Розрахунки систем контролю та керування





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Г.І. Манко, Ю.К. Тараненко, О.В.Тітова, В.Я. Трішкін, О.І. Швачка, Л.Д. Чумаков

РОЗРАХУНКИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

Навчальний посібник

Дніпро, 2019

УДК (665.6/.7:681.5). 002.2 M23

Рецензенти:

Бондаренко В.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри передачі електричної енергії НТУ «Харківський політехнічний університет»

Корсун В.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальних технологій ДВНЗ Національний гірничий університет

Косолап А.І. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри спеціальних комп'ютерних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Друкується за рішенням вченої ради ДВНЗ УДХТУ Протокол № 3 від 29.03.2019

Манко Г.І., Тараненко Ю.К., Тітова О.В., Трішкін В.Я., Швачка О.І., Чумаков Л.Д.

M23 Розрахунки систем контролю та керування : навчальний посібник / Γ.І. Манко, Ю.К. Тараненко, О.В. Тітова, В.Я. Трішкін, О.І. Швачка, Л.Д. Чумаков. – Дніпро : УДХТУ, 2018. – 191 с.

ISBN 978-617-7478-18-6

Подані методи і приклади розрахунків як окремих складових систем контролю і управління, так і характеристик надійності і безпеки систем в цілому. Описане використання програмних засобів для розрахунків. Наведені довідкові матеріали, необхідні для виконання розрахунків.

Для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» та 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології»

УДК (665.6/.7:681.5). 002.2

ISBN 978-617-7478-18-6

© Манко Г.І., Тараненко Ю.К., Тітова О.В., Трішкін В.Я., Швачка О.І., Чумаков Л.Д.

3MICT	
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ДАТЧИКИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	8
1.1 Вибір звужуючого пристрою і дифманометра	8
1.2 Розрахунок значення витрати	9
1.3 Розрахунок діаметра отвору звужуючого пристрою	12
1.4 Розрахунок звужуючого пристрою у програмі «КИП и А»	14

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКИ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ	17
2.1 Розрахунок регулюючого клапана для рідини	17
2.2 Розрахунок регулюючого клапана для газів	20
2.3 Розрахунок виконавчого механізму	22
2.4 Приклад розрахунку виконавчого механізму	24

РОЗДІЛ З. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	26
3.1 Ідентифікація об'єкта управління	
3.2 Динамічна ідентифікація об'єкта управління засобами Python	
3.3 Регулятори	
3.4 Класичний метод синтезу систем регулювання	
3.6 Пошук налаштувань регуляторів конструктором PID Tuner	
3.7 Оптимізація налаштувань ПІД-регулятора за інтегральним	критерієм
якості регулювання	
3.8 Вибір оптимального періоду дискретизації	

РОЗДІЛ 4. НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКА	59
4.1 Показники надійності	59
4.2 Інтегральні рівні безпеки	60
4.3 Приклад визначення рівнів безпеки	66
4.4 Розрахунок надійності АСК ТП	67

5 Розрахунок ефекту оперативної діагностики технічних засобів	75
6 Розрахунок надійності засобів вимірювання	77
7 Приклад розрахунку показників надійності засобу вимірювання	79
8 Метрологічна надійність засобів вимірювання	82

Δ

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ІСКРОБЕЗПЕЧНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	90
5.1 Загальні поняття	90
5.2 Розрахункова оцінка іскробезпечності для об'єднаних кіл	91
5.3 Приклад оцінки іскробезпечності схеми для тензовимірювань	94

РОЗДІЛ 6. ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

6.1 Загальні відомості	ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ	99
 6.2 Методика оцінки основної похибки вимірювальних каналів	6.1 Загальні відомості	
 6.3 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання температури	6.2 Методика оцінки основної похибки вимірювальних каналів	100
 6.4 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання тиску	6.3 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання температури	103
 6.5 Порядок оцінки невизначеності засобів вимірювання	6.4 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання тиску	105
6.6 Приклад розрахунку оцінки невизначеності виміру температури	6.5 Порядок оцінки невизначеності засобів вимірювання	108
6.7 Розрахунок невизначеності аналого-цифрового перетворення 113	6.6 Приклад розрахунку оцінки невизначеності виміру температури	110
	6.7 Розрахунок невизначеності аналого-цифрового перетворення	113

РОЗДІЛ 7. ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ	117
7.1 Статичні характеристики вимірювальних каналів	117
7.2 Динамічні характеристики вимірювальних каналів	120

РОЗДІЛ 8. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ КОНТРОЛЮ СПРАВНОСТІ

ГЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	125
8.1 Неперервний контроль справності	. 125
8.2 Періодичний контроль справності	. 133

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА	141	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	145	FR – Failure Rate IR – Intensity Failure I SB – Least Significant Bit
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	147	MTBF– Mean Time Between Failures MTTF – Mean Time To First Failure MTTR – Mean Time Te Repair
Додаток А	149	PFDavg – Probability of Failure on Demand
Лолаток Б	150	RRF – Risk Reduction Factor
	151	SFF – Safety Integrity Level
додаток В	151	SISO – Single-Input Single-Output system
Додаток Г	153	АСК – автоматизована система контролю
Додаток Д	155	АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом
Лолаток Е	157	АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
	150	БІС – блок іскрозахисту на стабілітронах
додаток ж	138	ВК – вимірювальний канал
Додаток И	160	BM – виконавчий механізм
Додаток К	161	ВМВ – верхня межа вибуху
Лолаток Л	162	ВІ – вимірювальний трубопровід
	102	ДП — дипломнии проект ЛЧХ — лійсна настотна характеристика
		3B – засіб вимірювання
		ЗП – звужуючий пристрій
		ЛЗ – лінія зв'язку
		ЛЧХ – логарифмічна частотна характеристика
		МЕП – мінімальна енергія підпалювання
		МО – математичне очікування
		МІІІ – міжповірочний інтервал
		ПФС – надиносно-функціональна схема ОМР одиница модолицого розрани
		ПАЗ – підсистема протиаварійного захисту
		ПІЛ – пропорційно-інтегрально-лиференцювальний
		ПФ – передатна функція
		РД – регульована ділянка (трубопроводу)
		РО – регулюючий орган
		САР – система автоматичного регулювання
		I ЕРС – термоелектрорушійна сила Т2 тохнішний годіб
		$\Delta B = \Delta \beta$ зична величина
		$\Phi \Psi X - \phi$ азочастотна характеристика
		T T
5		6

РОЗДІЛ 1. ДАТЧИКИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

ВСТУП

Кожний курсовий і дипломний проект має супроводжуватись (для підтвердження і обґрунтування всіх рішень) відповідними розрахунками.

При виконанні конкретного проекту студент разом з керівником обирають той обсяг розрахунків, який найбільше відповідає оптимальному забезпеченню заданої теми обчисленнями. При дипломному проектуванні рекомендується виконати один-три розрахунки для бакалаврів і від трьох до п'яти різних розрахунків для магістрів.

У цьому посібнику розглядаються методи і приклади розрахунків як окремих складових систем автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) і вимірювальних інформаційних систем (BIC), так і характеристик надійності та безпеки систем в цілому.

Навчальний посібник складається з п'яти розділів

В першому розділі наведені методики і приклади розрахунків звужуючого пристрою, який використовується при вимірюванні витрати рідини або газу методом змінного перепаду тиску.

Другий розділ містить розрахунки виконавчих пристроїв АСК ТП.

У третьому розділі описаний процес синтезу систем регулювання технологічних параметрів.

В четвертому розділі подані методи і приклади розрахунку надійності технічних засобів автоматизованої системи контролю (або керування) технологічного процесу. Зокрема розглянуті питання розрахунку метрологічної надійності засобів вимірювання.

У п'ятому розділі розглядаються питання оцінки іскробезпечності технічних засобів при їх використанні на вибухонебезпечних виробництвах.

У шостому розділі описані методика, приклади і алгоритми проектного розрахунку метрологічних характеристик вимірювального каналу.

