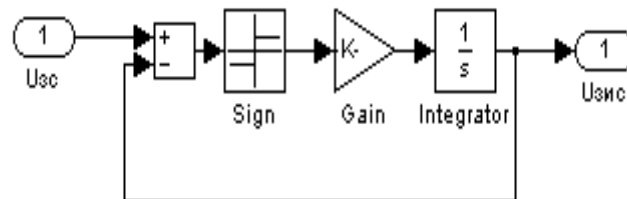


Рисунок 5.3 - Задатчик інтенсивності швидкості

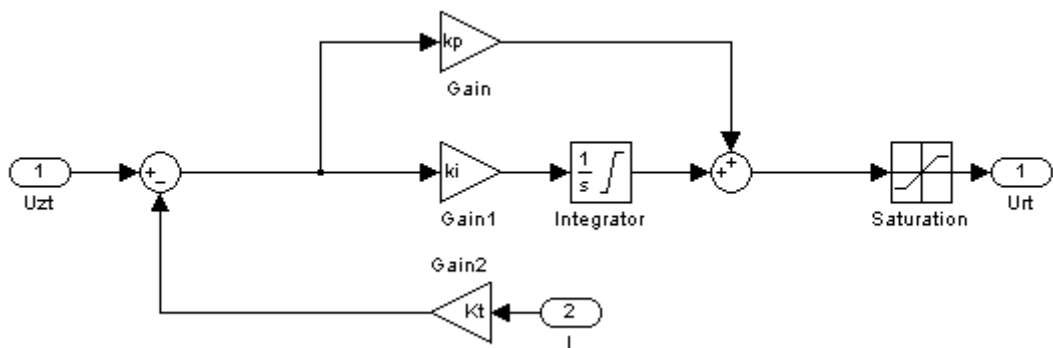


Рисунок 5.4 - Регулятор струму

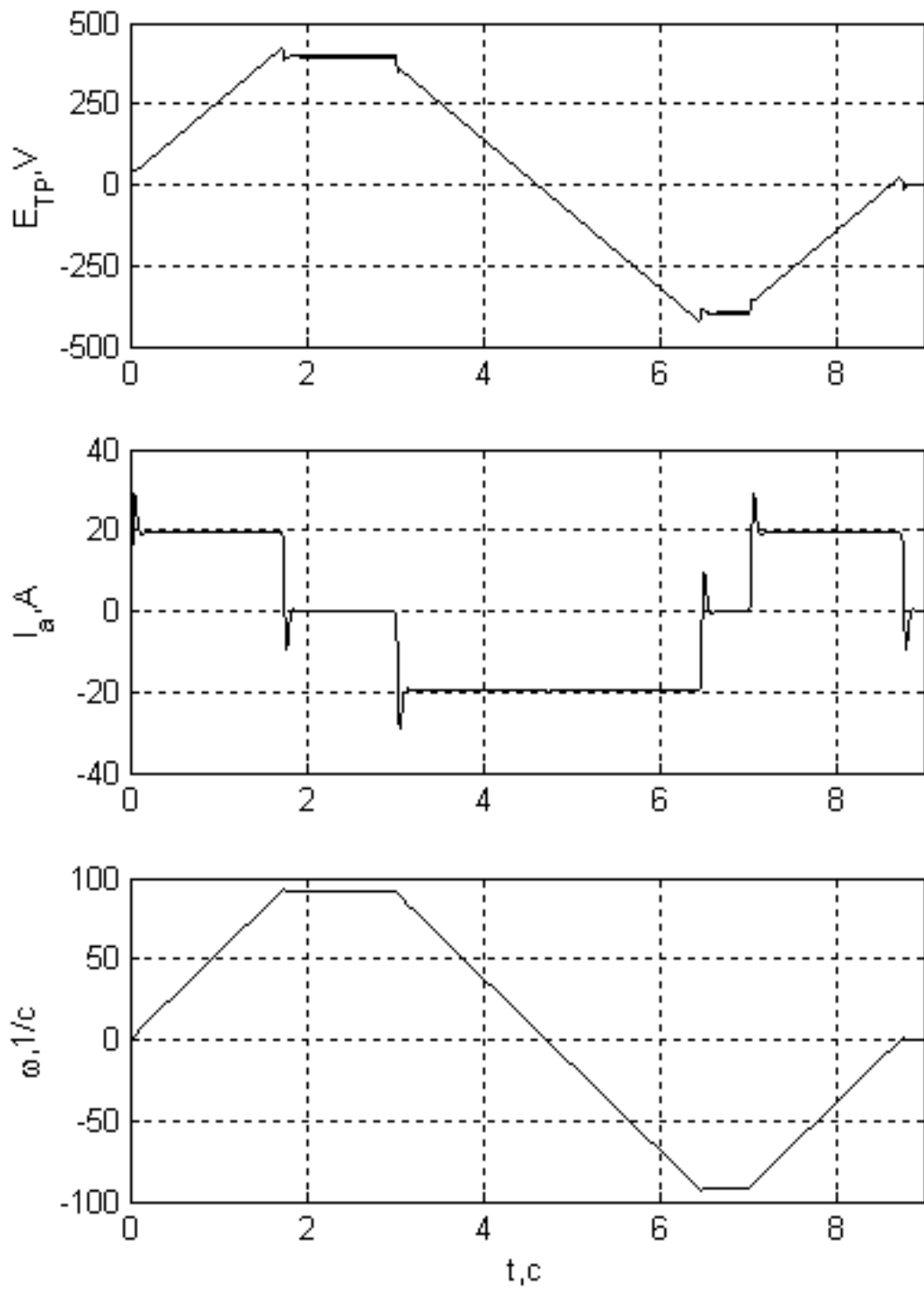


Рисунок 5.5 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

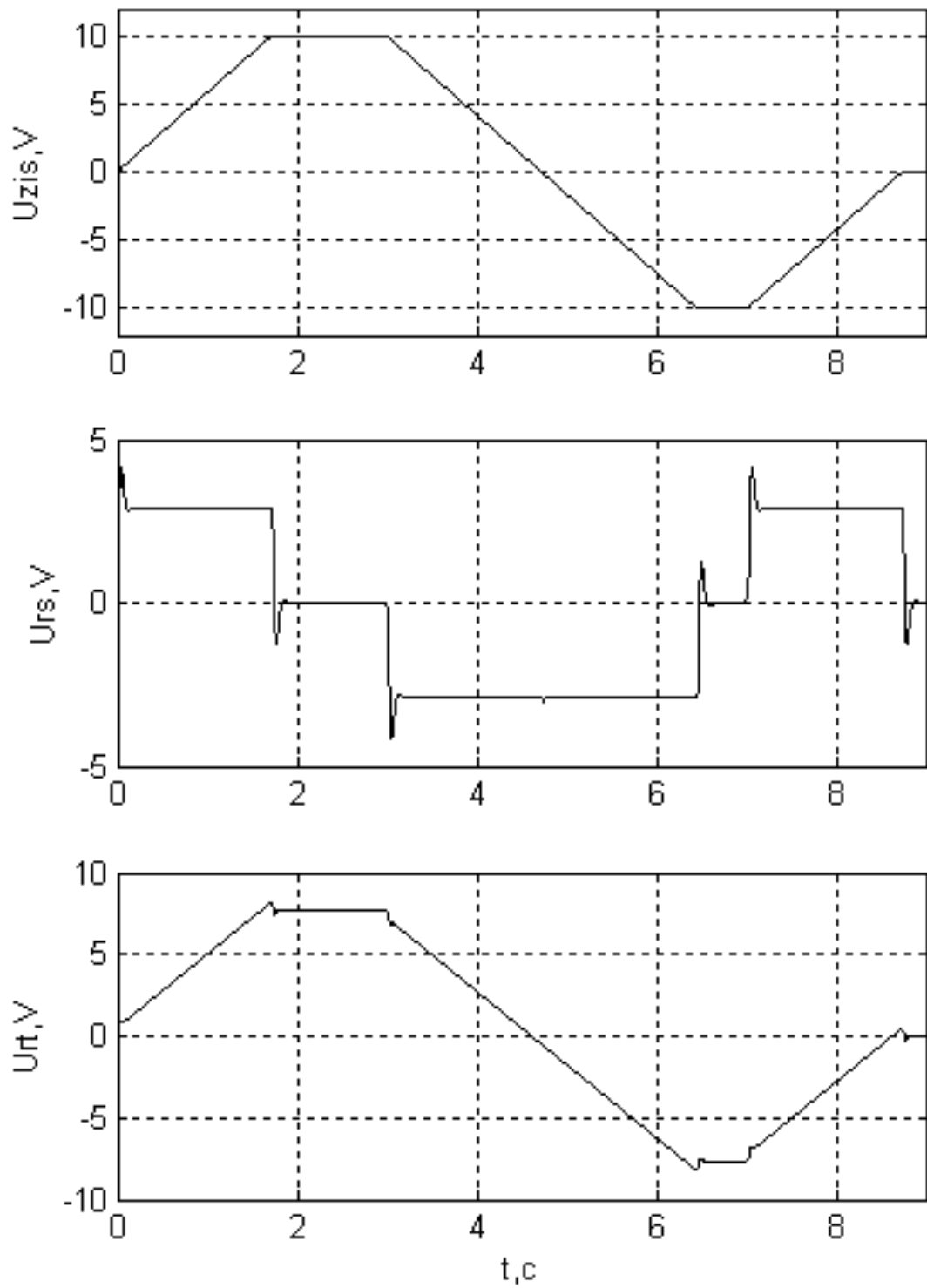


Рисунок 5.6 - Перехідні процеси на виході регуляторів і ЗІС при розгоні, реверсі та гальмуванні на холостому ході

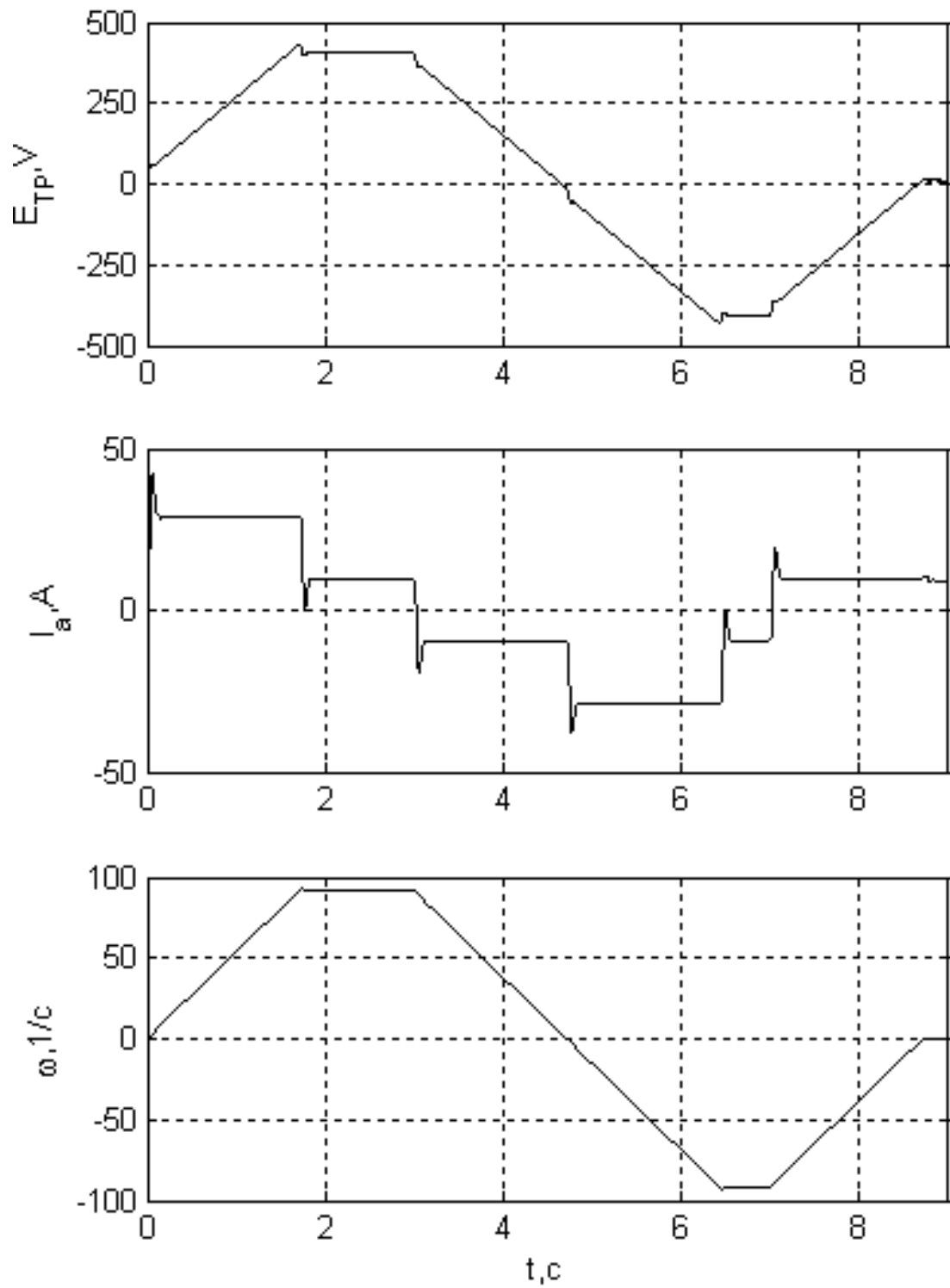


Рисунок 5.7 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні, реверсі та гальмуванні під навантаженням

