

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Розробка та дослідження асинхронного електропривода головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням»

КНУ.МР.141.25.665-01

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-24м _____/Микола БІЛЕНКО/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____/Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

БІЛЕНКО Микола Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка та дослідження асинхронного електропривода
головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

1. Термін подання студентом роботи: 15 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка асинхронного електропривода головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням. Завданням є дослідження асинхронного електропривода головного підйому мостового крана
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Структура електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням; II. Структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням; III. Розробка засобів реалізації структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Мостовий кран; II. Кінематична схема головного підйому; III. Діаграми швидкості та моментів; IV. Моделювання динамічних режимів електроприводу; V. Принципова схема системи керування мостового крана;

VI. Функціональна схема електропривода за системою ПЧ-АД

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Осадчук Ю.Г.		
II	Осадчук Ю.Г.		
III	Осадчук Ю.Г.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Перетворювальний пристрій для потреб електромеханічної системи головного підйому	12.10.25
2	Математичний опис структури електромеханічної системи з оптимальним частотно-струмовим керуванням	17.10.25
3	Розрахунок елементів системи керування	26.10.25
4	Перехідні процеси у системі керування з оптимальним частотно-струмовим керуванням	28.11.25
5	Складання алгоритму функціонування системи керування з оптимальним частотно-струмовим керуванням	07.12.25

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Біленко М.В.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Осадчук Ю.Г.
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему «Розробка та дослідження асинхронного електропривода головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням»
КНУ.РМ.141.25.665-01

Мета дослідження – розробка та дослідження асинхронного електропривода головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Об'єкт дослідження – асинхронний електропривод головного підйому мостового крана.

Предмет дослідження – асинхронний електропривод з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Було наведено загальний вигляд структури електромеханічної системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури електромеханічної системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Було наведено загальний вигляд структури системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Була розроблена структура моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Була удосконалено контур керування струмом електромеханічної системою головного підйому мостового крана з розробкою оптимального частотного керування.

Відповідно до удосконаленого контуру керування струмом електромеханічної системою головного підйому мостового крана було налаштовано параметри системи оптимального частотного керування.

МОСТОВИЙ КРАН, ГОЛОВНИЙ ПІДЙОМ, АСИНХРОНИЙ
ЕЛЕКТРОПРИВОД, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЧАСТОТНО-СТРУМОВЕ
КЕРУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. Структура електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	10
1.1. Перетворювальний пристрій для потреб електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	10
1.2. Математичний опис структури електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	11
1.3. Параметри системи керування	15
2. Структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	16
2.1. Розрахунок елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	16
2.2 Принципові схеми елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	18
2.2 Перехідні процеси у системі керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	20
3. Розробка засобів реалізації структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	26

3.1 Розробка структури елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	26
3.2 Розробка принципової схеми системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	29
3.3 Розробка моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	32
3.4 Складання алгоритму функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням	33
Висновки	36
Список використаних джерел.....	38
Додатки	41

ВСТУП

Вибір роду струму та типу для електроприводу має велике значення, як технічні можливості тому що ним пов'язані такі показники, електропривода, маса і розміри електрообладнання, надійність і простота обслуговування, капіталовкладення, вартість експлуатаційних витрат.

Зростаюча необхідність якості технологічного процесу до вимог виробничого процесу, необхідності впроваджувати високі технологічні розробки обумовлюють до стійкої тенденції впровадження в різноманітні галузі промисловості регульованого електроприводу.

Розвиток математичних засад та теорій електричних машин змінного роду струму, створення удосконаленої силової напівпровідникової техніки й перетворювачів на їх основі, а також використання сучасних методів керування, які містять мікропроцесорні пристрої, дозволить створювати надійні та якісні системи регульованого асинхронного електроприводу, які останнім часом стають більш поширені за існуючі, оскільки завойовують промислові ринки систем регульованого електроприводу. Так електропривод змінного струму складає 68%, електропривод постійного - 15%, механічний та гідравлічний приводи - 17%.

Це пов'язано з тим, що в діапазоні потужностей електроприводу до 100 кВт їх виробництво збільшилось у 40-50 разів, ніж двигунів постійного струму, такої саме потужності.

Широке використання регульованого електроприводу призводить до того, що сучасні системи електроприводу стають не лише енергетичною основою, яка дозволить забезпечити промислові механізми та комплекси необхідною механічною енергією, але й засобом керування технологічним процесом, оскільки завдання на реалізацію якості виробничого процесу на

тепер у більшості випадків покладають на систему керування регульованим електроприводом у поєднанні з системами технологічної автоматики.

В зв'язку із збільшенням цін на енергоносії, особливо електричну енергію, і обмеженням можливостей збільшення електричної потужності генеруючих установок, проблема енергозбереження для електроприводів стає актуальним завданням.

1. Структура електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

1.1. Перетворювальний пристрій для потреб електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Живлення двигунів змінного струму може здійснюватись від тиристорних та транзисторних ПЧ які може бути виконані як із безпосереднім зв'язком, так і за допомогою таких, які містять керовані випрямлячі, які підключені до мережі живлення змінного струму, а також можуть бути використані й дволанкові перетворювачі частоти з автономними інверторами.

Вибір типу перетворювача частоти має залежати від частоти напруги живлення, та необхідного діапазону зміни частоти на виході перетворювача, який може бути визначено завдяки діапазону зміни швидкості обертання електричної машини, а також потужністю та діапазоном зміни навантаження на валу електричного двигуна, наявністю або відсутністю режиму реверсування.

При частоті напруги живлення 50 Гц та вихідній частоті 25...12,5 Гц та нижче, доцільно використовувати перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком.

При частотах 50 Гц або нижче, краще використовувати перетворювачі з автономними інверторами напруги (AІН) або струму (AІС).

При широкому діапазоні регулювання швидкості двигуна такі перетворювачі використовуються лише у замкнених системах електроприводу.

1.2. Математичний опис структури електромеханічної системи головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Визначимо параметри схеми заміщення рис.1.1 для моделювання розімкненої системи ПЧ-АД, виходячи із параметрів та характеристик двигуна, перетворювача частоти, і струмообмежуючого реактора.

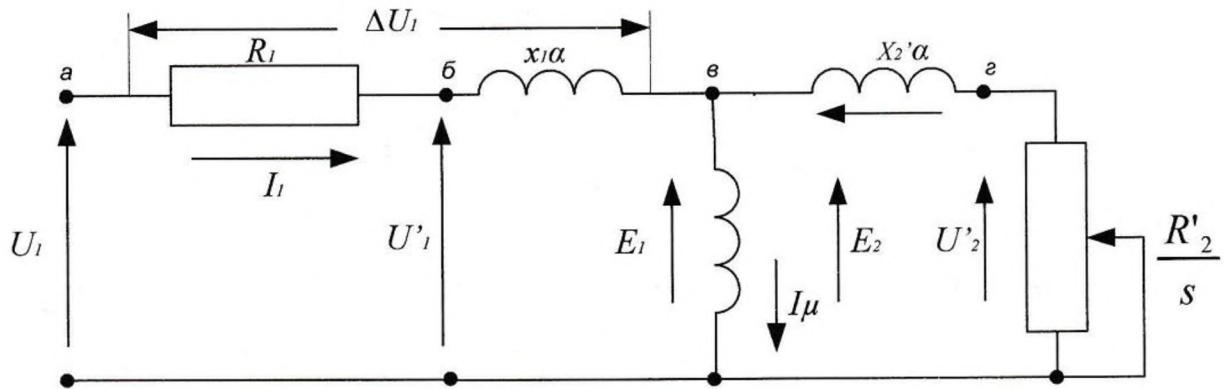


Рис.1.1 – Схема заміщення фази АД

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{U_{\text{тп}}}{U_{\text{к}}} = \frac{U_{\text{тпном}}}{10}, \quad (1.1)$$

$$U_{\text{тп}} = 380 \text{ В}$$

$$k_{ПЧ} = \frac{380}{10} = 38$$

Напруга перетворювача:

$$U = \frac{U_{mH}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (1.2)$$

Кількість пар полюсів двигуна:

$$p_n = \frac{60 \cdot f}{n_0} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \quad (1.3)$$

Критичне ковзання двигуна:

$$S_{\text{крит}} = S_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_H} + \sqrt{\frac{M_{\text{max}}^2}{M_H^2} - 1} \right) \quad (1.4)$$

$$S_{\text{крит}} = 0,066 \cdot \left(2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) = 0,246$$

Синхронна швидкість двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с}$$

Номінальна швидкість:

$$\begin{aligned}\omega_n &= \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot n_0(1 - S_n)}{30} = \\ &= \frac{3,14 \cdot 1500(1 - 0,066)}{30} = 146,638 \text{ рад/с}\end{aligned}\quad (1.5)$$

Момент номінальний:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{55000}{146,638} = 375,07 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.6)$$

Момент максимальний:

$$M_{max} = \frac{M_{max}}{M_H} \cdot M_H = 2 \cdot 375,07 = 750,14 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.7)$$

Момент пусковий:

$$M_{\Pi} = \frac{M_n}{M_H} \cdot M_H = 1,7 \cdot 375,07 = 637,619 \text{ H} \cdot \text{м} \quad (1.8)$$

1.3. Параметри системи керування

Коефіцієнти та сталі часу:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,000916}{0,476} = 0,00192 \quad (1.9)$$

$$K_2 = \frac{L_\mu}{L_2} = \frac{0,0096}{0,009704} = 0,9892 \quad (1.10)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R'_2} = \frac{0,009704}{0,1063} = 0,0912 \quad (1.11)$$

$$K_1 = \frac{L_\mu}{L_1} = \frac{0,0096}{0,009704} = 0,9892 \quad (1.12)$$

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,009704}{0,08791} = 0,1103 \quad (1.13)$$

2. Структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

2.1. Розрахунок елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Запишемо основні рівняння для розрахунку елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

$$W_{pn}(p) = \frac{R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)}{2 \cdot T_\mu \cdot K_2 \cdot R_2 \cdot K_{дп} \cdot K_{пч}} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} W_{pn}(p) &= \frac{0,476 \cdot (0,00192 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,02016 \cdot 0,9892 \cdot 0,1063 \cdot 8,963 \cdot 31,63} \\ &= 0,0007597 \cdot p + 0,3956 \end{aligned}$$

Отже маємо:

$$W_{pn}(p) = K_{ПРП} + \frac{K_{ІРП}}{p} \quad (2.2)$$

$$K_{ПРП} = 0,0007597 \frac{\text{А}}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad (2.3)$$

$$K_{\text{IPP}} = 0,3956 \frac{A}{B \cdot c} \quad (2.4)$$

2.2 Принципові схеми елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Складемо принципові схеми елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

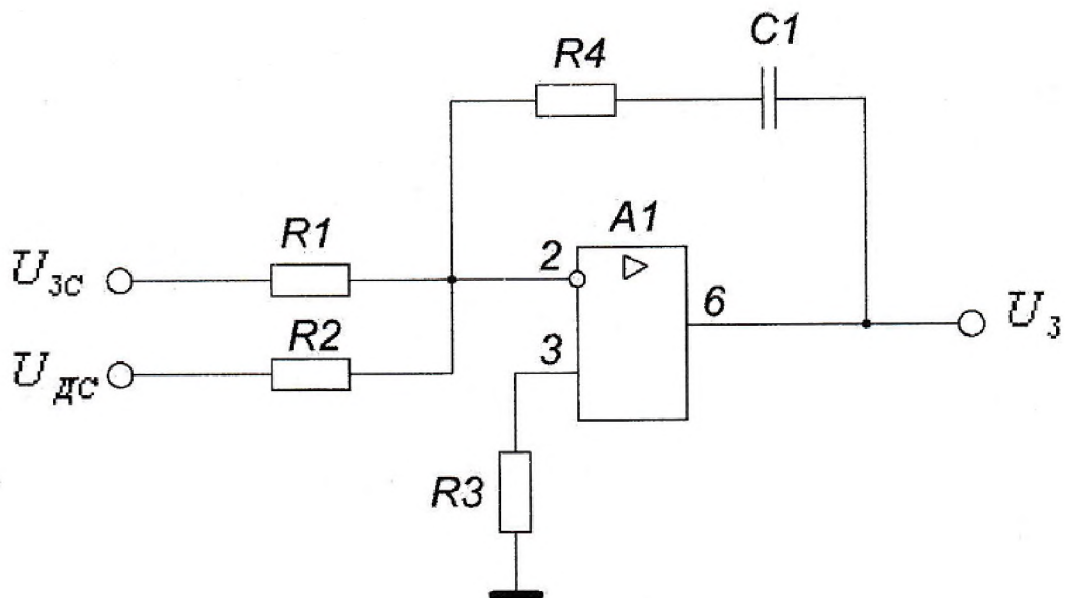


Рис.2.1 – Принципова схема РС

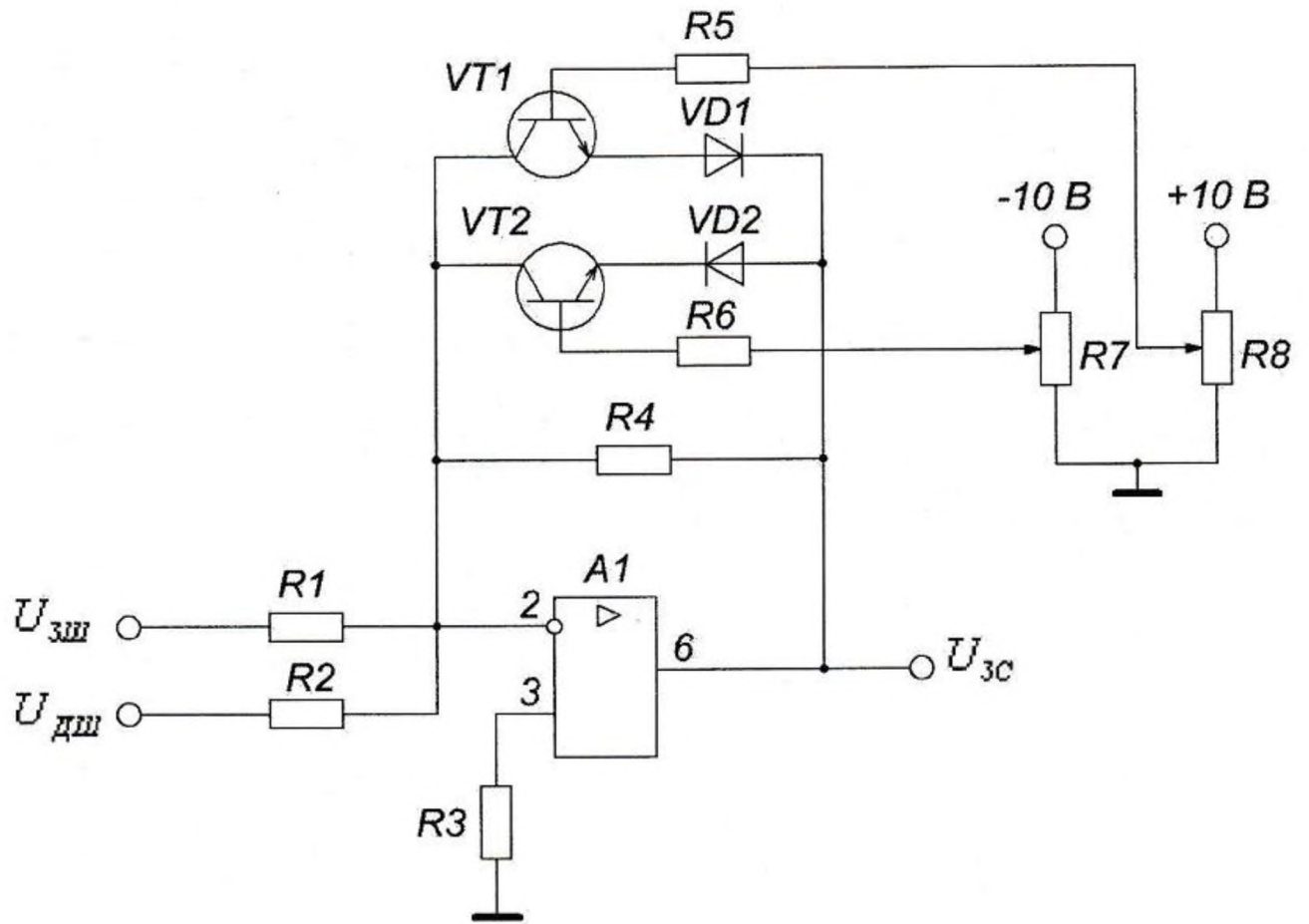


Рис.2.2 – Принципова схема РШ

2.2 Перехідні процеси у системі керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Модель замкненої системи представлена на рис.2.3.

Моделювання замкненої системи відбувається у два етапи. Перший прямий пуск без навантаження.

І другий пуск з подальшим накидом навантаження через 1,3 с із статичним моментом $M_{ст} = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$, оскільки щоб підняти вантаж необхідно спочатку вибрати канат, і створити певний його натяг, що відповідає часовому відрізку 1,3 с.

Графіки перехідних процесів по швидкості та струму замкненої системи ЕП ПЧ-АД відповідно для першого та другого випадків зображено на рис.2.4 та рис.2.5 відповідно.