Сьомий розділ присвячений методам визначення статичних і динамічних характеристик вимірювальних каналів.

У додатках міститься довідкова інформація, необхідна для виконання розрахунків. Необхідну нормативну документацію можна знайти на сайті кафедри КІТіМ за адресою citm.ho.ua.

При виконанні розрахунків студент-дипломник має продемонструвати своє вміння роботи з обчислювальною технікою, користуватись стандартними програмами та самостійно складати потрібні програми розрахунків. Тексти програм і результати обчислень на комп'ютері доцільно представляти у вигляді принтерних роздруківок у додатках до пояснювальної записки проекту.

1.1 Вибір звужуючого пристрою і дифманометра

1.1.1 При виборі звужуючого пристрою (ЗП) необхідно керуватися наступними міркуваннями:

а) втрата тиску (енергетичні втрати) у ЗП збільшується в наступній послідовності: труба Вентурі, довге сопло Вентурі, коротке сопло Вентурі, сопло, діафрагма;

б) при одних і тих же значеннях відносної площі β отвору ЗП і перепаду тиску ΔP та при інших рівних умовах сопло дозволяє вимірювати більшу витрату, ніж діафрагма, і забезпечує більш високу точність вимірювання в порівнянні з діафрагмою (особливо при малих значеннях β);

в) зміна або забруднення вхідного профілю ЗП в процесі експлуатації впливає на коефіцієнт витрати діафрагми в більшій мірі, ніж на коефіцієнт витрати сопла.

1.1.2 При виконанні розрахунків стандартних ЗП вирішують чотири завдання:

 визначення витрати потоку за вимірюваним перепадом тиску на звужуючому пристрої визначуваного типу при відомих конструктивних параметрах ЗП вимірювального трубопроводу з урахуванням фізико-хімічних властивостей потоку;

б) визначення діаметру *d*₂₀ отвору діафрагми, сопла, сопла Вентурі, якщо відомі витрати потоку, його фізико-хімічні параметри і розміри вимірювальної ділянки трубопроводу;

в) визначення діаметру d_{20} отвору ЗП при вільному виборі граничного перепаду тиску $\Delta p_{\rm rp}$, який обирається так, щоб відносна площа пристрою *m* була невелика (при середніх швидкостях потоків у вимірювальних трубопроводах 10–25 м/с значення β повинні відповідати перепаду тиску, що лежить в межах 0,016–0,063 МПа);

г) визначення перепаду тиску Δp , що створюється діафрагмою, соплом, соплом або трубою Вентурі, при заданій витраті потоку для вибору необхідного дифманометра.

1.1.3 Тип і різновид дифманометра обирають, виходячи з наступних міркувань:

 а) дифманометр можна застосовувати для вимірювання витрати тільки таких середовищ, які вказані в керівництві з експлуатації даного приладу (якщо не забезпечується неперервний захист чутливого елемента дифманометра або не застосовуються розділові судини);

б) дифманометр, що споживає електроенергію, у разі його установки в пожежо- і вибухонебезпечному приміщенні, повинен задовольняти вимогам відповідних нормативних документів; в) максимальний робочий тиск в трубопроводі перед звужуючим пристроєм не повинен бути більшим за максимальний робочий тиск, на який розрахований дифманометр.

1.1.4 Для дифманометрів, що серійно випускаються, граничний номінальний перепад тиску дифманометра ΔP_n потрібно обирати, згідно ГОСТ 18140-84, зі стандартного ряду чисел $A = a \cdot 10^n$, де a -одно з чисел ряду: 1; 1,25; 1.6; 2,0; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; n -ціле число або нуль. При цьому необхідно виходити з наступного:

а) чим більший перепад тиску ΔP_{μ} , тим меншою повинна бути відносна площа β звужуючого пристрою для вимірювання заданої витрати. Чим менше β , тим вища точність вимірювання заданої витрати і тим більша втрата тиску в звужуючому пристрої;

б) якщо задана допустима втрата тиску на звужуючому пристрої, то за найбільше значення ΔP_{μ} приймають таке, при якому втрата тиску ще залишається меншою за допустиму. У тих випадках, коли втрата тиску в звужуючому пристрої не має значення, перепад ΔP_{μ} обирають таким, щоб значення β було близьким до 0,2 (подальше зменшення відносної площі доцільне тільки для зменшення впливу числа Рейнольдса або для зменшення похибки внаслідок скорочення довжини прямої дільниці трубопроводу).

1.1.5 Верхню межу вимірів дифманометра Q_{np} встановлюють за заданою найбільшою вимірюваною витратою Q_{max} так, щоб найближче значення Q_{np} , взяте згідно п. 1.1.4, було більше значення Q_{max} або дорівнювало йому.

1.1.6 При розширенні діапазону вимірювання за допомогою підключення до одного звужуючого пристрою двох дифманометрів діапазон показань за шкалою одного приладу приймають рівним 0–100%, іншого 0–30%.

1.1.7 Граничний номінальний перепад тиску приладу зі шкалою 0– 100% обирають, виходячи з вимог п. 1.1.4. Для приладу зі шкалою 0–30% номінальний перепад тиску, відповідний відмітці 30%, приймають рівним 0,09 граничного номінального перепаду приладу з шкалою 0–100%.

1.1.8 Додаткові відомості щодо вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв можна знайти у стандартах ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009...ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009.

1.2 Розрахунок значення витрати

1.2.1 Для розрахунку витрати середовища потрібні наступні початкові дані:

а) діаметр отвору d_{20} , м;

б) внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу (ВТ) D_{20} , м;

в) середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості R_a або еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні R_u (див. Додаток А);

г) матеріал, з якого виготовлено ЗП;

д) матеріал, з якого виготовлена прямолінійна ділянка ВТ безпосередньо перед ЗП;

е) при застосуванні діафрагм:

1) початковий радіус *r_н* вхідної кромки діафрагми, м;

2) час $\tau_{\rm T}$ експлуатації діафрагми з моменту визначення значення $r_{\rm H}$ або міжконтрольний інтервал $\tau_{\rm y}$, років;

- для суміші газів (в т.ч. природного газу) – повний її склад або (для природного газу) – молярні долі діоксиду вуглецю x_y і азоту x_a в газі і його густина за стандартних умов ρ_c ;

- густина середовища в робочих умовах ρ (за наявності густиноміра), кг/м³;

- перепад тиску на ЗП Δp , Па;

- абсолютний тиск *p* середовища (або надмірний тиск *p_u* середовища і атмосферний тиск *p_a*, Па;

- температура середовища t, °C, або термодинамічна температура середовища T = 273,15 + t, К.

1.2.2 Розраховують діаметр отвору в реальних умовах:

$$d = d_{20}K_{3\Pi};$$
(1.1)
 $K_{3\Pi} = 1 + \alpha_{3\Pi}(t - 20),$ (1.2)

 $K_{3\Pi} = 1 + \alpha_{\beta\Pi}(t - 20),$ (1.2) Де $\alpha_{\beta\Pi}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЗП (див. Додаток А).

1.2.3 Розраховують внутрішній діаметр ВТ у реальних умовах:

$$D = D_{20} K_{T}; (1.3)$$

$$K_T = 1 + \alpha_{tT}(t - 20), \tag{1.4}$$

де $\alpha_{\ell T}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ВТ (див. Додаток А).

1.2.4 Розраховують значення відносного діаметра отвору β для вибраного типу ЗП:

$$= d/D. \tag{1.5}$$

1.2.5 Розраховують значення коефіцієнта швидкості входу Е:

в

$$E = 1/\sqrt{1 - \beta^4}.$$
 (1.6)

1.2.6 Коефіцієнт витікання С знаходиться згідно [15, п. 5.3.2.1].

9

1.2.7 Поправочний коефіцієнт $K_{\mu\nu}$ що враховує шорсткість внутрішньої поверхні ВТ знаходиться згідно [15, п. 5.3.2.3].

