

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова

Ю. П. КОНДРАТЕНКО, О. В. КОЗЛОВ, О. С. ГЕРАСІН

ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Методичні вказівки до практичних занять

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання

комбінованого використання на DVD-ROM

Миколаїв ♦ НУК ♦ 2016

УДК 681.516.75
ББК
К 46

Укладачі:

Ю. П. Кондратенко, д-р техн. наук, професор;

О. В. Козлов, канд. техн. наук, доцент;

О. С. Герасін, викладач.

Рецензент: Г. В. Павлов д-р техн. наук, професор.

Кондратенко Ю.П.

Проектування пристроїв та систем управління: Методичні вказівки до практичних занять / Ю. П. Кондратенко, О. В. Козлов, О. С. Герасін. – Миколаїв: НУК, 2016. – 101 с.

Подано індивідуальні завдання для практичних занять та самостійної роботи студентів, що вивчають дисципліну "Проектування пристроїв та систем управління". На основі даних завдань студенти повинні набути навичок розробки окремих елементів та систем управління різнотипними технологічними об'єктами засобами спеціалізованого програмного забезпечення Simulink пакету прикладних програм MatLab.

Призначено для студентів спеціальності "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", які вивчають дисципліну "Проектування пристроїв та систем управління".

© Кондратенко Ю. П., Козлов О. В.,
Герасін О. С., 2016

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2016

ЗМІСТ

Індивідуальне завдання № 1. Проектування системи автоматичного управління двигуном постійного струму.....	4
Індивідуальне завдання № 2. Проектування системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.....	10
Індивідуальне завдання № 3. Проектування системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі.....	16
Приклад виконання індивідуального завдання № 1.....	23
Приклад виконання індивідуального завдання № 2.....	49
Приклад виконання індивідуального завдання № 3.....	73
Література.....	97

Індивідуальне завдання №1

Проектування системи автоматичного управління двигуном постійного струму

Мета роботи: набути досвіду проектування систем автоматичного управління двигунами постійного струму.

Вибір початкових даних.

1. Вибрати тип системи управління двигуном постійного струму.

Тип системи управління двигуном постійного струму задається викладачем для кожного студента з наведених нижче варіантів:

1) одноконтурна система автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотним зв'язком за швидкістю (рис. 1);

2) двоконтурна система автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом і швидкістю (рис. 2);

3) триконтурна система автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом (рис. 3).

На рис. 1-3 прийнято наступні позначення: ЗП – багатоканальний з пристрій; РК – регулятор кута повороту; РШ – регулятор швидкості обертання; РС – регулятор струму; ТП – тиристорний перетворювач; ДПС – двигун постійного струму; РО – робочий орган; ДС – датчик струму; ДШ – датчик швидкості обертання; ДК – датчик кута повороту; $\varphi_{ЗРО}$ – задане значення кута повороту робочого органу; $\omega_{ЗРО}$ – задане значення швидкості обертання робочого органу; $u_{ЗШ}$ – заданий сигнал управління швидкістю, який відповідає $\omega_{ЗРО}$; $u_{ЗК}$ – заданий сигнал управління кутом повороту, який відповідає $\varphi_{ЗРО}$; ε_K – помилка управління кутом повороту; $u_{РК}$ – сигнал

управління регулятора кута повороту; $\varepsilon_{\text{ш}}$ – помилка управління швидкістю обертання; $u_{\text{рш}}$ – сигнал управління регулятора швидкості обертання; $\varepsilon_{\text{с}}$ – помилка управління струмом; $u_{\text{рс}}$ – сигнал управління регулятора струму; $u_{\text{тп}}$ – значення вихідної напруги тиристорного перетворювача; $I_{\text{я}}$ – значення струму якоря двигуна постійного струму; $\omega_{\text{д}}$ – значення швидкості обертання двигуна постійного струму; ω_{ppo} – реальне значення швидкості обертання робочого органу; φ_{ppo} – реальне значення кута повороту робочого органу; $M_{\text{н}}$ – значення моменту навантаження, що діє на робочий орган; $u_{\text{дс}}$ – сигнал датчика струму; $u_{\text{дш}}$ – сигнал датчика швидкості обертання; $u_{\text{дк}}$ – сигнал датчика кута повороту.

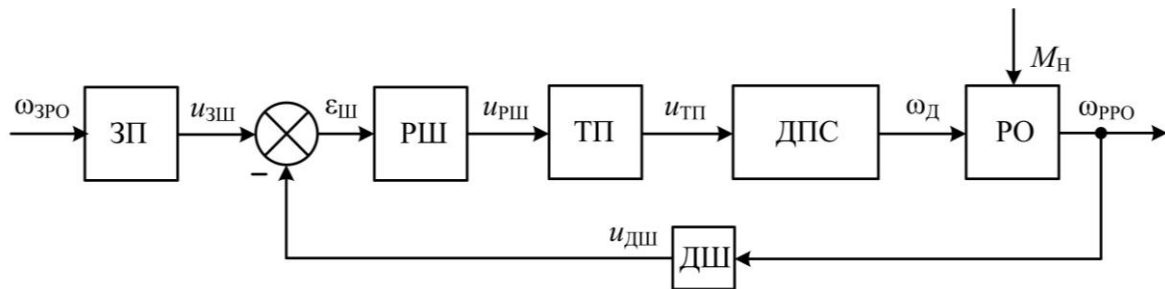


Рис. 1. Функціональна схема одноконтурної системи автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотним зв'язком за швидкістю

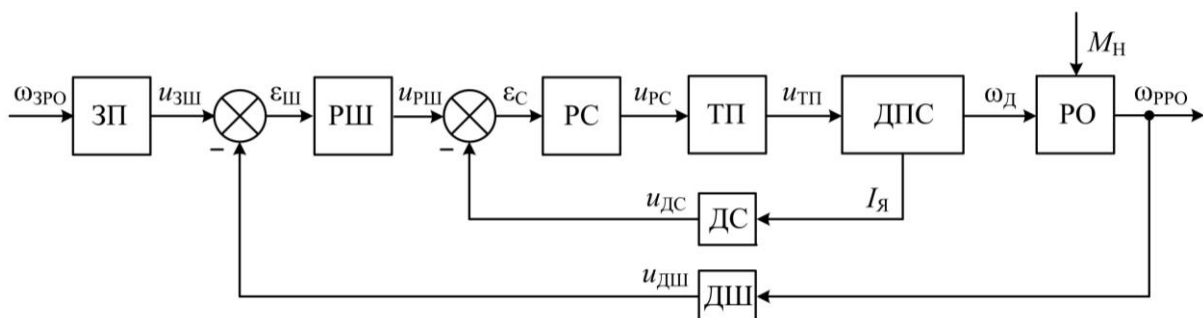


Рис. 2. Функціональна схема двоконтурної системи автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом і швидкістю

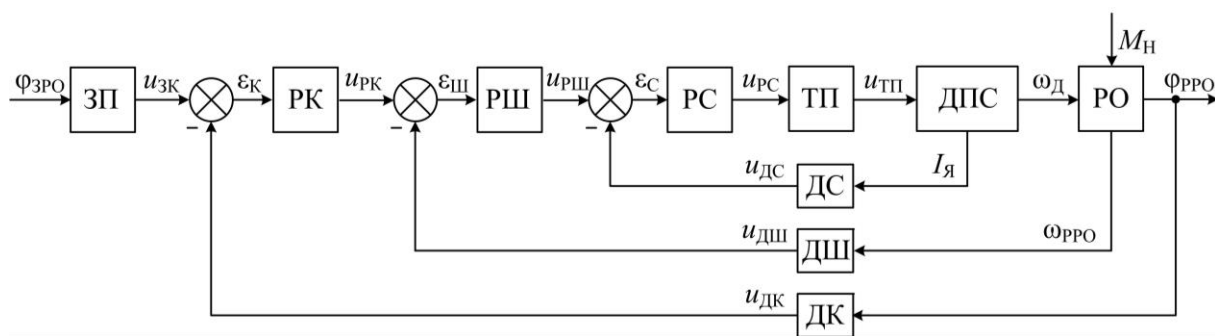


Рис. 3. Функціональна схема триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом

2. Вибрати тип двигуна постійного струму.

Тип двигуна постійного струму вибирається з табл. 1 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

Таблиця 1. Характеристики двигунів серії СЛ

№ варіанта	Тип двигуна	U_H , В	I_H , А	P_2 , кВт	n_H , об/хв	$J_{я}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$R_{я}$, Ом	$L_{я}$, мГн
1	2ПБ132МГ	220	7,46	1,1	800	0,038	3,97	55
2	2ПБ132L	110	16,19	1,3	800	0,048	0,708	9,8
3	2ПФ132ЛГ	220	19	2,8	750	0,048	1,995	23
4	2ПФ132М	110	26,74	2	750	0,038	0,459	8,2
5	2ПН160МГ	220	17,83	3	750	0,083	1,217	20,2
6	2ПН160L	110	71,15	6,3	1000	0,1	0,118	2,2
7	2ПФ160М	220	41,07	7,5	1500	0,1	0,246	4
8	2ПО160L	220	21,36	10	2360	0,1	0,118	2,5
9	2ПН180ЛГ	220	55,1	10	1000	0,23	0,279	5,6

3. Вибрати параметри робочого органа.

Робочий орган – це рухомий елемент системи, який безпосередньо виконує робочу операцію та, відповідно, змінює форму, властивості, стан

або положення об'єкта керування. В якості робочого органу системи може виступати заслінка, фреза, гребний гвинт, відрізний або шліфувальний диск тощо.

Момент інерції та момент навантаження робочого органу вибираються з табл. 2 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

Таблиця 2. Параметри робочого органу

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$J_{\text{ро}},$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot 10^{-4}$	0,19	0,24	0,24	0,19	0,415	0,5	0,415	0,5	1,15
$M_{\text{н}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	8,76	10,35	35,67	25,48	38,22	60,19	22,61	40,48	95,54

4. Вибрати тип тиристорного перетворювача.

Для кожного варіанта обирається керований тиристорний перетворювач (КТП) ТЕР4-63/230 з параметрами:

- номінальна напруга $U_{\text{нті}} = 230 \text{ [В]}$;
- номінальний струм $I_{\text{нті}} = 63 \text{ [А]}$;
- стала часу $T_{\text{ті}} = 0,006 \text{ [с]}$.

До КТП обирається згладжуючий дросель РТСТ-82-0,505У3 з параметрами:

- індуктивність $L_{\text{др}} = 0,505 \text{ [мГн]}$;
- опір $R_{\text{др}} = 0,037 \text{ [Ом]}$;

та трансформатор ТСП-25/0,7 з параметрами:

- індуктивність фази трансформатора $L_{\text{тр}} = 0,4 \text{ [мГн]}$;
- активний опір однієї фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки, $R_{\text{тр}} = 0,055 \text{ [Ом]}$.

Послідовність проектування системи автоматичного управління.

1. Розглянути функціональну схему системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

1.1. Навести функціональну схему системи автоматичного управління двигуном постійного струму для обраного варіанту.

1.2. Надати детальний опис основних елементів системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

1.3. Навести принцип дії основних елементів системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

2. Навести математичний опис основних елементів системи автоматичного управління двигуном постійного струму та побудувати її структурну схему.

2.1. Навести математичний опис двигуна постійного струму.

2.2. Сформувати передаточну функцію двигуна постійного струму та розрахувати її параметри для обраного варіанту.

2.3. Побудувати структурну схему двигуна постійного струму.

2.4. Навести передаточну функцію тиристорного перетворювача для заданих параметрів.

2.5. Навести математичний опис та передаточну функцію датчиків системи автоматичного управління для обраного варіанта.

2.6. Побудувати структурну схему системи автоматичного управління двигуном постійного струму з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

3. Розрахувати параметри регуляторів системи автоматичного управління двигуном постійного струму та провести математичне моделювання.

3.1. Провести розрахунок параметрів ПД-регулятора швидкості для одноконтурної системи автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотним зв'язком за швидкістю.

3.2. Провести розрахунок параметрів ПІ-регулятора струму та ПІ-

регулятора швидкості для двоконтурної системи автоматичного управління швидкістю обертання двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом і швидкістю.

3.3. Провести розрахунок параметрів ПІ-регулятора струму, ПІ-регулятора швидкості та П-регулятора кута повороту для триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом.

3.4. Провести математичне моделювання системи автоматичного управління двигуном постійного струму з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудувати її перехідні процеси.

3.5. При необхідності покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи провести додаткове налагодження коефіцієнтів регуляторів та повторити пункт 3.4.

4. Здійснити вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

4.1. Вибрати програмно-апаратні засоби реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління двигуном постійного струму для обраного варіанту.

4.2. Вибрати датчики струму, швидкості та кута повороту для реалізації зворотних зв'язків розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму для обраного варіанту.

4.3. Вибрати апаратні засоби реалізації перетворення цифрових та аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму для обраного варіанту.

5. Зробити загальні висновки за результатами проведеної роботи.

Індивідуальне завдання №2

Проектування системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта

Мета роботи: набути досвіду проектування систем автоматичного управління теплоенергетичними об'єктами.

Вибір початкових даних.

1. Вибрати тип системи управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

Тип системи управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта обирається викладачем для кожного студента з наведених нижче варіантів:

1) одноконтурна система автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотним зв'язком за температурою (рис. 4);

2) двоконтурна система автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою (рис. 5).

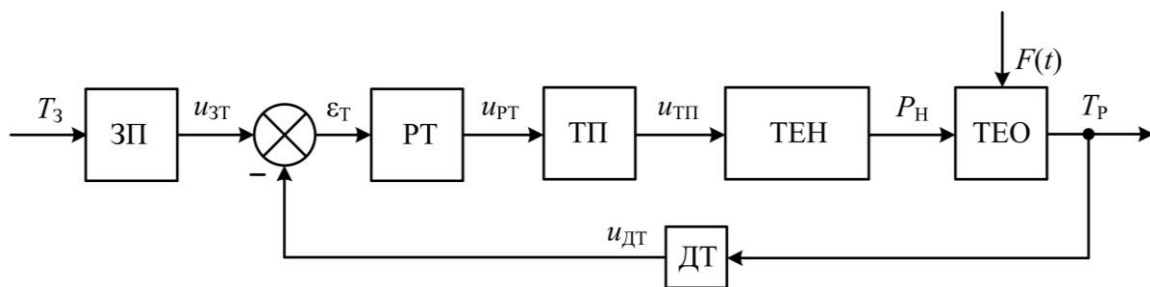


Рис. 4. Функціональна схема одноконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотним зв'язком за температурою

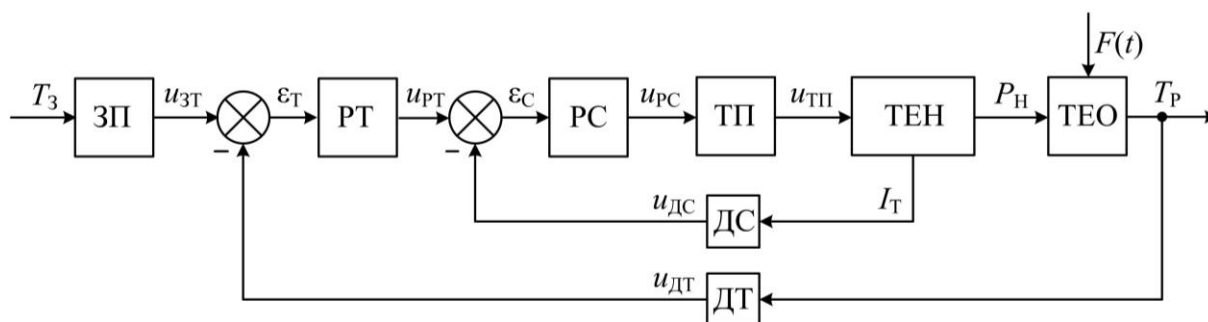


Рис. 5. Функціональна схема двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою

На рис. 4, рис. 5 прийнято наступні позначення: ЗП – задавальний пристрій; РТ – регулятор температури нагріву; ТЕН – трубчатий електронагрівач; ТЕО – теплоенергетичний об'єкт; ДТ – датчик температури; T_3 – задане значення температури нагріву; u_{3T} – заданий сигнал управління температурою, який відповідає T_3 ; ε_T – помилка управління температурою нагріву; u_{PC} , u_{PT} – сигнали управління регуляторів струму та температури; I_T – значення струму трубчатого електронагрівача; P_H – значення потужності нагріву трубчатого електронагрівача; T_P – реальне значення температури нагріву; $F(t)$ – значення збурювального впливу, що діє на теплоенергетичний об'єкт; u_{DC} , u_{DT} – сигнали датчиків струму та температури.

2. Вибрати тип трубчатого електронагрівача.

Тип трубчатого електронагрівача вибирається з табл. 3 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

Таблиця 3. Характеристики трубчатих електронагрівачів

№ варіанта	Тип ТЕНа	U_H , В	I_H , А	P_H , Вт	R_T , Ом	L_T , мГн
1	ТЕН-1	110	0,94	103	117	230
2	ТЕН-2	110	12,95	1425	8,5	126

Продовження таблиці 3

№ варіанта	Тип ТЕНа	U_H , В	I_H , А	P_H , Вт	R_T , Ом	L_T , мГн
3	ТЕН-3	110	30,55	3361	3,6	80
4	ТЕН-4	110	2,75	302,5	40	290
5	ТЕН-5	110	63,6	6990	1,73	250
6	ТЕН-6	110	9,56	1052	11,5	730
7	ТЕН-7	110	20,7	2277	5,31	245
8	ТЕН-8	110	16,9	1860	6,5	230
9	ТЕН-9	110	31,43	3457	3,5	470

3. Вибрати параметри теплоенергетичного об'єкта.

Передаточна функція узагальненого теплоенергетичного об'єкта управління має наступний вигляд:

$$W_{\text{ТЕО}}(p) = \frac{T_{\text{ТЕО}}(p)}{P_H(p)} = \frac{k_{\text{ТЕО}} e^{-\tau_{\text{ТЕО}} p}}{(T_{1\text{ТЕО}} p + 1)(T_{2\text{ТЕО}} p + 1)}, \quad (1)$$

де $k_{\text{ТЕО}}$ – коефіцієнт підсилення ТЕО; $\tau_{\text{ТЕО}}$ – час запізнення ТЕО; $T_{1\text{ТЕО}}$, $T_{2\text{ТЕО}}$ – сталі часу першої та другої аперіодичних ланок ТЕО, відповідно.

Параметри теплоенергетичного об'єкта управління вибираються з табл. 4 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

Таблиця 4. Параметри теплоенергетичного об'єкта

№ варіанта	$k_{\text{ТЕО}}$	$\tau_{\text{ТЕО}}$, с	$T_{1\text{ТЕО}}$, с	$T_{2\text{ТЕО}}$, с
1	0,97	1	10	26
2	0,07	3,5	25	74
3	0,029	7	43	89
4	0,33	2,1	12	30
5	0,014	12	65	112
6	0,095	3,2	22	64

№ варіанта	$k_{\text{ТЕО}}$	$\tau_{\text{ТЕО}}, \text{с}$	$T_{1\text{ТЕО}}, \text{с}$	$T_{2\text{ТЕО}}, \text{с}$
7	0,044	6	34	78
8	0,053	5,4	37	95
9	0,028	9,2	44	90

4. Вибрати тип тиристорного перетворювача.

Для кожного варіанту обирається керований тиристорний перетворювач КТП ТЕР4-63/230 з параметрами:

- номінальна напруга $U_{\text{НТП}} = 230 \text{ [В]}$;
- номінальний струм $I_{\text{НТП}} = 63 \text{ [А]}$;
- стала часу $T_{\text{ТП}} = 0,006 \text{ [с]}$.

До КТП обирається згладжуючий дросель РТСТ-82-0,505У3 з параметрами:

- індуктивність $L_{\text{др}} = 0,505 \text{ [мГн]}$;
- опір $R_{\text{др}} = 0,037 \text{ [Ом]}$;

та трансформатор ТСП-25/0,7 з параметрами:

- індуктивність фази трансформатора $L_{\text{тр}} = 0,4 \text{ [мГн]}$;
- активний опір однієї фази трансформатора, приведений до вторинної обмотки, $R_{\text{тр}} = 0,055 \text{ [Ом]}$.

Послідовність проектування системи автоматичного управління.

1. Розглянути функціональну схему системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

1.1. Навести функціональну схему системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

1.2. Надати детальний опис основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

1.3. Навести принцип дії основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

2. Навести математичний опис основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта та побудувати її структурну схему.

2.1. Навести математичний опис трубчатого електронагрівача.

2.2. Сформувати передаточну функцію трубчатого електронагрівача та розрахувати її параметри для обраного варіанту.

2.3. Побудувати структурну схему трубчатого електронагрівача.

2.4. Навести передаточну функцію теплоенергетичного об'єкта з заданими параметрами для обраного варіанту.

2.5. Навести передаточну функцію тиристорного перетворювача з заданими параметрами.

2.6. Навести математичний опис та передаточну функцію датчиків системи автоматичного управління для обраного варіанта.

2.7. Побудувати структурну схему системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

3. Розрахувати параметри регуляторів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта та провести математичне моделювання.

3.1. Провести розрахунок параметрів ПД-регулятора температури для одноконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотним зв'язком за температурою.

3.2. Провести розрахунок параметрів ПІ-регулятора струму та ПІ-регулятора температури для двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою.

3.3. Провести математичне моделювання системи автоматичного

управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудувати її перехідні процеси.

3.4. При необхідності покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи провести додаткове налагодження коефіцієнтів регуляторів та повторити пункт 3.3.

4. Здійснити вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

4.1. Вибрати програмно-апаратні засоби реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

4.2. Вибрати датчики струму та температури для реалізації зворотних зв'язків розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

4.3. Вибрати апаратні засоби реалізації перетворення цифрових та аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

5. Зробити загальні висновки за результатами проведеної роботи.

Індивідуальне завдання №3

Проектування системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі

Мета роботи: набути досвіду проектування систем автоматичного управління рівнем рідини в резервуарах.

Вибір початкових даних.

1. Для всіх варіантів застосовується гідравлічна схема системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі, зовнішній вигляд якої наведений на рис. 6.