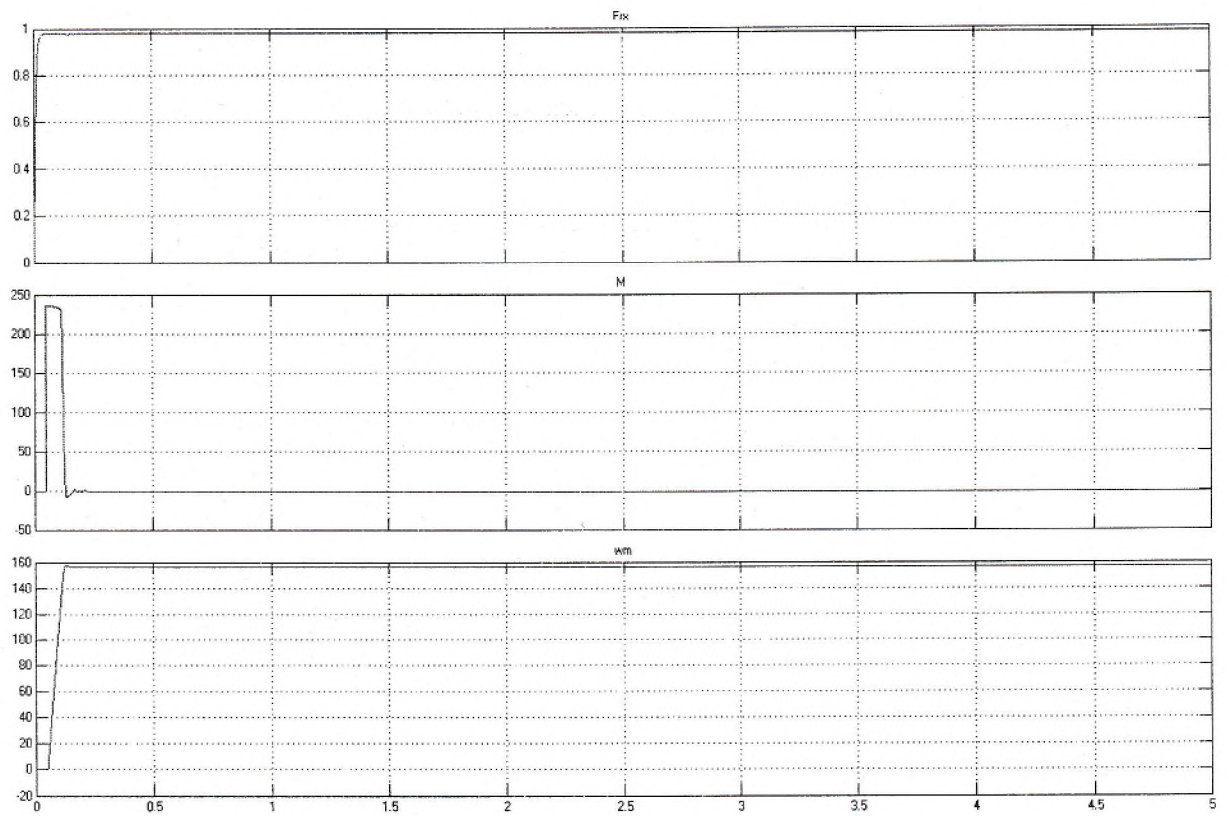


Рис.2.4. – Прямой пуск

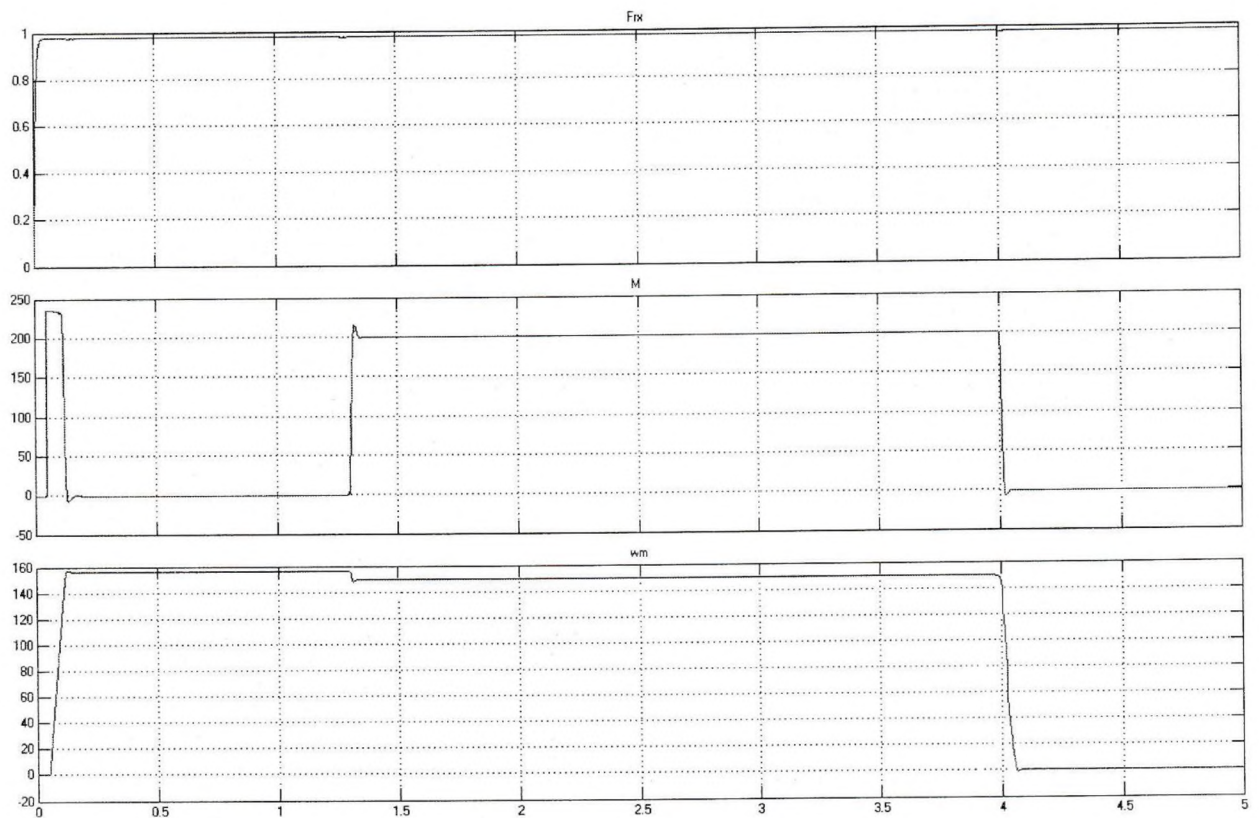


Рис.2.5. – Прямий пуск з розгоном, накидом навантаження та гальмуванням

Аналізуючи перехідний процес по швидкості, можна зазначити:

- 1) розгін двигуна до швидкості 157 рад/с за 1,3 с є прийнятним та відповідає завданню;
- 2) розгін двигуна відбувається плавно, з регламентованим прискоренням;
- 3) при накиді навантаження відбувається зовсім незначне падіння швидкості, що є допустимим.

Графіки перехідних процесів по струму характеризують такі особливості:

- 1) пусковий стрибок менший за $2,5 \cdot I_n$, що є прийнятним для системи ПЧ-АД;
- 2) при розгоні струм не перевищує значення 2.1%, але оскільки розгін відбувається за час менше 15 с, то перевантаження ПЧ немає;
- 3) перерегулювання за усі етапи моделювання режимів не перевищують значень 5%, що для системи ЕП крана є прийнятним.

3. Розробка засобів реалізації структура системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

3.1 Розробка структури елементів системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Важливим елементом системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням є датчик струму.

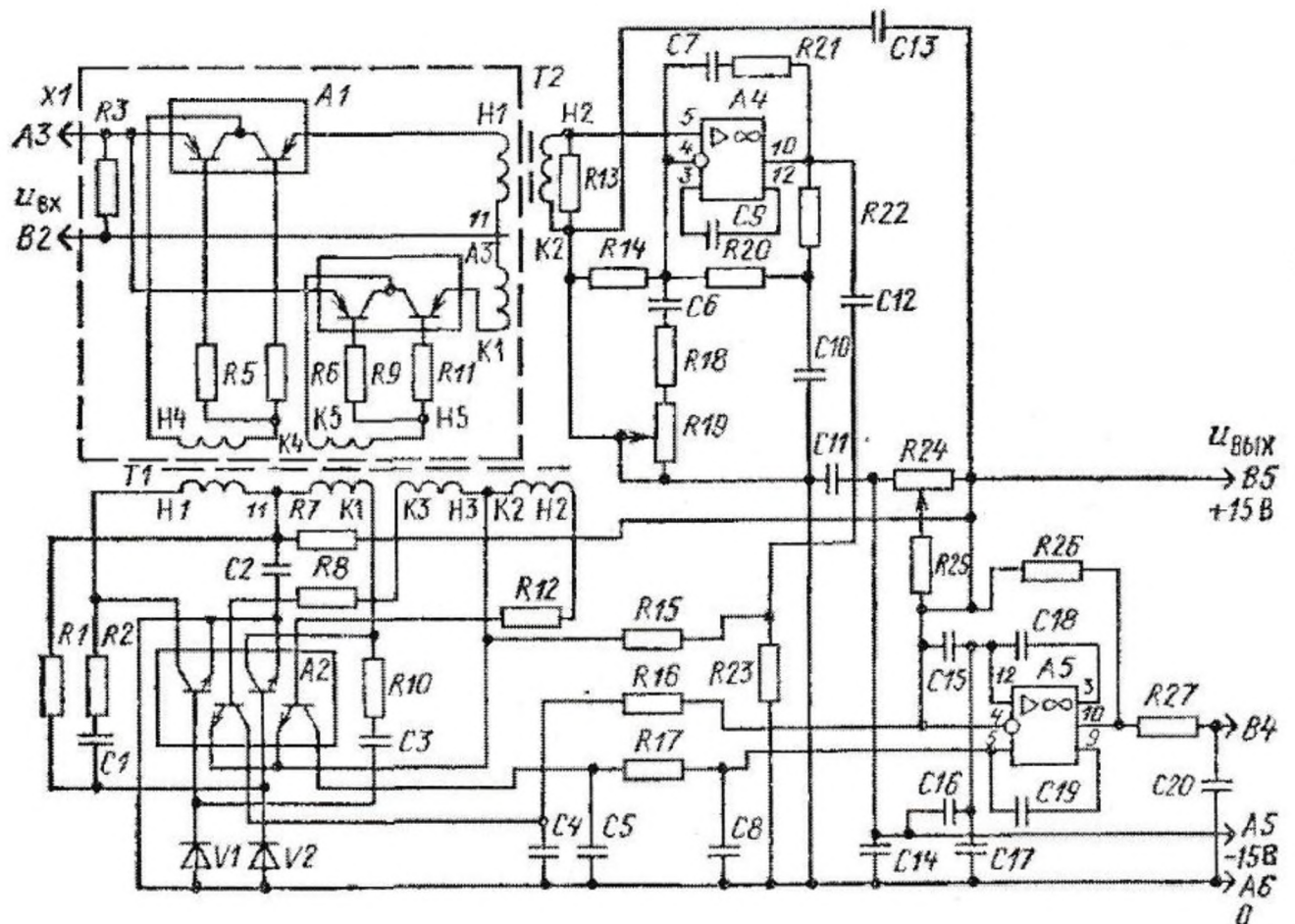


Рис.3.1. – Принципова схема датчика струму

Також важливим елементом системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням є датчик поточозчеплення.