1.2.8 Поправочний коефіцієнт, що враховує притуплювання вхідної кромки діафрагми

Якщо радіус вхідної кромки діафрагми r_{μ} не перевищує 0,0004d, то поправочний коефіцієнт К_п приймають рівним одиниці.

Якщо значення r_{μ} перевищує 0.0004*d*, то поправочний коефіцієнт K_{π} розраховують згідно формули: $K_{\rm II} = 0.9826 + (r_{\rm s}/d + 0.0007773)^{0.6}$

де

$$r_{\kappa} = a - (a - r_{\mu}) e^{(-\tau_{T}/3)}; \qquad (1.8)$$

(1.7)

а – параметр, що враховує тип вимірюваного середовища, який приймають рівним 0.19·10⁻³ для рідини. 0.195·10⁻³ для газу і 0.2·10⁻³ для водяної пари:

тт – поточний час експлуатації діафрагми з моменту визначення значення початкового радіусу вхідної кромки діафрагми, років.

Для інших $3\Pi K_{\pi} = 1$.

1.2.9 Коефіцієнт розширення:

а) для діафрагми:

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right];$$
(1.9)

б) для інших ЗП:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa\tau^{2/\kappa}}{\kappa - 1}\right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{2/\kappa}}\right) \left(\frac{1 - \tau^{(\kappa - 1)/\kappa}}{1 - \tau}\right)},$$
(1.10)

де $\tau = 1 - \Delta p/p$.

1.2.10 Розрахунок витрати виконують в наступній послідовності:

а) приймають перше наближення значення числа Рейнольдса Re₁, piвне 10^{6} :

б) розраховують перше наближення значення коефіцієнта витікання С1 згідно п. 1.2.6;

в) знаходять перше наближення значення *К*_{ш1} згідно п. 1.2.7 (для труб Вентурі — не визначається);

г) розраховують перше наближення значення шуканої витрати середовища q_1 , використовуючи формули:

1) для масової витрати:

$$q_{m} = 0,25\pi d_{20}^{2} K_{cy}^{2} CEK_{u} K_{n} \varepsilon (2\Delta p\rho)^{0.5}; \qquad (1.11)$$

2) для об'ємної витрати:

$$q_{v} = 0,25\pi d_{20}^{2} K_{cv}^{2} CEK_{u} K_{n} \varepsilon (2\frac{\Delta p}{\rho})^{0.5}; \qquad (1.12)$$

д) за отриманим значенням q_1 , знаходять друге наближення значень Re₂, C₂, K_{u2}iq₂, при чому число Рейнольдса, залежно від одиниці витрати середовища, розраховують по відповідній з наступних формул:

$$\operatorname{Re} = \frac{4}{\pi} \frac{q_m}{D_u}; \qquad (1.13)$$

$$\operatorname{Re} = \frac{4}{\pi} \frac{q_{\nu} \rho}{D_{\mu}}; \qquad (1.14)$$

е) процес уточнення значень Re, C, K_{μ} i q проводять до тих пip, поки значення відносного відхилення між набутим значенням витрати q_i і його попереднім значенням q_{i-1} не задовольнятиме умові:

 $|q_i - q_{i-1}|/q_i < 10^{-5}$. (1.15)

1.3 Розрахунок діаметра отвору звужуючого пристрою

1.3.1 Для розрахунку діаметра отвору ЗП необхідні наступні початкові дані: максимальна $q_{m \max}$ і мінімальна $q_{m \min}$ масова витрата середовища, кг/с; густина середовища за нормальних умов $\rho_{\text{ном}}$, кг/м³; температура середовища t, °C, або термодинамічна температура середовища T =273,15 + t, K; тиск середовища p, Па; допустима втрата тиску на звужуючому пристрої при максимальній витраті газу Δp_{nd} , Па; динамічна в'язкість μ , Па с; внутрішній діаметр трубопроводу *D*, м; еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхиі вимірювального трубопроводу R_{III}, м; для газу додатково показник адіабати к. Для діафрагми з [15, п. 5.3.2.4] беруть початкове значення радіуса r_{μ} вхідного канту та міжконтрольний інтервал $\tau_{\rm v}$.

1.3.2 Для газів перевіряють виконання нерівності

Якщо нерівність не виконується, то розрахунок припиняють, оскільки вимірювання витрати за такого режиму є неможливе, або обирають іншу верхню границю виміру перепаду тиску, що задовольняє нерівності (1.16).

 $\Delta p_{n\partial} \leq 0.25p$.

1.3.3 За даними відповідної частини комплексу стандартів (див. [15, п. 5.3.1], [16, п.п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [17, п.п. 5.5.2, 5.5.3, 5.5.4]) визначають верхню межу Re_в і нижню межу Re_н діапазону допустимих значень числа Рейнольдса Re для вибраного типу 3П.

1.3.4 Обчислюють максимальне значення Remax і мінімальне значення Remin робочого діапазону значень Re за формулами:

$$\operatorname{Re}_{\max} = \frac{4q_{m\max}}{\pi D_{\mu}}; \quad \operatorname{Re}_{\min} = \frac{4q_{m\min}}{\pi D_{\mu}}$$

і перевіряють виконання нерівностей

$$\begin{aligned} & \mathcal{R}e_{e} \geq \mathrm{R}e_{\mathrm{max}}; \end{aligned} \tag{1.17} \\ & \mathcal{R}e_{\mu} \leq \mathrm{R}e_{\mathrm{min}} \end{aligned} \tag{1.18}$$

Якщо нерівності (1.17) і (1.18) не виконуються, то обчислення припиняють і обирають інший тип ЗП, для якого ці нерівності виконуються.

1.3.5 Обчислюють допоміжну величину

$$A = \frac{\operatorname{Re}_{max}\mu}{D(2\rho\Delta p)^{0.5}}$$
(1.19)

1.3.6 Використовуючи відповідну частину стандартів (див. [15, п. 5.3.1], [16, п.п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [17, п.п. 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4]), визначають значення верхньої межі $\beta_{\rm B}$ і нижньої межі $\beta_{\rm H}$ діапазону допустимих значень відносного діаметра отвору β для вибраного типу ЗП:

1.3.7 За тими ж стандартами обчислюють допоміжні величини B_1 і B_2 за формулами:

$$B_{1} = E_{1}C_{1}K_{u1}K_{n1}\beta_{e}^{2}\varepsilon_{1}; \qquad (1.20)$$

$$B_{2} = E_{2}C_{2}K_{uu2}K_{n2}\beta_{\mu}^{2}\varepsilon_{2}; \qquad (1.21)$$

де E_1 та E_2 - коефіцієнти швидкості входження за $\beta_{\rm B}$ і $\beta_{\rm H}$ відповідно (п. 1.2.5);

 C_1 – коефіцієнт витікання за Re_{max} і $\beta_{\rm B}$ (п. 1.2.6);

 C_2 – коефіцієнт витікання за Re_{min} і $\beta_{\rm H}$ (п. 1.2.6);

 K_{n1} – поправковий коефіцієнт K_n за β_B (для решти ЗП $K_{n1} = 1$) (п. 1.2.8);

 K_{n2} – поправковий коефіцієнт K_n за β_{μ} (для решти ЗП K_{n2} =1) (п. 1.2.8);

 $K_{\rm m1}$ – поправковий коефіцієнт $K_{\rm m}$ за $\operatorname{Re}_{\rm max}$ і $\beta_{\rm B}$ (для труб Вентурі $K_{\rm m}$ = 1) (п. 1.2.7);

 $K_{\rm m2}$ – поправковий коефіцієнт К_ш за Re_{min} і $\beta_{\rm H}$ (для труб Вентурі К_ш = 1) (п. 1.2.7);

 ε_1 – коефіцієнт розширення за $\beta_{\rm B}$, $\Delta p_{n\partial}$, к і p (п. 1.2.9); ε_2 – коефіцієнт розширення за $\beta_{\rm H}$, $\Delta p_{n\partial}$, к і p (п. 1.2.9).