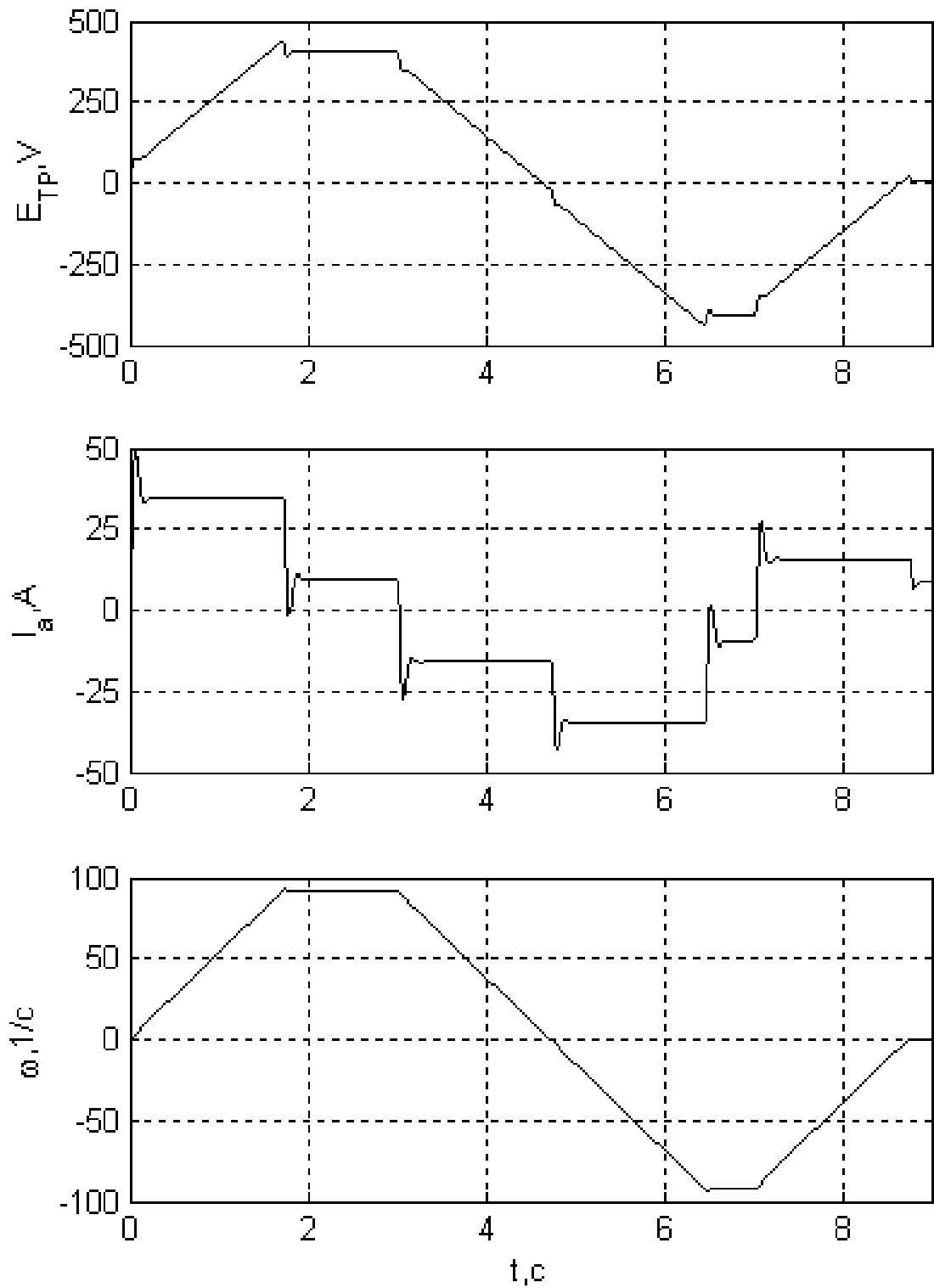


Рисунок 5.8 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,3 \cdot J_{\Sigma}$

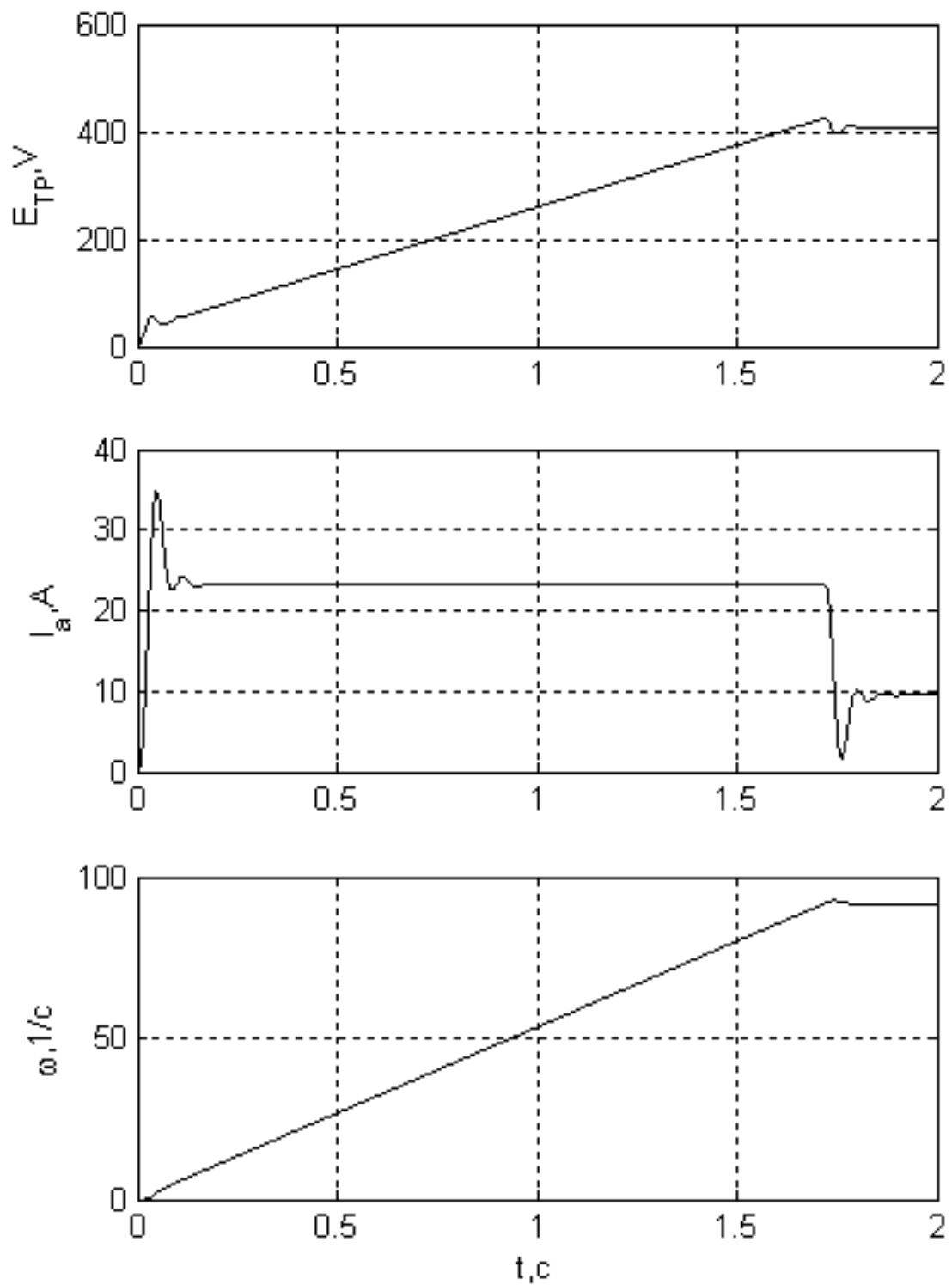


Рисунок 5.9 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

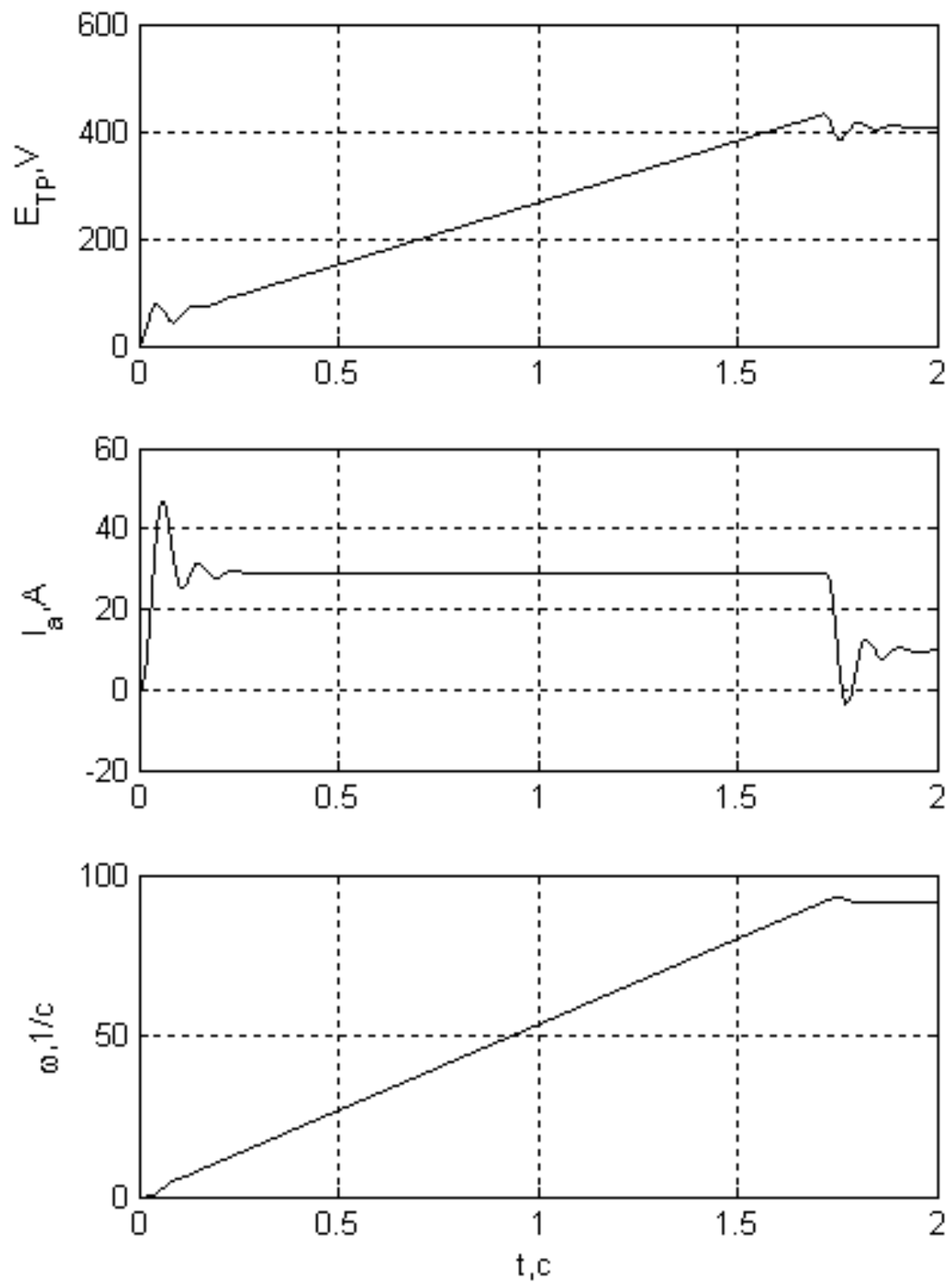


Рисунок 5.10 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $1,5 \cdot T_D$