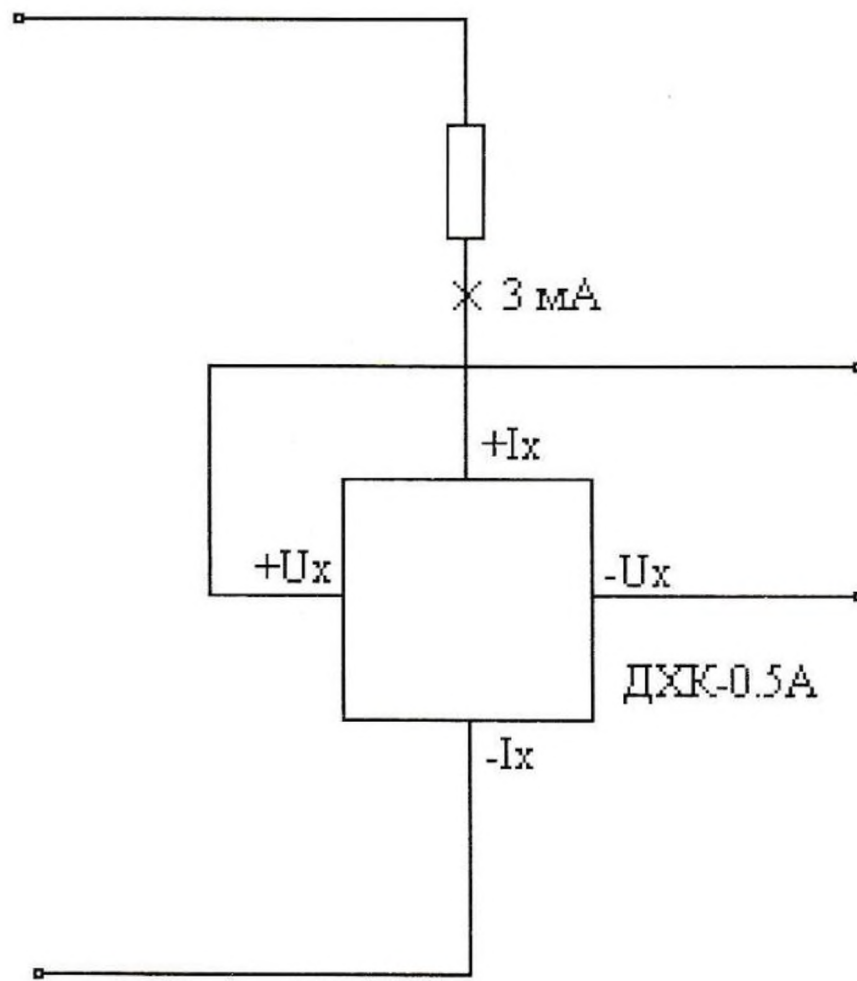


Рис.3.2. – Принципова схема датчика потокозчеплення

3.2 Розробка принципової схеми системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Розроблена принципова схема системи керування замкненої системи ЕП мостового крана 30/5 зображена на рис.3.3.

Силова частина схеми містить перетворювач частоти підключений до мережі через контактори Q1 та Q2, і реле максимального струму також зображена на рис.3.3.

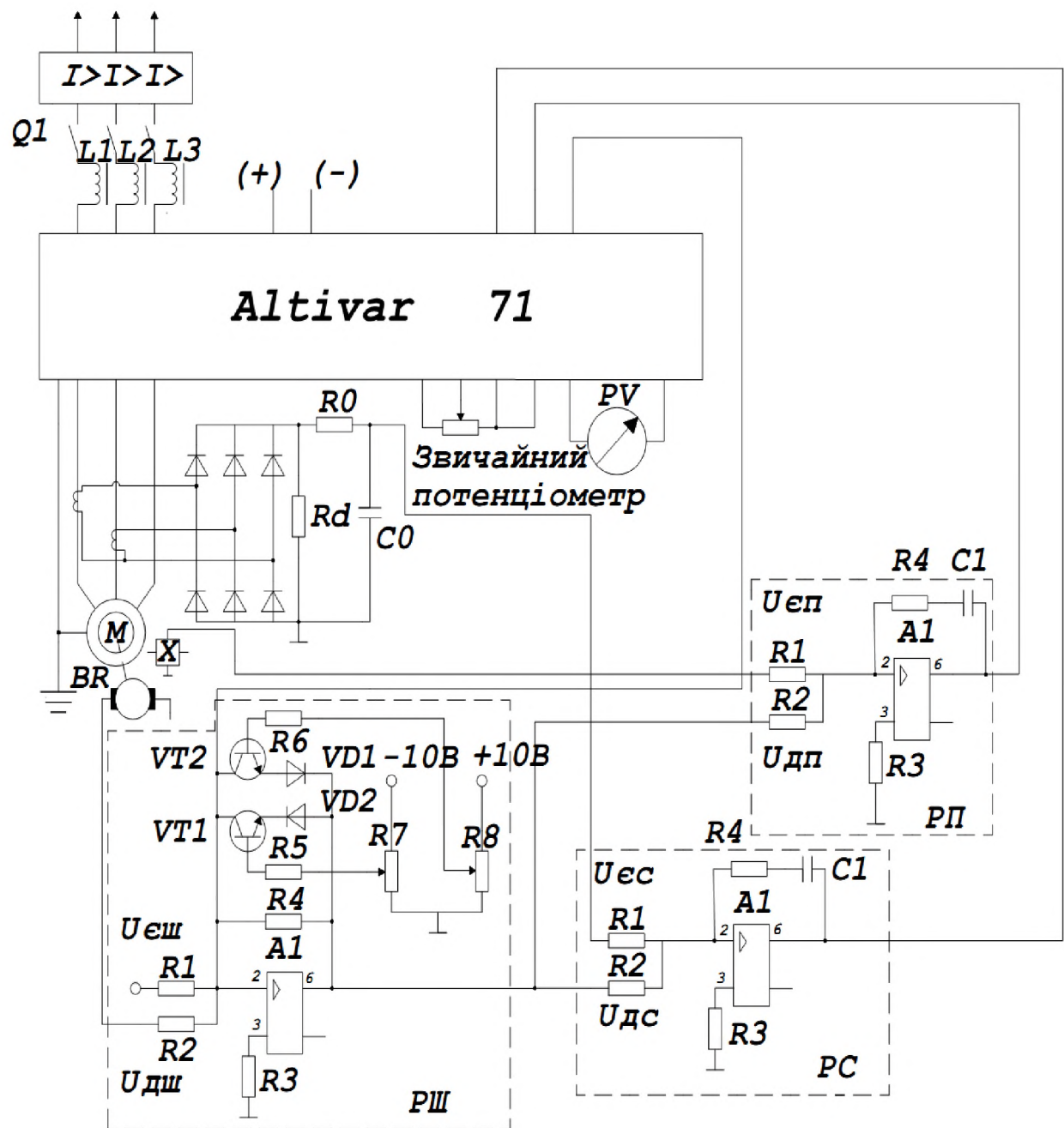


Рис.3.3. – Принципова схема системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

В нульовому положенні команд-контролера SM через контакти автоматичного вимикачів OF2 та аварійного SA1 вмикається реле часу KT1, що виконує функції нульового реле, та лінійний контактор KMM.

Електропривод забезпечує спуск або підйом із заданою швидкістю, якою керує перетворювач частоти змінюючи частоту і амплітуду напруги.

Також в схемі показані реактори змінного струму L1, L2, L3, для контролю швидкості, струму, та магнітного потоку в схемі передбачені датчики та регулятори цих величин.

Також в системі присутні регулятор струму РС, регулятор швидкості РШ, та регулятор потокозчеплення, через які відбувається плавне регулювання швидкості двигуна.

Цьому сприяє робота двигуна при високих значеннях частоти та вихідної напруги перетворювача.

Гальмування привода також здійснюється плавним переходом із відповідної вищої характеристики спуску або підйому на нижчу.

3.3 Розробка моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Модель системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням наведена на рис.3.4.

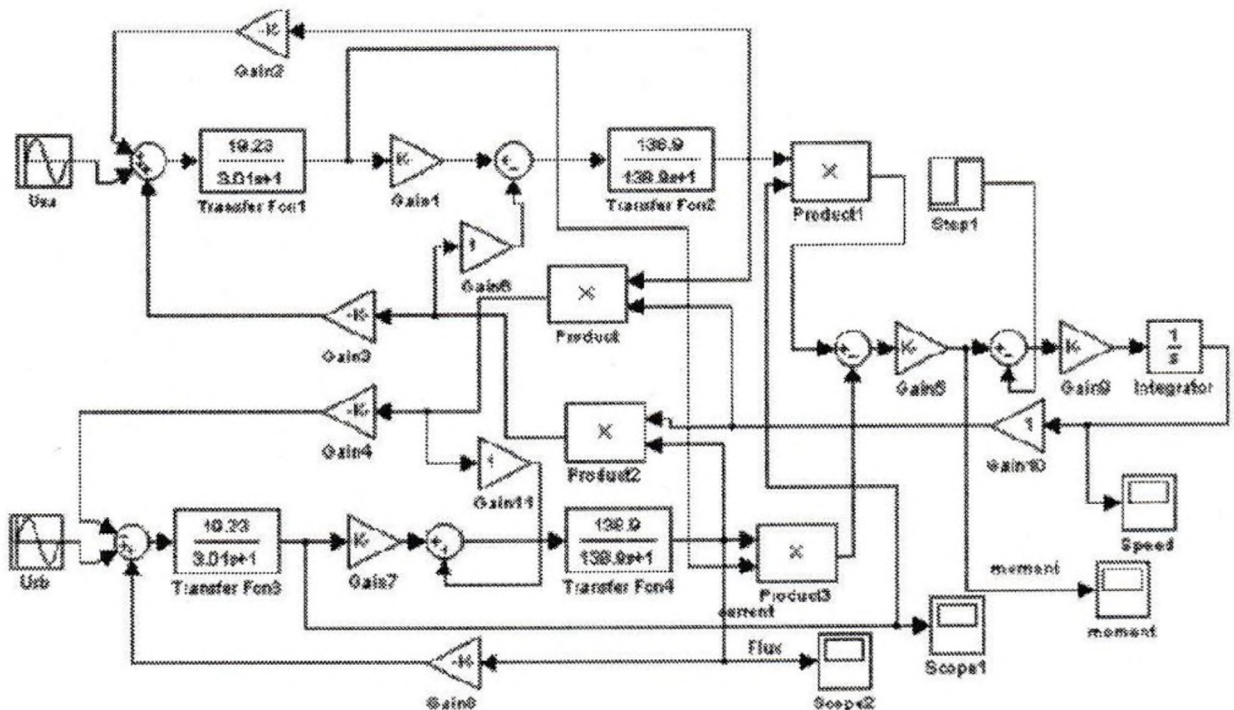


Рис.3.4. – Модель системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

3.4 Складання алгоритму функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Алгоритм функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням наведена на рис.3.5.