1.3.8 Обчислюють допоміжні величини за формулами:

$$\delta_1 = (B_1 - A) / A,$$

$$\delta_2 = (B_2 - A) / A.$$

Якщо величини δ_1 і δ_2 мають однаковий знак, то обчислення припиняють, оскільки в діапазоні допустимих значень β не існує значення, яке задовольняє вихідним даним. Якщо величини δ_1 і δ_2 мають різні знаки, то обчислення продовжують.

1.3.9 Відносно невідомої величини
$$\beta$$
 розв'язують таке рівняння:
 $A = E \cdot C \cdot K_{\rm m} \cdot K_{\rm n} \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon.$ (1.22)

Розв'язання рівняння (1.22) може бути виконане будь-яким з методів ітерацій.

1.3.10 Для знайденого значення β за даними відповідної частини комплексу стандартів (див. [15, п. 5.3.1], [16, п.п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [17, п. 5.5.2, 5.5.3, 5.5.4]) визначають верхню межу $\text{Re}_{\text{в}}$ і нижню межу $\text{Re}_{\text{н}}$ діапазону допустимих значень числа Рейнольдса Re і перевіряють нерівності (1.17) і (1.18). Якщо нерівності виконані, то значення β , обчислене відповідно до п. 1.2.9, вважають остаточним, в іншому випадку обчислення діаметра отвору ЗП за заданих вихідних даних є неможливим.

1.3.11 За знайденим остаточним значенням *β* визначають розрахунковий діаметр отвору звужуючого пристрою за формулою

 $d_{20} = \beta \cdot D/K_{3\pi},$ (1.23) де $K_{3\pi}$ – коефіцієнт зміни діаметра отвору внаслідок температурного розширення. Для сталі 12X18Н9Т $K_{3\pi}$ = 1,0012.

1.3.12 Перевіряють, чи міститься d_{20} в діапазоні допустимих значень (див. [15, п. 5.3.1]). Якщо цю умову виконано, то значення d_{20} вважають знайденим.

1.4 Розрахунок звужуючого пристрою у програмі «КИП и А»

1.4.1 Програма «КИП и А» [23] призначена для широкого кола користувачів, що працюють у сфері метрології, контрольно-вимірювальних приладів та автоматики, а також проектувальників АСКТП. Також може бути корисна студентам технічних університетів і фахівцям технічних спеціальностей.

1.4.2 Блок розрахунку ЗП для виміру витрати середовища цілком базується на матеріалах стандарту ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009.

1.4.3 Блок розрахунку звужуючих пристроїв викликається із списку головного меню при вибору пункту "Звужуючі пристрої". При цьому з'являється доступний перелік типів звужуючих пристроїв для розрахунку витрати середовища — діафрагми, сопла ИСА 1932, еліпсні сопла і сопла Вентурі. На рис. 1.1 видно, що кожен тип ЗП у свою чергу містить види середовищ, для яких виробляються обчислення витрати.

2° 2°	4:12 36 2:47
∑ Сужающие устройства	🕥 Диафрагма - Газ, смеси 🚦
Диафрагма	Пример Д.1 ГОСТ 8.586.5
Жидкость	
Пар	Диам. d СУ, мм [20 °C]
Газ. смеси	84
Сопло ИСА 1932	Диам. D ИТ, мм [20 °C]
Жидкость	150
	Сталь СУ в
-	12X18H9T
Газ, смеси	
Эллипсное сопло	20
Жидкость	Rн кромки [rн] 0.04 мм
Пар	Время экспл. 0.495 лет
Газ, смеси	
	Расход тип Объемный ст. условия
Жидкость	
Пар	To Kila Pepenad [Δp]
	2.86836 м³/с Расход [q]

Рис. 1.1 – Меню вибору типу Рис. 1.2 – Картка звужуючого звужуючого пристрою для пристрою (діафрагма, природний газ) розрахунку

1.4.4 Після вибору потрібного типу ЗП і вимірюваного середовища, з'являється нове вікно – картка звужуючого пристрою для виміру витрати вибраного середовища (рис. 1.2). При відкритті картки ЗП вона заповнюється встановленими вхідними даними для цього типу звужуючого пристрою і вимірюваного середовища. Ці дані можна редагувати, зберігати під іншим ім'ям, дублювати, а потім відкривати, закривати і змінювати як завгодно. При натисненні клавіши [Enter] на клавіатурі автоматично здійснюється перерахунок і формується звіт, який можна подивитися, вибравши відповідну дію з меню картки ЗП.

1.4.5 Меню має наступні пункти:

Подивитися звіт – перегляд параметрів розрахунку, детальний опис усіх вхідних, проміжних і розрахованих величин, має форму WEB сторінки;

Приклади звітів, що формуються програмою;

Довідка он-лайн – виклик довідки з Інтернету;

Відкрити – відкривається вікно списку збережених звітів;

Зберегти – зберігає редаговану картку звужуючого пристрою (окрім передвстановленої);

Зберегти як – зберігає картку звужуючого пристрою з редагованими параметрами під іншим ім'ям. Але збережена картка не стає при цьому активною. Її спочатку треба відкрити.

1.4.6 Якщо порушуються межі застосування умов розрахунку (конструктивні параметри ЗП, параметри вимірюваного середовища), то після розрахунку виводиться спливаюче попередження про помилку, а в звіті з'являється відповідне попередження червоного кольору.

1.4.7 Програма дозволяє розрахувати витрату вимірюваного середовища залежно від перепаду тиску, параметрів середовища і конструкції звужуючого пристрою, або розрахувати перепад тиску на ЗП залежно від витрати і параметрів середовища і конструкції. Така гнучкість забезпечується тим, що розрахунок відразу ж виконується або при зміні витрати чи перепаду і натисненні клавіши [Enter], або при зміні параметрів звужуючого пристрою в списку вибору значень.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКИ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Розрахунок регулюючого клапана для рідини

2.1.1 Регулюючий клапан повинен пропускати в безкавітаційному і безшумному режимі розрахункову кількість регульованого середовища через регульовану ділянку при заданих параметрах середовища, забезпечивши необхідну якість і точність регулювання (в сукупності із виконавчими механізмами і регулюючими приладами).

2.1.2 Під регульованою ділянкою (РД) розуміється ділянка мережі, що включає технологічний елемент регулювання, трубопроводи, арматуру, регулюючий клапан, перепад тиску на якому залишається постійним в процесі регулювання або коливається у відносно малих межах $\pm 10\%$. Перепад тиску на регульованій ділянці складається з перепаду тиску на регулюючому клапані і перепаду тиску на інших елементах технологічної мережі.

2.1.3 Робота регулюючого клапана характеризується величиною пропускної спроможності K_v , м³/час, і пропускною характеристикою. Коефіцієнт умовної пропускної спроможності дорівнює витраті рідини через клапан в м³/год. з густиною 1000 кг/м³ при перепаді тиску на ньому 0,1 МПа (1 бар). Умовний коефіцієнт пропускної спроможності визначається формулою:

$$K_{\nu} = q\psi \sqrt{\frac{\rho}{1000\Delta P}},\tag{2.1}$$

де q – об'ємна витрата рідини через клапан, м³/год.;

 ρ – густина рідини, кг/м³;

 ΔP – втрата тиску на регулюючому клапані при максимальній витраті рідини через нього, МПа.

2.1.4 Формула для визначення числа Рейнольдса:

$$\operatorname{Re} = 3530 \frac{q}{v \cdot d},\tag{2.2}$$

де v – кінематична в'язкість рідини, що змінюється залежно від температури і концентрації розчиненої речовини для водних розчинів, см²/с;

d – діаметр умовного проходу клапана, мм.



Рис. 2.1 – Графік для визначення коефіцієнта
 Ψ для двохсідельних (1) і односідельних (2) клапанів

2.1.5 Відносна пропускна спроможність клапана:

$$\sigma = \frac{K_v}{K_{vv}},\tag{2.3}$$

де K_{ν} , $K_{\nu\nu}$ – коефіцієнти пропускної спроможності дійсний і умовний, м³/год.