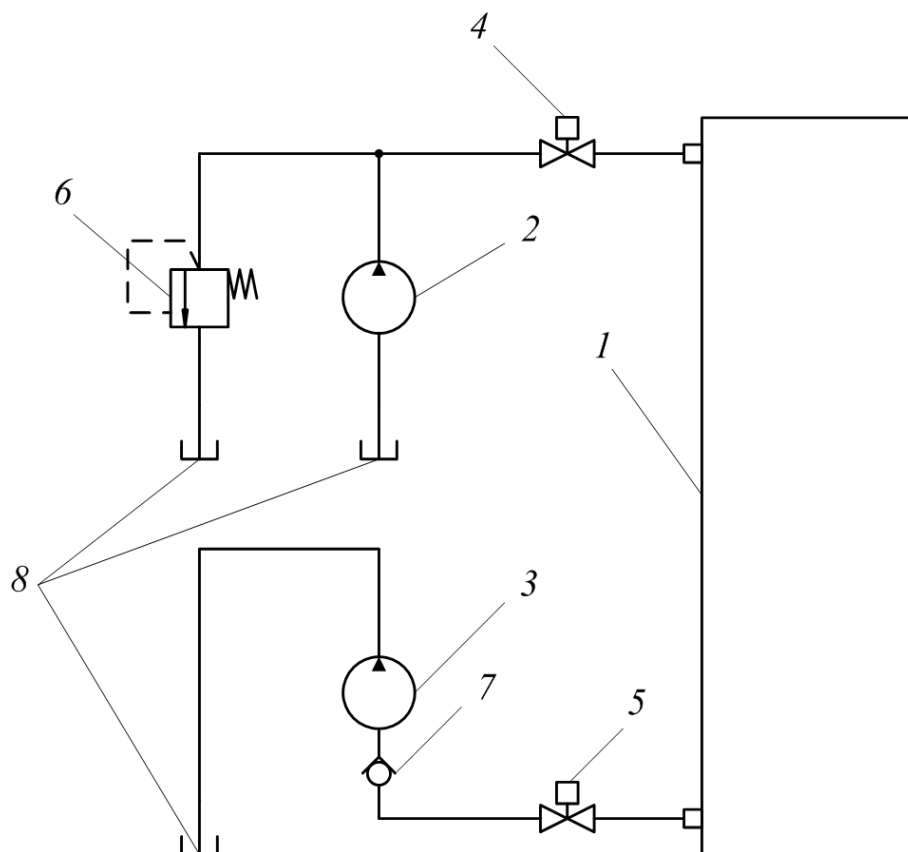


Рис. 6. Гідравлічна схема системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі

На рис. 6 прийнято наступні позначення: 1 – робочий резервуар системи, в якому здійснюється управління рівнем рідини; 2 – насос, який працює на наповнення резервуара системи; 3 – насос, який працює на спустошення резервуара системи; 4 – електрокерований клапан, який працює в лінії наповнення резервуара системи; 5 – електрокерований клапан, який працює в лінії спустошення резервуара системи; 6 – зворотний клапан, який застосовується в лінії наповнення резервуара системи для скидання тиску при закритому електрокерованому клапані 4; 7 – гідрозамок, який застосовується в лінії спустошення резервуара системи для запобігання руху рідини в зворотному напрямку; 8 – гідробак системи.

Наповнення та спустошення резервуара відбувається за допомогою насосів 2 та 3, відповідно. Значення витрати рідини при наповненні та спустошенні резервуара може змінюватися за допомогою електрокеруваних клапанів 4 та 5, відповідно, від 0 до максимального значення $Q_{\text{Вmax}}$.

При розрахунку системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі приймаються наступні припущення:

1) насоси 2 та 3 забезпечують сталі значення тиску рідини при будь-яких значеннях витрати рідини через електрокерувані клапани 4 та 5;

2) трубопроводи від насосів до робочого резервуару приймаються настільки короткими, що можна не враховувати хвильові процеси, які в них відбуваються.

2. Для всіх варіантів застосовується одноконтурна система автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі зі зворотним зв'язком за рівнем, функціональна схема якої наведена на рис. 7.

На рис. 7 прийнято наступні позначення: РР – регулятор рівня рідини; ЕКВН – електрокерований клапан наповнення резервуара; ЕКВС – електрокерований клапан спустошення резервуара; ІН – інвертор напруги; Р – робочий резервуар системи; L_3 – задане значення рівня рідини

в резервуарі; ε_p – помилка управління рівнем рідини; u_{pp} – сигнал управління регулятора рівня; Q_{BH} – значення витрати рідини, що проходить через електрокерований клапан наповнення резервуара; Q_{BC} – значення витрати рідини, що проходить через електрокерований клапан спустошення резервуара; L_p – реальне значення рівня рідини в резервуарі; $F(t)$ – значення збурювального впливу, що діє на робочий резервуар системи; u_{dp} – сигнал датчика рівня.

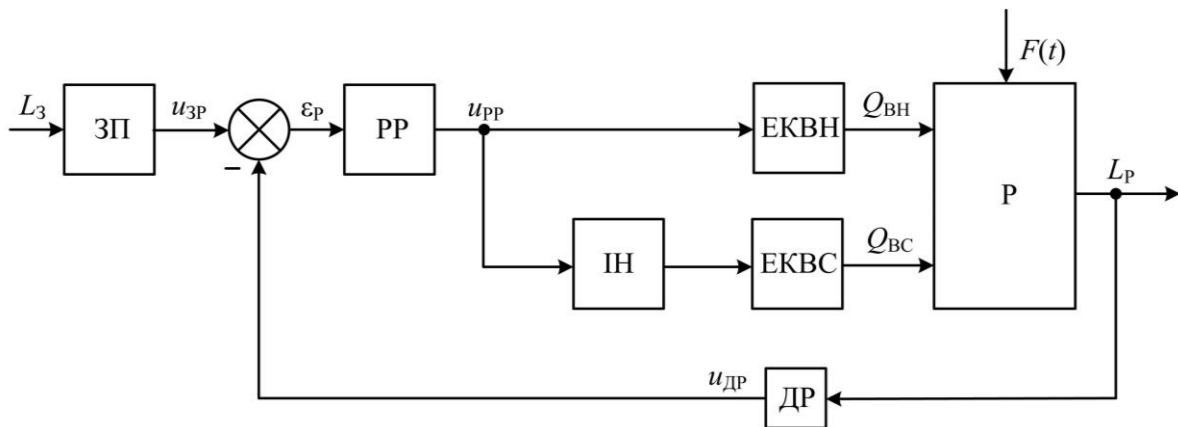


Рис. 7. Функціональна схема одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі зі зворотним зв'язком за рівнем

3. Вибрати тип електрокермованих клапанів наповнення та спустошення резервуара.

В якості електрокермованих клапанів наповнення та спустошення резервуара для даної системи доцільно обрати лінійні регулятори витрати рідини (ЛРВ), що мають лінійну характеристику вихідної витрати рідини від вхідної напруги живлення. На вхід лінійних регуляторів витрати подається напруга управління постійного струму від 0 до 10 В. При від'ємних та нульовому значеннях керуючої напруги ЛРВ значення витрати дорівнюватиме 0. При значенні керуючої напруги ЛРВ 10 В значення витрати дорівнюватиме Q_{Bmax} .

Передаточна функція лінійного регулятора витрати має наступний вигляд:

$$W_{\text{ЛРВ}}(p) = \frac{Q_{\text{ЛРВ}}(p)}{u_{\text{ЛРВ}}(p)} = \frac{k_{\text{ЛРВ}}}{(T_{\text{ЛРВ}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{ЛРВ}} p + 1)}, \quad (2)$$

де $k_{\text{ЛРВ}}$ – коефіцієнт підсилення ЛРВ; $T_{\text{ЛРВ}}$ – стала часу ЛРВ; ξ – коефіцієнт демпфування ЛРВ.

Тип та параметри лінійних регуляторів витрати рідини вибирається з табл. 5 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

Таблиця 5. Параметри лінійних регуляторів витрати рідини

№ варіанта	Тип ЛРВ	$Q_{\text{Вmax}}, \text{м}^3/\text{с}$	$k_{\text{ЛРВ}}$	$T_{\text{ЛРВ}}, \text{с}$	ξ
1	ЛРВ-1	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$0,035 \cdot 10^{-3}$	0,31	0,71
2	ЛРВ-2	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,027 \cdot 10^{-3}$	0,26	0,69
3	ЛРВ-3	$0,01 \cdot 10^{-3}$	$0,001 \cdot 10^{-3}$	0,09	0,55
4	ЛРВ-4	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	1,2	0,76
5	ЛРВ-5	$0,44 \cdot 10^{-3}$	$0,044 \cdot 10^{-3}$	0,36	0,6
6	ЛРВ-6	$0,32 \cdot 10^{-3}$	$0,032 \cdot 10^{-3}$	0,28	0,64
7	ЛРВ-7	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,015 \cdot 10^{-3}$	0,19	0,72
8	ЛРВ -8	$0,11 \cdot 10^{-3}$	$0,011 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,47
9	ЛРВ -9	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,095 \cdot 10^{-3}$	1,4	0,56

4. Вибрати тип та параметри робочого резервуара системи.

Тип та параметри робочого резервуара системи вибираються з табл. 6 у відповідності до номеру варіанта за списком групи.

В табл. 6 прийнято наступні позначення: H – максимальна висота робочого резервуара системи; a – перша сторона основи робочого резервуара системи з прямокутним дном; b – друга сторона основи робочого резервуара системи з прямокутним дном; R – радіус основи робочого резервуара системи з циліндричним дном.

Таблиця 6. Тип та параметри робочого резервуара системи

№ варіанта	Тип резервуара	H , м	a , м	b , м
1	З прямокутним дном	0,9	0,54	0,49
2	З прямокутним дном	0,71	0,56	0,44
3	З прямокутним дном	0,82	0,47	0,51
4	З прямокутним дном	0,64	0,6	0,546
5	З прямокутним дном	0,55	0,62	0,65
№ варіанта	Тип резервуара	H , м	R , м	
6	З циліндричним дном	0,67	0,24	
7	З циліндричним дном	0,82	0,31	
8	З циліндричним дном	0,77	0,27	
9	З циліндричним дном	0,94	0,34	

Послідовність проектування системи автоматичного управління.

1. Розглянути гідравлічну та функціональну схеми системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.1. Навести гідравлічну схему системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.2. Надати детальний опис основних елементів гідравлічної схеми системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.3. Навести функціональну схему системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.4. Надати детальний опис основних елементів функціональної схеми системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.5. Навести принцип дії основних елементів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

2. Навести математичний опис основних елементів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара та побудувати її структурну схему.

2.1. Навести математичний опис робочого резервуара системи.

2.2. Сформувати передаточну функцію робочого резервуара системи та розрахувати її параметри для обраного варіанту.

2.3. Навести передаточну функцію лінійного регулятора витрати рідини за заданими параметрами.

2.4. Навести математичний опис та передаточну функцію датчика рівня системи автоматичного управління.

2.5. Побудувати структурну схему системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

3. Розрахувати параметри регуляторів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара та провести математичне моделювання.

3.1. Провести розрахунок параметрів ПД-регулятора рівня для одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара зі зворотним зв'язком за рівнем.

3.2. Провести розрахунок параметрів ПІД-регулятора рівня для одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара зі зворотним зв'язком за рівнем.

3.3. Провести математичне моделювання системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудувати її перехідні процеси.

3.4. При необхідності покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи провести додаткове налагодження коефіцієнтів регуляторів та повторити пункт 3.3.

4. Здійснити вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

4.1. Вибрати програмно-апаратні засоби реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

4.2. Вибрати датчик рівня для реалізації зворотного зв'язку

розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

4.3. Вибрати апаратні засоби реалізації перетворення цифрових та аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

5. Зробити загальні висновки за результатами проведеної роботи.

Приклад виконання індивідуального завдання № 1

Використовуючи послідовність проектування системи автоматичного управління двигуном постійного струму (див. с. 7) виконаємо розробку триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом.

1. Розгляд функціональної схеми системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

1.1. Функціональна схема триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом наведена на рис. 8.

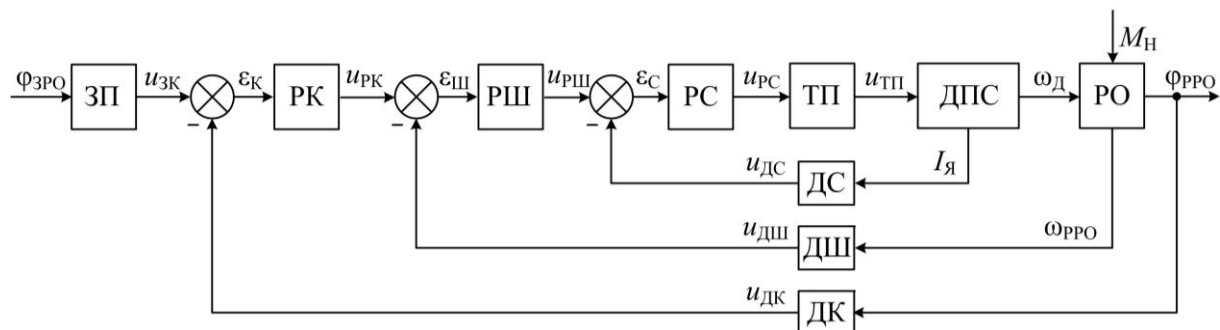


Рис. 8. Функціональна схема триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом

1.2. Надання детального опису основних елементів заданої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

Система автоматичного управління двигуном постійного струму (рис. 8) містить наступні основні елементи: **ЗП** – багатоканальний задавальний пристрій; **РК** – регулятор кута повороту; **РШ** – регулятор

швидкості обертання; РС – регулятор струму; ТП – тиристорний перетворювач; ДПС – двигун постійного струму; РО – робочий орган (заслінка, рейка паливного насосу тощо); ДС – датчик струму; ДШ – датчик швидкості обертання; ДК – датчик кута повороту.

1.3. Принцип дії основних елементів заданої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

Оператор задає кутову координату $\varphi_{ЗРО}$ повороту робочого органу за допомогою задавального пристрою, найчастіше з людино-машинного інтерфейсу комп'ютеризованої системи управління (сигнал $u_{ЗК}$). Після суматора сигнал розузгодження у вигляді помилки управління кутом повороту ε_K

$$\varepsilon_K = u_{ЗК} - u_{ДК}$$

подається на регулятор кута повороту РК, який визначає сигнал управління регулятора кута повороту $u_{РК}$. Далі, після другого суматора, сигнал розузгодження у вигляді помилки управління швидкістю обертання $\varepsilon_{Ш}$

$$\varepsilon_{Ш} = u_{РК} - u_{ДШ}$$

подається на регулятор швидкості обертання двигуна РШ, який визначає сигнал управління регулятора швидкості обертання $u_{РШ}$. На виході третього суматора формується сигнал розузгодження у вигляді помилки управління струмом ДПС ε_C

$$\varepsilon_C = u_{РШ} - u_{ДС}$$

Цей сигнал ε_C подається на регулятор струму РС, що визначає сигнал управління регулятора струму $u_{РС}$ – величину напруги, яку необхідно подати на тиристорний перетворювач ТП, щоб останній формував наругу $u_{ТП}$ для двигуна постійного струму. ТП при цьому виконує функції випрямлення змінної напруги мережі живлення та регулювання середньої величини випрямленої напруги. Виходячи з бажання зменшити зону переривчастих струмів, послідовно з якорем двигуна включають

згладжуючий дросель. Перетворювач підключається до живлячої мережі через трансформатор, який служить для узгодження напруг мережі і двигуна.

Далі двигун з кутовою швидкістю ω_d приводить у дію робочий орган РО. Реальні значення швидкості обертання ω_{ppo} та кута повороту φ_{ppo} робочого органу відслідковуються датчиками швидкості обертання (сигнал $u_{дш}$) та кута повороту (сигнал $u_{дк}$), відповідно. Поточне значення струму в якірній обмотці ДПС $I_{я}$ визначається за допомогою ДС (сигнал $u_{дс}$). Сигнали зворотного зв'язку $u_{дк}$, $u_{дш}$, $u_{дс}$ служать для корекції роботи системи та підвищення показників якості при пуску та відпрацюванні моменту навантаження M_H .

2. Математичний опис основних елементів системи автоматичного управління двигуном постійного струму та її структурна схема.

2.1. Математичний опис двигуна постійного струму.

Важлива властивість ДПС з незалежним збудженням полягає в тому, що результуючий момент сил від усіх провідників якоря, званий електромагнітним моментом двигуна $M_{емд}$, є пропорційним струму якоря $I_{я}$, споживаному двигуном від джерела живлення:

$$M_{емд} = k_M I_{я}, \quad (3)$$

де k_M – коефіцієнт пропорційності, [Н·м/А]. За законами електромагнітної індукції в провіднику, що рухається в магнітному полі, виникає електрорушійна сила (ЕРС). Сумарна ЕРС E котушок якоря через колектор і щітки прикладається до зовнішніх виводів двигуна. У двигунному режимі роботи ЕРС спрямована проти зовнішньої напруги $U_{я}$, підведеної до якоря ДПС від джерела живлення. ЕРС є прямо пропорційною кутовій швидкості обертання валу двигуна ω_d [рад / с]:

$$E = k_E \omega_d, \quad (4)$$

де k_E – коефіцієнт пропорційності постійної ЕРС двигуна, [В·с/рад].

Рівняння, що описують електричні процеси в ДПС. В якірному ланцюзі двигуна протікає струм $I_{\text{я}}$ під дією напруги постійного струму $U_{\text{я}}$ джерела живлення і проти-ЕРС двигуна E . Цей ланцюг характеризується параметрами: активним опором $R_{\text{я}}$ [Ом] і індуктивністю $L_{\text{я}}$ [Гн] якірної обмотки, а також активними опорами та індуктивностями з'єднаних послідовно дроселя ($R_{\text{др}}$ [Ом], $L_{\text{др}}$ [Гн]) та трансформатора ($R_{\text{тр}}$ [Ом], $L_{\text{тр}}$ [Гн]). Обертотий ротор, що має момент інерції $J_{\text{я}}$ [кг·м²], та зв'язаний з ним робочий орган з моментом інерції $J_{\text{ро}}$ приводяться в рух одночасною дією електромагнітного моменту двигуна $M_{\text{емд}}$ і моменту опору зовнішніх сил $M_{\text{н}}$, прикладеного до робочого органу.

Вихідні диференціальні рівняння ДПС складаються на підставі законів фізики. Для електричного кола використовується другий закон Кірхгофа, згідно з яким можна записати рівняння

$$U_{\text{я}} - E = R_{\Sigma} I_{\text{я}} + L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}, \quad (5)$$

де t – поточний час; $R_{\Sigma} I_{\text{я}}$ характеризує падіння напруги на активному опорі якірного ланцюга відповідно до закону Ома; $L_{\Sigma} (dI_{\text{я}}/dt)$ відображає наявність ЕРС самоіндукції, що виникає в обмотці при зміні струму якоря. У представленому рівнянні (5) не враховується падіння напруги на щітках, яке залежить нелінійно від струму якоря, але має, як правило, відносно невелике значення в порівнянні з напругою $U_{\text{я}}$.

Диференціальне рівняння, що характеризує процеси в механічній частині двигуна, формується на підставі другого закону Ньютона:

$$J_{\text{я}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M_{\text{емд}} - M_{\text{н}}. \quad (6)$$

У цьому рівнянні не враховується дія сил тертя, що виникають при обертанні ротора та чинять відносно слабку дію на прискорення валу ДПС.

Використовуючи наведені вище формули і приводячи диференціальні рівняння до нормальної форми Коші, отримаємо опис ДПС у формі:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{я}\Sigma} I_{\text{я}} - k_{\text{е}} \omega_{\text{д}}}{L_{\text{я}\Sigma}}; \\ \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = \frac{k_{\text{м}} I_{\text{я}} - M_{\text{н}}}{J_{\text{я}}}. \end{cases} \quad (7)$$

2.2. Передаточна функція двигуна постійного струму та розрахунок її параметрів для обраного варіанту.

Для дослідження процесів за допомогою ЕОМ зручно використовувати структурне представлення математичної моделі ДПС. Для цього перетворимо отриману систему лінійних диференціальних рівнянь по Лапласу при нульових початкових умовах. В результаті отримаємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} pI_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - R_{\text{я}\Sigma} I_{\text{я}}(p) - k_{\text{е}} \omega_{\text{д}}(p)}{L_{\text{я}\Sigma}}; \\ p\omega_{\text{д}}(p) = \frac{k_{\text{м}} I_{\text{я}}(p) - M_{\text{н}}(p)}{J_{\text{я}}}. \end{cases} \quad (8)$$

в яких p – оператор Лапласа, а величини $I_{\text{я}}(p)$, $\omega_{\text{д}}(p)$, $U_{\text{я}}(p)$, $M_{\text{н}}(p)$ – зображення по Лапласу змінних $I_{\text{я}}$, $\omega_{\text{д}}$, $U_{\text{я}}$, $M_{\text{н}}$, відповідно. Після еквівалентних перетворень ці рівняння можуть бути представлені у формі:

$$I_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - k_{\text{е}} \omega_{\text{д}}(p)}{R_{\text{я}\Sigma}(T_{\text{е}} p + 1)}; \quad (9)$$

$$\omega_{\text{д}}(p) = \frac{k_{\text{м}} I_{\text{я}}(p) - M_{\text{н}}(p)}{J_{\text{я}} p}, \quad (10)$$

де $T_{\text{е}} = \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}}$ – електромагнітна стала часу якірного ланцюга двигуна.

За відомими технічними характеристиками (табл. 7) номінальний електромагнітний момент двигуна $M_{\text{ЕМДН}}$ визначається як

$$M_{\text{ЕМДН}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{1100 \cdot 60}{2 \cdot 3.14 \cdot 800} = 13,14 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (11)$$

де ω_{H} – номінальна кутова швидкість обертання вала двигуна, $\omega_{\text{H}} = 2\pi n_{\text{H}}/60$,
 $\omega_{\text{H}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 800/60 = 83,73 \text{ рад/с}$.

Таблиця 7. Вихідні дані для двигуна 2ПБ132МГ

№ варіанта	Тип двигуна	$U_{\text{H}},$ В	$I_{\text{H}},$ А	$P_2,$ Вт	$n_{\text{H}},$ об/хв	$J_{\text{я}},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$R_{\text{я}},$ Ом	$L_{\text{я}},$ мГн
1	2ПБ132МГ	220	7,46	1100	800	0,038	3,97	55

Отже, коефіцієнт пропорційності $k_{\text{М}}$ може бути знайдений з виразу

$$k_{\text{М}} = \frac{M_{\text{ЕМДН}}}{I_{\text{H}}} = \frac{13,14}{7,46} = 1,76 \text{ [Н} \cdot \text{м/А]}. \quad (12)$$

За заданими параметрами силової частини системи визначаємо діюче значення опору силового кола електропривода $R_{\text{я}\Sigma}$, що дорівнює сумі опору якоря двигуна ($R_{\text{я}}$), активних опорів згладжувального дроселя ($R_{\text{др}}$) та трансформатора ($R_{\text{тр}}$)

$$R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{др}} + 2R_{\text{тр}} = 3,97 + 0,037 + 2 \cdot 0,055 = 4,117 \text{ [Ом]}. \quad (13)$$

Далі запишемо рівняння коефіцієнту пропорційності постійної ЕРС двигуна за допомогою (4) та (5)

$$k_{\text{Е}} = \frac{E}{\omega_{\text{H}}} = \frac{U_{\text{H}} - R_{\text{я}\Sigma} I_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{220 - 4,117 \cdot 7,46}{83,73} = 2,261 \text{ [В} \cdot \text{с/рад]}. \quad (14)$$

Електромагнітна стала часу головного кола електропривода $T_{\text{Е}}$ може бути визначена

$$T_{\text{Е}} = \frac{L_{\text{я}} + L_{\text{др}} + L_{\text{тр}}}{R_{\text{я}\Sigma}} = \frac{0,055 + 0,505 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}}{4,117} = 0,0136 \text{ [с]}. \quad (15)$$

2.3. Побудова структурної схеми двигуна постійного струму.