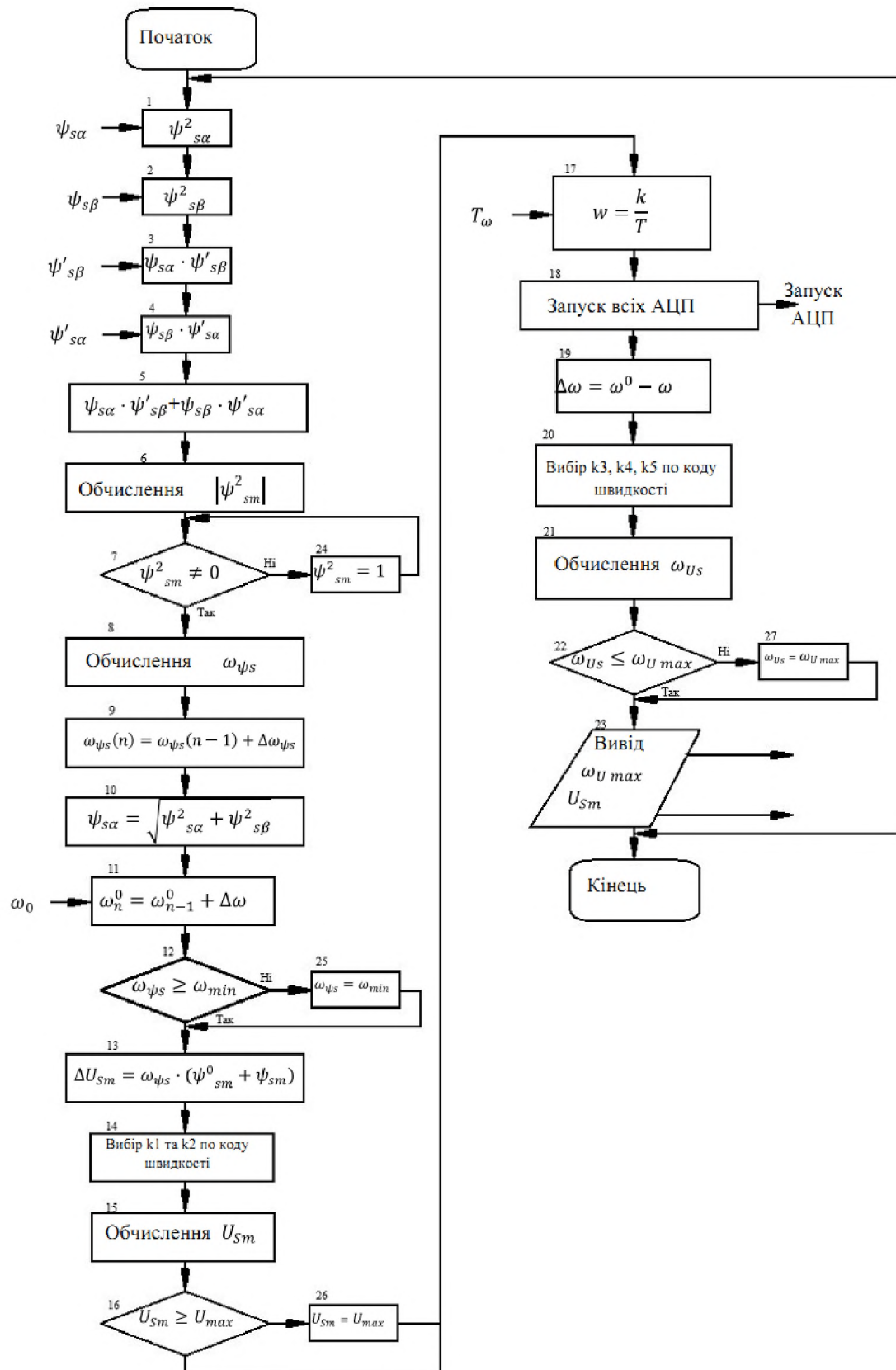


Рис.3.5. — Алгоритм функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

Передатна функція контуру регулювання потокозчеплення відповідно до наведеного алгоритму функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

$$W_p(s) = k_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{k_2 \cdot s}\right)$$

Висновки

Мета дослідження – розробка та дослідження асинхронного електропривода головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Об'єкт дослідження – асинхронний електропривод головного підйому мостового крана.

Предмет дослідження – асинхронний електропривод з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Було наведено загальний вигляд структури електромеханічної системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури електромеханічної системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Було наведено загальний вигляд структури системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Була розроблена структура моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Відповідно до загального вигляду структури моделі системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням було обрано та розраховано елементи що її складають.

Була удосконалено контур керування струмом електромеханічної системою головного підйому мостового крана з розробкою оптимального частотного керування.

Відповідно до удосконаленого контуру керування струмом електромеханічної системою головного підйому мостового крана було налаштовано параметри системи оптимального частотного керування.

Список використаних джерел

1. Gill, Charles Burroughs , Lorig, Clarence H., Shewmon, Paul G. and Charles, James A. "metallurgy". Encyclopedia Britannica, 8 Feb. 2024, <https://www.britannica.com/science/metallurgy>.
2. Kornilov, G.P., Abdulveleev, I.R., Gazizova, O.V. et al. Power Supply at Metallurgical Iron-and-Steel Works: Features and Development Prospects. Metallurgist 65, 783–793 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01216-8>
3. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
4. Науково-технічна революція. Стаття з Вікіпедії. URL: Науково-технічна революція — Вікіпедія ([wikipedia.org](https://uk.wikipedia.org)).
5. Principles of Shearing, Blanking, and Piercing, Metalworking: Sheet Forming, Vol 14B, ASM Handbook, Edited By S.L. Semiatin, ASM International, 2006, p 28–38, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14b.a0005116>
6. The Slitting Line and Steel Slitting Process Explained. Стаття компанії National Material Company. URL: <https://www.nationalmaterial.com/the-slitting-line-and-steel-slitting-process-explained>.
7. Slitting Process Explained. Стаття компанії Fistco. URL: <https://www.fistco.net/blog/slitting-process-explained>.
8. Sheet metal processing equipment catalogue. Каталог компанії ATM Engineering. URL: <https://www.ersengine.com/wp-content/uploads/2019/05/Sheet-metal-processing-equipment-ERS-AMT.pdf>.

9. The Complete Manual on Cutting Machines in the Steel Industry. Стаття компанії Steel Technology. URL: <https://www.steel-technology.com/articles/the-complete-manual-on-cutting-machines-in-the-steel-industry>.
10. Fang, Y., Li, X., Guo, Y. et al. Effects of Driving Parameters on TBM Dynamic Response and Cracking of the Disc Cutter Ring: A Case Study. *Rock Mech Rock Eng* 57, 3063–3082 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03716-2>
11. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
12. АИР180М4. Сайт продавця «Системи якості». URL: https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodivigatelei_air/air-180m4-30-kvt-1500-ob-min.
13. Кравчик А. Е., Шлаф М. М., Афонін В. І., Соболенська Е. А. Асинхронні двигуни серії 4А: довідник. Київ, 1982. 504 с.
14. Перетворювач частоти CHINT NVF2G-30/PS4, 30 кВт, 380 В. URL: <https://ukrprommotor.com.ua/ru/products/preobrazovatel-chastoty-30-kvt-chint-nvf2g-30ps4-380v-dlya-ventilyatorov-i-nasosov>.
15. Програмоване логічне реле Zelio Logic SR2B121BD. Сайт виробника Schneider Electric. URL: <https://bit.ly/3FgQyk2>.
16. M. Popescu and A. Bitoleanu, "New Achievements in the Rotor Field-Oriented Control for Autonomous Locomotives: Part 1: System synthesis and theoretical investigations," 2021 th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE53383.2021.9628690

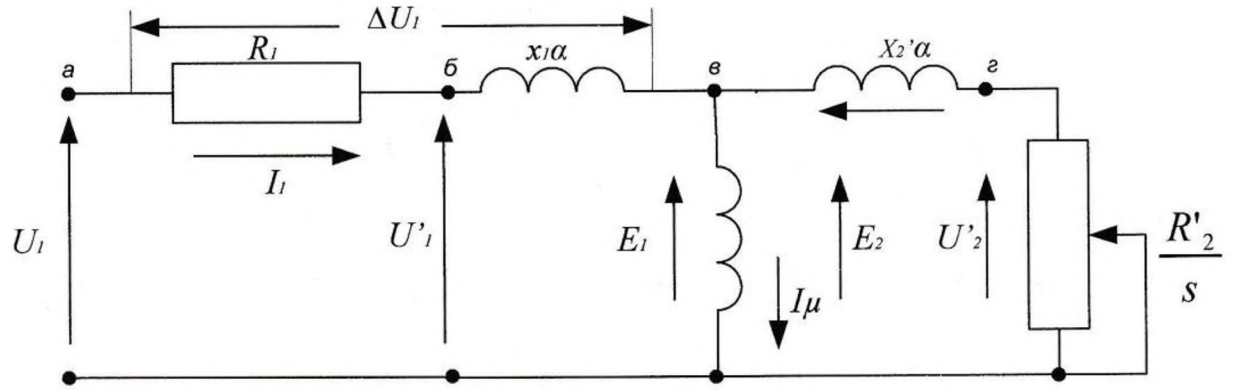
17. Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г. Лисенко В.П. Електропривод: підручник (за ред. Лавріненка Ю.М.). – К.: вид-во Ліп-К., 2009. – 504 с.

18. Heumann K. Trends in semiconductors devices and impact on power electronics and electric drives. PEMS-94, 20-22 sept. 1994. Warsaw, Poland. – P. 1288-1299.