1 =

2.1.6 Відносне переміщення затвора клапана:

$$\frac{S}{S_{v}},$$
 (2.4)

де *S*, *S*_v – дійсний і умовний ходи затвора, мм.

2.1.7 Пропускна характеристика – залежність відносної пропускної спроможності від відносного переміщення затвора клапана. Іноді вона називається ідеальною характеристикою регулюючого клапана. Частіше регулюючі клапани випускаються з лінійною пропускною характеристикою: $\sigma = l$, рідше рівновідсотковою $\sigma = 0,04^{1-l}$.

2.1.8 Реальна картина зміни витрати рідини через клапан відрізняється від ідеальної і характеризується робочою характеристикою клапана, яка виражає залежність відносної витрати рідини від ходу затвора. На неї чинять вплив параметри регульованої ділянки. Для того, щоб реальна характеристика щонайменше відрізнялася від ідеальної, перепад тиску на регулюючому клапані має бути більше або дорівнювати половині від загального перепаду тиску на регульованій ділянці, більше або дорівнювати перепаду тиску на елементах технологічної мережі:

$$\Delta P \ge 0, 5\Delta P_{m} a \delta o \Delta P \ge \Delta P_c \tag{2.5}$$

Правильно підібраним вважається такий клапан, який повністю відкритий при максимальному об'ємі протікаючого середовища і для якого виконуються співвідношення (2.5).

2.1.9 При виборі клапана його пропускна спроможність має бути рівною або близькою до значення необхідної пропускної спроможності. Необхідна пропускна спроможність визначається залежно від розрахункової витрати теплоносія через клапан і від фактичного перепаду тиску на ньому за формулою:

$$K_{vH} = 1,2G_p / (\Delta P_{\kappa \pi})^{0.5}, \, M^3 / \text{год},$$
 (2.6)

де 1,2 – коефіцієнт запасу;

 $G_{\rm p}$ – розрахункова витрата теплоносія через клапан, м³/год.;

 $\Delta P_{\kappa\pi}$ – заданий перепад тиску на клапані, бар.

2.1.10 Необхідна пропускна спроможність може бути також визначена за номограмою у Додатку Б при $G = 1, 2G_p$.

2.1.11 Рекомендоване мінімальне значення перепаду тиску на регулюючому клапані $\Delta P_{\text{клтіп}} = 0,3$ бар.

2.1.12 Гранично допустимий перепад тисків на регулюючому клапані розраховується за формулою:

$$\Delta P_{\text{клтах}} = Z \left(P_1 - P_{\text{нас}} \right),$$
 (2.7)
ефіцієнт початку кавітації. Визначається за каталогами на

де Z – коефіцієнт початку кавітації. Визначається за каталогами на регулюючі клапани залежно від їх типу і діаметра. Звичайно значення Z лежать в діапазоні від 0,2 до 0,6;

*P*₁ – надлишковий тиск рідини перед регулюючим клапаном, бар;

 $P_{\rm hac}$ – надлишковий тиск насичених парів рідини в залежності від її температури T_1 , бар.

Якщо розрахований $\Delta P_{\text{клтах}}$ виявиться менше прийнятого раніше $\Delta P_{\text{кл}}$, то необхідно або зменшити заданий перепад тиску на клапані шляхом перерозподілу його між елементами трубопровідної мережі, в тому числі за рахунок додаткової установки перед клапаном якого-небудь дроселюючого пристрою (наприклад, ручного балансувального клапана), або розмістити клапан після РД.

2.1.13 У табл. 2.1 наведені значення Р_{нас} для води.

Таблиця 2.1 – Значення надлишкового тиску насиченої пари води

T, ℃	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$P_{\rm Hac}$, бар	0,01	0,21	0,43	0,69	0,98	1,31	1,71	2,14	2,62	3,17	3,85

2.1.14 У документації на клапани вказується величина K_{vs} , яка характеризує максимальну пропускну спроможність повністю відкритого

клапана. За технічним каталогом виробника обирається клапан, для якого $K_{\nu s}$ є рівним, або трохи більшим, ніж необхідна пропускна спроможність, визначена за формулою (2.6). У Додатку В наведені дані деяких клапанів фірми Danfoss.

2.2 Розрахунок регулюючого клапана для газів

2.2.1 У розрахунках використовуються наступні дані:

- *Q_N* нормальна об'ємна витрата, м³/год.;
- *Q*₁ об'ємна витрата на вході в клапан, м³/год.;
- *Q*₂ об'ємна витрата на виході з клапана, м³/год.;
- *N* густина газу, кг/м³;
- Δp перепад тиску на клапані, бар;
- *p*₁ вхідний тиск (абс.), бар;
- *p*₂ вихідний тиск (абс.), бар;
- t_1 температура на вході °C;
- t_2 температура на виході °C;
- *w*₁ швидкість потоку перед клапаном м/с;
- *w*₂ швидкість потоку після клапана м/с;
- *d*1 умовний діаметр перед клапаном мм;
- *d*2 умовний діаметр після клапана мм.

2.2.2 Коефіцієнт пропускної спроможності визначається формулою:

а) для докритичного потоку (при $\Delta p < 0.5P_1$):

$$K_{V} = \frac{Q_{N}}{514} \sqrt{\frac{\rho_{N}(t_{1} + 273)}{\Delta p \times p_{2}}}; \qquad (2.8)$$

б) для надкритичного потоку (при $\Delta p > 0,5P_1$) :

$$K_{V} = \frac{Q_{N}}{257 \times p_{1}} \sqrt{\rho_{N}(t_{1} + 273)} .$$
 (2.9)

До розрахованого значення додаємо 30% і отримуємо необхідну мінімальну пропускну спроможність клапана.

2.2.3 Для розрахунку швидкості потоку необхідно визначити величину робочої витрати середовища:

$$Q = \frac{Q_N(273+t)}{p \times 273}.$$
 (2.10)

2.2.4 Необхідний діаметр трубопроводу

$$d = 18, 8\sqrt{\frac{Q}{w}} . \tag{2.11}$$

Для коректної роботи системи швидкість *w* потоку середовища в трубопроводі не повинна перевищувати рекомендованих меж:

- при тиску газу до 10 мбар – 2 м/с;

при тиску газу до 100 мбар – 4 м/с;

- при тиску газу до 1 бар 10 – м/с;

при тиску газу до 10 бар 20 – м/с;

- при тиску газу понад 10 бар – 40 м/с.

Вказані швидкості потоку рекомендуються для трубопроводів Ду80 і більше. Для менших трубопроводів слід використовувати менші швидкості потоку.

2.2.5 Для вибраного умовного діаметру швидкості потоку на вході і виході можуть бути розраховані з використанням формули:

$$w = 354 \frac{Q}{d^2}$$
. (2.12)

2.2.6 Деякі виробники клапанів використовують таку характеристику клапана, як коефіцієнт витрати для газів K_G . Його значення дорівнює величині протікаючої витрати при повністю відкритому клапані при абсолютному вхідному тиску $p_{\text{вх}} = 2,013$ бар і абсолютному вихідному тиску $p_{\text{вих}} = 1,013$ бар. Зв'язок між K_{yy} і K_G має вигляд:

$$K_G = 34 \cdot K_{vs}. \tag{2.13}$$

2.2.7 Звичайно в проспектах виробників значення K_G приведено до середовища природного газу. У Додатку Б наведено номограму для визначення K_G саме для природного газу. Цю номограму можна використати для інших газів, якщо виконати перерахунок витрати газу q_n у еквівалентну витрату природного газу $q_{nпр.газ}$ згідно формули:

 $q_{nпр.газ} = q_n/f,$ (2.14) де f – перерахунковий фактор, який береться з табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення перерахункового фактору f

Середовище	f	Середовище	f
Етилен	0,97	Окис вуглецю	0,81
Ацетилен	0,84	Вуглекислий газ	0,65
Етан	0,78	Повітря	0,80
Аміак	1,04	Метан	1,08
Бутан	0,55	Пропан	0,64
Хлор	0,51	Кисень	0,76
Газ із звалищ	0,81	Двоокис сірки	0,53
Гелій	2,15	Азот	0,81
Біогаз	0,85	Водень	3,04

2.3 Розрахунок виконавчого механізму

2.3.1 Виконавчий механізм (ВМ) обирають залежно від величини зусилля або моменту обертання, необхідного для перестановки регулюючого органу (РО). ВМ повинен:

a) забезпечувати необхідну швидкість регулювання, що визначається динамікою системи;

б) забезпечувати лінійну ходову характеристику, тобто постійність коефіцієнта передачі за потужністю в усьому діапазоні зміни регульованої величини, тоді ВМ не спотворюватиме вибраного закону регулювання;

3) зберігати рівність між переміщенням вихідного елементу і робочим ходом затвора регулюючого органу. Якщо ця рівність не виконується, необхідно підібрати відповідний механічний зв'язок між BM і PO.