Структурна схема двигуна постійного струму незалежного збудження представлена на рис. 9.

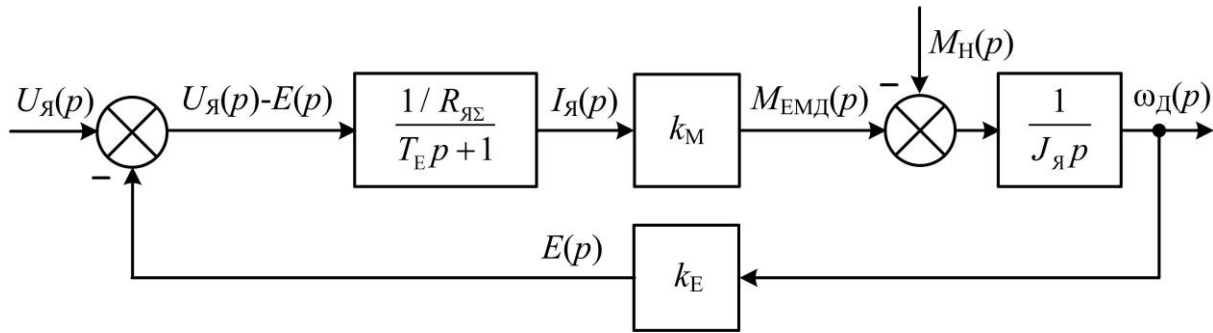


Рис. 9. Структурна схема двигуна постійного струму

При формуванні структурної схеми приймаються наступні припущення: (а) магнітний потік двигуна є постійним, (б) при роботі двигуна опір його обмоток не змінюється, (в) нелінійні елементи структурної схеми є лінеаризованими, (г) тиристорний перетворювач працює в режимі безперервного струму, (д) пульсаціями випрямленої напруги нехтуємо.

2.4. Передаточна функція тиристорного перетворювача за заданими параметрами.

В спрощеному вигляді передаточна функція ТП може бути записана як

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{u_{\text{тп}}(p)}{u_{\text{упр}}(p)} = \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1}, \quad (16)$$

де $u_{\text{упр}}$ – керуюча напруга, $k_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача, $k_{\text{ТП}} = U_{\text{Н}}/U_{\text{УПР}} = 220/10 = 22$, $U_{\text{УПР}}$ – діапазон зміни керуючої напруги, $U_{\text{УПР}} = 10$ В; $T_{\text{ТП}}$ – постійна часу ТП.

Використовуючи числові дані, отримаємо передаточну функцію ТП

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{22}{0,006p + 1}. \quad (17)$$

2.5. Математичний опис та передаточна функція датчиків системи автоматичного управління для обраного варіанта.

Розрахунок елементів контуру струму.

Передаточна функція елементів зворотного зв'язку за струмом може бути представлена підсилювальною ланкою з коефіцієнтом підсилення $k_{\text{дс}}$

$$W_{\text{дс}}(p) = k_{\text{дс}}. \quad (18)$$

В якості сенсора струму використовується шунт, коефіцієнт підсилення $k_{\text{ш}}$ якого може бути визначений як

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.н}}}{I_{\text{ш.н}}}, \quad (19)$$

де $U_{\text{ш.н}}$ – номінальна напруга шунта (для стандартних вимірювальних шунтів $U_{\text{ш.н}} = 75 \text{ мВ}$); $I_{\text{ш.н}}$ – номінальний струм шунта (вибирається з умови $I_{\text{ш.н}} \geq \lambda I_{\text{н}}$, де λ – надвантажувальна здатність двигуна, приймаємо $\lambda = 3$).

$$k_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 7,46} = 0,00335 \text{ [В/А]}. \quad (20)$$

Коефіцієнт підсилення сенсора струму:

$$k_{\text{п.сс}} \leq \frac{10}{k_{\text{ш}} \lambda I_{\text{н}}} = \frac{10}{0,00335 \cdot 3 \cdot 7,46} = 133,38. \quad (21)$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{\text{дс}} = k_{\text{ш}} k_{\text{п.сс}} = 0,00335 \cdot 133,38 = 0,447 \text{ [В/А]}. \quad (22)$$

Розрахунок елементів контуру швидкості.

Передаточна функція елементів зворотного зв'язку за швидкістю може бути представлена підсилювальною ланкою з коефіцієнтом підсилення $k_{\text{дш}}$

$$W_{\text{дш}}(p) = k_{\text{дш}}. \quad (23)$$

В якості датчика швидкості будемо використовувати тахогенератор. При цьому коефіцієнт передачі зворотного зв'язку $k_{\text{дш}}$ за швидкістю можна визначити як

$$k_{\text{дш}} = k_{\text{тг}} k_{\text{д.тг}} k_{\text{нпш}}, \quad (24)$$

де $k_{\text{тг}}$ – коефіцієнт підсилення тахогенератора:

$$k_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{н.тг}}}{\omega_{\text{н.тг}}}, \quad (25)$$

$U_{\text{н.тг}}$ – номінальна напруга тахогенератора; $\omega_{\text{н.тг}}$ – номінальна кутова швидкість тахогенератора:

$$\omega_{\text{н.тг}} = \frac{\pi n_{\text{н.тг}}}{30}, \quad (26)$$

$n_{\text{н.тг}}$ – номінальна швидкість обертання тахогенератора, який вибирається з умови $n_{\text{н.тг}} \geq n_{\text{н}}$; $k_{\text{д.тг}}$ – коефіцієнт дільника тахогенератора:

$$k_{\text{д.тг}} = \frac{U_{\text{з.ш}}}{U_{\text{н.тг}}}, \quad (27)$$

$U_{\text{з.ш}}$ – задавальна напруга в каналі регулювання швидкості ($U_{\text{з.ш}} = 10 \text{ В}$);

$k_{\text{нпш}}$ – нормувальний коефіцієнт підсилення сенсора швидкості ($k_{\text{нпш}} = 1$).

На цьому етапі одразу вибираємо тахогенератор ПТ-22 з параметрами, вказаними в табл. 8.

Тоді номінальна кутова швидкість тахогенератора:

$$\omega_{\text{н.тг}} = \frac{3,14 \cdot 800}{30} = 83,73 \text{ [рад/с]}. \quad (28)$$

Коефіцієнт підсилення тахогенератора:

$$k_{\text{тг}} = \frac{230}{83,73} = 2,747 \text{ [В} \cdot \text{с/рад]}. \quad (29)$$

Коефіцієнт дільника тахогенератора:

$$k_{\text{д.тг}} = \frac{10}{230} = 0,0435. \quad (30)$$

Таблиця 8. Параметри тахогенератора ПТ-22

Параметр	Числове значення
Номінальна швидкість обертання $n_{\text{н.тг}}$, об/хв	800
Номінальна вихідна напруга $U_{\text{тг}}$, В	230
Номінальний струм $I_{\text{н.тг}}$, А	0,2
Напруга збудження $U_{\text{зб}}$, В	55

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_{\text{дш}} = 2,747 \cdot 0,0435 \cdot 1 = 0,119 \text{ [В} \cdot \text{с/рад]}. \quad (31)$$

Розрахунок елементів контуру положення вихідного вала ДПС.

Положення вихідного вала в даній системі управління можна визначати програмно шляхом інтегрування отриманих значень швидкості обертання вала двигуна. В цьому випадку означимо передаточну функцію ДК пропорційною ланкою ($k_{\text{дк}}$ – коефіцієнт підсилення, приймаємо рівним 1).

$$W_{\text{дк}}(p) = k_{\text{дк}} = 1. \quad (32)$$

2.6. Побудова структурної схеми системи автоматичного управління двигуном постійного струму з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

Структурна схема системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом з розрахованими параметрами для обраного варіанта зображена на рис. 10.

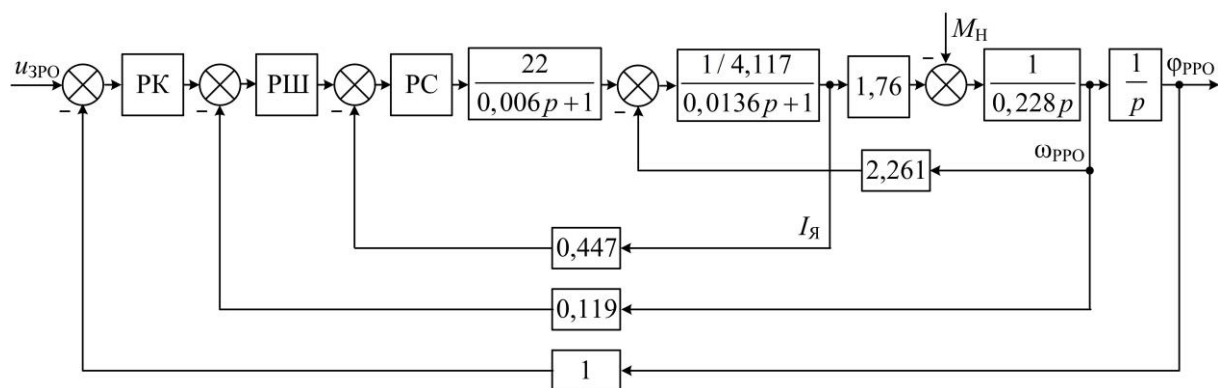


Рис. 10. Структурна схема триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом

Необхідно відзначити, що множник у знаменнику передостанньої передаточної функції представляє собою суму моментів інерції якоря $J_{\text{я}}$ та робочого органу $J_{\text{РО}}$, тобто

$$J_{\Sigma} = J_{\text{я}} + J_{\text{РО}} = 0,038 + 0,19 = 0,228 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

3. Розрахунок параметрів регуляторів системи автоматичного управління двигуном постійного струму та проведення математичного моделювання.

3.1. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора струму, ПІ-регулятора швидкості та П-регулятора кута повороту для триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом.

Налаштування регуляторів здійснюється послідовно від внутрішнього контуру струму до зовнішнього контуру кута повороту.

Налаштування регулятора струму.

Контур струму складається з об'єкта управління (кола якоря двигуна, силового перетворювача, сенсора струму) і регулятора струму. Контур замикається зворотним зв'язком за величиною напруги, яка знімається з сенсора струму в колі якоря.

Напруга завдання максимального струму:

$$U_{\text{зсmax}} = k_{\text{дс}} M_{\text{Н}} \leq 10 \text{ [В]}. \quad (33)$$

Фільтр у колі зворотного зв'язку за струмом розраховуємо, задаючись граничною частотою смуги пропускання $\omega_{\text{г}} = 500 \text{ с}^{-1}$ і ємністю фільтра $C_{\text{фс}} = 1 \text{ мкФ}$. В колі зворотного зв'язку за струмом використовуємо фільтр першого порядку, стала часу $T_{\text{фс}}$ якого визначається як

$$T_{\text{фс}} = \frac{1}{\omega_{\text{г}}} = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ [с]}. \quad (34)$$

Малу некомпенсовану сталу часу контуру струму в спрощеному вигляді можна представити як

$$T_{\mu c} = T_{\Gamma\Pi} + T_{\phi c} = 0,006 + 0,002 = 0,008 \text{ [с]}. \quad (35)$$

При цьому передаточна функція регулятора струму при налаштуванні контуру на модульний оптимум має вигляд

$$W_{pc}(p) = k_{pc} + \frac{1}{T_{pc}p}, \quad (36)$$

де k_{pc} – коефіцієнт передачі регулятора струму:

$$k_{pc} = \frac{T_E R_{\Sigma}}{2T_{\mu c} k_{\Gamma\Pi} k_{dc}} = \frac{0,0136 \cdot 4,117}{2 \cdot 0,008 \cdot 22 \cdot 0,447} = 0,356, \quad (37)$$

T_{pc} – стала часу регулятора струму:

$$T_{pc} = \frac{T_E}{k_{pc}} = \frac{0,0136}{0,356} = 0,0382 \text{ [с]}. \quad (38)$$

Налаштування регулятора швидкості.

Об'єкт регулювання контуру швидкості включає оптимізований контур струму (налаштований регулятор струму, тиристорний перетворювач, якірна обмотка ДПС та датчик струму), механічну частину електродвигуна (якір ДПС з обмотками та робочий орган) та сенсор швидкості.

Малу некомпенсовану сталу часу контуру швидкості в спрощеному вигляді можна розрахувати як:

$$T_{\mu\pi} = 2T_{\mu c} + T_{\phi\pi} = 2 \cdot 0,008 + 0,002 = 0,018 \text{ [с]}, \quad (39)$$

де $T_{\phi\pi}$ – стала часу фільтра першого порядку в колі зворотного зв'язку за швидкістю, приймаємо $T_{\phi\pi} = T_{\phi c}$.

Передаточна функція ПІ-регулятора швидкості при налаштуванні на симетричний оптимум:

$$W_{p\pi}(p) = k_{p\pi} + \frac{k_{p\pi}}{4T_{\mu\pi}p} = k_{p\pi} + \frac{1}{T_{p\pi}p}, \quad (40)$$

де $k_{рш}$ – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$k_{рш} = \frac{k_{дс} (J_{я} + J_{ро})}{2T_{мш} k_{дш} k_E} = \frac{0,447(0,038 + 0,19)}{2 \cdot 0,018 \cdot 0,119 \cdot 2,261} = 10,52; \quad (41)$$

$$T_{рш} = \frac{4T_{мш}}{k_{рш}} = \frac{4 \cdot 0,018}{10,52} = 0,0068 \text{ [с]}, \quad (42)$$

Налаштування регулятора кута повороту валу.

Регулятор кута повороту представляє собою П-регулятор, передаточна функція якого

$$W_{рк}(p) = k_{рк}, \quad (43)$$

де $k_{рк}$ – коефіцієнт підсилення регулятора кута:

$$k_{рк} = \frac{k_{дш}}{2T_{мш} k_p} = \frac{0,119}{2 \cdot 0,018 \cdot 1} = 3,31, \quad (44)$$

де k_p – передаточне число редуктора ($k_p = 1$).

Додатково РП містить обмежувач напруги ($0 \leq u_{рк} \leq 10 \text{ В}$).

3.2. Проведення математичного моделювання системи автоматичного управління двигуном постійного струму з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудова її перехідних процесів.

Використовуючи структурну схему системи (рис. 10) та розраховані значення параметрів регуляторів, побудуємо в програмному середовищі Simulink пакету прикладних програм Matlab схему для моделювання перехідних процесів (рис. 11).

Перехідним процесом в даному випадку будемо називати реакцію системи на вхідний ступінчатий сигнал. У процесі аналізу систем автоматичного управління (САУ) визначаються показники якості, за якими судять про властивості системи. Задоволення необхідним значенням показників якості САУ є достатньою умовою її працездатності.

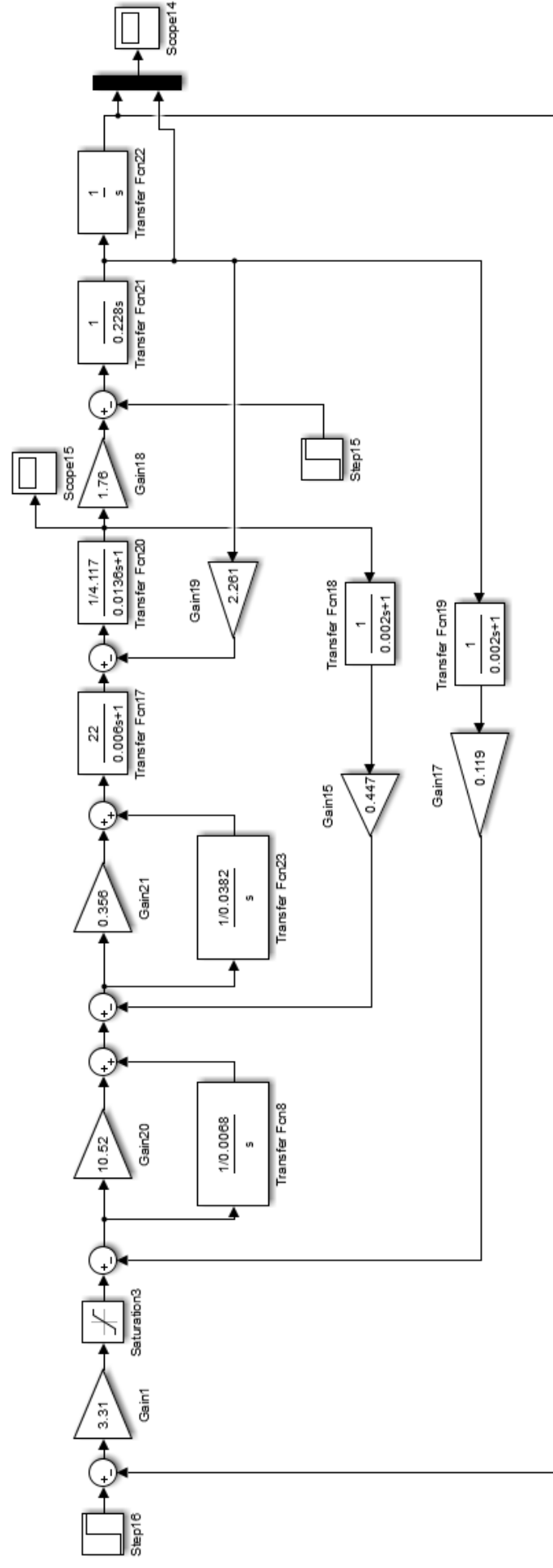


Рис. 11. Схема моделювання триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом

Показники якості визначаються шляхом аналізу перехідного процесу. До основних показників якості відносяться:

- швидкодія (час або тривалість перехідного процесу);
- перерегулювання;
- коливальність;
- статична похибка.

Розглянемо приклад перехідного процесу системи автоматичного управління (рис. 12) та означимо основні показники якості.

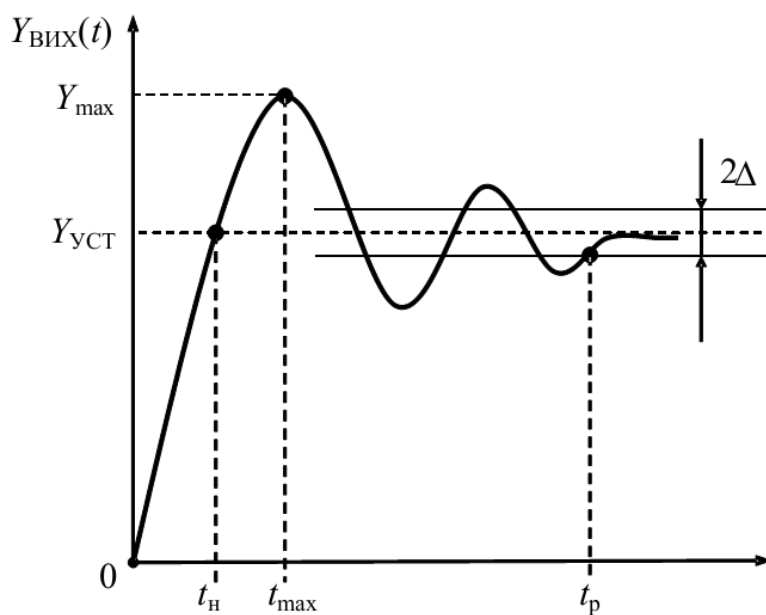


Рис. 12. Перехідний процес при ступінчастому вхідному сигналі

Швидкодія визначається тривалістю перехідного процесу t_p . Оскільки реальний перехідний процес продовжується нескінченно довго, то на практиці вважають, що перехідний процес закінчився, якщо відхилення вихідної величини $Y_{\text{вих}}$ від усталеного значення $Y_{\text{уст}}$ не перевищує деякої наперед заданої величини Δ . Величина Δ задається у відсотках від усталеного значення $Y_{\text{уст}}$, зазвичай $\Delta = 3 \dots 5 \%$.

Перерегулювання σ_{max} — максимальне відхилення перехідної характеристики $Y_{\text{вих}}(t)$ від усталеного значення $Y_{\text{уст}}$ (більше заданої величини Δ), що виражається у відносних одиницях або у відсотках:

$$\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\%.$$

При цьому час досягнення першого максимуму t_{\max} – це час, за який перехідна характеристика $Y_{\text{вих}}(t)$ вперше досягає максимального значення Y_{\max} , а час наростання t_n – це час, за який перехідна характеристика $Y_{\text{вих}}(t)$ вперше перетинає рівень усталеного значення $Y_{\text{уст}}$.

Показник коливальності μ – кількість перерегулювань за час перехідного процесу t_p ($\mu = 4$, рис. 12).

Статична помилка $\delta_{\text{ст}}$ – відхилення перехідної характеристики $Y_{\text{вих}}(t)$ в усталеному режимі ($Y_{\text{вих}}(t) = Y_{\text{уст}}$) від заданого значення $Y_{\text{зад}}$, що виражається у відносних одиницях, або у відсотках:

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зад}}}{Y_{\text{зад}}} \cdot 100\%.$$

За результатами математичного моделювання можна визначити показники якості розробленої системи автоматичного управління кутом повороту валу ДПС при подачі вхідного ступінчатого сигналу (пуск системи з початкового положення для $\varphi_{\text{ppo}} = 0$ рад та $\omega_{\text{ppo}} = 0$ рад/с згідно з рис. 13):

- час регулювання $t_p \approx 0,79$ [с];
- перерегулювання $\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = 0 \%$;
- показник коливальності $\mu = 0$;
- статична помилка $\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зад}}}{Y_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{70,8 - 70}{70} \cdot 100\% = 1,14 \%$.

За швидкістю дана система відпрацьовує наступні показники якості (визначаються за рис. 14):

- час регулювання $t_p \approx 0,224$ [с];
- перерегулювання $\sigma_{\max} = \frac{117,8 - 84}{84} \cdot 100\% = 40,2 \%$;

- показник коливальності $\mu = 0$;

- статична помилка $\delta_{\text{ст}} = \frac{84 - 83,73}{83,73} \cdot 100\% = 0,32\%$.