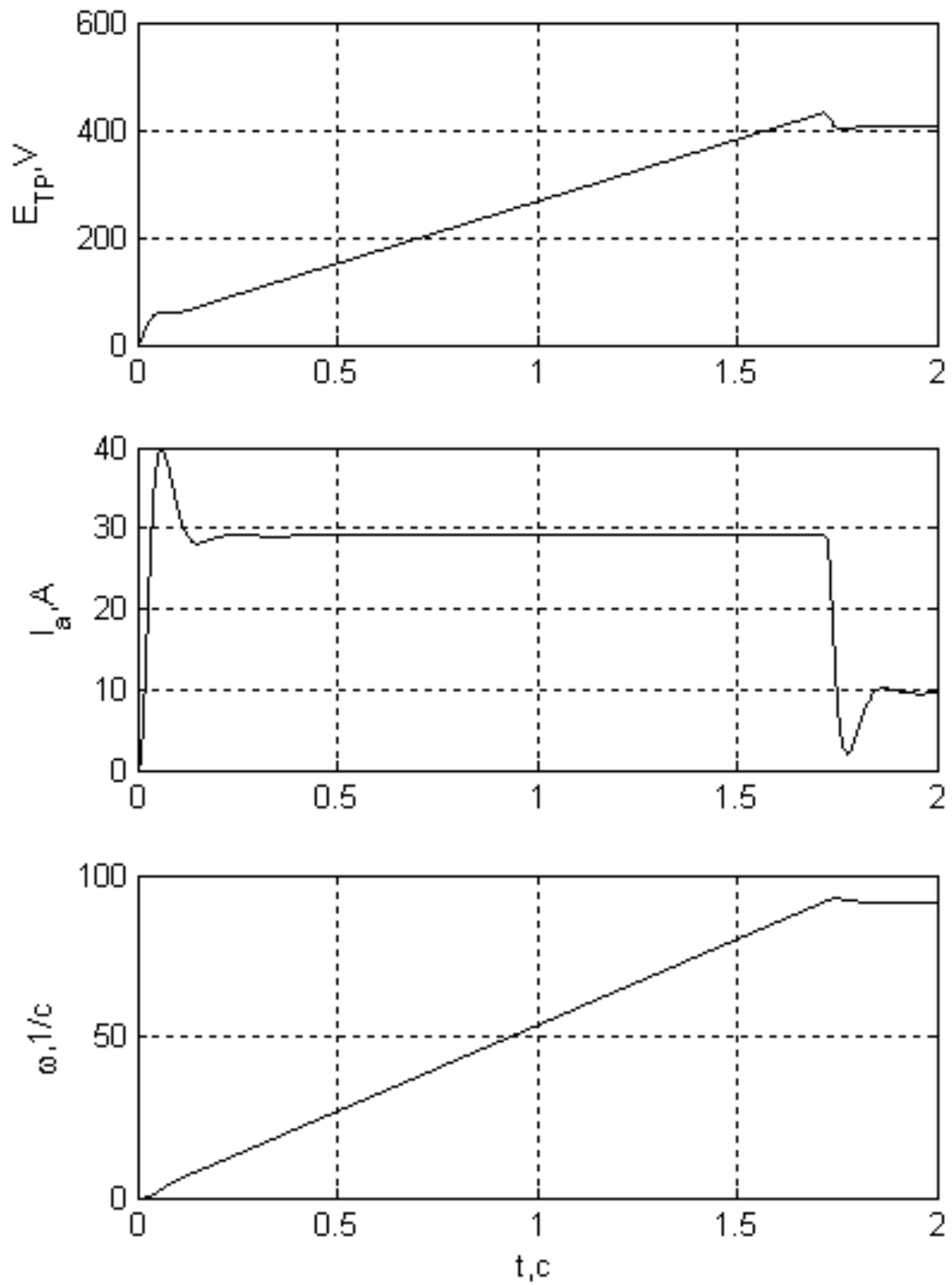


Рисунок 5.11 - Перехідні процеси швидкості і струму двигуна і ЕРС перетворювача при розгоні і $0,7 \cdot T_d$

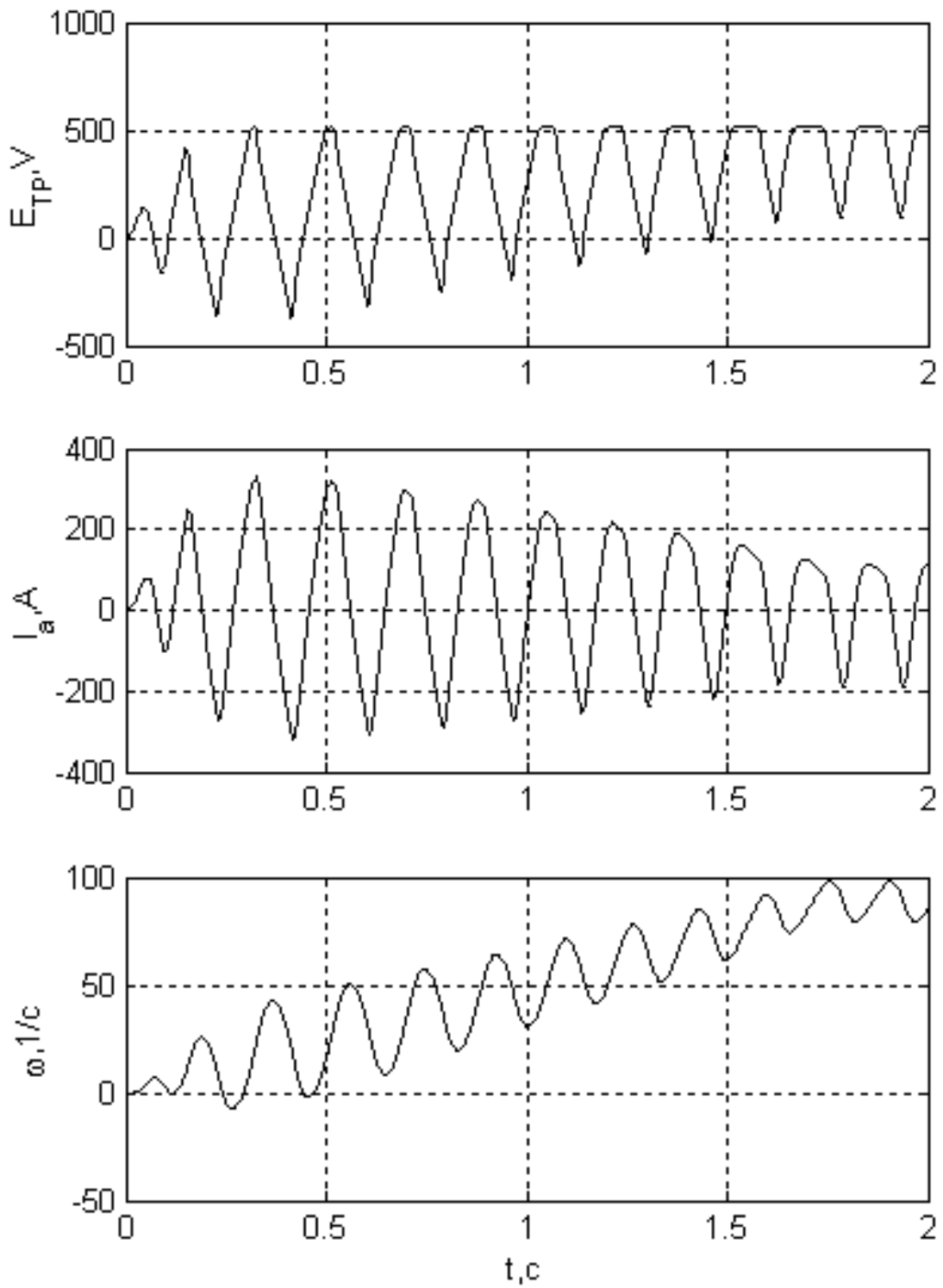


Рисунок 5.12 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку за струмом

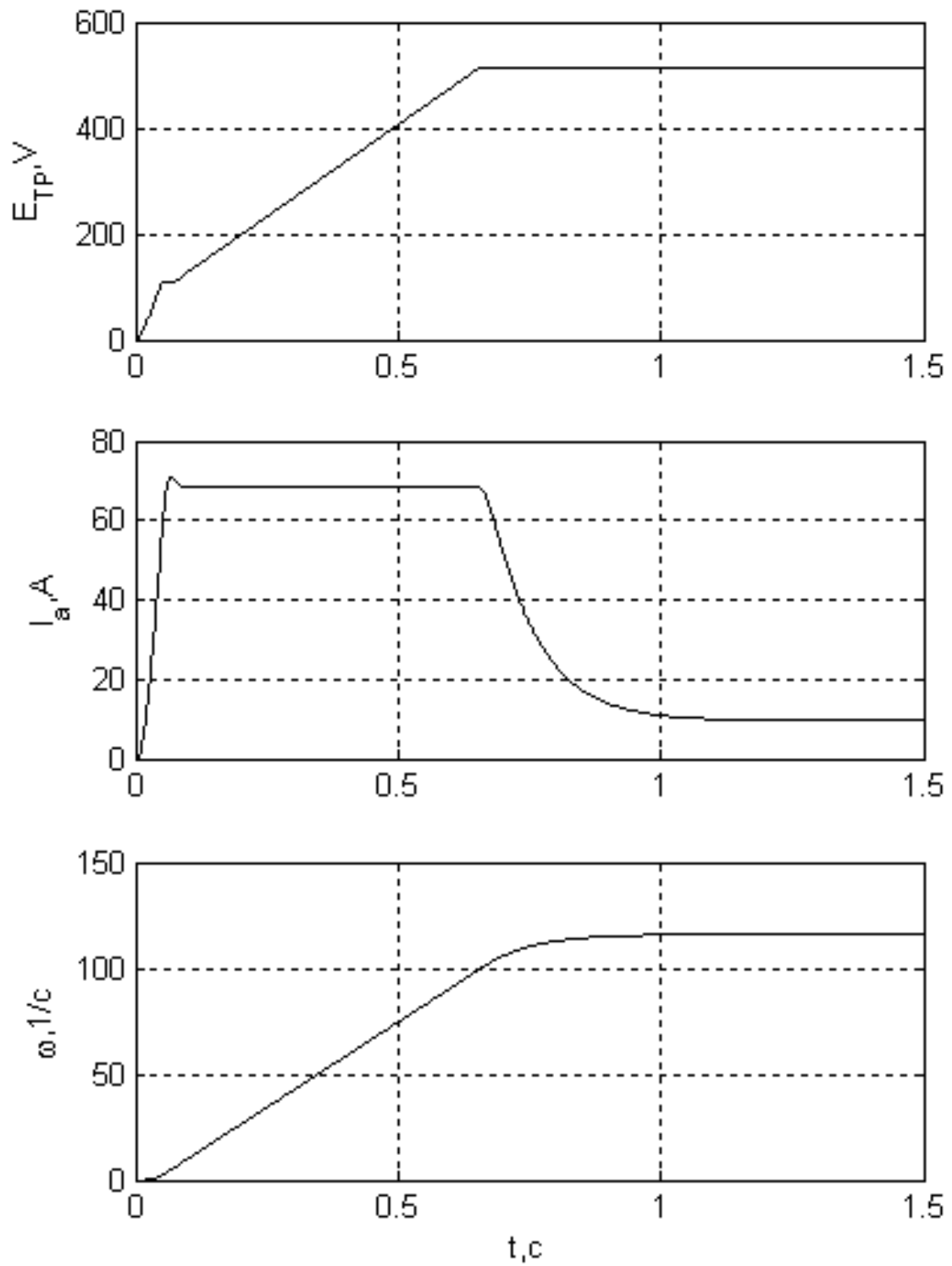


Рисунок 5.13 - Перехідні процеси при обриві зворотного зв'язку за швидкістю

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення

Дана Типова інструкція розроблена на основі НПАОП 0.00-1.03-02 «Правил будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів» (Далі - Правила), затверджених наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 20.08.2002 № 409 [17]. Документ поширюється на всі підприємства, організації України незалежно від їх відомчої (галузевої) належності та громадян, які є власниками кранів, визначає загальні права та обов'язки кранівників кранів мостового типу, а також встановлює порядок безпечного проведення робіт з переміщення вантажів кранами.

Дана Типова інструкція визначає вимоги до кранівникам кранів мостового типу (мостових, козлових, напівкозлових) незалежно від виду застосовуваних на них вантажозахоплювальних органів (Крюкова, грейферних, магнітних, мульдо-магнітних, мульдо-грейферних, мульдо-завалювальних, штирьових і інших).