2.3.2 Перестановочне зусилля на штоку односідельного регулюючого органу:

$$N_{\rm nc} = \pm N_{\rm c} \pm N_{\rm III} + N_{\rm Tp+} N_{\rm yIII}, \qquad (2.15)$$

де N_c – сила тиску середовища на затвор;

*N*_ш – сила тиску середовища на шток;

*N*_{тр} – сила тертя штока в сальнику;

N_{ущ} – сила, необхідна для створення контакту ущільнюючого затвора з сідлом.

2.3.3 Сила тиску середовища на затвор:

$$N_3 = F_c(P_1 - P_2) = F_c \Delta P,$$
 (2.16)
де F_c - площа проходу у сідлі, см²;

 P_1, P_2 – тиск перед і після РО, кгс/см²;

 ΔP - перепад тиску на регулюючому органі, кгс/см².

2.3.4 Сила тиску середовища на шток:

$$N_{\rm m} = 0,785 d^2_{\ m} P_2, \tag{2.16}$$

де *d*_{*u*}- діаметр штока в сальнику, см.

Знаки перед N_c і N_m в рівнянні (2.15) приймаються залежно від напряму цих сил. Якщо напрям співпадає з напрямком зусилля від ВМ, то ці сили приймаються зі знаком плюс, інакше – зі знаком мінус.

2.3.5 Сила тертя штока в сальнику може бути визначена по наступних емпіричних формулах:

а) для сальників з фторопластовими кільцями і штока, обробленого за 11-м класом шорсткості

$$N_{\rm rp} = 0.6 \, d_{\rm ul} + 0.01 \, d_{\rm ul} P, \, {\rm krc}, \qquad (2.18)$$

де d_{u} – діаметр штока, мм;

Р – тиск середовища під сальниковою камерою, кгс/см²;

б) для сальників з іншими набивальними матеріалами

$$N_{\rm TP} = 1.1 \ d_{\rm ul} + 0.02 \ d_{\rm ul}P, \, {\rm KFC}. \tag{2.19}$$

У односідельних регулюючих органах з розвантаженими затворами слід додатково враховувати тертя, що створюється ущільненням в направляючій втулці:

 $N_{\rm rp} = 0.4 d_{\rm ul} + 0.01 d_{\rm H} \Delta P, \, {\rm krc}, \qquad (2.20)$

де *d_н* – діаметр направляючої частини затвора, мм;

 ΔP – максимальний перепад тиску при закритому проході, кгс/см².

2.3.6 Сила, необхідна для створення контакту ущільнювача в жорсткій замочній парі, може бути орієнтовно підрахована по наступних формулах:

а) при умовному тиску $P_y < 100 \text{ кгс/см}^2$:

 $N_{\rm ym} \approx 0.75\pi \cdot d_c, \, \text{kfc}; \tag{2.21}$

(2.22)

де d_c - діаметр проходу сідла, мм;

б) при умовному тиску $P_y > 100 \text{ кгс/см}^2$:

 $N_{
m ym} pprox 0,75 \pi \cdot d_c P_y / 100$, кгс;

2.3.7 PO з поступальною ходою затвора зручно зчленовувати з BM за допомогою шарнірного важільного механізму, як це показано на рис. 2.2.



Рис. 2.2 – Важільний механізм

Тяга шарнірного механізму, що сполучає провідний важіль ВМ з точкою B важеля регулюючого органу, передає зусилля N, з яким ВМ утримує важіль $BO_2 = r$. Сила на штоці регулюючого органу N_c прагне повернути важіль BO_2 за годинниковою стрілкою навкруги осі O_2 . Позначивши довжину плеча $CO_2 = b$, знайдемо необхідний обертаючий момент на важелі регулюючого органу:

(2.23)

де *n* – коефіцієнт запасу:

а) для плавного управління витратою середовища, що протікає через PO, n = 2;

 $M=nbN_{nc}$,

б) для швидкого і прецизійного управління положенням затвора РОn = 3.

2.3.8 Необхідний обертаючий момент ВМ, що зчленовується з регулюючим органом:

$$M_c = n_0 \cdot M/k, \tag{2.24}$$

де n_0 – коефіцієнт послаблення обертаючого моменту механізмом зчленування;

k – відношення пускового обертаючого моменту ВМ до номінального.

Величину коефіцієнта послаблення доцільно приймати з деяким запасом, що забезпечується при $n_0 = 4$.

Номінальний обертаючий момент M_{μ} вибраного BM має бути рівний або більше величини M_c .

2.4 Приклад розрахунку виконавчого механізму

2.4.1 Вихідні дані для розрахунку

Регульоване середовище – вода. Регулюючий орган – односідельний клапан. Тиск перед регулюючим органом $P_1 = 60$ кгс/см². Приєднувальний (умовний) діаметр регулюючого органу d = 20 мм. Діаметр сідла $d_c = 18$ мм. Діаметр штоку $d_{ul} = 20$ мм. Хід штоку $h_{ul} = 22$ мм. Плече сили на штоку b = 45 мм. Довжина важеля регулюючого органу $r_1 = 440$ мм. Час запізнювання об'єкту $\tau = 36$ с. Необхідна характеристика зчленування – лінійна. Відношення пускового обертаючого моменту ВМ до номінального

k = 1, 7.

2.4.2 Визначимо максимальну силу тиску середовища на затвор і шток. Оскільки $d_{u} > d_c$, то найбільша сила тиску середовища на шток буде в положенні "відкрито", коли перепад тиску мінімальний. Нехтуючи величиною цього перепаду, знайдемо:

 $(N_3 + N_{uu})_{\text{max}} = 0,785 d_{uu}^2 P_1 = 0,785 \cdot 2^2 \cdot 60 = 189 \text{ krc.}$

2.4.3 Визначимо силу тертя штока в сальнику:

 $M_{\rm TP} = 1,1d_{\rm ul} + 0,02d_{\rm ul}P_1 = 1,1\cdot 20 + 0,02\cdot 20\cdot 60 = 46$ кгс.

2.4.4 Оцінимо силу, необхідну для створення контакту ущільнювача в жорсткій замочній парі "сідло-плунжер":

 $N_{\text{ущ}} \approx 0.75 \pi d_c = 0.75 \cdot 3.14 \cdot 18 = 42$ кгс.

2.4.5 Визначимо максимальне перестановочне зусилля на штоку:

$$N_{nc} = (N_{c} + N_{\mu})_{max} + N_{TP} + N_{y\mu} = 189 + 46 + 42 = 277 \text{ krc}.$$

2.4.6 Прийнявши коефіцієнт запасу n = 2, визначимо необхідний момент на важелі регулюючого органу:

$$M = nb \cdot N_{nc} = 2.0,045.277 = 25$$
 кгс.м.

2.4.7 Визначимо необхідний обертаючий момент на вихідному органі ВМ:

$$M_c = \frac{n_0 M}{k} = \frac{4 \cdot 25}{1.7} = 59 \text{ krc} \cdot \text{m} = 578 \text{ H} \cdot \text{m}$$

де $n_o = 4$ – коефіцієнт послаблення обертаючого моменту механізмом зчленування.