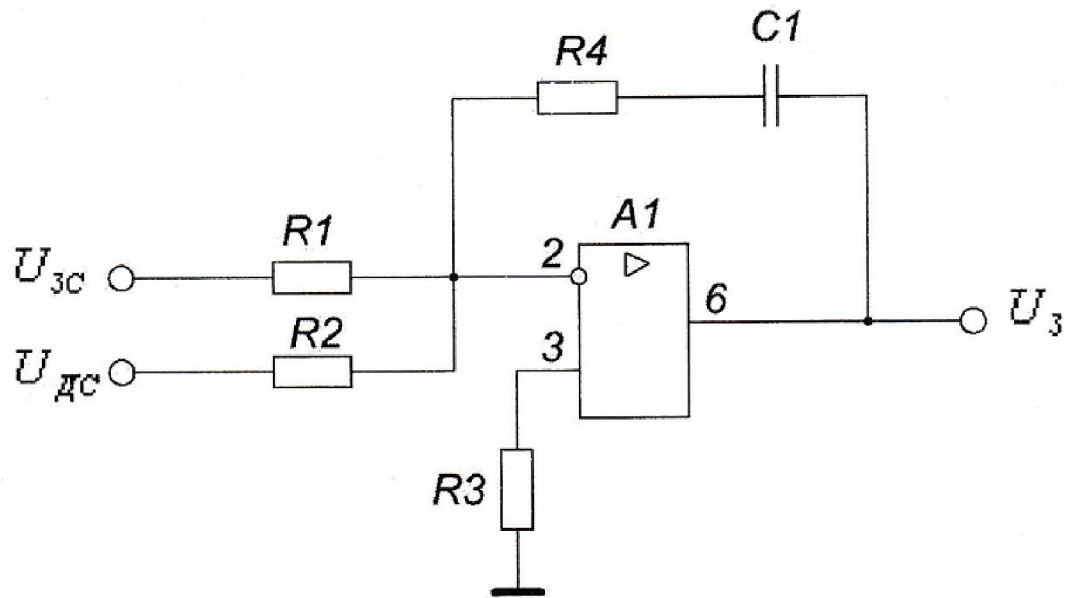
19. Bose Bimal K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.