Для управління та обслуговування зазначених кранів власник зобов'язаний призначити кранівників, які мають посвідчення на право керування краном даного типу. При знаходженні крана у приватній власності обов'язки кранівника може виконувати власник за умови, що він пройшов навчання та атестацію як кранівник у порядку, встановленому Правилами.

Для стропування або підвішування вантажу на гак крана призначаються стропальники. Як стропальники можуть допускатися й інші робітники (такелажники, монтажники тощо), пройшли навчання за професією, кваліфікаційною характеристикою якої передбачено виконання робіт зі стропування вантажу.

При знаходженні крана у приватній власності, обов'язки стропальника може виконувати власник за умови, що він пройшов навчання та атестацію як стропальник у порядку, встановленому Правилами.

При роботі двох і більше стропальників один з них призначається

старшим.

У випадках, коли зона, що обслуговується краном, в повному обсязі оглядається з кабіни кранівника і відсутній радіо - або телефонний зв'язок між кранівником і стропальником для передавання сигналів стропальника кранівнику, особою, відповідальною за безпечне проведення робіт з переміщення вантажів кранами, призначається сигнальник.

Для виконання обов'язків кранівника можуть бути призначені робітники, які досягли 18 років. Перед призначенням на роботу вони повинні пройти медичний огляд з метою визначення відповідності їх фізичного стану вимогам, що ставляться до цих професій.

Під час роботи кранівник повинен мати при собі посвідчення на право керування краном.

Допуск до роботи кранівників оформляється наказом по цеху (дільниці) або підприємству. Допуск кранівників до обслуговування і ремонту електроустаткування крана може здійснюватися лише з дозволу головного енергетика підприємства в порядку, встановленому Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів.

При знаходженні крана у приватній власності та його обслуговуванні за договором організацією або підприємством, які мають відповідний дозвіл органів Держнаглядохоронпраці, порядок допуску до роботи кранівників визначається договором між власником крана і підприємством, що обслуговує кран (крани).

Перед допуском до роботи керівництво підприємства зобов'язане перевірити у кранівників знання інструкції заводу-виготовлювача з монтажу та експлуатації крана, на якому вони допускаються працювати, і вручити їм під розписку виробничу інструкцію. Крім того, кранівнику повинні бути видані або вивішені у місцях виконання робіт краном графічні зображення (схеми) стропування, обв'язування або зачіплювання вантажів.

Кранівники і їх помічники після перерви в роботі за спеціальністю більше одного року проходять перевірку знань в комісії підприємства і в разі

задовільних результатів допускаються до стажування для відновлення необхідних навичок.

Якщо кран знаходиться в приватній власності й обов'язки кранівника виконує власник, то після перерви в роботі більше одного року він проходить перевірку знань за договором на підприємстві, яке має комісію з атестації кранівників, або в комісії органу Держнаглядохоронпраці. При задовільних результатах перевірки він допускається до стажування за договором на вказаному вище або іншому підприємстві, що має крани такого ж типу і моделі.

Повторна перевірка знань кранівників комісією підприємства проводиться:

Періодично, не рідше одного разу в 12 місяців.

У разі переходу з одного підприємства на інше.

На вимогу інспектора органів Держнаглядохоронпраці (далі - інспектор) або інженерно-технічного працівника, який здійснює нагляд за утриманням та безпечною експлуатацією вантажопідіймальних кранів (далі - ІТП по нагляду).

Повторні перевірки знань проводяться в обсязі даної Типової інструкції та інструкції заводу-виготовлювача з монтажу та експлуатації крана.

Кранівник контролює роботу стропальника (зачіплювача) і відповідає за дії учня, який проходить у нього стажування, а також за порушення ним вимог, викладених у цій Типової інструкції.

Адміністрація підприємства або цеху зобов'язана надати час, необхідний для огляду крана до початку його роботи.

6.2 Обов'язки кранівника перед пуском крана в роботу

Перед початком роботи кранівник повинен:

Ознайомитися зі станом крана за записами у вахтовому журналі, а при прийманні крана, що знаходився до цього в роботі, з'ясувати стан крана у кранівника, який здає зміну.

Оглянути механізми крана, гальма, ходову частину, буферні пристрої і їх кріплення.

Перевірити наявність і справність огорожень механізмів, перехідних майданчиків і галерей.

Перевірити мащення передач, підшипників і канатів, стан мастильних пристосувань і сальників.

Перевірити стан канатів та їх кріплення на барабані, а також укладку канатів у струмках блоків і барабанів.

Оглянути гак і його кріплення в обоймі, ланцюги і кільця підвіски вантажопідйомного магніту (на магнітних кранах) та інші змінні вантажозахоплювальні органи.

Провести зовнішній огляд (без зняття кожухів і розбирання) електричних апаратів (рубильників, контакторів, контролерів, пускових опорів, гальмових електромагнітів, кінцевих вимикачів, командоконтролерів, магнітних контролерів і кабелів, якщо кран живиться від мережі за допомогою кабелю).

Перевірити наявність і справність робочого та ремонтного освітлення шляхом включення світильників, а також звукового сигнального пристрою.

Перевірити наявність діелектричних килимків та рукавичок і переконатися в їх придатності (відсутність проколів, поривів і інше).

Переконатися у відсутності на крані сторонніх предметів, що можуть при русі крана впасти вниз.

Переконатися у відсутності на крані і на кранових коліях ремонтного персоналу або сторонніх осіб.

Кранівник зобов'язаний разом зі стропальником (зачіплювачів) перевірити справність знімних вантажозахоплювальних пристроїв і тари та наявність на них бірок або клейм.

Огляд крана, який працював в попередній зміні, проводиться разом з кранівником, який здає зміну.

Кран оглядається лише при непрацюючих механізмах і вимкненому рубильнику в кабіні кранівника, гнучкий кабель - при вимкненому рубильнику, що подає напругу на кабель.

При огляді крана в разі недостатності освітлення необхідно

використовувати лампою напругою не вище 42 В.

Після огляду, перед пуском крана в роботу, необхідно все його механізми випробувати на холостому ході і зробити про це запис у вахтовому журналі.

При виявленні несправностей, що заважають безпечній роботі крана, кранівник, не приступаючи до роботи, повинен зробити відповідний запис у вахтовому журналі і доповісти про це особу, відповідальну за утримання вантажопідіймальних кранів в справному стані, і особи, відповідальної за безпечне проведення робіт з переміщення вантажів кранами .

Робота крана забороняється за наявності таких несправностей:

Тріщин і деформацій металоконструкції крана.

Тріщин в елементах змінних вантажозахоплювальних органів (гаку, траверсі і інших), якщо відсутні шплінти, затискачі або ослаблені елементи кріплення канатів.

Крюк не обертається в обоймі; гайка, що кріпить гак, не має пристрою, що запобігає її самовідгвинчування.

Вантажний канат має обірвану пасмо, місцеве пошкодження або спрацювання, що перевищує встановлену норму (дані по бракуванню канатів наведені в пріл.10 до Правил).

Деталі гальм механізмів підйому вантажу мають пошкодження.

Відсутня огорожа механізмів і голих струмоведучих частин електроустаткування.

Ненадійно закріплені редуктори, гальмівні шківи, підшипники, електродвигуни та інше устаткування крана.

Корпуси контролерів та іншого електрообладнання, а також металоконструкція крана перебувають під напругою.

Тролеї, розташовані на мосту крана, стикаються між собою або з металоконструкціями крана; струмозйомники стикаються з суміжними тролеями; гнучкі тролі сильно провисають; ізоляція електропроводки пошкоджена; заземлюючі провідники обірвані.

6.3 Обов'язки кранівника під час роботи крана

Кранівник повинен входити на кран і сходити з нього тільки через посадочний майданчик.

Входити на крани, у яких передбачений безпосередній вхід в кабінку, або на настил галереї без посадочного майданчика (козлові крани), а також сходити з них дозволяється лише в спеціально відведених для цього місцях.

Перед виходом на настил галереї кранівник повинен вимкнути рубильник у кабінці й повісити на нього плакат з написом "Не вмикати. Працюють люди". На кранах, у яких рейки візка розташовані на рівні настилу, кранівник перед виходом на галерею повинен встановити візок посередині моста, за винятком випадків, коли він виходить для огляду самого візка; в таких випадках слід встановити візок у безпосередній близькості від виходу на настил.

Під час роботи крана кранівник повинен стежити за тим, щоб робоче місце під краном було освітлено.

Під час роботи крана кранівнику і його помічнику забороняється відволікатися від своїх обов'язків, а також чистити і змащувати механізми.

При обслуговуванні крана двома особами - кранівником і його помічником - жоден з них не має права відлучатися з крана, не попередивши про це один одного.

Перед включенням механізмів крана кранівник повинен подати попереджувальний звуковий сигнал. Ця вимога має виконуватися також і тоді, коли в роботі крана була перерва.

Кранівник повинен зупинити кран за сигналом "Стоп", незалежно від того, ким він подається.

Під час вимушеної зупинки мостового крана не біля посадочного майданчика і за відсутності вздовж кранової колії прохідної галереї спуск кранівника з крана повинен бути організований за його сигналом адміністрацією цеху і проводитися відповідно до порядку, встановленого для даного цеху.

Кранівник може почати роботу на крані після його ремонту лише з

дозволу особи, відповідальної за утримання вантажопідіймального крана в справному стані. Цей дозвіл має бути записаний у вахтовому журналі.

Кранівнику забороняється:

Виконувати самостійно ремонт крана, його механізмів або електроустаткування, огляд і ремонт головних тролей і струмознімачів, а також заміну запобіжників (плавких вставок).

Виконувати огляд і очищення крана при ввімкненому рубильнику в кабіні кранівника.

Включати рубильник і керувати механізмами крана при перебуванні на його галереї людей; виключення допускаються для слюсарів і електромонтерів при огляді ними механізмів крана; в цьому випадку кранівник виконує команди лише особи, яка проводить огляд, і може включити рубильник і механізми крана за його командою, якщо він знаходиться в зоні видимості кранівника.

Залишати на настилі галереї або на візку крана інструмент, а також незакріплене устаткування або деталі.

Скидати будь-з крана вниз.

Входити на кран і сходити з нього під час його руху.

Виходити на кранові колії, перелазити з одного крана на інший, а також переходити з однієї галереї моста на іншу через візок.

Виробляти заклинювання контакторів, виводити з дії гальма, кінцеві вимикачі, блокувальні контакти і електричний захист.

Перш ніж здійснити будь-який рух краном, кранівник повинен переконатися, що в зоні дії крана відсутні сторонні люди, а його помічник і стажист перебувають в безпечному місці.

Перед виконанням кожної операції, а також при знаходженні людей на шляху руху вантажу кранівник повинен подавати попереджувальний звуковий сигнал; якщо люди не відходять з шляху переміщення вантажу, то кранівник повинен припинити рух.

Включення механізмів крана кранівник повинен виконувати тільки за сигналами стропальника; якщо останній дає неправильний сигнал, то кранівник

не повинен його виконувати; за пошкодження і травми, завдані краном через подачу неправильно поданого сигналу, несуть відповідальність як кранівник, так і стропальник, який подав неправильний сигнал.

На кранах з двома і більше механізмами підймання які не використовуються в роботі гаки повинні бути звільнені від знімних вантажозахоплювальних пристроїв і підняті у верхнє положення.

Чи не дозволяється одночасно проводити краном більше двох операцій, наприклад, пересувати кран і візок, а також виробляти підйом вантажу. Виняток допускається тільки для спеціальних кранів: завалювальних, посадочних та інших, а також в разі необхідності запобігти аварії або нещасному випадку.

Перед підйомом вантажу кранівник повинен переконатися, що вантажні канати крана перебувають у вертикальному положенні і що вантаж, що піднімається не може під час підймання за що-небудь зачепитися.

При підйомі вантажів, вага яких близький до граничної вантажопідйомності крана, кранівник повинен попередньо підняти вантаж на висоту 200-300 мм і переконатися в надійності дії гальма, а також правильності стропування вантажу.

При підйомі вантажу кранівник повинен стежити за тим, щоб вантаж, що піднімається не вперся в нижні пояси ферми крана.

При переміщенні вантажу в горизонтальному напрямку кранівник повинен попередньо підняти його не менше ніж на 0,5 м вище що зустрічаються на шляху і стежити, щоб під піднятим або вантажем, що переміщується не було людей.

Опускати переміщуваний краном вантаж дозволяється лише на призначене для цього місце, що виключає можливість падіння, перевертання або сповзання встановлюваного вантажу.

При навантаженні або розвантаженні залізничних вагонів, кранівник повинен попередньо переконатися у відсутності в них людей.

Гак підйимального механізму необхідно встановлювати точно над вантажем, що підлягає підйому.