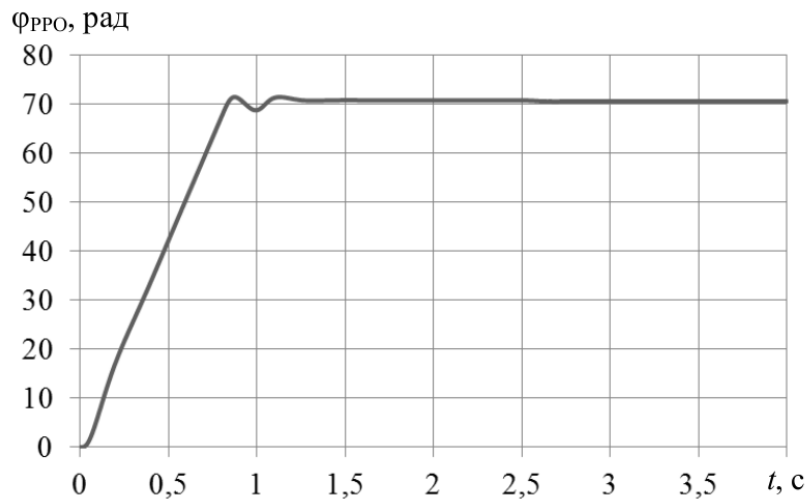


Рис. 13. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту ДПС

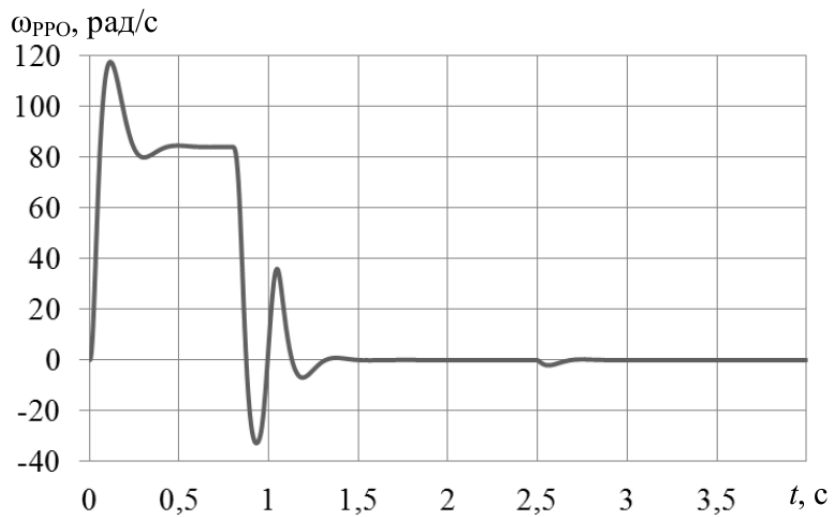


Рис. 14. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління ДПС за кутовою швидкістю обертання

Спостерігається також значний сплеск пускового струму (рис. 15).

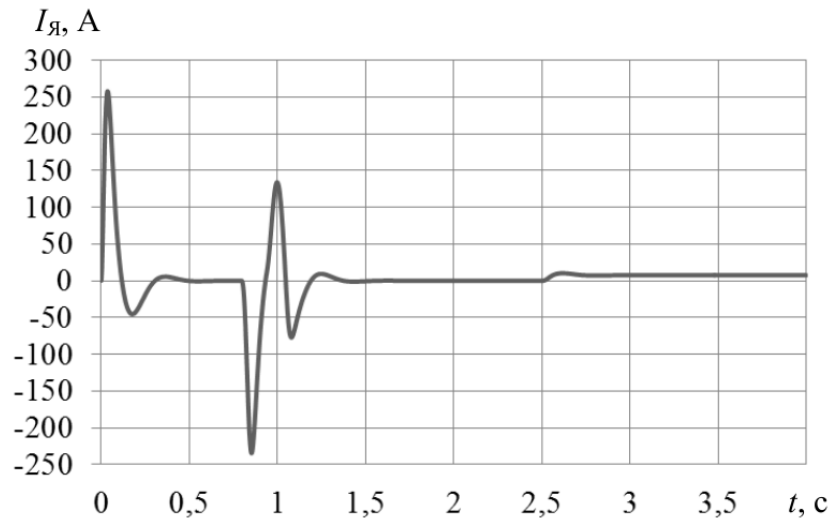


Рис. 15. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління ДПС за струмом

3.3. Покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи шляхом додаткового налагодження коефіцієнтів регуляторів.

Покращення якості перехідних процесів розрахованої системи проводиться шляхом послідовного налагодження коефіцієнтів підсилення та сталих часу регуляторів. Спочатку змінюють коефіцієнт підсилення регулятора (при фіксованій сталій часу ПІ-регулятора) для досягнення необхідної точності, потім отримане значення коефіцієнта підсилення фіксують та налаштовують сталу часу для досягнення необхідного часу перехідного процесу. Налаштування контурів проводиться послідовно від внутрішнього до зовнішнього. В нашому випадку параметри ПІ-регулятора струму змінювати не будемо, а одразу проведемо налаштування ПІ-регулятора швидкості. За результатами математичного моделювання при $k_{рш} = 11$ та $T_{рш} = 0,173$ можна визначити показники якості системи автоматичного управління кутом повороту валу ДПС при подачі вхідного ступінчатого сигналу (рис. 16):

- час регулювання $t_p \approx 0,82$ [с];
- перерегулювання $\sigma_{\max} = 0$ %;
- показник коливальності $\mu = 0$;

- статична помилка $\delta_{\text{ст}} = \frac{71-70}{70} \cdot 100\% = 1,4 \%$;

та за швидкістю (рис. 17):

- час регулювання $t_p \approx 0,0885 \text{ [с]}$;

- перерегулювання $\sigma_{\text{max}} = 0 \%$;

- показник коливальності $\mu = 0$;

- статична помилка $\delta_{\text{ст}} = \frac{85,46-83,73}{83,73} \cdot 100\% = 2,07 \%$.

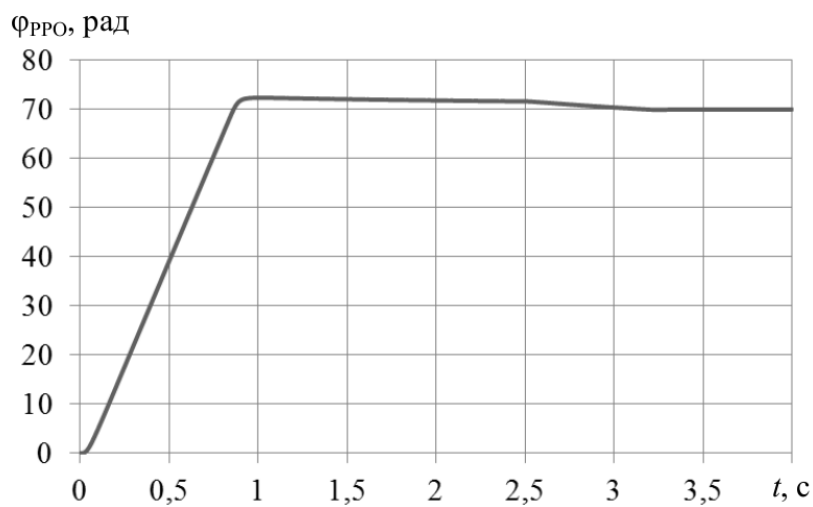


Рис. 16. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління кутом повороту ДПС після додаткового налагодження РШ

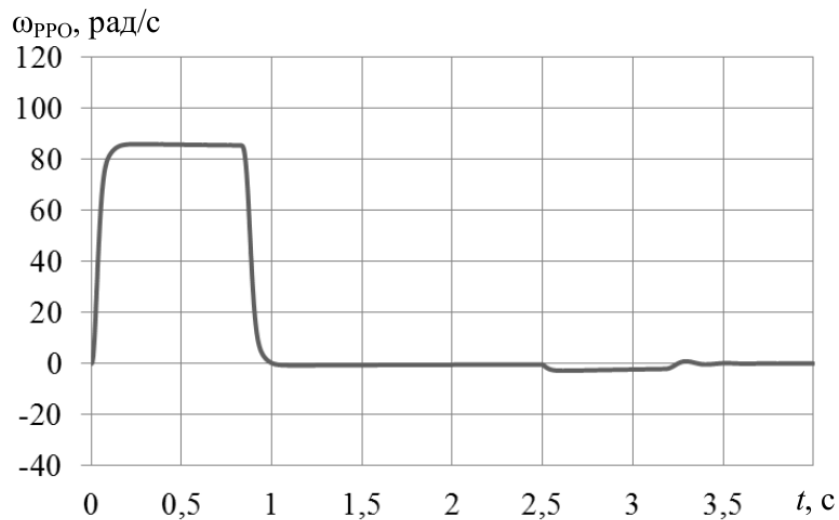


Рис. 17. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління ДПС за швидкістю обертання з додатково налагодженим РШ

Додатково, при налаштованих параметрах РШ система показує на 20 % менший сплеск пускового струму (рис. 18).

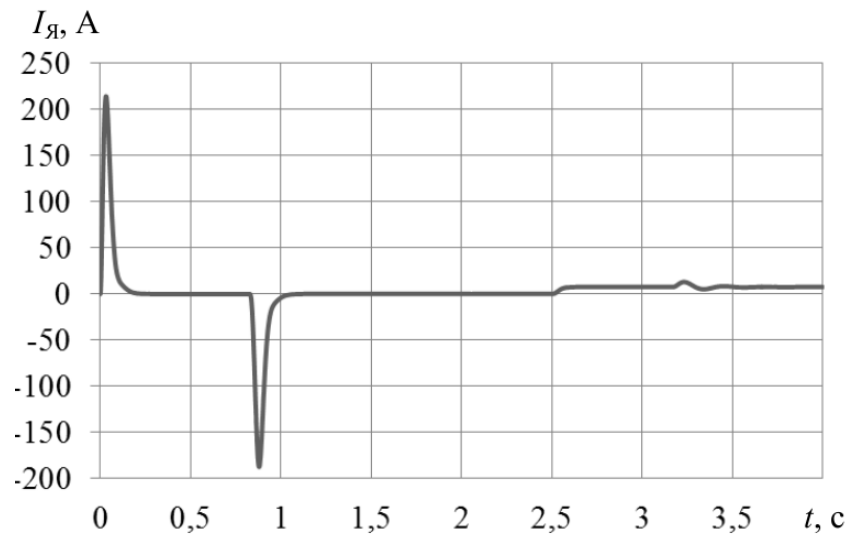


Рис. 18. Перехідний процес триконтурної системи автоматичного управління ДПС за струмом після додаткового налагодження РШ

Основні показники якості при пуску системи зведені в табл. 9. З табл. 9 видно, що додатковим налаштуванням регуляторів вдалося значно підвищити якість управління за швидкістю та, дещо, за кутом повороту. При значенні часу 2,5 с на систему починає діяти навантаження M_H . З рис. 17, 18 видно, що система відпрацьовує задане навантаження.

Таблиця 9. Основні показники якості розробленої системи управління:
1 – з розрахованими та 2 – з налаштованими коефіцієнтами регуляторів

Показник якості	Значення показників якості систем управління			
	За кутом		За швидкістю	
	1	2	1	2
t_p, c	0,79	0,82	0,224	0,0885
$\sigma_{max}, \%$	0	0	40,2	0
$\delta_{ст}, \%$	1,14	1,4	0,32	2,07
μ	0	0	0	0

4. Вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

4.1. Вибір програмно-апаратних засобів реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

Головним апаратним засобом реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління кутовим переміщенням валу двигуна доцільно вибрати програмований логічний контролер (ПЛК). Такий пристрій здатний проводити вимірювання цікавих для розробника фізичних величин, реалізовувати достатньо складні алгоритми управління за невеликий проміжок часу та виробляти керуючий вплив (сигнал). Для автоматичного регулювання заданих значень кутового положення валу виберемо ПЛК ICP DAS μ PAC 7186EX - SM, основні характеристики якого зведені в табл. 10. Зовнішній вигляд даного ПЛК наведений на рис. 19.

Таблиця 10. Основні технічні характеристики ПЛК μ PAC 7186EX-SM

Тип процесору		80186-сумісний
Максимальна частота процесору		80 МГц
Оперативна пам'ять	Максимальний об'єм	512 кб
Енергонезалежна пам'ять	Максимальний об'єм	16 кб
	Тип	EEPROM
Електронний диск	Встановлено	512 кб
	Тип	Flash
Годинник реального часу		Так
Сторожовий таймер		1.6 с

Продовження таблиці 10

Напруга живлення	+10...+30В
Споживана потужність	1,5 Вт
Час напрацювання на відмову	60000 год



Рис. 19. Зовнішній вигляд ПЛК ICP DAS μPAC 7186EX –SM

ПЛК може бути додатково оснащений платою розширення X305 (рис. 20), параметри якої зведені в табл. 11.

Програма, яка реалізує розроблені регулятори, може бути написана на мові C++ в середовищі розробки MiniOS7 Studio (відкритий доступ) з використанням компілятора Borland C++ 3.1. Запис програми до контролера здійснюється за допомогою програмного забезпечення MiniOS Utility.

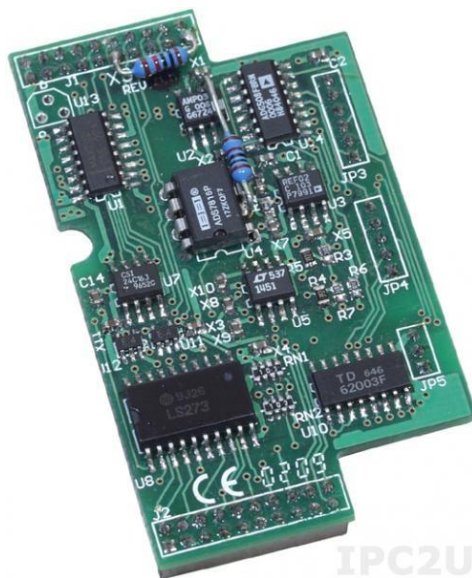


Рис. 20. Мезонінна плата розширення X305

Таблиця 11. Технічні характеристики плати розширення X305

Каналів аналогового вводу	7
Діапазон вхідного аналогового сигналу за напругою, В	+/- 5
Каналів дискретного виводу	2
Вихідна напруга дискретного виводу, В	5...30
Каналів аналогового виводу	1
Діапазон вихідного аналогового сигналу за напругою, В	+/- 5
Каналів дискретного вводу	2
Вид монтажу	вбудовуваний

4.2. Вибір датчиків струму, швидкості та кута повороту для реалізації зворотних зв'язків розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

За результатами розрахунку вибираємо стандартний коефіцієнт підсилення сенсора струму $k_{п.сс} = 133,33$ та шунт 75ШИП з номінальним струмом 25 А. Технічні дані шунта зведені в табл. 12, зовнішній вигляд зображений на рис. 21.

Таблиця 12. Основні технічні характеристики вибраного шунта

Тип	Номінальний струм, А	Клас точності
75ШИП	25	0,5

Визначення кутового положення вала робочого органу проводиться програмно за сигналами з датчика швидкості. В якості датчиків швидкості зазвичай можуть використовуватися датчики ЕРС, тахометричні мости і тахогенератори змінного і постійного струмів. Тахогенератор постійного струму в даному випадку є найбільш доцільним, оскільки надійно закріплюється на валу двигуна з протилежного боку від виступаючого кінця, має достатню лінійність перетворення «частота обертання → напруга», а також не потребує додаткового випрямлення вихідної напруги для адаптації до системи управління.



Рис. 21. Вимірювальний шунт типу 75ШИП

Кутова швидкість обертання вала робочого органу в системі визначається за допомогою тахогенератора ПТ-22 з параметрами, вказаними в табл. 8.

Кут повороту вала двигуна розраховується програмно шляхом інтегрування виміряних тахогенератором значень кутової швидкості обертання.

4.3. Вибір апаратних засобів реалізації перетворення цифрових та

аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління двигуном постійного струму.

ПЛК виконує функції автоматичного регулювання заданих значень кутового положення валу двигуна на базі інформації з датчиків зворотних зв'язків. Аналогові сигнали від датчика швидкості обертання валу двигуна та датчика струму (шунта) надходять до даної системи та безпосередньо сприймаються ПЛК через аналогові входи. Керуючий сигнал від ПЛК безпосередньо надходить на тиристорний перетворювач системи управління по каналу аналогового виводу.

5. Загальні висновки за результатами проведеної роботи.

В результаті виконання індивідуального завдання розроблено систему автоматичного управління кутом повороту двигуна постійного струму зі зворотними зв'язками за струмом, швидкістю та кутом із застосуванням сучасних програмно-апаратних засобів реалізації керуючих пристроїв.

Наведено математичні моделі та визначено основні параметри двигуна постійного струму та тиристорного перетворювача згідно із заданим варіантом. Розроблено структурну схему системи підпорядкованого управління кутом повороту двигуна постійного струму.

Крім того, виконані синтез та налаштування коефіцієнтів П-регулятора кута повороту, ПІ-регуляторів швидкості (на симетричний оптимум) та струму (на модульний оптимум). Проведено додаткове налаштування регулятора швидкості з використанням методу параметричної оптимізації в програмному забезпеченні MatLab за допомогою пакету Simulink, що позитивно відзначилося на показниках якості управління. Проведено порівняльний аналіз перехідних процесів систем з розрахованими та налаштованими параметрами регуляторів. Отримано аперіодичний перехідний процес за швидкістю, який досягається при наступних параметрах регуляторів: $k_{pk} = 3,31$; $k_{pc} = 0,356$;

$T_{pc} = 0,0382$; $k_{рш} = 11$; $T_{рш} = 0,173$. При цьому за кутом повороту найменше значення коливальності ($\mu = 0$) та перерегулювання ($\sigma_{max} = 0$ %) забезпечується при одночасній наявності статичної помилки ($\delta_{ст} = 1,4$ %) та часі регулювання ($t_p = 0,82$ с). Треба також відзначити, що в цілому при додатковому налаштуванні параметрів регуляторів вдалося досягти більш високих показників якості за швидкістю (t_p зменшився майже на 1,14 с, вдалося позбавитися перерегулювання при збільшенні $\delta_{ст}$ на 1,75 %), однак при цьому дещо погіршилися показники якості системи за кутом повороту (t_p збільшився на 0,03 с, а $\delta_{ст}$ – на 0,26 %).

Вибрано програмно-апаратні засоби реалізації системи управління кутом повороту двигуна. Апаратна частина включає програмований логічний контролер, датчики струму та швидкості. Програмна частина має на увазі реалізацію алгоритмів роботи налаштованих регуляторів кута повороту, швидкості та струму, а також визначення кута повороту за вимірними значеннями кутової швидкості обертання.

Приклад виконання індивідуального завдання № 2

Використовуючи послідовність проектування системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта (с. 13) виконаємо синтез двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою.

1. Розгляд функціональної схеми системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

1.1. Функціональна схема двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою наведена на рис. 22.

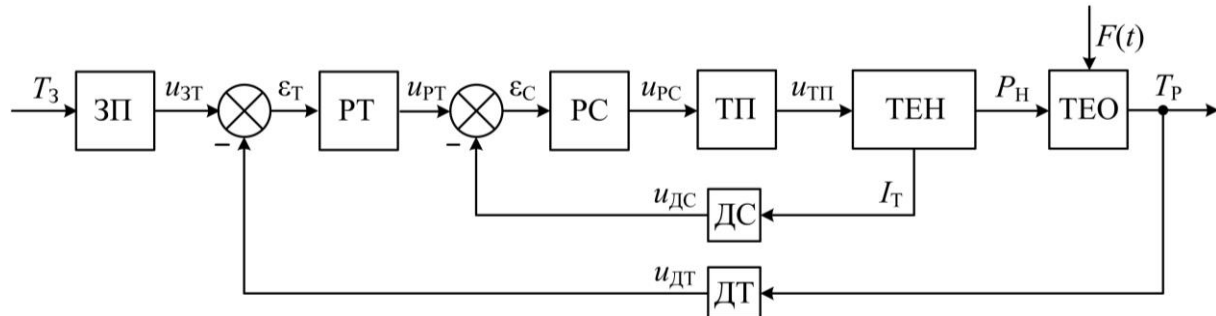


Рис. 22. Функціональна схема двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою

1.2. Детальний опис основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

Система автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта (рис. 22) містить наступні основні елементи: ЗП – задавальний пристрій; РТ – регулятор температури нагріву; РС – регулятор струму; ТП – тиристорний перетворювач; ДС – датчик струму; ТЕН – трубчатий

електронагрівач; ТЕО – теплоенергетичний об’єкт; ДТ – датчик температури.

1.3. Принцип дії основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об’єкта.

Оператор задає значення температури нагріву T_3 робочого органу за допомогою задавального пристрою, найчастіше з людино-машинного інтерфейсу комп’ютеризованої системи управління (сигнал u_{3T}). Після суматора сигнал розузгодження у вигляді помилки управління температурою нагріву ε_T

$$\varepsilon_T = u_{3T} - u_{dT}$$

подається на регулятор температури нагріву РТ, який визначає сигнал управління регулятора температури $u_{РТ}$. Далі, після другого суматора, сигнал розузгодження у вигляді помилки управління струмом ТЕНа ε_C

$$\varepsilon_C = u_{РТ} - u_{дс},$$

який подається на регулятор струму РС, що визначає сигнал управління регулятора струму $u_{РС}$ – величину напруги, яку необхідно подати на тиристорний перетворювач ТП, щоб останній формував наругу $u_{ТП}$ для нагрівача.

ТЕН розвиває потужність P_H та нагріває теплоенергетичний об’єкт ТЕО. Реальне значення температури ТЕО T_p відслідковується датчиком температури ДТ (сигнал u_{dT}). Поточне значення струму в обмотці трубчатого електронагрівача I_T визначається за допомогою датчика струму ДС (сигнал $u_{дс}$). Сигнали зворотного зв’язку u_{dT} , $u_{дс}$ служать для корекції роботи системи та підвищення показників якості при відпрацюванні збурювального впливу $F(t)$.

2. Математичний опис основних елементів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об’єкта та побудова її

структурної схеми.

2.1. Математичний опис трубчатого електронагрівача.

Вихідне диференціальне рівняння ТЕНа складається на підставі законів фізики. Для електричного кола використовується другий закон Кірхгофа, згідно з яким напруга на ТЕНі U_T визначається з рівняння

$$U_T = R_{T\Sigma} I_T + L_{T\Sigma} \frac{dI_T}{dt}, \quad (45)$$

де t – поточний час; I_T – струм в провіднику нагрівача; $R_{T\Sigma} I_T$ характеризує падіння напруги на активному опорі електричного ланцюга нагрівача відповідно до закону Ома; $L_{T\Sigma}(dI_T/dt)$ відображає наявність ЕРС самоіндукції, що виникає в обмотці при зміні струму нагрівача.

Теплова енергія Q_T , яка виділяється в провіднику, по якому протікає електричний струм, згідно закону Джоуля-Ленца, визначається як

$$Q_T = I_T^2 R_T \Delta t, \quad (46)$$

де R_T – активний опір ТЕНа, Δt – час нагріву електричного провідника.