Додатки

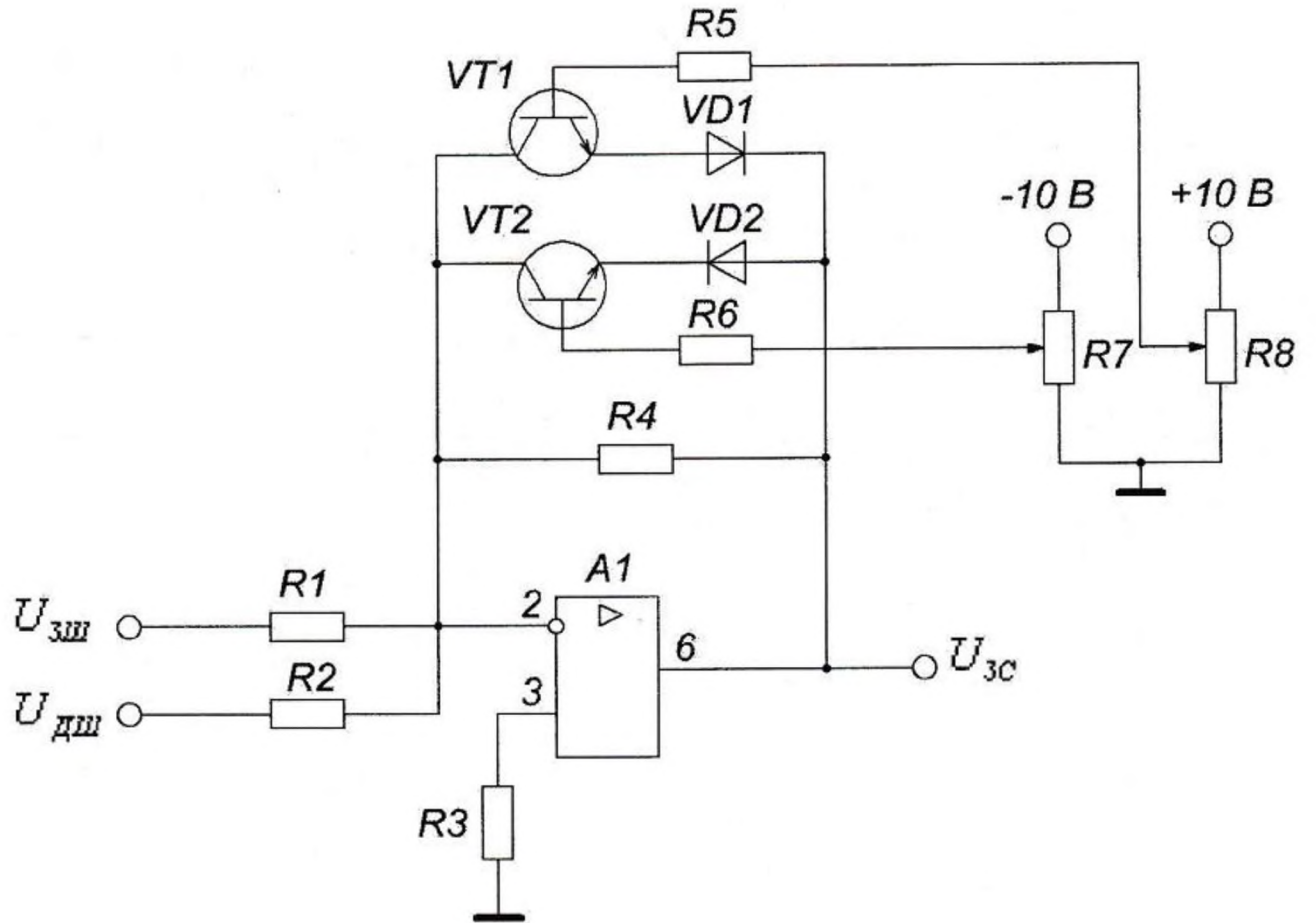
Схема заміщення фази АД



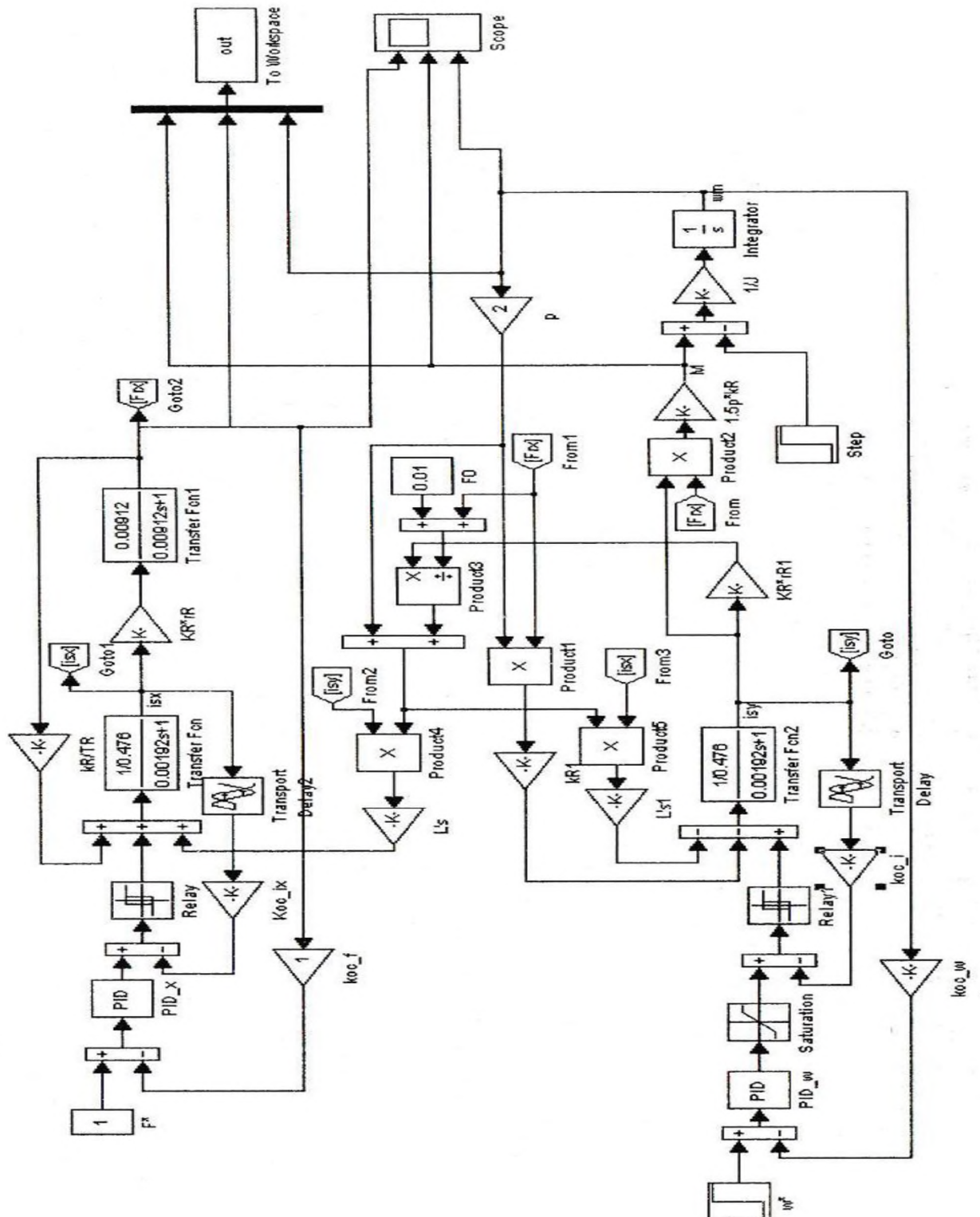
Принципова схема РС



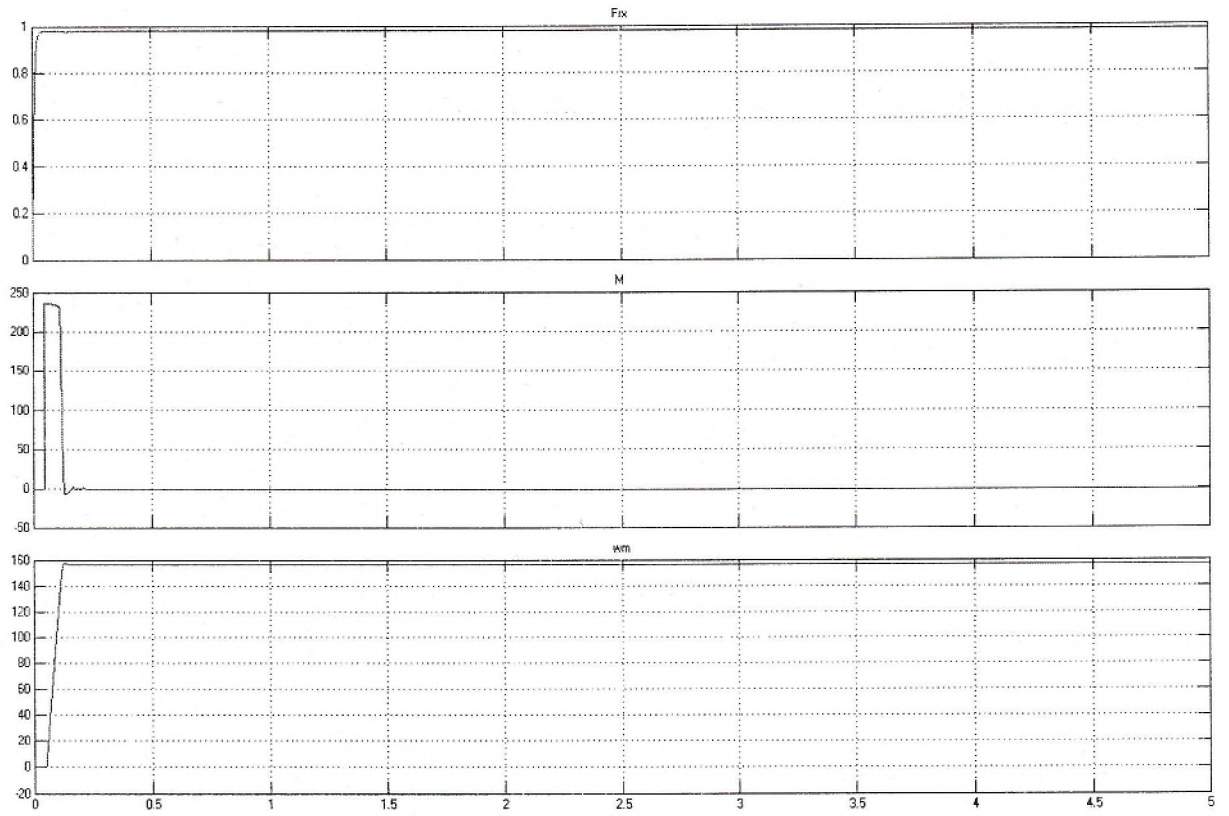
Принципова схема РШ



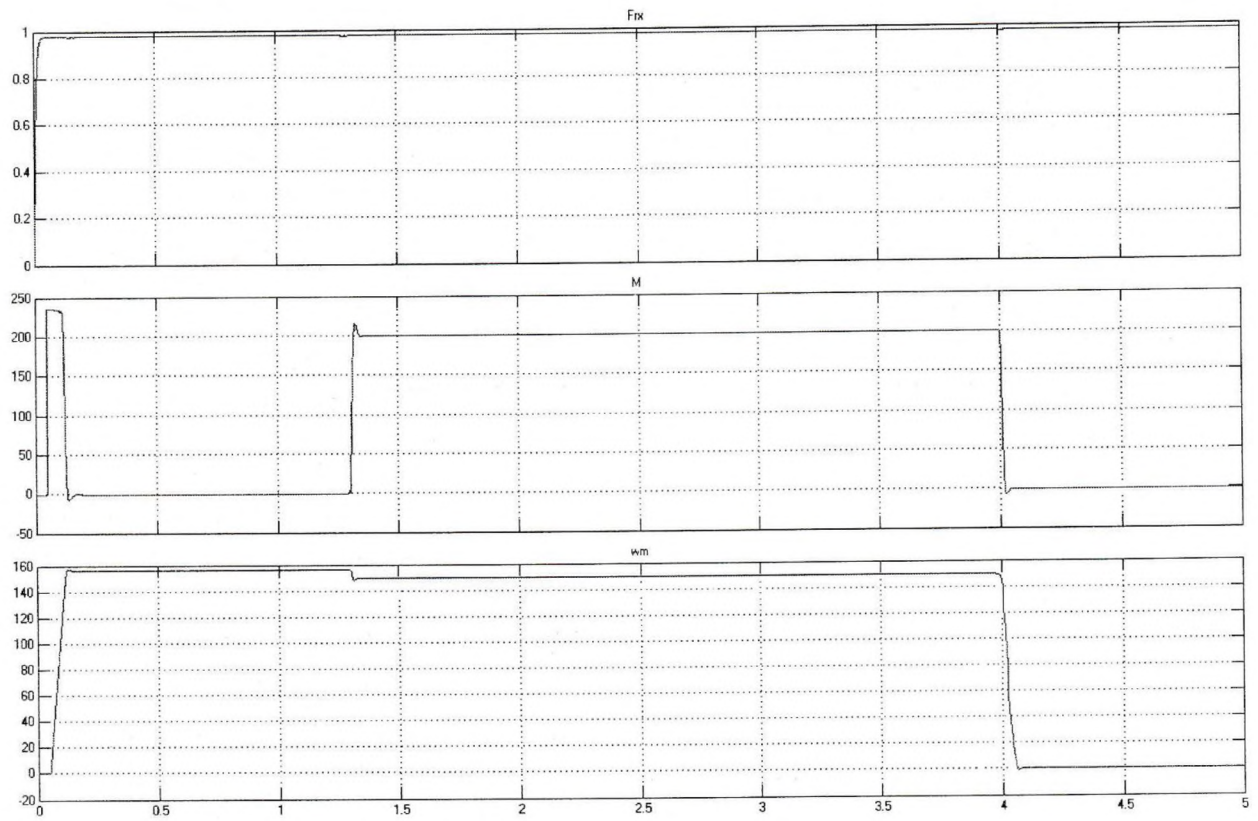
Модель замкненої системи



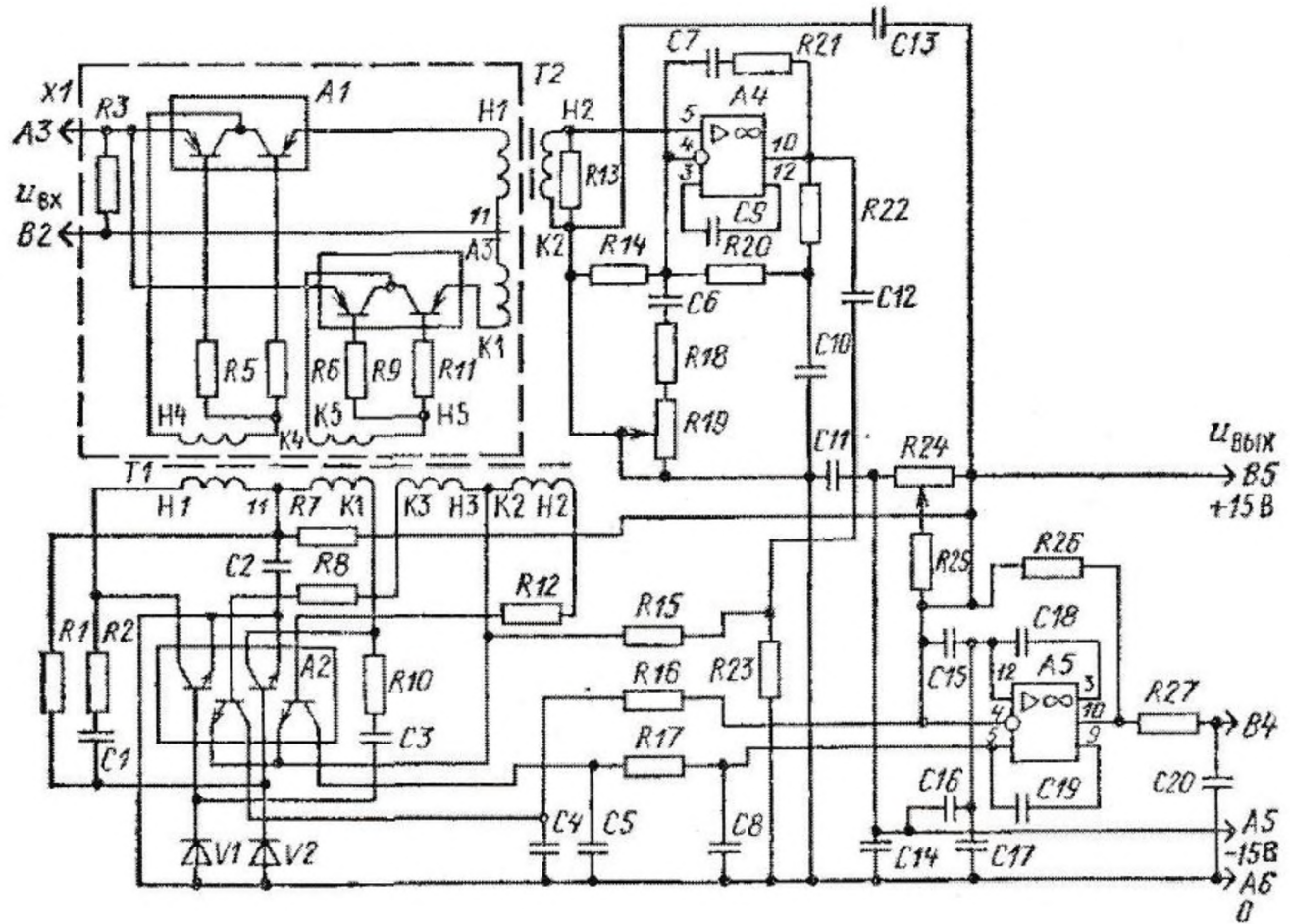
Прямой пуск



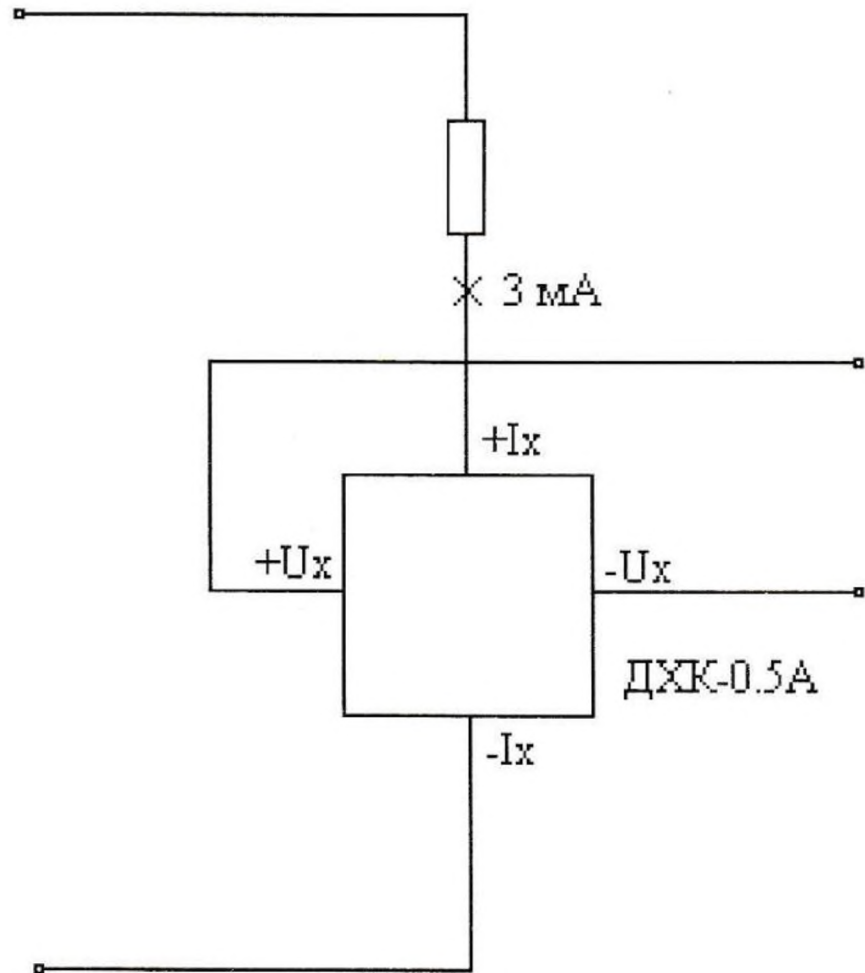
Прямий пуск з розгоном, накидом навантаження та гальмуванням



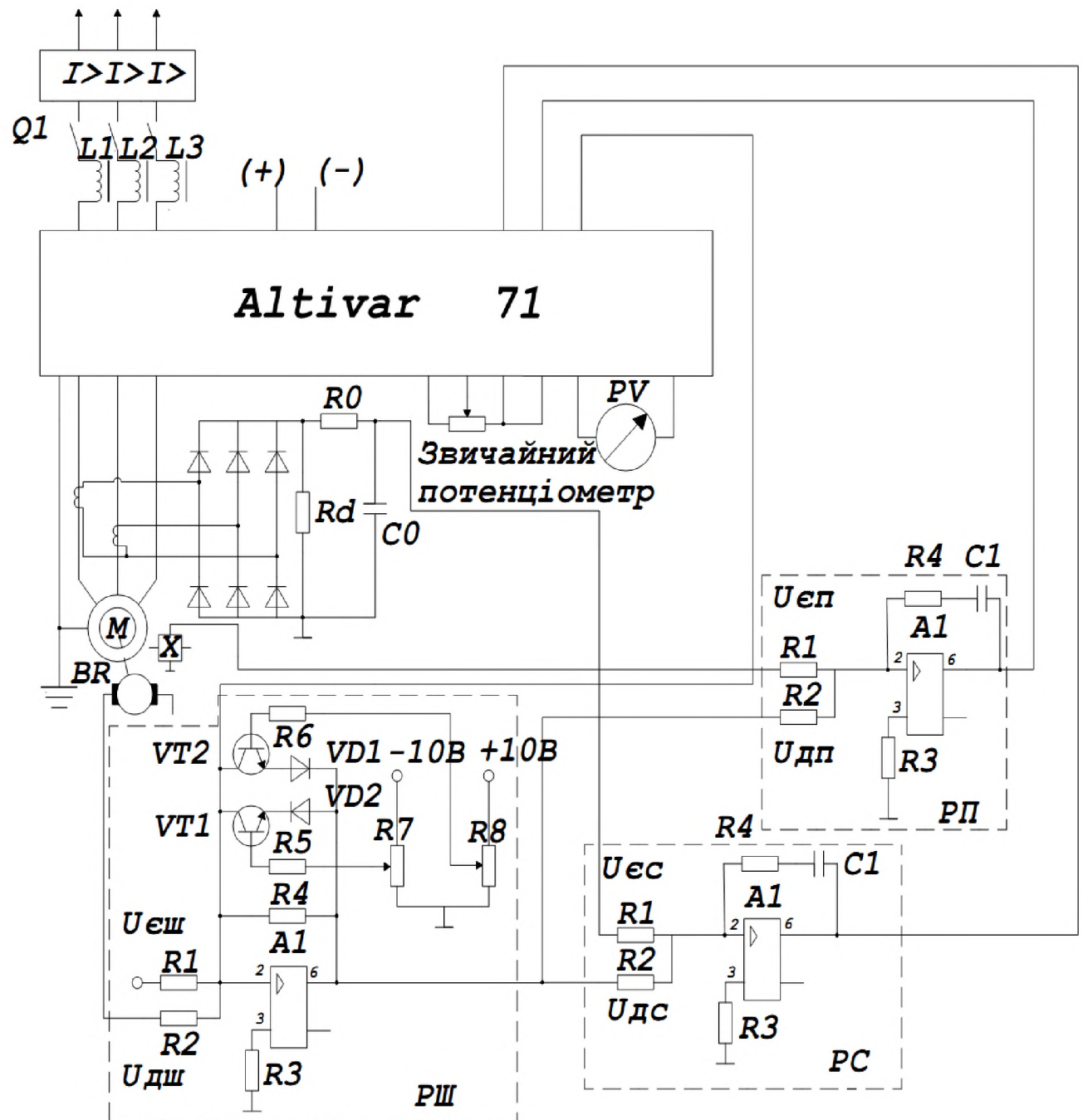