При роботі поблизу колони, штабеля вантажу, залізничного вагона та інших місцях кранівник повинен попередньо переконатися у відсутності стропальника та інших осіб між підіймається, переміщується або опускається, і цими предметами, а також в тому, що вантаж не зачепить за колону, штабель вантажу і інше .

Перед підйомом вантажу з колодязя або котловану, а також перед опусканням вантажу в них кранівник повинен попередньо переконатися, опустивши порожній (ненавантажений) гак, в тому, що при його нижчому положенні на барабані лебідки залишається не менше ніж 1,5 витка каната, не враховуючи витків, що знаходяться під затискним пристроєм.

При установці на одному крановому шляху декількох кранів кранівник з метою уникнення їх зіткнень повинен стежити за тим, щоб відстань між габаритами кранів або габаритами вантажів, що піднімаються було не менше 1 м.

При двохярусному розташуванні кранів кранівники не повинні допускати, щоб нижній кран міг наїхати на опущений вантажний канат верхнього крана.

При підйомі і переміщенні вантажу кранівнику забороняється:

Піднімати вантаж, вага якого перевищує вантажопідйомність крана; якщо вага вантажу не відомий, то кранівник повинен отримати ці відомості від особи, відповідальної за безпечне проведення робіт з переміщення вантажів кранами.

Штовхати краном сусідній кран.

Користуватися кінцевими вимикачами як робочі органи для автоматичної зупинки механізмів.

Відривати гаком або грейфером вантажі, засипані землею, закладені іншими вантажами, прикріплені болтами, залиті бетоном, а також вантажі, що примерзли до землі.

Звільняти краном защемлені вантажем знімні вантажозахоплювальні пристрої.

Розгойдувати вантажі (опоки, виливниці та інші) або стрімко їх опускати і ударяти з метою вибивання залишилися в них землі, металу та іншого, якщо

кран на таку роботу не розрахований.

Піднімати вантаж, що знаходиться в нестійкому положенні, або підвішений за один риг дворого гака, а також в тарі, заповненій вище її бортів або вище встановленої позначки заповнення. Підтягувати вантаж по землі, підлозі або по рейках гаком крана при косому натягу каната, а також підтягувати гаком залізничні вагони, платформи, вагонетки і т.д. без застосування спеціальних напрямних блоків, які забезпечують вертикальне положення вантажного каната. Допускати до стропування і зачіплювання вантажу осіб, які не мають посвідчення стропальника або зачіплювача, а також застосовувати вантажозахоплювальні пристрої без клейма або бирки. Укладати вантаж на електричні кабелі та трубопроводи, а також на краю укосу чи канави, якщо при цьому він може сповзти або перевернутися. Піднімати вантаж з розташованими на ньому людьми, а також вантаж, що підтримується руками. Допускати на кран і передавати керування краном стороннім особам, допускати до самостійного керування краном учнів та стажистів без спостереження за ними. Вести навантаження і розвантаження автомашини, якщо шофер перебуває в кабіні. Переміщати вантаж над людьми. При силі вітру понад 6 балів кранівник крана, що працює на відкритому повітрі, повинен припинити роботу краном і вжити заходів щодо запобігання угону крана вітром відповідно до інструкції заводу-виготовлювача або інструкцією, розробленою адміністрацією підприємства.

6.4 Додаткові вимоги при роботі козлових кранів

Кранівник козлового крана повинен при його переміщенні стежити, щоб на кранових коліях не було людей або будь-яких предметів.

При виході з кабіни кранів, яка переміщається спільно зі змінним вантажозахватним органом, попередньо переконатися в тому, що остання знаходиться біля посадочного майданчика.

6.5 Обов'язки кранівника після закінчення роботи крана

Після закінчення зміни або роботи крана кранівник повинен:

Звільнити від вантажу гак або інший вантажозахоплювальний орган; залишати вантаж в підвішеному положенні не дозволяється.

Кран поставити біля посадочного майданчика або на місце, призначене для його стоянки.

Крюк підняти в верхнє положення, а підймальний електромагніт, грейфер або інший вантажозахоплювальний орган опустити на землю на відведеній для цього ділянці.

Штурвали і рукоятки усіх контролерів і командоконтролерів перевести в нульове положення і вимкнути рубильник у кабіні крана.

Оглянути кран, очистити всі його обладнання і зробити запис про стан крана у вахтовому журналі.

Кран, що працює на відкритому повітрі, надійно зміцнити за допомогою протиугінних захоплень.

При роботі крана в кілька змін кранівник має право залишити кран після закінчення свого робочого часу лише після передачі крана змінника. При невихід змінника на роботу кранівник, який закінчив зміну, може піти з крана тільки з дозволу особи, якій він підпорядкований.

Кранівник, який здав зміну, повинен повідомити своєму змінника про всі несправності в роботі крана, що спостерігалися за минулу зміну.

Коли в прольоті встановлений лише один кран, то при роботі його в одну або дві зміни кранівник після закінчення роботи крана зобов'язаний відключити головні тролєї та замкнути на замок шафу з рубильником.

6.6 Обслуговування крана

Кранівник відповідає за правильне обслуговування крана, при цьому він повинен:

Утримувати механізми та обладнання крана в чистоті і справності.

Своєчасно робити змащування всіх рухомих механізмів крана і канатів,

згідно з вказівками інструкції заводу-виготовлювача.

Масильні і обтиральні матеріали зберігати в закритій металевій посуді. Використаний обтиральний матеріал необхідно прийняти з крана.

Стежити за тим, щоб на крані не було будь-яких незакріплених предметів, а також інструменту в місцях, не призначених для його зберігання.

Знати терміни і результати проведення слюсарями та електромонтерами профілактичних оглядів крана та його окремих механізмів і вузлів за записами в журналі періодичних оглядів.

Усунення несправності, що виникла під час роботи крана, здійснюється за заявкою кранівника. Інші види ремонту крана здійснюються в установлені адміністрацією строки.

Під час оглядів електроустаткування крана необхідно вимкнути джерело його, а рубильник в місці підключення крана у вимкненому стані повинен бути замкненим протягом всього часу огляду.

Пробний пуск крана після ремонту (планового, аварійного) кранівник зобов'язаний здійснювати лише в присутності слюсаря або електромонтера, який ремонтував кран, і приступати до роботи тільки за письмовим розпорядженням особи, відповідальної за утримання вантажопідіймального крана в справному стані.

6.7 Відповідальність кранівника

Кранівник крана мостового типу, навчений і атестований згідно з Правилами, несе особисту відповідальність за порушення вимог, викладених у цій Типовій інструкції, відповідно до чинного законодавства України.

6.8 Електробезпека при роботі з кранами

Машиністам кранів з електричним приводом присвоюється кваліфікаційна група з електробезпеки не нижче II, а допущеним до огляду і регулюванню електрообладнання не нижче III (ПТЕ). Електромонтерами та електрослюсарів, що проводить ремонт, наладку та випробування

електроустаткування і електропроводки вантажопідйомних машин, присвоюється відповідна їх знанням і навичкам кваліфікаційна група з техніки безпеки, але не нижче III (ПТЕ). Ці робітники повинні знати будову та електричну схему вантажопідйомної машини, до обслуговування якої вони допущені. Кожному робітникові, що успішно пройшов перевірку знань з електробезпеки, видається встановленої форми посвідчення із зазначенням в ньому присвоєної групи з електробезпеки (ПТЕ).

Стропальникам, робочим основних професій, допущеним до управління кранами з підлоги, присвоюється I кваліфікаційна група з техніки безпеки, що фіксується в особливому журналі. Посвідчення про перевірку знань з електробезпеки їм не видається. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів не поширюється на автомобільні, пневмоколісні, гусеничні і залізничні крани. У зв'язку з цим необхідність присвоєння персоналу, пов'язаного з експлуатацією таких кранів, кваліфікаційної групи з електробезпеки визначається на підставі додаткових вказівок міністерств і відомств.

ВИСНОВОК

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 Д806.

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, загустіння мастила і т.п.

Отримані перехідні процеси свідчать про правильність проектування системи електроприводу. Досліджуваний електропривод з синтезованою системою керування повністю задовольняє технологічним

вимогам, що висувуються до електроприводу при вихідних параметрах об'єкта керування та доступні їх відхиленнях.

У дипломі так само розглянуті заходи з охорони праці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Яуре А. Г., Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с, ил.
2. Справочник по кранам: В 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. Под общ. ред. М. М. Гохберга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1988. – 536с.
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 – 465 с.: 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 електропривода 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.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Одним з видів автоматичного керування є *оптимальне керування*, яке застосовують у технічних системах для підвищення ефективності виробничих процесів, і в системах організаційного управління для вдосконалення діяльності підприємств та організацій. Ідея оптимізації в останні десятиріччя була центральною ідеєю, яка визначала розвиток теорії керування.

Слово “оптимальний” походить від латинського *optimus*, що значить – найкращий, досконалий. *Оптимізація* – це отримання найкращого можливого рішення.

7.1 Постановка й класифікація задач оптимізації

Під час розробки автоматичних систем насамперед ставиться задача виконання функціонального призначення системи, що визначається метою керування. Більш складною є задача розробки системи з найкращими показниками якості – *оптимальної системи*. Оцінку досяжності мети у процесі керування об’єктом, яка подана у формалізованому вигляді, називають *критерієм оптимальності* або *цільовою функцією*. Розробка оптимальної системи - це задача синтезу або задача оптимізації.

Розв’язання цієї задачі починають з її *постановки*, яка містить опис заданих реальних елементів системи математичними співвідношеннями (складення математичної моделі системи), визначення існуючих обмежень для координат системи й аналіз характеристики сигналів зовнішніх впливів, а також складення математичного виразу заданого критерію якості. Далі задачу розв’язують відповідними математичними методами, у результаті чого знаходять функцію керування за умови мінімуму чи максимуму показника якості, що визначає оптимальний режим роботи об’єкта.

Обмеження фазових координат і керувань

Об'єкт керування можна подати у вигляді, що наведений на рис. 1. Величини $u_1(t), \dots, u_m(t)$ зручно вважати координатами деякого вектора $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ у m -мірному просторі керування. Вектор \mathbf{u} називають *вектором керування* або *керуванням*.

Величини $y_1(t), \dots, y_n(t)$ розглядають як координати вектора $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ у n -мірному просторі, який називають *фазовим простором* об'єкта, що

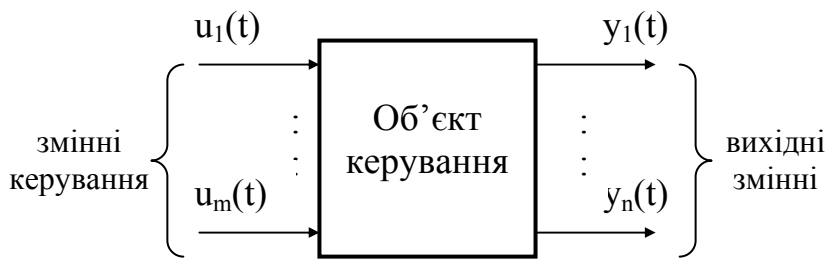


Рис. 7.1 – Об'єкт керування

розглядають. Вектор \mathbf{y} називають *фазовим вектором* або *вектором стану*. Він визначає стан об'єкта у даний момент часу.

Якщо стан об'єкта характеризується двома фазовими координатами, то кажуть про фазову площину. Розмірність векторів \mathbf{u} і \mathbf{y} може бути однаковою або відрізнятися одна від одної ($m \leq n$). Пару векторних функцій $[\mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t)]$ називають *процесом керування* або просто *процесом*.

Під час розробки оптимальних систем автоматичного керування необхідно враховувати різні обмеження, що накладають на координати і показники якості процесу.

Усі обмеження координат і керувань можна розділити на два типи: природні та умовні.

Природні обмеження фазових координат обумовлені принципом роботи об'єкта. Наприклад, частота обертання асинхронного електродвигуна не може бути більшою за синхронну частоту; вихідні сигнали підсилювача обмежені через явище насичення і т.д.

Умовні обмеження координат уводять свідомо. Наприклад, величину струму якоря електродвигуна постійного струму обмежують умовами нормальної комутації на колекторі, нагрівом струмопровідних частин,

граничною температурою ізоляції обмоток. Наявність умовних обмежень координат звичайно обумовлює введення обмежень на керування.

Іншими словами, вектори $\mathbf{u}(t)$ і $\mathbf{y}(t)$ можуть змінюватись лише у деякій зоні, що допускається:

$$\mathbf{u}(t) \in G_u; \mathbf{y}(t) \in G_y. \quad (1)$$

Першу умову називають *обмеженням на керування*, другу – *фазовим обмеженням*. G_u і G_y – деякі задані множини. Множину G_u називають *областю керування*.