При цьому, потужність нагрівача P_H може бути знайдена як

$$P_H = \frac{dQ_T}{dt} = I_T^2 R_T. \quad (47)$$

2.2. Передаточна функція трубчатого електронагрівача та розрахунок її параметрів для обраного варіанту.

Для дослідження швидкоплинних процесів за допомогою ЕОМ зручно використовувати структурне представлення математичної моделі нагрівача. Для цього перетворимо отримане лінійне диференціальне рівняння (45) по Лапласу при нульових початкових умовах. В результаті отримаємо алгебраїчне рівняння:

$$pI_T(p) = \frac{U_T(p) - R_{T\Sigma} I_T(p)}{L_{T\Sigma}}, \quad (48)$$

де p – оператор Лапласа, а величини $I_T(p)$, $U_T(p)$ – зображення по Лапласу змінних I_T , U_T , відповідно. Після еквівалентних перетворень це рівняння може бути представлене у формі:

$$I_T(p) = \frac{U_T(p)}{R_{T\Sigma}(T_E p + 1)}, \quad (49)$$

де $T_E = \frac{L_{T\Sigma}}{R_{T\Sigma}}$ – електромагнітна стала часу електричного провідника нагрівача.

Тоді запишемо передаточну функцію електричної частини нагрівача $W_{HE}(p)$ через відношення

$$W_{HE}(p) = \frac{I_T(p)}{U_T(p)} = \frac{1/R_{T\Sigma}}{T_E p + 1}. \quad (50)$$

За заданими параметрами силової частини системи (табл. 13) визначимо діюче значення опору силового кола нагрівача $R_{T\Sigma}$, що дорівнює сумі опору ТЕНа (R_T), активних опорів згладжувального дроселя ($R_{ДР}$) та трансформатора ($R_{ТР}$)

$$R_{T\Sigma} = R_T + R_{ДР} + 2R_{ТР} = 117 + 0,037 + 2 \cdot 0,055 = 117,15 \text{ [Ом]}. \quad (51)$$

Електромагнітна стала часу головного кола нагрівача T_E може бути визначена наступним чином

$$T_E = \frac{L_T + L_{ДР} + L_{ТР}}{R_{T\Sigma}} = \frac{0,23 + 0,505 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}}{117,15} = 0,00197 \text{ [с]}. \quad (52)$$

Таблиця 13. Характеристики заданого трубчатого електронагрівача

№ варіанта	Тип ТЕН	U_H , В	I_H , А	P_H , Вт	R_T , Ом	L_T , мГн
1	ТЕН-1	110	0,94	103	117	230

2.3. Побудова структурної схеми трубчатого електронагрівача.

При формуванні структурної схеми приймаються такі припущення:

(а) в процесі нагріву ТЕНа опір його обмоток не змінюється, (б) нелінійні

елементи структурної схеми лінеаризовані, (в) тиристорний перетворювач працює в режимі безперервного струму, (г) пульсаціями випрямленої напруги нехтуємо. Структурна схема трубчатого електронагрівача представлена на рис. 23.

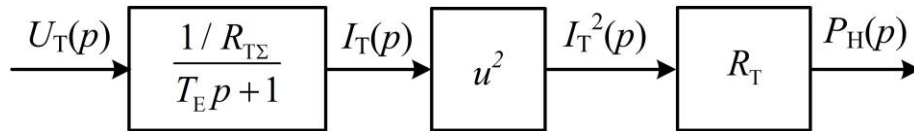


Рис. 23. Структурна схема електронагрівача

2.4. Передаточна функція теплоенергетичного об'єкта за заданими параметрами для обраного варіанту.

Передаточна функція узагальненого теплоенергетичного об'єкта управління, враховуючи дані табл. 14, має наступний вигляд:

$$W_{\text{ТЕО}}(p) = \frac{T_{\text{ТЕО}}(p)}{P_{\text{Н}}(p)} = \frac{0,97 \cdot e^{-p}}{(10p + 1)(26p + 1)}. \quad (53)$$

Таблиця 14. Параметри заданого теплоенергетичного об'єкта

№ варіанта	$k_{\text{ТЕО}}$	$\tau_{\text{ТЕО}}, \text{с}$	$T_{1\text{ТЕО}}, \text{с}$	$T_{2\text{ТЕО}}, \text{с}$
1	0,97	1	10	26

2.5. Передаточна функція тиристорного перетворювача за заданими параметрами.

В спрощеному вигляді передаточна функція ТП може бути записана як

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{u_{\text{ТП}}(p)}{u_{\text{упр}}(p)} = \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1}, \quad (54)$$

де $u_{\text{упр}}$ – керуюча напруга, $k_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача, $k_{\text{ТП}} = U_{\text{Н}}/U_{\text{УПР}} = 110/10 = 11$, $U_{\text{УПР}}$ – діапазон зміни керуючої напруги, $U_{\text{УПР}} = 10 \text{ В}$; $T_{\text{ТП}}$ – постійна часу ТП.

Використовуючи числові дані, отримаємо передаточну функцію ТП

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{11}{0,006p + 1}. \quad (55)$$

2.6. Математичний опис та передаточна функція датчиків системи автоматичного управління для обраного варіанта.

Розрахунок елементів контуру струмів.

Передаточна функція елементів зворотного зв'язку за струмом може бути представлена підсилювальною ланкою з коефіцієнтом підсилення $k_{\text{дс}}$

$$W_{\text{дс}}(p) = k_{\text{дс}}. \quad (56)$$

В якості сенсора струму використовується шунт, коефіцієнт підсилення $k_{\text{ш}}$ якого може бути визначений як

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.н}}}{I_{\text{ш.н}}}, \quad (57)$$

де $U_{\text{ш.н}}$ – номінальна напруга шунта (для стандартних вимірювальних шунтів $U_{\text{ш.н}} = 75 \text{ мВ}$); $I_{\text{ш.н}}$ – номінальний струм шунта (вибирається з умови $I_{\text{ш.н}} \geq \lambda I_{\text{н}}$, де λ – надвантажувальна здатність електричного провідника, приймаємо $\lambda = 3$).

$$k_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,94} = 0,0266 \text{ [В/А]}. \quad (58)$$

Коефіцієнт підсилення сенсора струму:

$$k_{\text{п.сс}} \leq \frac{10}{k_{\text{ш}} \lambda I_{\text{н}}} = \frac{10}{0,0266 \cdot 3 \cdot 0,94} = 133,312. \quad (59)$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{\text{дс}} = k_{\text{ш}} k_{\text{п.сс}} = 0,0266 \cdot 133,312 = 3,55 \text{ [В/А]}. \quad (60)$$

Розрахунок елементів контуру температури.

В якості сенсора температури будемо використовувати термопару. Вибір датчика здійснюється, виходячи з наступної умови: постійна часу

датчика має бути набагато меншою за постійну часу об'єкту. Передаточна функція ДТ може бути записана у вигляді аперіодичної ланки як

$$W_{\text{дт}}(p) = \frac{k_{\text{пт}}}{T_{\text{дт}} p + 1}, \quad (61)$$

де $k_{\text{ПТ}}$ – коефіцієнт підсилення зворотнього зв'язку за температурою; $T_{\text{ДТ}}$ – постійна часу термопари, приймаємо $T_{\text{ДТ}} = 0,5$ с.

$$k_{\Pi T} = k_{\text{ДТ}} \cdot k_{\Pi}, \quad (62)$$

де $k_{\text{ДТ}}$ – коефіцієнт підсилення датчика температури (термопари); $k_{\text{П}}$ – коефіцієнт підсилення додаткового підсилювача.

$$k_{\text{ДТ}} = \frac{E_{\text{ДТmax}}}{T_{\text{ДТmax}}}, \quad (63)$$

де $E_{\text{ДТmax}}$ – максимальне значення термо-ЕРС за максимального значення температури $T_{\text{ДТmax}}$, приймаємо $T_{\text{ДТmax}} = 600$ °С та за градуовальною таблицею, що наведена в довідковій літературі, для хромель-копелевої термопарі $E_{\text{ДТmax}} = 49,02 \cdot 10^{-3}$ В (див. табл. 15). Тоді

$$k_{\text{дт}} = \frac{49,02 \cdot 10^{-3}}{600} = 8,17 \cdot 10^{-5} \text{ [B/}^\circ\text{C]}. \quad (64)$$

$$k_{\Pi} = \frac{U_{\text{yIP}}}{E_{\text{JTmax}}} = \frac{10}{49,02 \cdot 10^3} = 204. \quad (65)$$

Таблица 15. Термоерс (в мВ) для хромель-копелевых (ХК) термопар

T, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
		-0,64	-1,27	-1,89	-2,50	-3,11				
0	0	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,66	15,48	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,58	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42									

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за температурою:

$$k_{\text{ПТ}} = 8,17 \cdot 10^{-5} \cdot 204 = 0,017 \text{ [B/}^{\circ}\text{C]}. \quad (66)$$

Тоді передаточна функція ДТ матиме вигляд

$$W_{\text{ДТ}}(p) = \frac{0,017}{0,5p + 1}. \quad (67)$$

2.7. Побудова структурної схеми системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

Структурна схема системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта з розрахованими параметрами для обраного варіанта зображена на рис. 24.

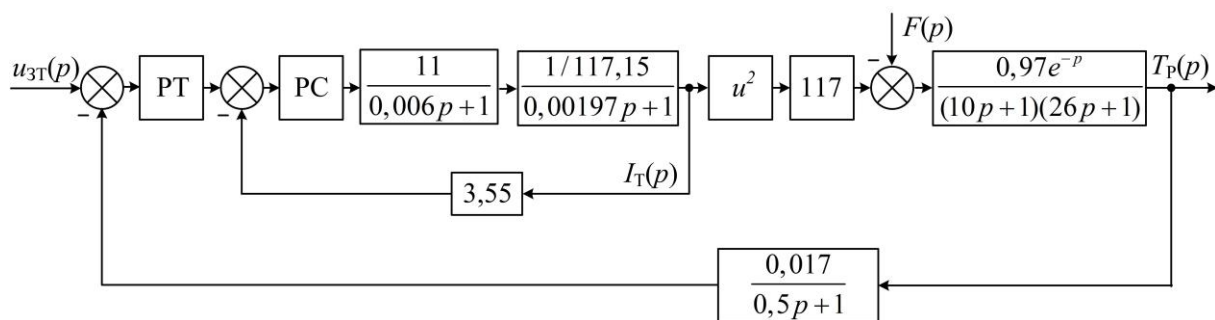


Рис. 24. Структурна схема двоконтурної системи автоматичного управління нагрівом ТЕО з розрахованими параметрами зі зворотними зв'язками за струмом та температурою

3. Розрахунок параметрів регуляторів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта та проведення математичного моделювання.

3.1. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора струму та ПІ-регулятора температури для двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою.

Налаштування регуляторів здійснюється послідовно від внутрішнього контуру струму до зовнішнього контуру температури градієнтним методом параметричної оптимізації коефіцієнтів регуляторів.

Налаштування регулятора струму.

Контур струму складається з об'єкта управління (електричного кола ТЕНа, силового перетворювача, сенсора струму) і регулятора струму. Контур замикається зворотним зв'язком за величиною напруги, яка знімається з сенсора струму в колі нагрівача.

Напруга завдання максимального струму:

$$U_{\text{зсмах}} = k_{\text{дс}} \lambda I_{\text{Н}} \leq 10 \text{ [В]}. \quad (68)$$

Передаточна функція ПІ-регулятора струму має наступний вигляд:

$$W_{\text{РС}}(p) = K_{\text{ПС}} + \frac{K_{\text{ІС}}}{p}, \quad (69)$$

де $K_{\text{ПС}}$ – коефіцієнт підсилення пропорційної складової РС; $K_{\text{ІС}}$ – коефіцієнт підсилення інтегральної складової РС; p – оператор Лапласа.

В якості цільової функції в даному випадку пропонується використання квадратичного інтегрального відхилення реального значення струму ТЕНа від заданого:

$$\min_q f(t, q) = \min_q \left[\int e_1(t, q)^2 dt \right] = \min_q \left[\int (I_3(t) - I_p(t))^2 dt \right], \quad (70)$$

де $f(t, q)$ – квадратичне інтегральне відхилення реального значення струму в колі нагрівача I_p від заданого I_3 ; q – параметр оптимізації; e_I – помилка управління за струмом.

Вектор параметрів оптимізації в даному випадку має наступний вигляд:

$$Q = \{K_{\text{ПС}}, K_{\text{ІС}}\}. \quad (71)$$

Початкові значення коефіцієнтів регулятора струму перед оптимізацією обираємо наступними:

$$K_{\text{ПС}} = 1; \quad (72)$$

$$K_{\text{ІС}} = 1. \quad (73)$$

Для оптимізації вищенаведених коефіцієнтів можуть бути застосовані наступні ітераційні процедури:

$$K_{\text{ПС}}[n+1] = K_{\text{ПС}}[n] - \gamma[n] \left. \frac{\partial f(q)}{\partial K_{\text{ПС}}} \right|_{K_{\text{ПС}}[n]}; \quad (74)$$

$$K_{\text{ІС}}[n+1] = K_{\text{ІС}}[n] - \gamma[n] \left. \frac{\partial f(q)}{\partial K_{\text{ІС}}} \right|_{K_{\text{ІС}}[n]}, \quad (75)$$

де γ – крок градієнтного спуску; n – номер ітерації.

В даній роботі вищенаведені процедури параметричної оптимізації доцільно здійснювати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Matlab Simulink (блок «PID-controller»).

Вихідний сигнал регулятора представляє собою зважену суму вхідного сигналу, інтегралу від вхідного сигналу і похідної вхідного сигналу. Ваги складаються з параметрів підсилення вхідного сигналу, інтегралу від вхідного сигналу і похідної вхідного сигналу.

«PID-контролер» («ПІД-регулятор») – це досить універсальний блок, вихідний сигнал якого задається операторним виразом:

$$P + I \frac{1}{p} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}}, \quad (76)$$

де P – коефіцієнт підсилення помилки управління; I – коефіцієнт підсилення інтегральної складової помилки управління; D – коефіцієнт підсилення диференціальної складової помилки управління; N – стала часу фільтруючої ланки.

Параметр P фактично задає компоненту вихідного сигналу, пропорційну вхідному сигналу, параметр I задає пропорційність інтегралу вхідного сигналу, параметр D задає пропорційність похідної вхідного сигналу. Змінюючи параметри P , I і D , можна задавати різний вигляд

вихідного сигналу, в тому числі у вигляді інтеграла або похідної від вхідного.

Типи контролерів, які можна вибрати в налаштуваннях регулятора:

- «PID» (за замовчуванням). Реалізує контролер з пропорційною, інтегральною і похідною складовою (ПІД).
- «PI». Реалізує контролер з пропорційною та інтегральною складовими (ПІ).
- «PD». Реалізує контролер як з пропорційною, так і з похідною складовими (ПД).
- «P». Реалізує контролер пропорційної дії (П).
- «I». Реалізує контролер інтегральної складової (І).

Параметри у блоці «ПІД-регулятор» включають в себе:

- тип контролера і форму;
- часову область (безперервну або дискретну);
- початкові умови і виклики скидання тригера;
- сигнал слідкування за плавним переходом управління та багатопетлевий контроль;
- межі насичення, що обмежують значення вихідного сигналу інтегратора.

Налаштування регулятора починається з подвійного натискання лівою кнопкою миші на блок «PID Controller», тим самим викликається вікно налагодження параметрів регулятора (рис. 25). У рядку «Controller» (1) обирається тип регулятора («PID», «PI», «PD», «P», «I»). Натиском кнопки «Tune» (2) запускається автоматичний підбір коефіцієнтів регулятора, значення яких записується до спеціальних рядків (3).

При налаштуванні коефіцієнтів регулятора Simulink лінеаризує об'єкт в поточній робочій точці і будує лінійну модель об'єкта з постійними параметрами, з якою взаємодіє блок ПІД-регулятора в замкнутому контурі управління. Обчислювальна затримка, пов'язана з дискретизацією сигналу, враховується автоматично. Використовуючи

метод автоматичного налаштування, Simulink обчислює початкові коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора. Цей метод не накладає ніяких обмежень на порядок об'єкта або постійну часу, причому він працює в областях як безперервного, так і дискретного часу.

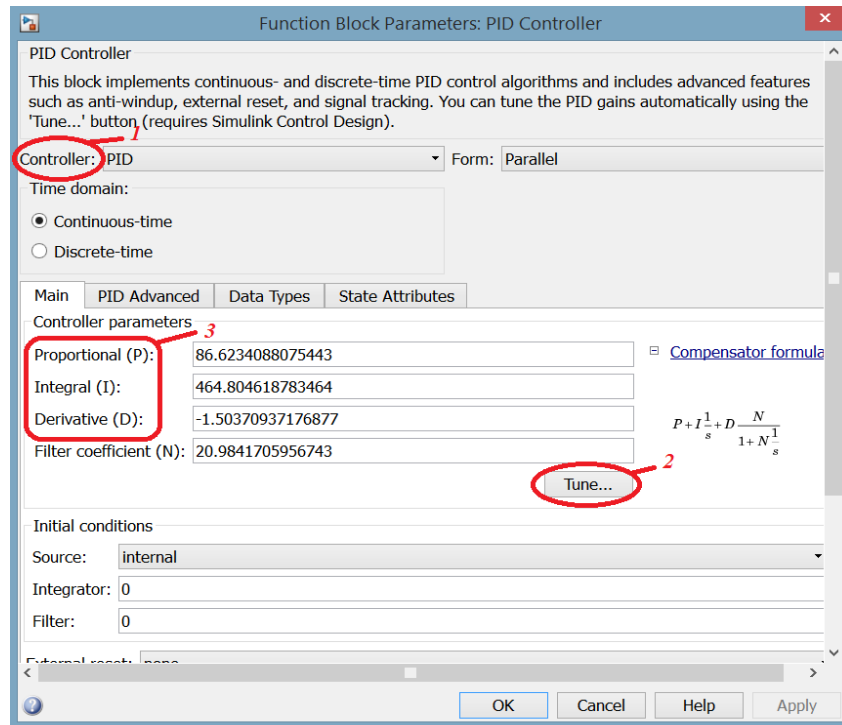


Рис. 25. Вікно налаштування параметрів регулятора: 1 – рядок вибору типу регулятора; 2 – кнопка початку автоматичного підбору коефіцієнтів регулятора; 3 – рядки коефіцієнтів регулятора

На рис. 26 показана реакція замкнутої системи з початковими коефіцієнтами ПІД-регулятора в робочій точці. Якщо регулятор працює задовільно, слід натиснути кнопку «Apply» («Застосувати»), щоб оновити значення параметрів «P», «I», «D» і «N» в діалоговому вікні блоку «PID Controller» («ПІД-регулятор»). Курсором «Response time» (1, на рис. 26) можна регулювати час реакції системи, що буде відображатися на графіку вихідного сигналу.

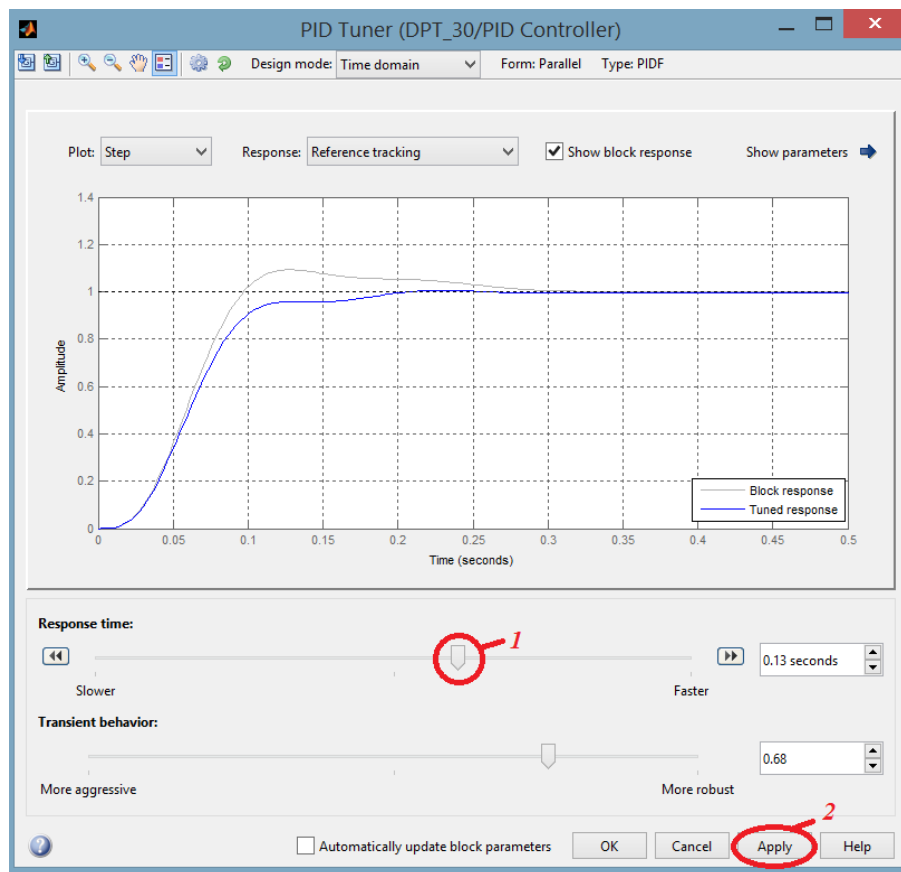


Рис. 26. Вікно «PID Tuner»: 1 – курсор регулювання часу реакції системи;
2 – кнопка оновлення коефіцієнтів

В результаті проведення процедур параметричної оптимізації отримано оптимальні значення коефіцієнтів ПІ-регулятора струму, які становлять:

$$K_{IC} = 3,21; \quad (77)$$

$$K_{IC} = 514. \quad (78)$$

Додатково РС містить обмежувач напруги ($0 \leq u_{PC} \leq 10 \text{ V}$).

Налаштування регулятора температури.

Об'єкт регулювання контуру температури включає оптимізований контур струму (налаштований регулятор струму, тиристорний перетворювач, електричне коло ТЕНа та датчик струму), частину нагрівача, що здійснює безпосереднє перетворення електричного струму в теплову потужність згідно з виразом (47), та сенсор температури.

Передаточна функція ПІ-регулятора температури має наступний вигляд:

$$W_{PT}(p) = K_{PT} + \frac{K_{IT}}{p}, \quad (79)$$

де K_{PT} – коефіцієнт підсилення пропорційної складової РТ; K_{IT} – коефіцієнт підсилення інтегральної складової РТ; p – оператор Лапласа.

В якості цільової функції в даному випадку пропонується використання рівнянь мінімізації квадратичного інтегрального відхилення реального значення температури ТЕО від заданого:

$$\min_q f(t, q) = \min_q \left[\int e_T(t, q)^2 dt \right] = \min_q \left[\int (T_3(t) - T_P(t))^2 dt \right], \quad (80)$$

де $f(t, q)$ – квадратичне інтегральне відхилення реального значення температури T_P від заданого T_3 ; q – параметр оптимізації; e_T – помилка управління за температурою.