Принципова схема датчика струму



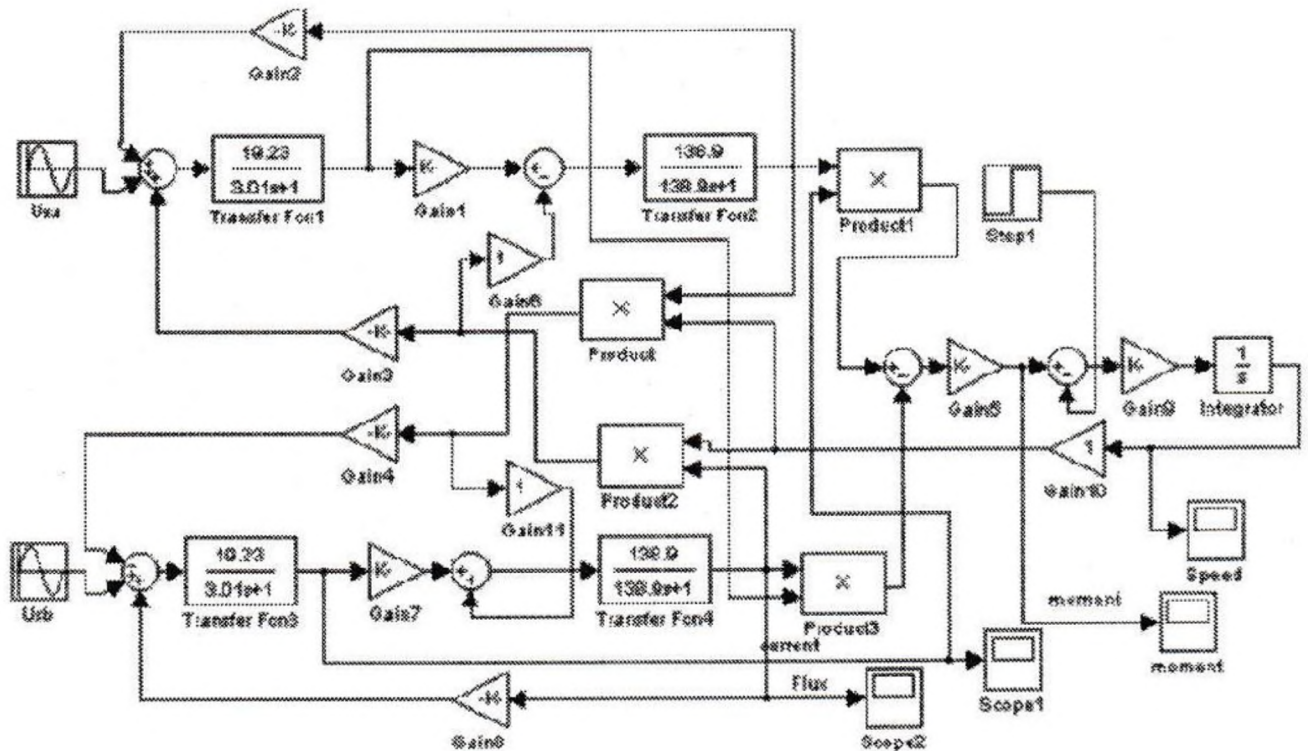
Принципова схема датчика потокозчеплення



Принципова схема системи керування електромеханічною системою
головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим
керуванням



Модель системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням



Алгоритм функціонування системи керування електромеханічною системою головного підйому мостового крана з оптимальним частотно-струмовим керуванням