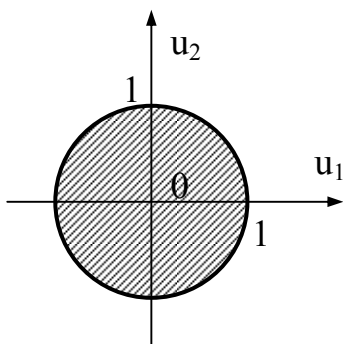


Рис. 7.2 – Приклад області керування

Її вказують у математичному описі об'єкта. Наприклад, якщо параметри u_1 і u_2 характеризують на площині векторну величину, модуль якої не перевищує одиниці, то ці параметри підкоряються умові $u_1^2 + u_2^2 \leq 1$, а область керування G_u являє собою круг одиничного радіусу (рис. 2).

У загальному випадку область керування може мати геометрично більш складний характер, оскільки через конструкцію об'єкта між керуючими параметрами u_i можуть існувати зв'язки, що виражаються рівняннями вигляду:

$$\varphi(u_1, u_2, \dots, u_m) = 0. \quad (2)$$

Для технічних систем особливо важливим і характерним є випадок *замкнутої* множини G_u , тобто випадок, коли точка може знаходитись не тільки всередині цієї множини, а і на її межі.

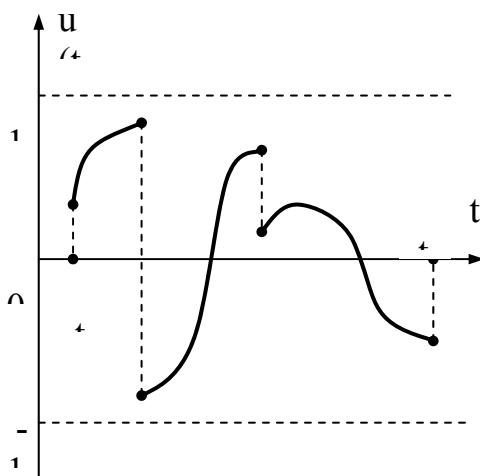


Рис. 7.3 – Приклад кусково-безперервної функції

Важливо зробити ще одне припущення: значення керуючих параметрів можуть змінюватись стрибком, тобто ці параметри є *безінерційними*. Тому необхідно розглядати не тільки безперервні, а й *кусково-безперервні* керування.

Функція $u(t)$ при $t_0 \leq t \leq t_1$ називається кусково-безперервною, якщо складається зі скінченної кількості безперервних кусків, тобто є безперервною для всіх моментів часу t , за винятком лише скінченної кількості цих моментів, де функція $u(t)$ може мати розрив першого роду (рис. 3).

Кусково-безперервні керування дозволяють отримати для достатньо широкого класу прикладів точний математичний розв'язок оптимальної задачі та є достатньо наочними і зручними для технічної реалізації.

Критерії оптимальності

Важним етапом під час розробки оптимальних систем є формулювання мети оптимізації, яка математично виражається як вимога забезпечення мінімуму чи максимуму деякого показника якості (критерію оптимальності).

Як критерій оптимальності, можуть бути прийняті різні технічні та техніко-економічні показники й оцінки.

Наприклад, критерій може відображати техніко-економічну вигоду (продуктивність, коефіцієнт корисної дії тощо), при цьому оптимальне керування повинне забезпечувати *максимум* критерію оптимальності; він може виражати також утрати (витрату енергії, палива, коштів і т.д.), у цьому випадку оптимальне керування забезпечує *мінімум* критерію.

Цільову функцію необхідно подати у формі, яка допускає використання будь-якого відомого методу синтезу оптимальних систем. Під час розробки найпростіших локальних систем керування звичайно розглядають задачу оптимізації за критеріями, що характеризують *якість* функціонування системи (точність, швидкодію), а інші критерії не враховують.

У теорії автоматичного керування широко розповсюджені *функціонали*, що характеризують якість системи.

Змінна величина $I[x(t)]$ називається функціоналом, що залежить від функції $x(t)$, якщо кожній функції $x(t)$ відповідає число I .

У загальному випадку функціонал залежить від фазових координат $y_i(t)$, координат керування $u_j(t)$, збурюючих впливів $z_k(t)$ і може бути поданий у вигляді:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} F[\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{z}] dt, \quad (3)$$

де $[t_0, t_1]$ – інтервал часу, що розглядають; F – визначена функція, яка відображає показник якості; $\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{z}$ – вектори фазових змінних, керувань і збурень відповідно.

Досягнення максимального чи мінімального (екстремального) значення цього функціоналу вказує на оптимальну роботу чи стан системи.

Розглянемо деякі типи критеріїв оптимальності найпростіших об'єктів і систем керування складними процесами.

Час перехідного процесу:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} 1(t) dt = t_1 - t_0 = T. \quad (4)$$

Отримана при цьому система є *оптимальною за швидкодією*, якщо вона забезпечує мінімум інтегралу (4) з урахуванням обмежень координат.

Інтегральні оцінки якості перехідного процесу:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \varepsilon^2(t) dt, \quad (5)$$

$$I = \bar{\varepsilon}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon^2(t) dt, \quad (6)$$

$$I = \bar{y}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt, \quad (7)$$

де $\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t)$ – відхилення вихідної змінної $y(t)$ від заданого значення $y^*(t)$;

$\bar{\varepsilon}^2$ - середнє значення квадрату помилки системи;

\bar{y}^2 - середнє значення квадрату вихідної координати.

За умови забезпечення мінімуму інтегралу (5) система є *оптимальною за точністю у динамічних режимах* при ступінчастому задавальному впливі.

За умови забезпечення мінімуму функціоналів (6) і (7) система є *оптимальною за точністю у статичному розумінні*.

Для визначення коливальності перехідного процесу, тобто характеру його протікання, застосовують *узагальнений інтегральний квадратичний критерій*:

$$I = \int_0^{\infty} \left[y^2 + r_1 \dot{y}^2 + \dots + r_n (y^{(n)})^2 \right] dt, \quad (8)$$

де r_i – вагові коефіцієнти.

Перший доданок у виразі (8) забороняє тривале існування відхилення вихідної координати y , а подальші доданки – тривале існування великих значень похідних. Тому мінімуму інтегралу (8) відповідають достатньо швидкоплинні й плавні перехідні процеси.

Зазначимо, що інтегральні критерії (5) – (8) не враховують того, що у системі можуть мати місце обмеження потужності сигналу керування. Крім того, система сама може мати обмежені енергетичні ресурси. Ці обмеження враховують функціонали вигляду:

$$I = \int_0^{\infty} [y^2(t) + cu^2(t)] dt. \quad (9)$$

Перший доданок у виразі (10.9) має той самий смисл, що й у виразі (10.8). Другий доданок, з одного боку, означає досягнення оптимальності гасіння збуреного руху за умови обмеження витрат енергії на керування, а з іншого – забезпечує пошук оптимального керування серед множини лінійних функцій, що допускаються.

Витрати енергії на керування:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot i(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} r \cdot u^2(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} R \cdot i^2(t) dt, \quad (10)$$

де $u(t)$ та $i(t)$ – напруга і струм навантаження; $r=1/R$ – коефіцієнт пропорційності; R – опір електричного ланцюга.

Даний критерій також використовують при керуванні від джерел енергії, що є обмеженими за потужністю.

У механічних системах для оцінювання енергії керування іноді беруть функціонал вигляду:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot \dot{y}(t) dt, \quad (11)$$

де $u(t)$ – координата керування; $\dot{y}(t) = dy/dt$ - похідна вихідної змінної об'єкта.

Витрати палива:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} r \cdot |u(t)| dt. \quad (12)$$

За умови мінімуму цього інтегралу отримуємо систему, *оптимальну за витратами палива*.

У випадках, коли необхідно забезпечити найкращу роботу системи за найгірших можливих умов, застосовують *мінімаксний* критерій оптимальності.

Формування критерію оптимальності, що визначає мету оптимізації, - це інженерна та інженерно-економічна задача, яку розв'язують на підставі глибокого та всебічного вивчення об'єкта, яким керують.

Якщо необхідно врахувати різні показники якості, задача вибору критерію оптимальності ускладнюється, оскільки вимоги до системи звичайно є суперечними. У зв'язку з цим як основний беруть критерій якості функціонування.

Класифікація задач оптимізації

Для того, щоб повністю завдати рух об'єкта, необхідно знати його фазовий стан у початковий момент часу t_0 і вибрати керування $u(t)$.

Цей вибір здійснюють за таких умов:

- задані крайові умови, тобто початковий $y(t_0)$ і кінцевий $y(t_k)$ стан об'єкта;

- оптимальність керування оцінюється за максимумом чи мінімумом функціоналу (10.3);

- на керування і змінні стану накладають обмеження (10.1);

Конкретизація всіх цих умов породжує різні типи задач оптимізації, які можна розділити на три групи за способом завдання:

- функціоналу I ;

- обмежень;
- крайових умов.

Різні види функціоналу I були розглянуті вище.

За *способом завдання обмежень* задачі розділяють на:

- задачі з обмеженням на керування;
- задачі з обмеженням на фазові змінні;
- задачі зі спільним обмеженням на керування і на фазові змінні.

За *способом завдання крайових умов* задачі можна розділити на:

- задачі з фіксованими кінцями: задані значення $y(t_0)$ і $y(t_k)$, а також моменти часу t_0 і t_k ;
- задачі з вільними кінцями: якщо $y(t_0)$ чи $y(t_k)$ не задані, то маємо задачу з вільним лівим чи правим кінцем відповідно;
- задачі з рухомими кінцями: у цьому випадку значення t_0 і t_k зафіксовані, а вектори стану $y(t_0)$ і $y(t_k)$ задані деякими множинами G_{t_0} і G_{t_k} .

Крім зазначених ознак класифікації задач оптимізації, ці задачі можна розділяти за видом змінних і видом залежностей між ними.

За видом дії над змінними залежності можуть бути алгебраїчними і диференціальними. Задачі, що містять диференціальні залежності у функції часу, називають задачами *динамічної оптимізації* чи *оптимального керування*.

7.2 Класичні методи варіаційного числення

Методи варіаційного числення можна умовно розділити на класичні й сучасні. До класичних належать методи, що ґрунтуються на рівняннях Ейлера, Лагранжа, Якобі, Вейерштрасса. Їх доцільно застосовувати до задач, у яких області змін $u(t)$ і $y(t)$ не містять обмежень. Це має місце, коли розглядають малі відхилення $u(t)$ і $y(t)$ від ustalених станів. Сучасні методи ґрунтуються на принципі максимуму Понтрягіна і методі динамічного програмування Беллмана. Їх перевагами є можливість урахування обмежень на керування та змінні стану, а також придатність до застосування ЕОМ.

Варіаційна задача з закріпленими граничними точками. Рівняння

Ейлера

Під час вивчення перехідних процесів систем керування характер динаміки можна оцінювати величиною визначеного інтегралу. Наприклад, для

одномірних об'єктів:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} F(y, \dot{y}, t) dt,$$

(13)

де $y = y(t)$, $\dot{y} = dy(t)/dt$ - траєкторії координати виходу та її першої похідної за часом.

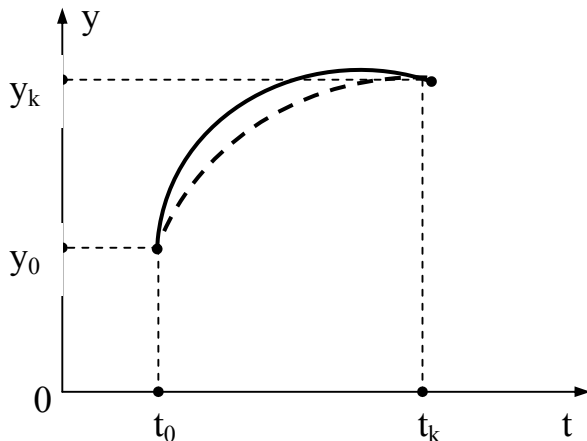


Рис. 7.4 – До задачі із закріпленими кінцями

Технічна задача оптимізації динаміки об'єкта приводиться до математичної задачі знаходження

екстремуму функціоналу (13). При цьому шукана функція повинна задовольняти крайовим умовам: $y(t_0) = y_0$; $y(t_k) = y_k$, де y_0, y_k – задані числа.

Така задача називається варіаційною задачею із закріпленими граничними точками (із закріпленими кінцями) (рис. 4).