Вектор параметрів оптимізації в даному випадку має наступний вигляд:

$$Q = \{K_{PT}, K_{IT}\}. \quad (81)$$

Початкові значення коефіцієнтів регулятора температури перед оптимізацією обираємо наступними:

$$K_{PT} = 1; \quad (82)$$

$$K_{IT} = 1. \quad (83)$$

Для оптимізації вищенаведених коефіцієнтів можуть бути застосовані наступні ітераційні процедури:

$$K_{PT}[n+1] = K_{PT}[n] - \gamma[n] \frac{\partial f(q)}{\partial K_{PT}} \Big|_{K_{PT}[n]}; \quad (84)$$

$$K_{IT}[n+1] = K_{IT}[n] - \gamma[n] \frac{\partial f(q)}{\partial K_{IT}} \Big|_{K_{IT}[n]}, \quad (85)$$

де γ – крок градієнтного спуску; n – номер ітерації.

В даній роботі вищенаведені процедури параметричної оптимізації доцільно здійснювати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Matlab Simulink («PID-controller»).

В результаті проведення процедур параметричної оптимізації отримано оптимальні значення коефіцієнтів ПІ-регулятора температури:

$$K_{\text{ПІ}} = 35,7; \quad (86)$$

$$K_{\text{І}} = 0,034. \quad (87)$$

Додатково РТ містить обмежувач напруги ($0 \leq u_{\text{РТ}} \leq 10 \text{ В}$).

3.3. Математичне моделювання системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудова її перехідних процесів.

Використовуючи структурну схему системи (рис. 24) та розраховані значення параметрів регуляторів, побудуємо в програмному забезпеченні Simulink пакету прикладних програм Matlab схему для моделювання перехідних процесів (рис. 27).

За результатами математичного моделювання можна визначити показники якості системи автоматичного управління температурою ТЕО при подачі вхідного ступінчатого сигналу (пуск системи при нульових початкових умовах для $T_p = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ згідно з рис. 28):

- час регулювання $t_p \approx 91,36 \text{ [с]}$;
 - перерегулювання $\sigma_{\text{max}} = \frac{Y_{\text{max}} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = 0 \text{ \%}$;
 - показник коливальності $\mu = 0$;
 - статична помилка
- $$\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зАд}}}{Y_{\text{зАд}}} \cdot 100\% = \frac{90,34 - 90,34}{90,34} \cdot 100\% = 0 \text{ \%}.$$

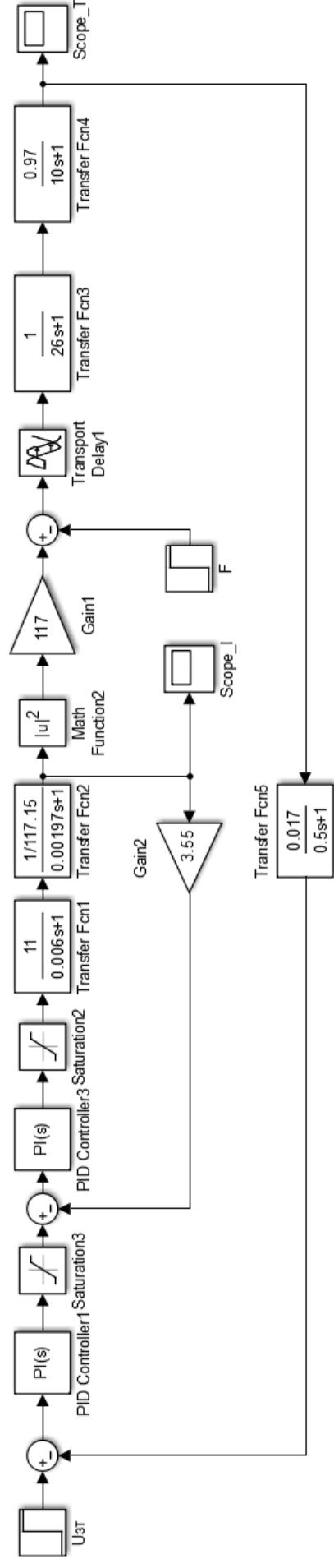


Рис. 27. Схема моделювання двоконтурної системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом та температурою

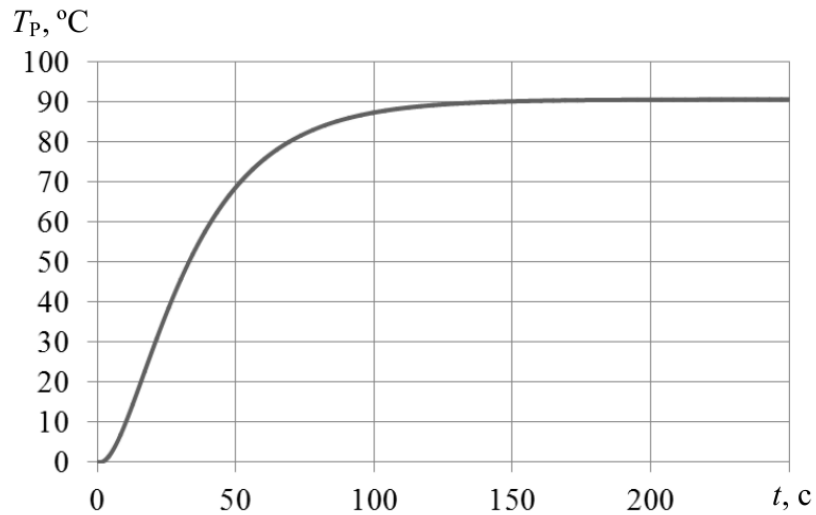


Рис. 28. Перехідний процес двоконтурної системи автоматичного управління температурою нагріву ТЕО

За струмом система відпрацьовує наступні показники якості (визначаються за рис. 29):

- час регулювання $t_p \approx 0,0205$ [с];
- перерегулювання $\sigma_{\max} = \frac{0,94 - 0,94}{0,94} \cdot 100\% = 0 \%$;
- показник коливальності $\mu = 0$;
- статична помилка $\delta_{\text{ст}} = \frac{0,94 - 0,94}{0,94} \cdot 100\% = 0 \%$.

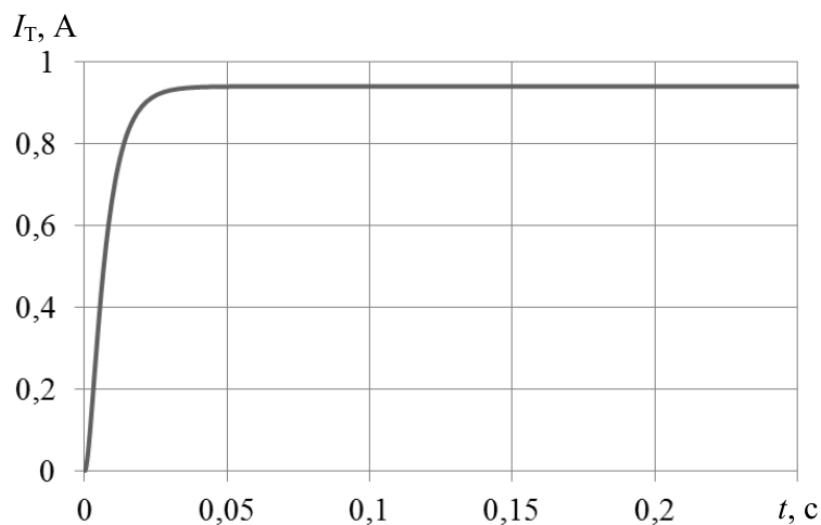


Рис. 29. Перехідний процес двоконтурної системи автоматичного управління нагрівом ТЕО за струмом

3.4. Покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи управління.

Перехідні процеси системи за струмом та швидкістю (рис. 28 та рис. 29, відповідно) мають аперіодичний характер, тому додаткового налаштування регулятори не потребують.

4. Вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта.

4.1. Вибір програмно-апаратних засобів реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

Реалізація розроблених регуляторів може бути здійснена з використанням програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК150. Контролер має вбудовані цифрові інтерфейси RS-232, RS-485, Ethernet і підтримує роботу з протоколами Modbus, Dcon і ОВЕН. Основні технічні характеристики ПЛК150 зведені в табл. 16.

Загальний вигляд контролера ПЛК150 зображений на рис. 30.

Таблиця 16. Основні технічні характеристики ПЛК150

Напруга живлення: ПЛК150-220	90...264 В змінного струму (номінальна напруга 220 В) з частотою 47...63 Гц
Споживана потужність	6 Вт
Центральний процесор	32-х розрядний RISC-процесор 200 МГц на базі ядра ARM9
Об'єм оперативної пам'яті	8 МБ
Час виконання циклу ПЛК	Мінімальне 250 мкс (нефіксоване), типове від 1 мс

Кількість дискретних входів	6
Кількість дискретних виходів	4 є/м реле
Кількість аналогових входів	4
Кількість аналогових виходів	2
Середовище програмування	CoDeSys 2.3.8.1 (і старші)

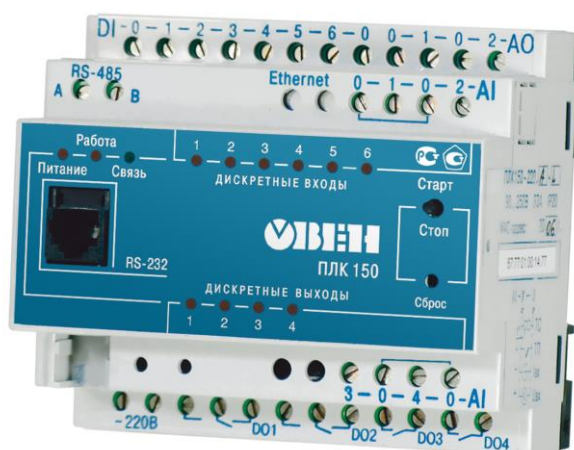


Рис. 30. ОВЕН ПЛК150

Програмування контролера здійснюється в професійному, поширеному і абсолютно безкоштовному для покупців ОВЕН середовищі CoDeSys v.2.3.x, наприклад, на мові програмування безперервних функціональних схем (CFC).

На відміну від FBD редактор безперервних функціональних схем дає можливість вільно розміщувати компоненти і з'єднання, що дозволяє створювати зворотні зв'язки, як показано в прикладі (рис. 31). У цьому редакторі немає сітки, а тому елементи можуть розташовуватися де завгодно.

До елементів мови CFC відносяться блоки, входи, виходи, повернення, довільні переходи, мітки та коментарі. Входи і виходи цих елементів можна з'єднувати, перетягуючи лінії з'єднання мишкою. Ці лінії будуть перерисовуватися автоматично при переміщенні елементів.



Рис. 31. Приклад програмування мовою CFC

4.2. Вибір датчиків струму та температури для реалізації зворотних зв'язків розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

За результатами розрахунку вибираємо стандартний коефіцієнт підсилення сенсора струму $k_{п.сс}$ на 133,33 та шунт 75ШИСВ.2 з номінальним струмом 3 А. Технічні дані шунта зведені в табл. 17, зовнішній вигляд зображений на рис. 32.

Таблиця 17. Дані вибраного шунта

Тип	Номінальний струм, А	Клас точності
75ШИСВ.2	3	0,5



Рис. 32. Вимірювальний шунт типу 75ШИСВ.2

Для визначення поточного значення температури в системі автоматичного управління застосовується термопара. Термопари є найпоширенішим засобом вимірювання температури в промисловості. Це пов'язано з їх широким температурним діапазоном (від -270 до +2500 °C), зазвичай задовільною точністю, низькою ціною, взаємозамінністю і

високою надійністю. Перевагою термопар є дуже низький внутрішній опір, що робить їх практично нечутливими до ємнісних наведень.

В якості датчика температури в даній системі управління доцільно використовувати термопару типу КТХК (рис. 33), яка має наступні основні характеристики:

- діапазон вимірювань $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +600\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- номінальна температура застосування $450\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вихідна напруга $-2,5 \dots 66,42\text{ мВ}$.



Рис. 33. Зовнішній вигляд датчика температури

4.3. Вибір апаратних засобів реалізації перетворення цифрових та аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта для обраного варіанту.

Контролер ПЛК150 має достатню кількість входів та виходів для підключення датчиків струму та температури, а також тиристорного перетворювача. Для обробки отриманих з датчиків сигналів в програмному забезпеченні CoDeSys присутній модуль «Unified Signal Sensor» («Датчик уніфікованого сигналу»). Параметри модуля:

- «Type of sensor» («Тип датчика») – значення вибираються зі списку, містить сім можливих типів датчиків, значення за умовчанням – IT_4_20 (датчик з уніфікованим сигналом постійного струму від 4 до 20 мА);

- Measure interval, s («Час між вимірами в секундах») – максимальний час між вимірами не обмежено, значення може бути будь-яким, в т.ч.

дробовим, мінімальне – 1 с;

- «Ain low & Ain high» («Нижня і верхня границі») – межі діапазону вимірювання фізичної величини;

- «First point» і «Delta», «Second point» і «Delta» і «Third point» і «Delta» («Перша, друга і третя точка» і «Введене змінення») – три точки корекції проведеного вимірювання.

Вікно конфігурування модуля аналогового входу «Датчик уніфікованого сигналу» з вкладкою параметрів представлено на рис. 34.

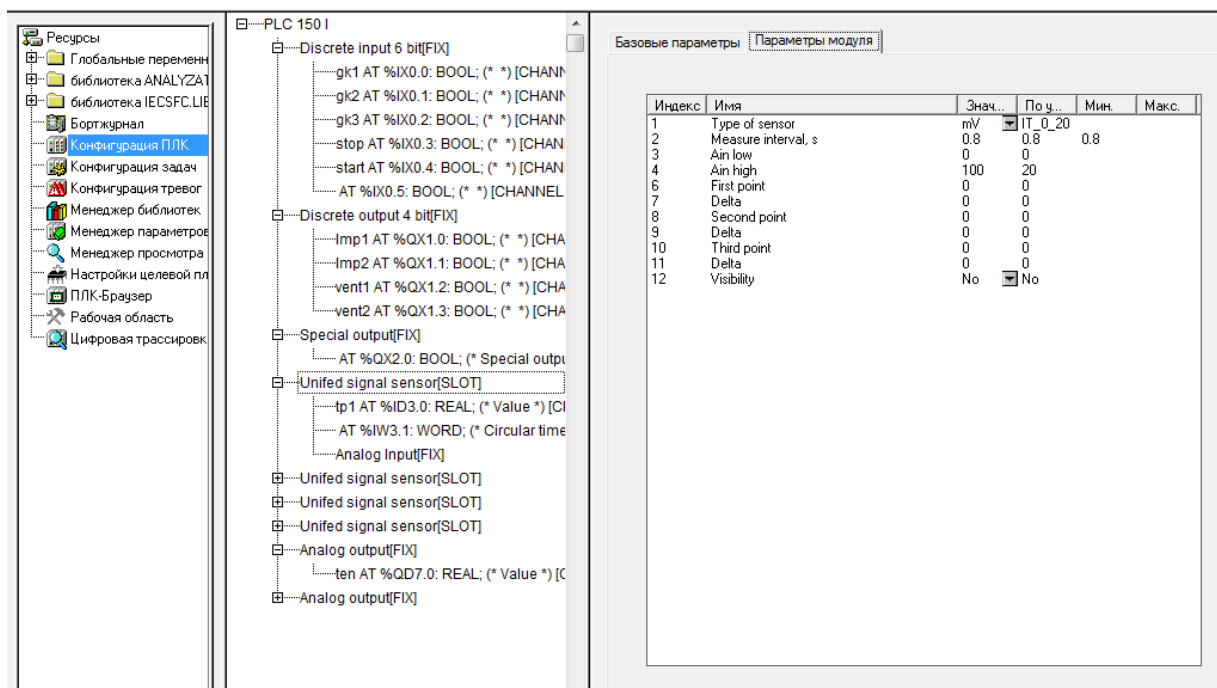


Рис. 34. Вікно конфігурування модуля аналогового входу «Датчик уніфікованого сигналу» з вкладкою параметрів

Необхідно відзначити, що у параметрі «Type of sensor» («Тип датчика») задається тип датчика, показники якого будуть оброблятися модулем «Датчик уніфікованого сигналу». Користувач здійснює вибір із семи можливих варіантів у випадіючому списку: датчики з уніфікованим сигналом струму 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА; датчики з уніфікованим сигналом напруги -50 ... +50 мВ, 0 ... 1 В, 0... 10 В; опір від 0 до 5000 Ом.

Для формування вихідного керуючого сигналу, який подається до

ТП, застосовується модуль аналогових виходів («Analog output»). Аналогові виходи відносяться до стаціонарних модулів (рис. 35).

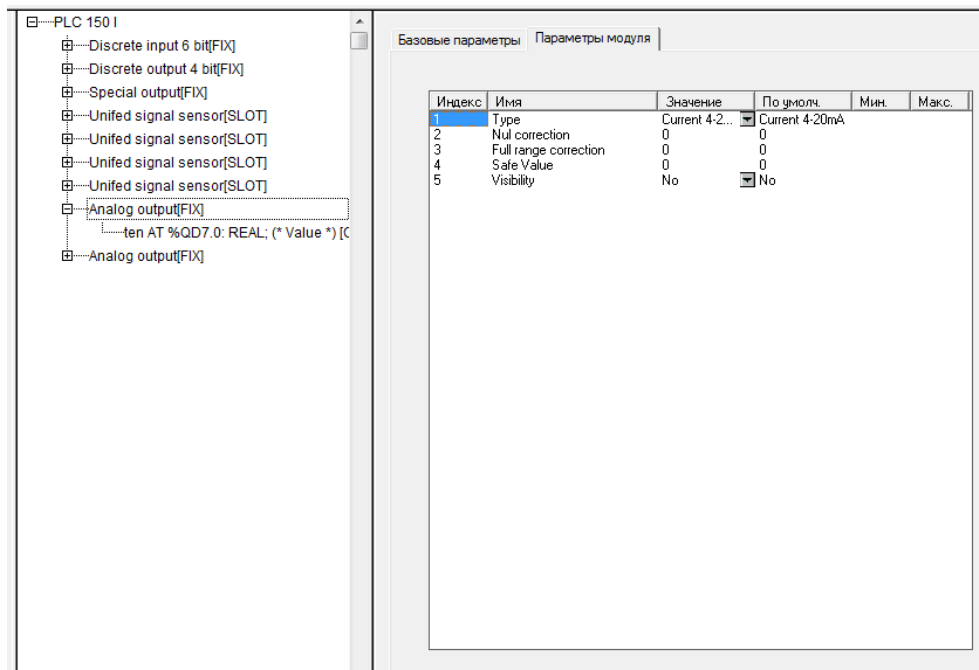


Рис. 35. Вкладка параметрів модуля аналогового виходу

В залежності від типу встановлених в ПЛК цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) існують три варіанти налаштування модуля аналогових виходів:

- універсальний – програмно налаштовується або на ЦАП «параметр - струм», або на ЦАП «параметр - напруга»;
- фіксований, призначений для ЦАП «параметр - струм»;
- фіксований, призначений для ЦАП «параметр - напруга».

5. Загальні висновки за результатами проведеної роботи.

В результаті виконання індивідуального завдання розроблено двоконтурну систему автоматичного управління нагрівом теплоенергетичного об'єкта зі зворотними зв'язками за струмом і температурою.

Наведені математичні моделі та визначені основні параметри

трубчатого електронагрівача та тиристорного перетворювача згідно із заданим варіантом. Розроблено структурну схему системи підпорядкованого управління температурою теплоенергетичного об'єкту.

За допомогою вбудованого інструменту PID Controller програми Simulink пакету прикладних програм Matlab проведено синтез ПІ-регуляторів струму та температури градієнтним методом оптимізації параметрів регуляторів. Причому додаткового налаштування параметрів регуляторів не знадобилося. Перехідні процеси за струмом та температурою мають аперіодичний характер ($\mu = 0$, $\sigma_{\max} = 0\%$), також система показує високу точність ($\delta_{\text{ст}} = 0\%$). Крім того, час перехідного процесу за струмом складає 0,0205 с, а за температурою – 91,36 с. Наведені показники якості досягаються при наступних налаштуваннях регуляторів: $K_{\text{ПТ}} = 35,7$; $K_{\text{ІТ}} = 0,034$; $K_{\text{ПС}} = 3,21$; $K_{\text{ІС}} = 514$.

Вибрано програмно-апаратні засоби реалізації системи управління температурою нагріву ТЕО. Апаратна частина включає програмований логічний контролер, датчики струму та температури. Синтезовані регулятори струму та температури запропоновано реалізувати в цифровому вигляді з використанням ОВЕН ПЛК150 та програмного забезпечення CoDeSys на мові CFC.

Приклад виконання індивідуального завдання № 3

Використовуючи послідовність проектування системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі (с. 20) виконаємо синтез одноконтурної системи автоматичного управління рівнем зі зворотним зв'язком за рівнем.

1. Розгляд гідравлічної та функціональної схем системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

1.1. Гідравлічна схема системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара наведена на рис. 36.

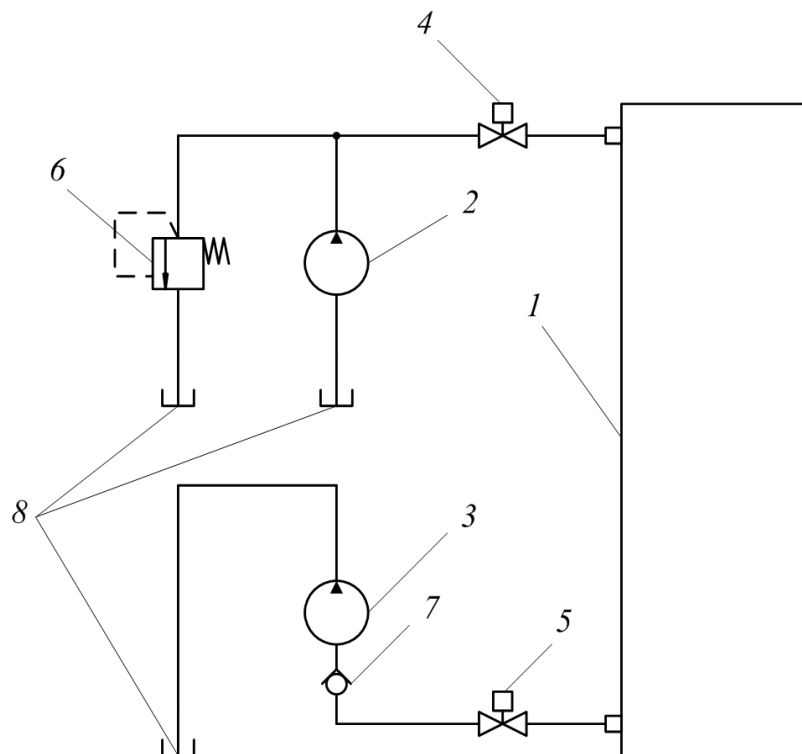


Рис. 36. Гідравлічна схема системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі

1.2. Детальний опис основних елементів гідравлічної схеми системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

Гідравлічна схема системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара (рис. 36) містить наступні основні елементи: 1 – робочий резервуар системи, в якому здійснюється управління рівнем рідини; 2 – насос, який працює на наповнення резервуара системи; 3 – насос, який працює на спустошення резервуара системи; 4 – електрокерований вентиль, який працює в лінії наповнення резервуара системи; 5 – електрокерований вентиль, який працює в лінії спустошення резервуара системи; 6 – зворотний клапан, який застосовується в лінії наповнення резервуара системи для скидання тиску при закритому електрокерованому вентилі 4; 7 – гідрозамок, який застосовується в лінії спустошення резервуара системи для запобігання руху рідини в зворотному напрямку; 8 – гідробак системи.