2.4.8 За каталогами виробників обираємо МЭО-630/25-0,63-92К, що має номінальний обертаючий момент 630 н м.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Ідентифікація об'єкта управління

3.1.1 Класичний метод синтезу систем регулювання часто дає результати, дуже далекі від оптимальних. Причиною є використання спрощеної моделі динаміки об'єкта управління, яка представляється передатною функцією першого порядку. В той же час динамічні властивості реальних технологічних об'єктів описуються передатними функціями другого-третього порядку.

3.1.2 Більшість хіміко-технологічних процесів і апаратів розглядаються як двоємкісні об'єкти з ПФ наступного вигляду:

$$W(s) = \frac{ke^{-st}}{(T_1s+1)(T_2s+1)},$$
(3.1)

де k – коефіцієнт передачі об'єкта;

 T_1, T_2 – сталі часу;

τ – чисте (транспортне) запізнення.

Ідентифікація таких об'єктів складається в апроксимації розгінної характеристики передатною функцією (3.1), що полягає в підборі таких параметрів передатної функції, які забезпечують максимальну близькість експериментальної кривої розгону h(t) до кривої $h_p(t)$, розрахованої за передатною функцією.

Параметри *k*, *T*₁, *T*₂, т передатної функції (3.1) можуть бути отримані шляхом мінімізації функціоналу

$$I = \int (h(t) - h_p(t))^2 dt \to \min_{k, T_1, T_2, \tau}.$$
 (3.2)

3.1.3 Процес ідентифікації розглянемо на наступному прикладі. Нехай треба визначити передатну функцію динамічного об'єкта за кривою розгону, яка представлена даними табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані кривої розгону

Т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
h	0	0	0	0.07	0.23	0.43	0.64	0.84	1.03	1.19	1.33	1.45	1.55	1.64	1.71	1.77

3.1.4 Таку задачу зручно розв'язувати за допомогою системи МАТLAB. Створюємо Script-файл для вирішення задачі. Для цього викликаємо меню File командного вікна МАТLAB і обираємо в нім спочатку команду New, а потім команду M-file. У вікні текстового редактора, що з'явилося, набираємо текст:

```
% t - MacuB MomentiB vacy
% h - macuB значень експериментальної перехідної
характеристики
% hp - масиВ значень розрахованої перехідної
характеристики
% a - вектор параметрів передатної функції об'єкту
% a(1)=k, a(2)=t1, a(3)=t2, a(4)=tau
global t h hp
t=0:1:15;
h=[0 0 0 0.07 0.23 0.43 0.64 0.84 1.03 1.19 1.33 1.45
1.55 1.64 1.71 1.77];
[a, fval] = fminunc(@func,[1 1 2 1])
plot(t,h,'o',t,hp,'-')
```

Процедура fminunc здійснює пошук мінімуму функції декількох змінних. Ім'я функції, що мінімізується, задається в першому аргументі процедури fminunc, а в другому – передається початкова точка для пошуку.

Зберігаємо цей текст у файлі під ім'ям *din_app.m*.

3.1.5 Створюємо файл-функцію, яка обчислює функціонал (3.2). Текст файл-функції має вигляд:

```
function f=func(a)
global t h hp
% ПФ oб'єкта:
y=series(tf([a(1)],[a(2) 1]), tf([1],[a(3) 1]));
y.inputd = a(4); % запізнення
[hp, t]=step(y, t);
f=sum((h - hp').^2);
```

Рядок [hp, t]=step(y, t); будує відгук ПФ на ступінчасту дію. Останній рядок визначає суму квадратів нев'язок між експериментальною і розрахованою перехідними характеристиками.

Зберігаємо введений текст у файлі під ім'ям func.m.

3.1.6 У командному режимі запускаємо на виконання Script-файл:

>>din_app

При завершенні виконання цього Script-файлу в командному вікні MATLAB буде відображається результат рішення задачі мінімізації функції (3.3) у вигляді:

a = 2.0382 2.4265 4.8308 2.0181 fval = 3.9104e-005

Тобто k = 2.0382, $T_1 = 2.4265$, $T_2 = 4.8308$, $\tau = 2.0181$.

На графік виводяться експериментально зняті точки розгінної характеристики і розрахована апроксимуюча перехідна характеристика.

3.2 Динамічна ідентифікація об'єкта управління засобами Python

3.2.1 Параметрична ідентифікація методом найменших квадратів з використанням похідних

3.2.1.1 Розглянемо об'єкт довільного порядку, що описується звичайним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами

$$\sum_{i=0}^{n} a_{i} y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{n} b_{j} x^{(j)}(t),$$
(3.3)

де a_i и b_j — постійні коефіцієнти (параметри моделі), $u^{(j)}(t)$ і $x^{(i)}(t)$ – похідні, відповідно, вхідного і вихідного сигналів, n — порядок моделі.

Для ідентифікації використовується метод найменших квадратів, що вимагає мінімізації середнього квадрата нев'язки правої і лівої частин рівняння (3.3):

$$S = \int_{0}^{T} \left[\sum_{i=0}^{n} a_{i} y^{(i)}(t) - \sum_{j=0}^{n} b_{j} x^{(j)}(t) \right]^{2} dt \to \min.$$
(3.4)

3.2.1.2 Рішення задачі (3.4) зводиться до розв'язання системи :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_{i}} = 0, \ i = 0, ..., n, \\ \frac{\partial S}{\partial b_{j}} = 0, \ j = 0, ..., m. \end{cases}$$

$$(3.5)$$

Перетворюючи (3.5) відповідно до рівняння (3.4), можна отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n} a_{i} \cdot \int_{0}^{T} y^{(i)}(t) \cdot y^{(k)}(t) dt - \sum_{j=0}^{m} b_{j} \cdot \int_{0}^{T} x^{(j)}(t) \cdot y^{(k)}(t) dt = 0, \\ \sum_{i=0}^{n} a_{i} \cdot \int_{0}^{T} y^{(i)}(t) \cdot x^{(k)}(t) dt - \sum_{j=0}^{m} b_{j} \cdot \int_{0}^{T} x^{(j)}(t) \cdot x^{(k)}(t) dt = 0, \\ k = 0, ..., m. \end{cases}$$

$$(3.6)$$

3.2.1.3 Для вирішення системи (3.6) відносно невідомих параметрів необхідно знати похідні вхідного і вихідного сигналів об'єкта, які знаходяться в результаті згладжування функцій X(t) і Y(t) на відрізку $t \in [0,T]$. Для розрахунку коефіцієнта b_1 використовується формула $b_1 = a_2 \cdot y_0^{(1)}$.

3.2.1.4 Для оцінки адекватності моделі можна використати критерій другого порядку:

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} [y_{i} - z(t_{i})]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} y_{i}^{2}},$$
(3.7)

де у_i – дані, зняті з кривої розгону;

 $z(t_i)$ – значення, розраховані по дійсній частині передатної функції моделі (перехід з частотної області в часову) :

$$z(t) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{20} \operatorname{Re}(W(j\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega.$$
(3.8)

Найкращою слід вважати модель, що забезпечує максимальне значення R^2 .