Умова екстремуму інтегралу (13) при фіксованих граничних значеннях і відсутності обмежень на координати записується у вигляді рівняння Ейлера:

$$\frac{\partial F(y, \dot{y}, t)}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(y, \dot{y}, t)}{\partial \dot{y}} \right) = 0. \quad (14)$$

Криві, на яких реалізується екстремум функціоналу (*екстремалі*), є інтегральними кривими цього рівняння. Для з'ясування, чи відповідає знайдена екстремаль мінімуму функціоналу, необхідно перевірити виконання додаткових умов. Оскільки це є достатньо складною процедурою, на практиці іноді обмежуються чисельною перевіркою значення функціоналу біля знайденої екстремалі.

У задачах оптимізації динаміки об'єктів у загальному випадку функціонал (13) може містити похідні вищих порядків. Необхідну умову

наявності екстремуму такого функціоналу визначає *рівняння Ейлера-Пуассона* (за фіксованих граничних умов і відсутності обмежень на координати):

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \ddot{y}} \right) - \dots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \left(\frac{\partial^n F}{\partial y^{(n)}} \right) = 0. \quad (19)$$

Слід зазначити, що рівняння (14) і (19) застосовуються для знаходження екстремумів відповідних функціоналів тільки тоді, коли координати $y(t)$ є безперервними гладкими функціями і не мають обмежень типу нерівностей.

Ці рівняння виражають *першу необхідну умову екстремуму*. Однак, залишається неясним, є отримані екстремали максимумом чи мінімумом функціоналу. Відповідь на це запитання дає теорема *Лежандра*, яка виражає *другу необхідну умову екстремуму*:

Для того, щоб функціонал (13) у задачі із закріпленими кінцями досягав на кривій мінімуму (максимуму), необхідно, щоб уздовж цієї кривої виконувалась умова:

$$\frac{\partial^2 F(y, \dot{y}, t)}{\partial \dot{y}^2} > 0, \quad \left(\frac{\partial^2 F(y, \dot{y}, t)}{\partial \dot{y}^2} < 0 \right) \quad (20)$$

Так, для прикладу (10.1) маємо:

$$\frac{\partial^2 F(y, \dot{y}, t)}{\partial \dot{y}^2} = 2k^2 > 0,$$

значить, на кривій (17) функціонал (15) досягає мінімуму.

Варіаційні задачі на умовний екстремум. Рівняння Ейлера-Лагранжа

Задачі синтезу алгоритмів оптимального керування об'єктами у динаміці при вибраному функціоналі критерію якості мають додаткові (умовні) обмеження у вигляді рівнянь математичної моделі динаміки об'єкта. Екстремум функціоналу, що визначається за додаткових умов (функціональних обмеженнях), називають *умовним екстремумом*. Задачі на умовний екстремум при визначенні оптимальних керувань об'єктом у динаміці зумовлені тим, що траєкторія виходу $y(t)$ є наслідком зміни координати керування і залежить від виду диференціального рівняння об'єкта.

Таким чином, задача оптимізації об'єкта керування у динаміці, яку розв'язують класичним варіаційним численням, має таке формулювання:

- математична модель об'єкта задана у формі рівняння:

$$\dot{y} = \varphi(y, u, t); \quad (21)$$

- задані граничні умови: $y(t_0) = y_0$; $y(t_k) = y_k$;
- необхідно визначити оптимальне керування $u^\circ(t)$, що забезпечує мінімум функціоналу:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} F(y, \dot{y}, u, \dot{u}, t) dt. \quad (22)$$

Ця задача називається *задачею Лагранжа*. Перші задачі на умовний екстремум були поставлені й розв'язані засновниками класичного варіаційного числення Бернуллі, Ейлером і Лагранжем.

Розв'язувати задачу на умовний екстремум можна методом *множників Лагранжа*. Для цього введемо до розгляду новий функціонал:

$$I_1 = \int_{t_0}^{t_k} \bar{F}(y, \dot{y}, u, \dot{u}, \lambda, t) dt = \int_{t_0}^{t_k} [F(y, \dot{y}, u, \dot{u}, t) + \lambda(\dot{y} - \varphi(y, u, t))] dt, \quad (23)$$

де λ - множник Лагранжа;

$\bar{F}(y, \dot{y}, u, \dot{u}, \lambda, t)$ - функція Лагранжа;

$\dot{y} - \varphi(y, u, t) = 0$ - функція зв'язку.

За допомогою множників Лагранжа задача про умовний екстремум функціоналу (22) приводиться до задачі на безумовний екстремум функціоналу (23). Рівняння Ейлера при цьому складають для функції Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{y}} \right) = 0; \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial u} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{u}} \right) = 0; \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \lambda} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{\lambda}} \right) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Ці рівняння називають *рівняннями Ейлера-Лагранжа*. Вони характеризують умову стаціонарності функціоналу (23). У результаті розв'язування цих рівнянь з урахуванням математичної моделі об'єкта і граничних умов отримаємо оптимальне керування $u^*(t)$ об'єктом у динаміці.

Слід нагадати, що при використанні класичного варіаційного числення шукані функції оптимальних процесів є безперервними і на координати виходу та керувань не накладають обмеження.

Під час розв'язання задач оптимального керування ці умови далеко не завжди дотримуються.

По-перше, керуючі впливи, що входять до функціоналів, можуть бути кусково-безперервними (рис. 3). За деяких умов координати об'єкта також мають розрив. Значить, порушуються умови безперервності, що робить розв'язок задачі дуже складним або неможливим.

По-друге, у практичних системах на координати і керування завжди накладаються обмеження. Це відповідає тому, що координати і керування можуть змінюватися у деяких замкнутих зонах, а також знаходитись на межах цих зон. Остання обставина може стати причиною серйозних ускладнень. Проілюструємо це за допомогою рис. 5.

У першому випадку рівняння $\partial Q / \partial u = 0$ допомагає знайти оптимальне значення $u = u^*$, при якому $Q = Q_{\min}$, а у другому маємо мінімум і при невиконанні цієї умови.

Таким чином, порушення умов, на яких ґрунтується класичне варіаційне

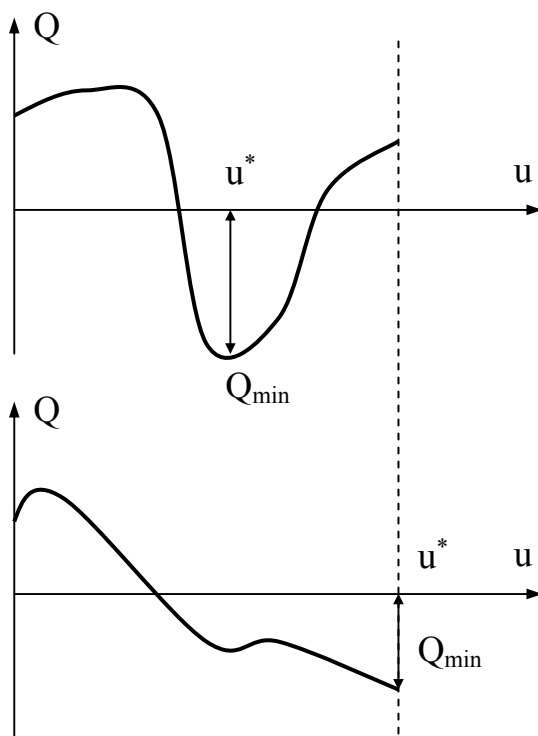


Рис. 7.5 – Визначення мінімуму функції у замкнутій області керувань

числення, не дозволяє розв'язувати цими методами широке коло задач теорії автоматичного керування.

Ці труднощі можна подолати за допомогою нових методів розв'язування задач теорії оптимальних систем – методу динамічного програмування і принципу максимуму.

7.3 Метод динамічного програмування Беллмана

У техніці існує клас об'єктів і процесів, керування якими здійснюється на підставі обмеженої кількості рішень, що приймають послідовно у деякі фіксовані моменти часу. Для розв'язування задач оптимізації таких об'єктів американський вчений Р.Беллман запропонував метод, що отримав назву *динамічного програмування*. Цей термін означає прийняття рішень у часі.

За допомогою динамічного програмування можна розв'язувати задачі, що є дискретними за своєю природою. Це має велике значення для найрізноманітніших галузей техніки та економіки, пов'язаних з дискретними процесами виробництва.

У основі методу лежить *принцип оптимальності*. Відповідно до цього принципу оптимальне керування визначається кінцевою метою керування і станом системи у даний момент часу незалежно від того, яким чином система дійшла до цього стану, тобто від “передісторії” системи. Це означає, що для будь-якої оптимальної траєкторії кожна ділянка, яка зв'язує будь-яку проміжну точку цієї траєкторії з кінцевою, також є оптимальною траєкторією. Іншими словами, друга ділянка оптимальної траєкторії є оптимальною траєкторією.

Пояснимо метод динамічного програмування на простому прикладі керування об'єктом, рух якого описується рівнянням (21):

$$\dot{y} = \varphi(y, u, t),$$

причому на керуючий вплив накладені обмеження $u(t) \in G_u$, а також задані початкові умови: $y(t_0) = y_0$.

Необхідно мінімізувати функціонал:

$$I = \int_0^T F(y, u) dt + \Phi[y(T)], \quad (25)$$

де $\Phi[y(T)]$ - деякий функціонал, що залежить від значення вихідної координати у кінці інтервалу часу T , тобто значення критерію при останньому кроці на ділянці dt (без урахування попередніх).

Для розв'язування задачі Беллман застосував прийом, що полягає у посуванні від кінця процесу ($t=T$) до його початку ($t=0$).

У результаті було отримане рівняння динамічного програмування у безперервній формі, яке у найпростішому випадку для системи першого порядку з однією керуючою дією має вигляд:

$$\min_{u \in G_u} \left\{ F(y_0, u_0) + \frac{dS(y)}{dy} \varphi(y_0, u_0) \right\} = 0, \quad (26)$$

де y_0, u_0 – початкові значення вихідної координати і керування,

S – мінімальне значення функціоналу (25), яке залежить від початкових умов.

Для отримання мінімуму рівняння (26) необхідно продиференціювати за керуванням u . Тоді умову мінімуму (26) можна замінити системою:

$$\begin{cases} F(y, u) + \frac{dS(y)}{dy} \varphi(y, u) = 0; \\ \frac{\partial F(y, u)}{\partial u} + \frac{\partial \varphi(y, u)}{\partial u} \frac{dS(y)}{dy} = 0. \end{cases} \quad (27)$$

де y, u – поточні значення вихідної координати і керування.

З другого рівняння системи (27) визначають $dS(y)/dy$, а потім з першого рівняння знаходять шукану залежність $u=f(y)$.

У випадку, коли система має n вихідних координат і m керувань, рівняння (27) матимуть вигляд:

$$\begin{cases} F(\bar{y}, \bar{u}) + \sum_{i=1}^n \frac{dS(\bar{y})}{dy_i} \varphi_i(\bar{y}, \bar{u}) = 0; \\ \sum_{j=1}^m \frac{\partial F(\bar{y}, \bar{u})}{\partial u_j} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{\partial S(\bar{y})}{\partial y_j} \frac{\partial \varphi_i(\bar{y}, \bar{u})}{\partial u_j} = 0. \end{cases} \quad (28)$$

Наведена система рівнянь є найпоширенішою формою запису рівнянь Беллмана. При цьому функція $S(\bar{y})$ має бути безперервною й диференційованою за y_i , а dS/dy_i відіграє ту саму роль, що і множник λ у задачі на умовний екстремум. Функція ϕ аналогічна рівнянню зв'язку (21).

7.4 Аналітичне конструювання оптимальних регуляторів

Аналітичним конструюванням регуляторів (АКР) називається методика синтезу оптимального регулятора для заданого об'єкта при заданих обмеженнях і критерію оптимальності, що задається у квадратичній інтегральній формі вигляду (10.8):

$$I = \int_0^{\infty} \left[y^2 + r_1 \dot{y}^2 + \dots + r_n (y^{(n)})^2 \right] dt.$$

Ця методика вперше була запропонована у роботах Р.Калмана. Кожний з підходів має свої особливості, однак обидва рішення приводять до аналогічних результатів.

Суть задачі АКР полягає у визначенні варіаційними методами керуючої дії, яка мінімізує функціонал, що характеризує відхилення траєкторії справжнього руху системи від бажаної. У процесі аналітичного конструювання регуляторів відшукують закон керування у його аналітичній формі як деяку функцію фазових координат початкової системи. Таким чином, спочатку для заданого об'єкта керування при існуючих обмеженнях відшукують оптимальну траєкторію руху системи, а потім шляхом АКР визначають диференціальне рівняння (алгоритм керування) регулятора, що гарантує мінімальне відхилення траєкторії руху об'єкта керування від знайденої оптимальної траєкторії.