Наповнення та спустошення резервуара відбувається за допомогою насосів 2 та 3, відповідно. Значення витрати рідини при наповненні та спустошенні резервуара може змінюватися за допомогою електрокеріваних вентилів 4 та 5, відповідно, від 0 до $Q_{\text{Вmax}}$.

При розрахунку системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі приймаються наступні припущення:

- 1) насоси 2 та 3 забезпечують сталі значення тиску рідини при будь-яких значеннях витрати рідини через електрокерівані вентилі 4 та 5;
- 2) трубопроводи від насосів до робочого резервуару приймаються настільки короткими, що можна не враховувати хвильові процеси, які в них відбуваються.

1.3. Функціональна схема системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

Функціональна схема одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі зі зворотним зв'язком за рівнем наведена на рис. 37.

1.4. Детальний опис основних елементів функціональної схеми системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

Функціональна схема системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара (рис. 37) містить наступні основні елементи: РР – регулятор рівня рідини; ЕКВН – електрокерований клапан наповнення резервуара; ЕКВС – електрокерований клапан спустошення резервуара; ІН – інвертор напруги; Р – робочий резервуар системи.

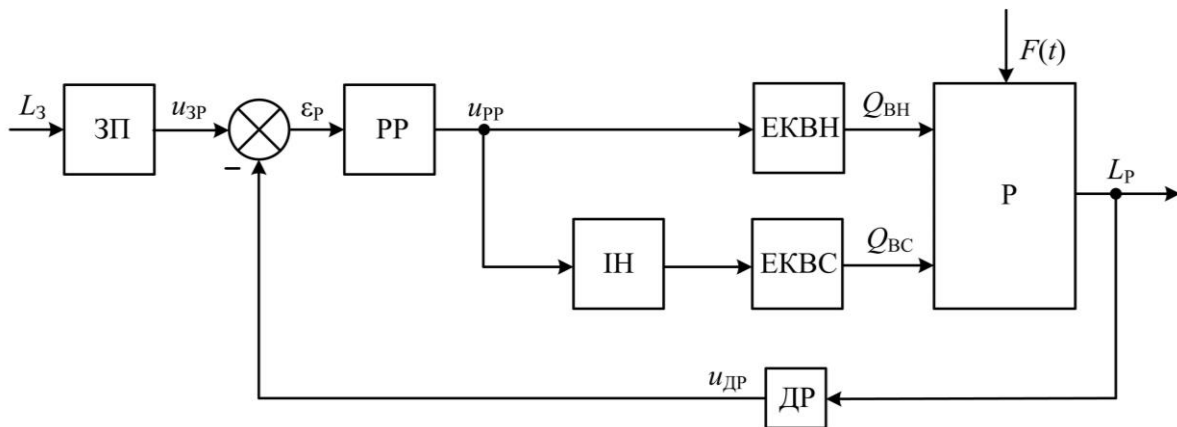


Рис. 37. Функціональна схема одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі зі зворотним зв'язком за рівнем

1.5. Навести принцип дії основних елементів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

Оператор задає значення рівня рідини в резервуарі L_3 за допомогою задавального пристрою ЗП, найчастіше з людино-машинного інтерфейсу комп'ютеризованої системи управління (сигнал $u_{зр}$). Після суматора сигнал розузгодження у вигляді помилки управління рівнем ϵ_p

$$\epsilon_p = u_{зр} - u_{др}$$

подається на регулятор рівня РР, який визначає сигнал управління регулятора рівня рідини $u_{рр}$ – величину напруги, яку необхідно подати на електрокерований клапан наповнення резервуара ЕКВН та одночасно через інвертор напруги ІН – на електрокерований клапан спустошення резервуара ЕКВС. Далі, відповідно до сигналу $u_{рр}$, на виході ЕКВН та

ЕКВС формуються значення витрати рідини, що проходить через електрокерований клапан наповнення резервуара $Q_{ВН}$, та значення витрати рідини, що проходить через електрокерований клапан спустошення резервуара $Q_{ВС}$, шляхом відкривання або закривання заслінок клапанів.

Таким чином, реальне значення рівня рідини L_p в робочому резервуарі системи Р формується завдяки взаємодії витрат $Q_{ВН}$ та $Q_{ВС}$ двох електрокеруваних клапанів ЕКВН та ЕКВС відповідно та відслідковується датчиком рівня ДР. Сигнал зворотного зв'язку ДР $u_{ДР}$ служить для корекції роботи системи та підвищення показників якості при відпрацюванні збурювального впливу $F(t)$, що діє на робочий резервуар системи.

2. Математичний опис основних елементів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара та побудова її структурної схеми.

2.1. Математичний опис робочого резервуара системи.

Робочий резервуар системи, у відповідності до номеру варіанта за списком групи, має форму паралелепіпеда (див. табл. 18). В табл. 18 прийнято наступні позначення: H – максимальна висота робочого резервуара системи; a – перша сторона основи робочого резервуара системи з прямокутним дном; b – друга сторона основи робочого резервуара системи з прямокутним дном.

Таблиця 18. Тип та параметри робочого резервуара системи

№ варіанта	Тип резервуара	H , м	a , м	b , м
1	З прямокутним дном	0,9	0,54	0,49

Геометрично об'єм резервуара може бути визначений як

$$V_p = S_p \cdot H = a \cdot b \cdot H, \quad (88)$$

де S_p – площа дна резервуара.

2.2. Передаточна функція робочого резервуара системи та розрахунок її параметрів.

Вхідною змінною математичної моделі робочого резервуара є сумарне значення витрати рідини $Q_{\text{ВН}}$ та $Q_{\text{ВС}}$ через вентиля ЕКВН та ЕКВС, а вихідною – рівень його заповнення L_p .

Об'єм в резервуарі прямокутної форми розраховується за формулою:

$$V_p = \int (Q_{\text{ВН}} - Q_{\text{ВС}}) dt, \quad (89)$$

де t – час заповнення резервуара.

Рівень води в робочому резервуарі прямокутної форми визначається за формулою:

$$L_p = \frac{V_p}{S_p} = \frac{V_p}{a \cdot b} = \frac{\int (Q_{\text{ВН}} - Q_{\text{ВС}}) dt}{a \cdot b}. \quad (90)$$

Таким чином, передаточна функція резервуара як об'єкту управління має наступний вигляд

$$W_p(p) = \frac{L_p(p)}{Q_{\text{ВН}}(p) - Q_{\text{ВС}}(p)} = \frac{1}{k_p p}, \quad (91)$$

де $k_p = S_p = a \cdot b = 0,54 \cdot 0,49 = 0,265 \text{ м}^2$; p – оператор Лапласа. Тому

$$W_p(p) = \frac{1}{0,265 p}. \quad (92)$$

2.3. Передаточна функція лінійного регулятора витрати рідини за заданими параметрами.

В якості електрокерованих вентилів наповнення та спустошення резервуара для даної системи доцільно обрати лінійні регулятори витрати рідини (ЛРВ), що мають лінійну характеристику вихідної витрати рідини від вхідної напруги живлення. На вхід даних лінійних регуляторів витрати подається напруга управління постійного струму від 0 до 10 В. При від'ємних та нульовому значеннях керуючої напруги ЛРВ значення витрати дорівнюватиме 0. При значенні керуючої напруги ЛРВ 10 В

значення витрати дорівнюватиме $Q_{\text{Вmax}}$.

Передаточна функція лінійного регулятора витрати має наступний вигляд:

$$W_{\text{ЛРВ}}(p) = \frac{Q_{\text{ЛРВ}}(p)}{u_{\text{ЛРВ}}(p)} = \frac{k_{\text{ЛРВ}}}{(T_{\text{ЛРВ}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{ЛРВ}} p + 1)}, \quad (93)$$

де $k_{\text{ЛРВ}}$ – коефіцієнт підсилення ЛРВ; $T_{\text{ЛРВ}}$ – стала часу ЛРВ; ξ – коефіцієнт демпфування ЛРВ.

Тип та параметри лінійного регулятора витрати рідини наведені у табл. 19 згідно з номером варіанта за списком групи.

Таблиця 19. Параметри заданого лінійного регулятора витрати рідини

№ варіанта	Тип ЛРВ	$Q_{\text{Вmax}}, \text{м}^3/\text{с}$	$k_{\text{ЛРВ}}$	$T_{\text{ЛРВ}}, \text{с}$	ξ
1	ЛРВ-1	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$0,035 \cdot 10^{-3}$	0,31	0,71

При цьому передаточна функція ЛРВ матиме вигляд

$$W_{\text{ЛРВ}}(p) = \frac{Q_{\text{ЛРВ}}(p)}{u_{\text{ЛРВ}}(p)} = \frac{0,035 \cdot 10^{-3}}{(0,31^2 p^2 + 2 \cdot 0,71 \cdot 0,31 p + 1)}. \quad (94)$$

2.4. Математичний опис та передаточна функція датчика рівня системи автоматичного управління.

В якості датчика рівня в даній системі управління доцільно використовувати датчик тиску, що встановлений на дні баластного танку, та здійснювати вимірювання гідростатичним методом. За такого способу вимірювання поточне значення рівня визначається як

$$L_p = \frac{P_p}{\rho_p g}, \quad (95)$$

де P_p – значення гідростатичного тиску рідини, що вимірюється за допомогою датчика тиску; ρ_p – густина робочої рідини, для води $\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Враховуючи вищевикладене, передаточна функція ДР може бути

записана у вигляді підсилювальної ланки як

$$W_{\text{др}} = k_{\text{др}}, \quad (96)$$

де $k_{\text{др}}$ – коефіцієнт зворотнього зв'язку за рівнем рідини.

$$k_{\text{др}} = k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{дп}}, \quad (97)$$

де $k_{\text{дт}}$ – коефіцієнт підсилення датчика тиску; $k_{\text{дп}}$ – коефіцієнт підсилення додаткового підсилювача, який обумовлений необхідністю розрахунку рівня гідростатичним способом. Для визначення числових параметрів датчика рівня системи управління рівнем необхідно одразу вибрати датчик тиску, наприклад, ДТ фірми «Dwyer Instruments» типу 673-4.

$$k_{\text{дт}} = k_{\text{уз}} \frac{I_{\text{ддт}}}{P_{\text{max}}}, \quad (98)$$

де P_{max} – максимальний тиск, на який розрахований датчик, $P_{\text{max}} = 67000$ Па; $I_{\text{ддт}}$ – діапазон значень струмового виходу датчика тиску, $I_{\text{ддт}} = 16$ мА; $k_{\text{уз}}$ – узгоджувальний коефіцієнт струмового сигналу датчика тиску.

$$k_{\text{уз}} = \frac{U_{\text{упр}}}{I_{\text{дтmax}}}, \quad (99)$$

де $U_{\text{упр}}$ – керуючий сигнал, приймаємо $U_{\text{упр}} = 10$ В; $I_{\text{дтmax}}$ – максимально можливе значення струмового виходу датчика тиску у відповідності до висоти заданого резервуара (при заповненому резервуарі).

$$I_{\text{дтmax}} = \frac{I_{\text{ддт}} \rho_{\text{р}} g H}{P_{\text{max}}} = \frac{16 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,9}{67000} = 2,11 \cdot 10^{-3} \text{ [A]}. \quad (100)$$

$$k_{\text{уз}} = \frac{10}{2,11 \cdot 10^{-3}} = 4739,3 \text{ [В / А]}. \quad (101)$$

$$k_{\text{дт}} = 4739,3 \frac{16 \cdot 10^{-3}}{67000} = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ [В / Па]}. \quad (102)$$

Коефіцієнт підсилення додаткового підсилювача

$$k_{\text{дп}} = \rho_{\text{р}} g = 1000 \cdot 9,81 = 9810 \text{ [кг / (м}^2 \cdot \text{с}^2\text{)]}. \quad (103)$$

Тоді коефіцієнт зворотного зв'язку за рівнем рідини буде визначатися як

$$k_{\text{дР}} = k_{\text{дТ}} \cdot k_{\text{дП}} = 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 9810 = 11,1 \text{ [В / м]}. \quad (104)$$

2.5. Структурна схема системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара з розрахованими параметрами для обраного варіанта.

Структурна схема системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі з прямокутним дном з розрахованими параметрами для обраного варіанта зображена на рис. 38.

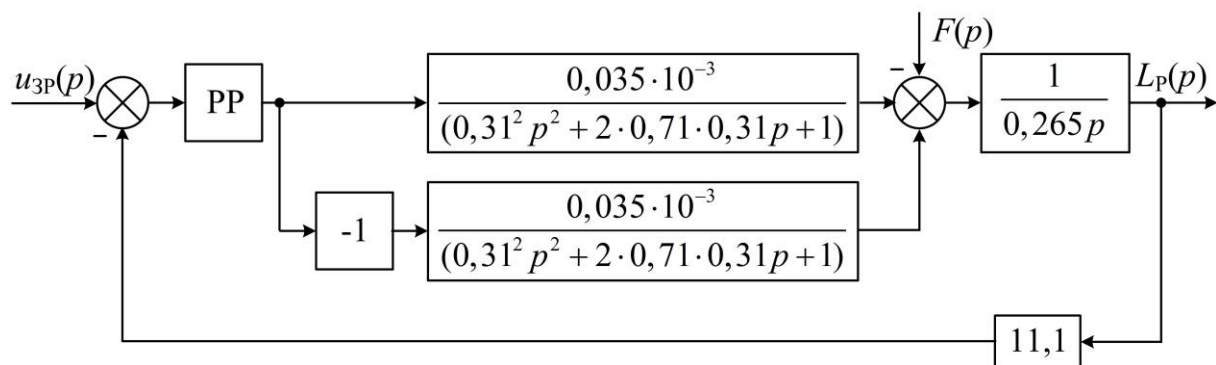


Рис. 38. Структурна схема системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі з розрахованими параметрами зі зворотним зв'язком за рівнем

3. Розрахунок параметрів регулятора системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара та проведення математичного моделювання.

3.1. Розрахунок параметрів ПД-регулятора рівня для одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара зі зворотним зв'язком за рівнем.

Розглянемо застосування методу Зіглера-Нікольса до налаштування параметрів регулятора рівня в робочому резервуарі, що базується на використанні запасів стійкості системи. Цей метод, запропонований в 1943 р, відноситься до емпіричних і заснований на використанні даних, отриманих експериментально на реальному об'єкті.

Процедура налаштування починається з експериментального дослідження системи, що складається з П-регулятора і заданого об'єкта регулювання. Коефіцієнт передачі $k_{\text{П}}$ П-регулятора збільшується до тих пір, доки на виході системи не встановляться коливання з постійною амплітудою коливань (рис. 39), тобто система не опиниться на межі стійкості. Фіксується і позначається через $k_{\text{П}^*}$ значення коефіцієнту передачі регулятора, за якого система знаходиться на межі стійкості (для розробленої системи такий стан досягається при $k_{\text{П}^*} = 3,2$). Далі вимірюється період коливань T^* , що встановилися в системі, $T = 1,953$ с (за рис. 39). Значення параметрів регулятора обраного типу визначаються за формулами, наведеними в табл. 20.

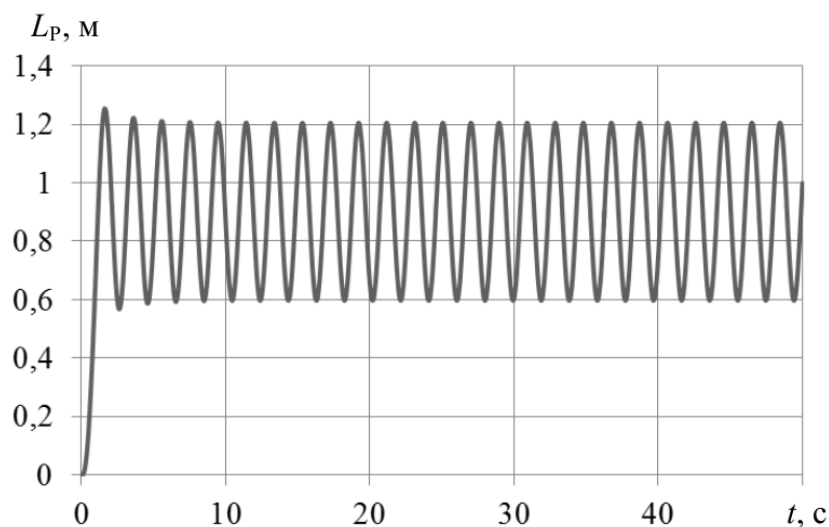


Рис. 39. Перехідний процес системи на межі стійкості

Таблиця 20. Параметри типових регуляторів

	$k_{\text{П}}$	$k_{\text{І}}$	$k_{\text{Д}}$
П-регулятор	$0,5k_{\text{П}^*}$	-	-
ПІ-регулятор	$0,45k_{\text{П}^*}$	$0,54k_{\text{П}^*}/T^*$	-
ПІД-регулятор	$0,6k_{\text{П}^*}$	$1,2k_{\text{П}^*}/T^*$	$0,75k_{\text{П}^*}T^*$

Для розробленої системи параметри ПД регулятора обчислюються

наступним чином:

$$k_{\Pi} = 0,6k_{\Pi*} = 0,6 \cdot 3,2 = 1,92, \quad (105)$$

$$k_{\text{Д}} = 0,75k_{\Pi*}T^* = 0,75 \cdot 3,2 \cdot 1,953 = 4,687. \quad (106)$$

Недоліком методу Зіглера-Нікольса є необхідність виводити систему на межу стійкості, що для багатьох об'єктів управління робити не рекомендується, однак засоби комп'ютерного моделювання систем управління дозволяють попередньо налаштувати коефіцієнти регуляторів з подальшим перенесенням їх до реальної системи.

3.2. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора рівня для одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара зі зворотним зв'язком за рівнем.

Параметри ПІД-регулятора розраховуються аналогічно до налаштувань ПД-регулятора:

$$k_{\Pi} = 0,6k_{\Pi*} = 0,6 \cdot 3,2 = 1,92, \quad (107)$$

$$k_{\text{І}} = \frac{1,2k_{\Pi*}}{T^*} = \frac{1,2 \cdot 3,2}{1,953} = 1,97, \quad (108)$$

$$k_{\text{Д}} = 0,75k_{\Pi*}T^* = 0,75 \cdot 3,2 \cdot 1,953 = 4,687. \quad (109)$$

3.3. Математичне моделювання системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара з розрахованими параметрами регуляторів для обраного варіанта та побудова її перехідних процесів.

Використовуючи структурну схему системи (рис. 38) та розраховані значення параметрів регуляторів, побудуємо в програмному забезпеченні Simulink пакету прикладних програм Matlab схему для моделювання перехідних процесів (рис. 40).

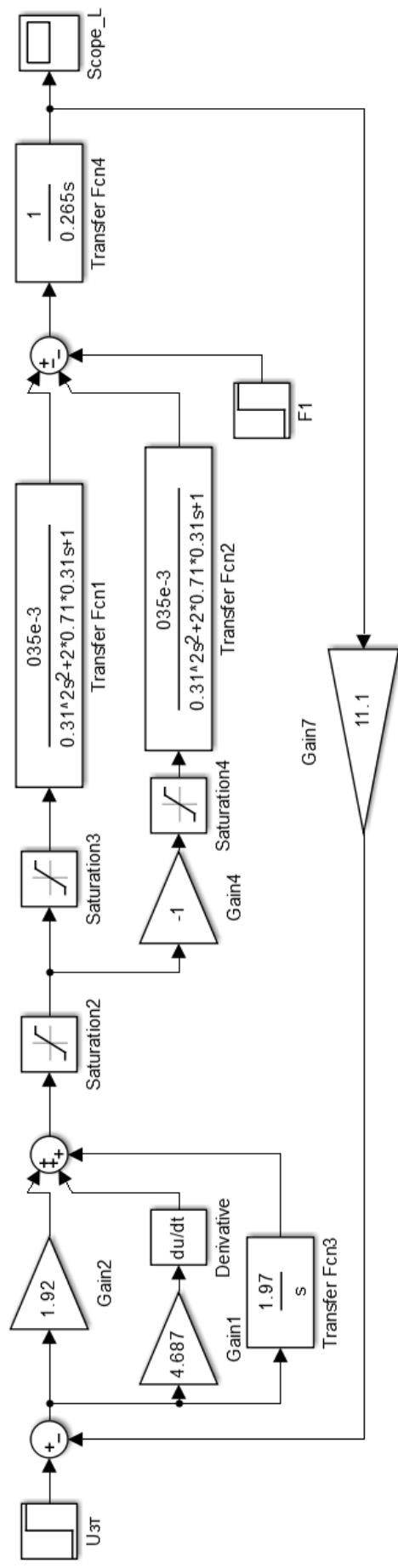


Рис. 40. Схема моделювання одноконтурної системи автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі зі зворотним зв'язком за рівнем

За результатами математичного моделювання (рис. 41) можна визначити показники якості управління рівнем з ПД-регулятором при пуску:

- час регулювання $t_p \approx 8,3$ [с];

- перерегулювання $\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = 0\%$;

- показник коливальності $\mu = 0$;

- статична помилка

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зАд}}}{Y_{\text{зАд}}} \cdot 100\% = \frac{0,9009 - 0,9}{0,9} \cdot 100\% = 0,1\%.$$

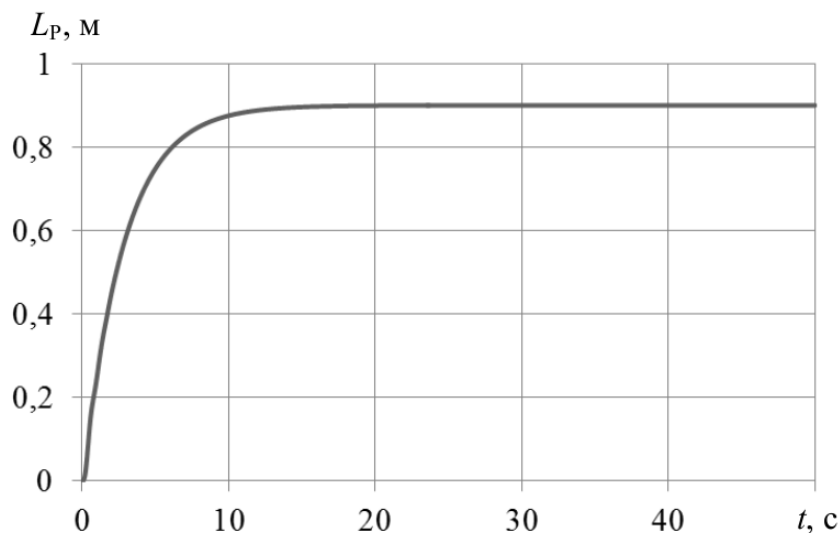


Рис. 41. Перехідний процес одноконтурної системи автоматичного управління рівнем з ПД-регулятором

За результатами математичного моделювання можна визначити показники якості системи автоматичного управління рівнем з ПД-регулятором при подачі вхідного ступінчатого сигналу (пуск системи згідно з рис. 42):

- час регулювання $t_p \approx 16,7$ [с];

- перерегулювання

$$\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1,345 - 0,9011}{0,9011} \cdot 100\% = 49,3 \%;$$

- показник коливальності $\mu = 3$;

- статична помилка

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зад}}}{Y_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{0,9011 - 0,9}{0,9} \cdot 100\% = 0,12 \; \%.$$

3.4. Покращення якості отриманих перехідних процесів розрахованої системи шляхом додаткового налагодження коефіцієнтів регуляторів.

Синтезована система управління рівнем заповнення резервуара з ПД-регулятором має достатньо високі показники якості управління, тому не потребує додаткового налаштування. При застосуванні ПД-регулятора рівня система має значні перерегулювання та коливальність, отже проведемо додаткове налаштування параметрів ПД-регулятора.

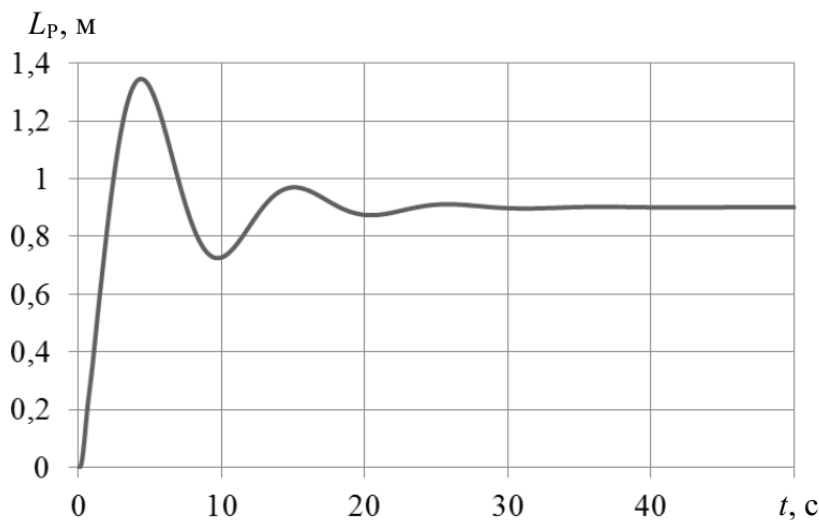


Рис. 42. Перехідний процес одноконтурної системи автоматичного управління рівнем з ПД-регулятором

Шляхом послідовного налаштування коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної складових ПД-регулятора вдається отримати наступні коефіцієнти регулятора

$$k_{\Pi} = 1,2, \quad (110)$$

$$k_I = 0,05, \quad (111)$$

$$k_D = 0,6. \quad (112)$$

При цьому досягаються наступні показники якості управління рівнем (за рис. 43):

- час регулювання $t_p \approx 2,37$ [с];

- перерегулювання $\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = 0 \%$;

- показник коливальності $\mu = 0$;

- статична помилка

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{Y_{\text{уст}} - Y_{\text{зАд}}}{Y_{\text{зАд}}} \cdot 100\% = \frac{0,9065 - 0,9}{0,9} \cdot 100\% = 0,72 \%$$

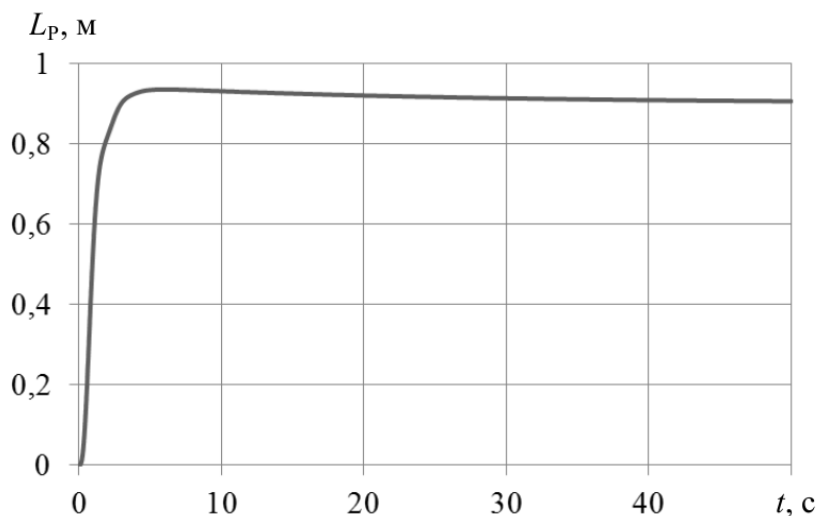


Рис. 43. Перехідний процес одноконтурної системи управління рівнем з додатково налаштованими параметрами ПД-регулятора

Основні показники якості при пуску системи зведені в табл. 21. З таблиці видно, що додатковим налаштуванням регуляторів вдалося значно підвищити якість управління за рівнем при застосуванні ПД-регулятора.

Таблиця 21. Основні показники якості розробленої системи управління рівнем рідини в резервуарі: 1 – з розрахованим та 2 – з додатково налаштованим ПІД-регуляторами, 3 – з розрахованим ПД-регулятором

Показник якості	Значення показників якості систем управління рівнем		
	1	2	3
t_p, c	16,7	2,37	8,3
$\sigma_{max}, \%$	49,3	0	0
$\delta_{ст}, \%$	0,12	0,72	0,1
μ	3	0	0

4. Вибір елементної бази розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара.

4.1. Вибір програмно-апаратних засобів реалізації розроблених регуляторів системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

На ринку обладнання та програм для розробки систем автоматичного управління технологічними процесами пропонується багато систем, що забезпечують вирішення основної задачі – підвищення рівня або повної автоматизації технологічних процесів. Аналізуючи побудову цих систем та їх структуру, доцільно умовно розподілити їх на дві категорії: інтегровані та модульні. Наприклад, системи IGSS та GENESIS 32 надають широкі можливості для проектувальників, але складаються з різних програмних модулів, що при розробці на їх основі відповідного проекту потребує належного фаху програмістів. Більш раціональними є інтегровані системи, що забезпечують максимальні зручності проектувальникам та користувачам, наприклад, SCADA-система TRACE MODE.

TRACE MODE призначена для вирішення задач, пов'язаних з автоматизацією промислових підприємств, енергетичних об'єктів, будівель, об'єктів транспорту, систем енергетики, тощо. Дана SCADA-

система виконана в легкій для сприйняття формі і має зрозумілий інтерфейс. В ній використовується п'ять різних мов програмування (Structured Text - ST, Sequential Function Chart - SFC, Function Block Diagram - FBD, Instruction List - IL, Ladder Diagram - LD), які є простими для засвоєння і можуть використовуватись для синтезу програм управління програмованими логічними контролерами (ПЛК), що дає змогу відійти від використання не завжди досконалих програм, які постачаються разом з контролерами.

Всі вищезазначені властивості роблять TRACE MODE універсальною системою для автоматизації об'єктів різної складності. Отже, в якості програмних засобів реалізації системи автоматичного управління рівнем заповнення резервуара доцільно використовувати SCADA-систему TRACE MODE 6.

До апаратних засобів управління в системі автоматичного управління рівнем заповнення резервуара відносяться модулі збору та виводу даних, а також ПЛК. Модулі збору даних отримують аналогові сигнали від датчика рівня та перетворюють їх на цифрові сигнали, які надходять до даної системи. ПЛК виконує функції автоматичного регулювання заданого значення рівня. Модулі виводу, в свою чергу, реалізують перетворення цифрових сигналів управління від ПЛК в аналогові, які безпосередньо надходять на електрокеровані вентилі системи управління рівнем.

Для автоматичного регулювання заданих значень рівня в даній системі управління доцільно застосовувати ПЛК типу WP-8131, основні характеристики якого зведені в табл. 22.

Таблиця 22. Технічні характеристики ПЛК типу WP-8131

Системне програмне забезпечення	
Операційна система	Windows CE 5.0

Net Compact Framework	2.0
Вбудовані сервіси	FTP server, Web server (підтримуються VB script, JAVA script), вбудований SQL server
Середовище розробки	Dll для eVC, Dll для Visual Studio.Net 2003/2005/2008
Процесорний модуль	
CPU	PXA270 або сумісний (32-бит, 520 МГц)
Оперативна пам'ять SDRAM	128 МБ
Енергонезалежна SRAM	512 КБ
Flash-пам'ять	128 МБ
Додаткова Flash-пам'ять	microSD 2 ГБ (підтримується карта 16 ГБ microSD)
Годинник реального часу	так
Серійний апаратний номер 64-бит	так
Сторожевий таймер	так
Програмований LED індикатор	1
Поворотний перемикач	Так (0~9)
DIP- перемикач	немає
VGA-інтерфейс & Комунікаційні порти	

Продовження таблиці 22

VGA		роздільна здатність: 1024 x 768, 800 x 600, 640 x 480; з одним додатковим GPU
Ethernet		RJ-45 x 2, 10/100 Base-TX
USB 1.1		2
COM 0		внутрішній
COM 1		RS-232 (для оновлення ПО) (RXD, TXD и GND); не ізолюваний
COM 2	RS-485	D2+, D2-; self-tuner ASIC inside
	ізоляція	2500 VDC
COM 3		—
COM 4		—
Слоти розширення		
Кількість слотів вводу/виводу		1 (Тільки модулі високого профілю I-87K)
Механічні характеристики		
Габарити, мм		95 x 132 x 111
Монтаж		На DIN-рейку, на стіну
Оточуюче середовище		
Робоча температура		-25 °C ~ +75 °C
Температура зберігання		-30 °C ~ +85 °C
Відносна вологість		5 ~ 90 %, без конденсату
Живлення		
Вхідна напруга		+10 ~ +30 В DC
Ізоляція		1 кВ
Резервний ввід живлення		з одним реле живлення (1 А / 24 В DC) для аварійного сигналу

Навантаження	1 А, 5 В живлення CPU та задньої панелі, 0,6 А, 5 В живлення слотів розширення вводу/виводу, сумарно 8 Вт
Споживана потужність	7,3 Вт (0,3 А / 24 В DC)

Зовнішній вигляд даного ПЛК наведений на рис. 44.



Рис. 44. Зовнішній вигляд ПЛК типу WP-8131

4.2. Вибір датчика рівня для реалізації зворотного зв'язку розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

До апаратних засобів вимірювання рівня в системі автоматичного управління рівнем заповнення резервуара з прямокутним дном відноситься датчик рівня. Як вже відзначалося вище, в якості датчика рівня в даній системі управління використовується датчик тиску, що встановлений на дні резервуара, а вимірювання здійснюються гідростатичним методом.

В якості датчика тиску доцільно застосовувати датчик тиску фірми «Dwyer Instruments» типу 673-4, зовнішній вигляд та основні технічні характеристики якого наведений на рис. 45 та в табл. 23, відповідно.



Рис. 45. Зовнішній вигляд датчика тиску 673-4

Таблиця 23. Технічні характеристики датчика тиску 673-4

Тип	673-4
Напруга живлення	9-30 VDC
Монтаж	в будь якому положенні
Температура оточуючого середовища	-40...85 °C
Серія	673
Електромонтажне підключення	кабельний зажим з кабелем
Температура контролюваного середовища	-40...85 °C
Тип тиску	відносний
Діапазон тиску	0...0,68 бар
Виконання мембрани	внутрішнє
Вихідний сигнал	4...20 мА

4.3. Вибір апаратних засобів реалізації перетворення цифрових та аналогових сигналів розробленої системи автоматичного управління рівнем рідини резервуара для обраного варіанту.

Для обробки сигналів з датчиків витрати та рівня в даній системі управління доцільно застосовувати модулі збору даних зі струмовим входом. В якості модуля збору даних з датчиків з виходом по струму доцільно використовувати модуль типу I-7017C фірми ICP DAS на 8

входів. Зовнішній вигляд та основні характеристики даного модулю наведені на рис. 46 та в табл. 24, відповідно.

Для реалізації перетворення цифрових сигналів управління від ПЛК в аналогові, які безпосередньо надходять на тиристорні перетворювачі системи доцільно застосовувати модуль аналогового виводу I-7024 на 4 виходи, зовнішній вигляд якого наведений на рис. 47.

Таблиця 24. Технічні характеристики модуля збору даних з датчиків з виходом по струму I-7017C

Тип модуля	АЦП
Кількість аналогових входів АЦП	8
Тип аналогових входів АЦП	диференціальний
Максимальна частота вибірки	10 Гц
Роздільна здатність АЦП	16 біт
Напруга ізоляції аналогових входів	3000 В
Захист від перенапруги	35 В
Вхідний діапазон по струму	-20 ~ +20 мА
Смуга пропускання	15,7 Гц
Точність аналогового вводу	0,1%
Вхідний імпеданс при зміні струму	125 Ом (необхідний зовнішній шунт 125 Ом)
Напруга живлення	+10 ~ +30 В
Споживана потужність	1,3 Вт

Основні характеристики модуля аналогового виводу зведені в табл. 25.



Рис. 46. Зовнішній вигляд модуля збору даних з датчиків з виходом по струму I-7017C



Рис. 47. Зовнішній вигляд модуля аналогового виводу I-7024

Таблиця 25. Технічні характеристики модуля аналогового виводу I-7024

Тип модуля	ЦАП
Кількість аналогових входів ЦАП	4
Тип аналогових виходів ЦАП	мА, В
Роздільна здатність ЦАП	14 біт
Напруга ізоляції аналогових виходів	3000 В
Вхідний діапазон	0 ~ +10 В, -10 ~ +10 В, 0 ~ 20 мА, 4 ~ 20 мА
Точність аналогового виводу	0,1%
Максимальне вихідне навантаження	10 В, 5 мА

Напруга живлення	+10 ~ +30 В
Споживана потужність	2,4 Вт

5. Загальні висновки за результатами проведеної роботи.

В даному індивідуальному завданні розроблено систему автоматичного управління рівнем рідини резервуара. Побудована, розрахована та промодельована структурна схема системи автоматичного управління рівнем резервуара в програмі Simulink пакету прикладних програм MatLab. За допомогою методу Зіглера-Нікольса визначені параметри ПД-регулятора ($k_P = 1,92$; $k_D = 4,687$), а також додатково налагоджений ПІД-регулятор ($k_P = 1,2$; $k_I = 0,05$; $k_D = 0,6$) для системи управління рівнем рідини резервуара.

Розглянуто показники якості перехідних процесів системи з використанням ПД- та ПІД- регуляторів. Проведений аналіз перехідних процесів показав, що найменший час перехідного процесу ($t_p = 2,37$ с) при нульових значеннях коливальності ($\mu = 0$) та перерегулюванні ($\sigma_{\max} = 0$ %) досягається при застосуванні ПД-регулятора. Крім того, найвищу точність ($\delta_{\text{ст}} = 0,1$ %) показує система з розрахованим ПД-регулятором.

Крім того, наведено програмно-апаратні засоби реалізації системи автоматичного управління рівнем заповнення резервуару. Запропоновано SCADA-систему TRACE MODE 6 в якості програмного засобу реалізації системи автоматичного управління рівнем заповнення резервуару.

В якості модулів збору даних з датчиків з виходом по струму виберемо модуль фірми ICP DAS, типу I-7017C на 8 входів. Для автоматичного регулювання заданого значення рівня для даної системи управління вибрано ПЛК типу WP-8131. Реалізація перетворення цифрових сигналів управління від ПЛК в аналогові, які безпосередньо надходять на електрокеровані вентилі розробленої системи проводиться модулем аналогового виводу I-7024 на 4 виходи. Апаратним засобом

вимірювання рівня в системі автоматичного управління рівнем рідини в резервуарі є датчик тиску «Dwyer Instruments» типу 673-4 при здійсненні вимірювання рівня гідростатичним методом.

Література

1. Standard WinPAC-8000 controller. WP-8131, WP-8431, WP-8831, WP-8141, WP-8441, WP-8841 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.icpdas.com/products/PAC/winpac/wp-8x41.htm>
2. Автоматизированное проектирование систем управления / под ред. М. Джемшиди. – М.: Машиностроение, 1989.
3. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения. Справочное руководство. К.: Наукова думка, 1965. – 304 с.
4. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.
5. Грабко, В. В., Розводюк, М. П., Грабко, В. В. Системи управління електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого управління електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування : навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 89 с.
6. Графкин, А. В. Принципы программного управления модулями ICP DAS серии I-7000 в задачах промышленной автоматизации. СНЦ РАН, 2010. – 133 с.
7. Гудвин, Г. К., Гребе, С. Ф., Сальгадо, М. Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
8. Ефимов, И. П., Солуянов, Д. А. SCADA - система Trace Mode. Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 158 с.
9. Корячко, В. П., Курейчик, В. М., Норенков, И. П. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
10. Кузнецов, М. М., Усов, Б. А., Стародубов, В. С. Проектирование автоматизированного производственного оборудования. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

11. Куцевич, Н. SCADA-системы, или муки выбора. Средства и системы компьютерной автоматизации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.asutp.ru/?p=600055>.
12. Латышев, П. Н. Каталог САПР. Программы и производители. – М.: Солон-Пресс, 2006. – 608 с.
13. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
14. Минаев, И. Г., Самойленко, В. В. Программируемые логические контроллеры. Практическое руководство для начинающего инженера. – К: АГРУС, 2009. – 100 с.
15. Модули удаленного ввода-вывода серии I-7000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.icp-das.ru/catalog/remote_i_o/i-7000_m-7000_tm/i-7000/
16. Нестеров, А. Л. Проектирование АСУТП. – М.: ДЕАН, 2009. – 944 с.
17. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ, 2000. – 360 с.
18. Онищенко, Г. Б., Аксенов, М. И., Грехов, В. П., Зарицкий, М. Н., Куприков, А. В., Нитиевская, А. И. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Учебное пособие. – М.: РАСХН – 2001. – 520 с.
19. Парр, Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера. – Д.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.
20. Петренко, А. И. Основы автоматизации проектирования. – К.: Техника, 1982.
21. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования: Навч. посібник. – И.: Солон-Пресс, 2004. – 256 с.
22. Піцан, Р. М., Бардачевський, В. Т., Бойчук, Б. Г. Збірник задач до курсу «Електропривід». Перша частина «Розімкнені системи

электропривода». – Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 425 с.

23. Подлесный, Н. И., Рубанов, В. Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. – К: Высшая школа, 1991.

24. Преобразователи термоэлектрические ХА, ХК, ТПП (ДТПК, ДТПЛ, ДТПС) [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/termoelektricheskie_preobrazovateli_tipa_dtphk_i_dtpkha_datchiki_temperaturi_termopari/69960055.

25. Программируемые логические контроллеры (ПЛК) и среда их программирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goo.gl/yyO086>.

26. Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 150 – Поддерживаемые интерфейсы и протоколы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goo.gl/cCkc5T>.

27. Пупена, О. М., Ельперін, І. В., Луцька, Н. М., Ладанюк, А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навчальний посібник. – К.: Вид-во «Ліра-К», 2011. – 552 с.

28. Пьявченко, Т. А., Финаев, В. И. Автоматизированные информационно-управляющие системы. Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007. – 271 с.

29. Рождественский, Д. А. Автоматизация проектирования систем и средств управления: учеб. пособие Ч. 1. – Томск: Том. межвуз. центр дистанционного образования, 2004. – 67 с.

30. Рождественский, Д. А. Автоматизация проектирования систем и средств управления: учеб. пособие Ч. 2. – Томск: Том. межвуз. центр дистанционного образования, 2004. – 131 с.

31. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 296 с.

32. Ротач, В. Я., Кузищин, В. Ф., Ключев, А. С. Автоматизация настройки систем управления. Под ред. В. Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

33. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.kipshop.ru/CoDeSys/steps/codesys_v23_ru.pdf.

34. Система регулирования уровня воды в котле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spiraxsarco.com/ru/applications/examples/boiler-house/level-controls-and-alarms/modulating-boiler-level-control.asp>.

35. Системы управления гибким автоматизированным производством. Под ред. Краснопрошиной А. А. – К.: Высшая школа, 1987.

36. Советов, Б. Я., Цехановский, В. В. Автоматизированное управление. – Л.: Машиностроение, 1988.

37. Сольнищев, Р. И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: учебник для вузов / Р. И. Сольнищев. – М.: Высш. шк., 1991. – 335 с.

38. Спецификация датчика Dwyer 673 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goo.gl/jOjZXI>.

39. Спецификация контролера uPAC-7186EX-SM CR [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://icpdas.com.ua/pac-programmable-automation-controller/upac-7186ex-sm-cr-.html>.

40. Спецификация модуля I-7017C [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.icp-das.ru/catalog/remote_i_o/i-7000_m-7000_tm/i-7000/i-7000_ai/23455.html.

41. Спецификация модуля I-7024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.icpdas.com/root/product/solutions/remote_io/rs485/i-7000_m-7000/i-7024.html.

42. Спецификация модуля Х305 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ipc2u.ru/catalog/x305>.

43. Спецификация термпарного датчика фирмы ТЕРА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ao-tera.com.ua/commonfiles/t-sensors.pdf>.

44. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. Красовского А. А.. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987.

45. Стандартная градуировочная таблица термопары хромель - копель [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://goo.gl/FFcрnL>.

46. Таленс, Я. Ф. Работа конструктора. – Л.: Машиностроение, 1987. – 255 с.

47. Теория автоматического управления. Под ред. Соломенцева Ю. М. – М.: Высшая школа, 2000. – 270 с.

48. Термоэлектрические преобразователи [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ekb.openrussia.ru/i72447-termoelektricheskie-preobrazovateli-01-11-02-11-tip-ktha-kthk.html>.

49. Челищев, Б. Е., Боброва, И. В., Гонсалес-Собатер, А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

50. Шевляков, И. М. Основы автоматизации производства в машиностроении и приборостроении (пособие для выполнения лабораторных и практических занятий). – К.: Высшая школа, 1983. – 160 с.