Узагалі рівняннями, що описують поведінку керуючого пристрою, можуть бути рівняння Ейлера, але вони не завжди виявляються такими, що реалізуються. Крім того, ці рівняння мають неприємну властивість: якщо час процесу керування у безперервній системі є скінченним, то рівняння Ейлера, що розглядають разом з рівняннями об'єкта, відповідають нестійкій системі

регулювання. Так, у разі лінійного об'єкта і квадратичного функціоналу рівняння Ейлера є лінійними, причому серед коренів характеристичного рівняння обов'язково є як ліві, так і праві корені.

Якщо приєднання регулятора робить системи нестійкою, то це приєднання не може бути тривалим. Якщо відомо, що процес оптимального керування має спорадичний (одиничний, від випадку до випадку) характер, то можна піти на використання нестійкої системи, вмикаючи її лише на той момент, коли виникла потреба здійснити оптимальне керування, і обов'язково вимикаючи її після завершення керування. У тих випадках, коли регулятор має бути весь час підключеним до об'єкта, необхідно вжити заходів щодо забезпечення стійкості системи.

Цю задачу можна розв'язати шляхом відкидання у розв'язку рівняння складових, що відповідають додатним кореням. При цьому час керування стає нескінченно великим, проте функціонал набуває найменше з усіх можливих значення для різних T .

Розглянемо окремі випадки такого роду систем і знайдемо рівняння екстремалі, що реалізує екстремум функціоналу (10.8) для цих випадків.

Нехай критерієм якості роботи системи слугує функціонал вигляду:

$$I_1 = \int_0^{\infty} (y^2 + r_1 \dot{y}^2) dt. \quad (29)$$

Для знаходження екстремалі складаємо рівняння Ейлера (14). У даному випадку $F = y^2 + r_1 \dot{y}^2$, а значить:

$$\frac{\partial F(y, \dot{y}, t)}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F(y, \dot{y}, t)}{\partial \dot{y}} \right) = 2y - 2r_1 \ddot{y} = 0, \text{ або } y - r_1 \ddot{y} = 0. \quad (30)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$1 - r_1 s^2 = (1 + s\sqrt{r_1})(1 - s\sqrt{r_1}) = 0. \quad (31)$$

Для знаходження екстремалі необхідно враховувати тільки корені рівняння: $1 + s\sqrt{r_1} = 0$, інакше система буде нестійкою. Таким чином, розв'язок рівняння (30) для стійкої системи має вигляд:

$$y = Ce^{s_1 t}, \text{ де } s_1 = -1/\sqrt{r_1}.$$

Сталу C визначають із початкових умов: при $t = 0, y = y_0$, тоді

$$y = y_0 e^{s_1 t}. \quad (32)$$

Рівняння (32) є рівнянням екстремалі. Зазначимо, що екстремаль відповідає розв'язку диференціального рівняння першого порядку: $T\dot{y} + y = 0$ з характеристичним рівнянням $Ts + 1 = 0$, де T – постійна часу. Вагову константу r_1 можна подати через цю постійну часу T , якщо дорівняти поліноми:

$$1 + s\sqrt{r_1} = 1 + Ts.$$

Звідси $r_1 = T^2$, і тоді рівняння екстремалі матиме вигляд:

$$y = y_0 e^{-t/T}. \quad (33)$$

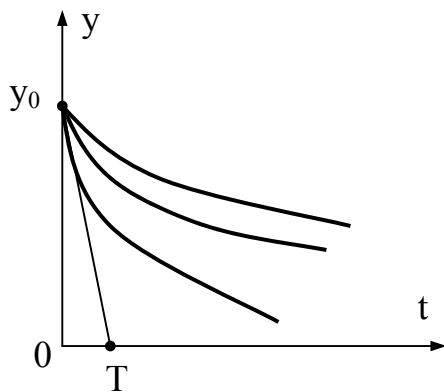


Рис.7.6– Поле екстремалей

Таким чином, при мінімізації функціоналу вигляду (29) структуру або параметри системи слід підбирати так, щоб перехідний процес у системі наближався до аперіодичного (33). Оскільки величина T може бути взята різною, то маємо поле екстремалей (рис.), з яких вибираємо екстремаль, яка найбільш повно відповідає вимогам до системи.

Наприклад, якщо $|\dot{y}| \leq \dot{y}_{пр.}$, то при $t = 0$:

$$|\dot{y}_0| = |\dot{y}_{max}| \leq \dot{y}_{пр.}. \text{ Тоді } \dot{y}_{пр.} = \frac{|y_0|}{T}; T = \frac{|y_0|}{\dot{y}_{пр.}},$$

де $\dot{y}_{пр.}$ - припустиме значення похідної від вихідної координати.

Зазначимо, що при $T=0$ отримуємо звичайний квадратичний інтегральний критерій:

$$I_2 = \int_0^{\infty} y^2 dt. \quad (34)$$

У цьому випадку рівняння екстремалі: $y = 0$. Фізично це означає, що при ступінчастому змінюванні керуючої дії вихідна координата y повинна змінитися стрибком від значення y_0 до $y=0$. Зрозуміло, що в інерційній системі такий режим не можна реалізувати. Зазначимо також, що прагнення прискорити змінювання вихідної координати призводить до різкого збільшення коефіцієнта підсилення у ланцюгу зворотного зв'язку, що, у свою чергу, сприяє збільшенню коливальності процесу.

Аналогічно можна розв'язувати задачу і для об'єктів більш високих порядків, але обчислення стають більш громіздкими.

Методи аналітичного конструювання регуляторів з розповсюдженням на різні випадки обмежень останнім часом суттєво розширені. Розв'язок загальних задач АКР лінійних об'єктів доведено до рівнянь для визначення коефіцієнтів оптимальних керувань.

Висновки по розділу

Одним з видів автоматичного керування є оптимальне керування, яке застосовують у технічних системах для підвищення ефективності виробничих процесів, і в системах організаційного управління для вдосконалення діяльності підприємств та організацій.

Під час розробки автоматичних систем насамперед ставиться задача виконання функціонального призначення системи, що визначається метою керування. Більш складною є задача розробки системи з найкращими показниками якості – оптимальної системи. Оцінку досяжності мети у процесі керування об'єктом, яка подана у формалізованому вигляді, називають критерієм оптимальності або цільовою функцією. Розробка оптимальної системи - це задача синтезу або задача оптимізації.

Під час розробки оптимальних систем автоматичного керування необхідно враховувати різні обмеження, що накладають на координати і показники якості процесу.

Усі обмеження координат і керувань можна розділити на два типи: природні та умовні.

Природні обмеження фазових координат обумовлені принципом роботи об'єкта. Наприклад, частота обертання асинхронного електродвигуна не може бути більшою за синхронну частоту; вихідні сигнали підсилювача обмежені через явище насичення і т.д.

Умовні обмеження координат уводять свідомо. Наприклад, величину струму якоря електродвигуна постійного струму обмежують умовами нормальної комутації на колекторі, нагрівом струмопровідних частин, граничною температурою ізоляції обмоток. Наявність умовних обмежень координат звичайно обумовлює введення обмежень на керування.

Кусково-безперервні керування дозволяють отримати для достатньо широкого класу прикладів точний математичний розв'язок оптимальної задачі та є достатньо наочними і зручними для технічної реалізації.

Важним етапом під час розробки оптимальних систем є формулювання мети оптимізації, яка математично виражається як вимога забезпечення мінімуму чи максимуму деякого показника якості (критерію оптимальності).

Як критерій оптимальності, можуть бути прийняті різні технічні та техніко-економічні показники й оцінки.

У випадках, коли необхідно забезпечити найкращу роботу системи за найгірших можливих умов, застосовують мінімаксний критерій оптимальності.

Формування критерію оптимальності, що визначає мету оптимізації, - це інженерна та інженерно-економічна задача, яку розв'язують на підставі глибокого та всебічного вивчення об'єкта, яким керують.

Якщо необхідно врахувати різні показники якості, задача вибору критерію оптимальності ускладнюється, оскільки вимоги до системи звичайно є суперечними. У зв'язку з цим як основний беруть критерій якості функціонування.

Для того, щоб повністю завдати рух об'єкта, необхідно знати його фазовий стан у початковий момент часу t_0 і вибрати керування $u(t)$.

Цей вибір здійснюють за таких умов:

- задані крайові умови, тобто початковий $y(t_0)$ і кінцевий $y(t_k)$ стан об'єкта;
- оптимальність керування оцінюється за максимумом чи мінімумом функціоналу (10.3);
- на керування і змінні стану накладають обмеження (10.1);

Конкретизація всіх цих умов породжує різні типи задач оптимізації, які можна розділити на три групи за способом завдання:

- функціоналу I ;
- обмежень;
- крайових умов.

За способом завдання обмежень задачі розділяють на:

- задачі з обмеженням на керування;
- задачі з обмеженням на фазові змінні;
- задачі зі спільним обмеженням на керування і на фазові змінні.

За способом завдання крайових умов задачі можна розділити на:

- задачі з фіксованими кінцями: задані значення $y(t_0)$ і $y(t_k)$, а також моменти часу t_0 і t_k ;
- задачі з вільними кінцями: якщо $y(t_0)$ чи $y(t_k)$ не задані, то маємо задачу з вільним лівим чи правим кінцем відповідно;
- задачі з рухомими кінцями: у цьому випадку значення t_0 і t_k зафіксовані, а вектори стану $y(t_0)$ і $y(t_k)$ задані деякими множинами G_{t_0} і G_{t_k} .

За видом дії над змінними залежності можуть бути алгебраїчними і диференціальними. Задачі, що містять диференціальні залежності у функції часу, називають задачами динамічної оптимізації чи оптимального керування.

Методи варіаційного числення можна умовно розділити на класичні й сучасні. До класичних належать методи, що ґрунтуються на рівняннях Ейлера, Лагранжа, Якобі, Вейерштрасса. Їх доцільно застосовувати до задач, у яких області змін $u(t)$ і $y(t)$ не містять обмежень. Це має місце, коли розглядають малі відхилення $u(t)$ і $y(t)$ від усталених станів.

Сучасні методи ґрунтуються на принципі максимуму Понтрягіна і методі динамічного програмування Беллмана. Їх перевагами є можливість урахування обмежень на керування та змінні стану, а також придатність до застосування ЕОМ.

Задачі синтезу алгоритмів оптимального керування об'єктами у динаміці при вибраному функціоналі критерію якості мають додаткові (умовні) обмеження у вигляді рівнянь математичної моделі динаміки об'єкта. Екстремум функціоналу, що визначається за додаткових умов (функціональних обмеженнях), називають умовним екстремумом.

Порушення умов, на яких ґрунтується класичне варіаційне числення, не дозволяє розв'язувати цими методами широке коло задач теорії автоматичного керування.

Ці труднощі можна подолати за допомогою нових методів розв'язування задач теорії оптимальних систем – методу динамічного програмування і принципу максимуму.

За допомогою динамічного програмування можна розв'язувати задачі, що є дискретними за своєю природою. Це має велике значення для найрізноманітніших галузей техніки та економіки, пов'язаних з дискретними процесами виробництва.

У основі методу лежить принцип оптимальності. Відповідно до цього принципу оптимальне керування визначається кінцевою метою керування і станом системи у даний момент часу незалежно від того, яким чином система дійшла до цього стану, тобто від “передісторії” системи. Це означає, що для будь-якої оптимальної траєкторії кожна ділянка, яка зв'язує будь-яку проміжну точку цієї траєкторії з кінцевою, також є оптимальною траєкторією. Іншими словами, друга ділянка оптимальної траєкторії є оптимальною траєкторією.

Аналітичним конструюванням регуляторів (АКР) називається методика синтезу оптимального регулятора для заданого об'єкта при заданих обмеженнях і критерію оптимальності.

Суть задачі АКР полягає у визначенні варіаційними методами керуючої дії, яка мінімізує функціонал, що характеризує відхилення траєкторії справжнього руху системи від бажаної. У процесі аналітичного конструювання регуляторів відшуковують закон керування у його аналітичній формі як деяку функцію фазових координат початкової системи. Таким чином, спочатку для заданого об'єкта керування при існуючих обмеженнях відшуковують оптимальну траєкторію руху системи, а потім шляхом АКР визначають диференціальне рівняння (алгоритм керування) регулятора, що гарантує мінімальне відхилення траєкторії руху об'єкта керування від знайденої оптимальної траєкторії.

Методи аналітичного конструювання регуляторів з розповсюдженням на різні випадки обмежень останнім часом суттєво розширені. Розв'язок загальних задач АКР лінійних об'єктів доведено до рівнянь для визначення коефіцієнтів оптимальних керувань.