3.2.1.5 Наступна програма виконує ідентифікацію об'єкта управління описаним методом. Вихідними даними для розрахунків є крива розгону, представлена двома векторами. Вектор x містить моменти часу, вектор y – відповідні цим моментам значення відгуку об'єкта на ступінчастий вплив. Адекватність моделей оцінюється згідно (3.7).

import matplotlib.pyplot as plt# для побудови графіку import time start = time.time() import scipy as sp# для інтерполяції поліномом import numpy as np# для операцій з матрицями похідних від КР from sympy import *# для символьного диференціювання КР import scipy.integrate as spint from scipy.integrate import quad x=[0.0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6]# час y=[0.00, 0.11, 0.36, 0.61, 0.79, 0.89, 0.94, 0.98, 0.99, 1.00] # відгук системи fp, residuals, rank, sv, rcond = sp.polyfit(x, y,4, full=True) # інтерполяція поліномом a=round(fp[0],4);b=round(fp[1],4);c=round(fp[2],4) d=round(fp[3], 4); e=round(fp[4], 4)t=symbols('t ' ,real=True) def h(t):# аналітична форма перехідної характеристики h(t)return a*t**4+b*t**3+c*t**2+d*t+e ''' Символьне обчислення похідних ''' L1=integrate(h(t).diff(t)*h(t).diff(t,t),(t,0,3.6))L2=integrate(h(t).diff(t,t)*h(t).diff(t,t),(t,0,3.6))L3=integrate(h(t).diff(t)*h(t).diff(t),(t,0,3.6)) L4=integrate((1-h(t))*h(t).diff(t,t),(t,0,3.6))L5=integrate((1-h(t))*h(t).diff(t),(t,0,3.6))""" Матрична форма рішення системи рівнянь (3.10)""" P = np.zeros([2,2])P[0, 0] = L2; P[0, 1] = L1P[1,0]=L1; P[1,1]=L3O= np.zeros([2,1]) Q[0,0] = L4; Q[1,0] = L5P=np.matrix(P); Q=np.matrix(Q)C=P.I*O ''' Коефіцієнти передатної функції об'єкта''' a2=C[0,0] a1=C[1,0] b1=C[0,0]*h(t).diff(t).subs(t,0)a2 = round(C[0,0],3)a1=round(C[1,0],3) b1 = round(C[0,0]*h(t).diff(t).subs(t,0),3)""" Перехід з частотної області в часову """

```
def ff(x, t):
        j = (-1) * * 0.5
        return (2/np.pi)*( ((b1*x*j+1)/(a2*(x*j)**2
+a1*x*j+1).real)*(np.sin(x*t)/x)
z=np.array([round(quad(lambda x: ff(x,t),0, 20)[0],2))
for t in xl)
""" Визначення адекватності моделі """
k=round(1-sum([(y[i]-z[i])**2 for i in
np.arange(0,len(y)-1,1)])/sum([(y[i])**2 for i in
np.arange(0, len(y) - 1, 1)]), 5)
stop = time.time()
print ("Час роботи програми:", round(stop-start, 3))
plt.title(' Ідентифікація методом найменших квадратів\n
Адекватність моделі -%s'%k)
plt.plot(x, y,'o', label='Знята експериментально КР')
plt.plot(x, z,'r', label='
W = (\$s*p+1) / (\$s*p**2+\$s*p+1) '\$(b1,a2,a1))
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
plt.show()
```

3.2.1.6 Результат виконання програми виглядає наступним чином.

Час роботи програми: 0.802



3.2.2 Параметрична ідентифікація модифікованим методом площ

3.2.2.1 Для створення моделі засобами Python, модифікація методу площ полягає в незмінному масштабі часу. У класичному варіанті вводять новий масштаб часу, що при чисельному рішенні призводить до додаткової погрішності.

3.2.2.2 Передатну функцію об'єкта часто шукають у вигляді однієї з трьох математичних моделей:

$$W(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$
(3.9)

$$W(p) = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p_1 + 1};$$
(3.10)

$$W(p) = \frac{b_1 p + 1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}.$$
(3.11)

3.2.2.3 Вираз 1/*W*(*p*), зворотний передатній функції моделі, можна розкласти в ряд:

$$\frac{1}{W(p)} = 1 + S_1 p + S_2 p^2 + \dots + S_k p^k + \dots$$
(3.12)

3.2.2.4 Коефіцієнти *a*, *b* приведених передатних функцій пов'язані з коефіцієнтами S наступною системою рівнянь :

$$\begin{cases} a = b_1 + S_1 \\ a = b_1 S_1 + S_2 \\ a = b_1 S_2 + S_3 \\ a_4 = b_1 S_3 + S_4 \end{cases}$$
(3.13)

3.2.2.5 Коефіцієнти S_i є пов'язаними з перехідною функцією h(t) співвідношеннями:

$$S_{1} = \int_{0}^{\infty} (1 - h) dt,$$

$$S_{2} = \int_{0}^{\infty} (1 - h) (S_{1} - t) dt,$$

$$S_{3} = \int_{0}^{\infty} (1 - h) (S_{2} - S_{1}t + \frac{t^{2}}{2}) dt,$$

$$S_{4} = \int_{0}^{\infty} (1 - h) (S_{3} - S_{2}t + S_{1}\frac{t^{2}}{2} - \frac{t^{3}}{6}) dt.$$
(3.14)

3.2.2.6 Співвідношення (3.14) є оптимальними для вирішення засобами Python при інтерполяції h(t) кубічними сплайнами відповідно до наступного лістингу.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import time
start = time.time()
from scipy.interpolate import splev, splrep
import scipy.integrate as spint
import numpy as np
from scipy.integrate import guad
xx =np.array([0.0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8
,3.2, 3.6])
yy =np.array([0.00, 0.11, 0.36, 0.61, 0.79, 0.89, 0.94,
0.98, 0.99, 1.001)
""" Інтерполяція перехідної характеристики за допомогою
сплайнів """
def h(x):
         spl = splrep(xx, yy)
         return splev(x, spl)
""" Чисельна інтеграція без зміни координати часу """
S1=(spint.guad(lambda x:1-h(x),xx[0],xx[len(xx)-1])[0])
S2=(spint.quad(lambda x: (1-h(x))*(S1-
x), xx[0], xx[len(xx)-1])[0])
S3=(spint.guad(lambda x: (1-h(x)))*(S2-
S1*x+(1/2)*x**2), xx[0], xx[len(xx)-1])[0])
S4=(spint.quad(lambda x: (1-h(x))*(S3-
S2*x+S1*(1/2)*x**2-(1/6)*x**3), xx[0], xx[len(xx)-1])[0])
"" Визначення коефіцієнтів передатної функції ""
b1 = -S4/S3
a1=b1+S1
a2=b1*S1+S2
a3=b1*S2+S3
""" Повернення в часову область """
def ff(x, t):
```

j = (-1) * * 0.5return (2/np.pi)*(((b1*x*j+1)/(a3*(x*j)**3+a2*(x*j)**2+a1*x*j+1)).real)*(np.sin(x*t)/x)y=np.array([round(quad(lambda x: ff(x,t),0, 20)[0],2))for t in xxl) "" Визначення критерію адекватності модели """ k=round(1-sum([(yy[i]-y[i])**2 for i in np.arange(0,len(yy)-1,1)])/sum([(yy[i])**2 for i in np.arange(0, len(yy)-1, 1)]), 5) stop = time.time() print ("Час роботи програми:", round(stop-start, 3)) plt.title('Ідентифікація модифікованим методом площ.\n Адекватність моделі -%s'%k) plt.plot(xx, yy, 'o', label='Hopmobaha крива розгону (KP)') plt.plot(xx,y,'r',label='W=(%s*p+1)/(%s*p**3+%s*p**2+%s *p+1) '% (round (b1, 3), round (a3, 3), round (a2, 3), round (a1, 3))) plt.legend(loc='best') plt.grid(True) plt.show() 3.2.2.7 Ця програма дає наступні результати.

Час роботи програми: 0.238





3.2.2.8 Висока міра адекватності моделі 0.99996 і більша швидкодія, ніж при символьному диференціюванні, дозволяє стверджувати, що передатна функція, отримана модернізованим методом площ краще відображає динамічні властивості об'єкту.

3.3 Регулятори

3.3.1 На сьогоднішній день в переважній більшості АСК ТП використовуються пропорційно-інтегрально-диференцювальні регулятори (ПІД-регулятори).

Стандартний ПІД-регулятор виробляє сигнал управління, що є сумою трьох складових: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Пропорційна складова залежить від розузгодження між завданням і поточним значенням регульованої величини і відповідає за реакцію на миттєву помилку регулювання. Інтегральна складова містить в собі накопичену помилку регулювання, яка дозволяє добитися максимальної швидкості досягнення уставки за відсутності перерегулювання. Диференціальна складова залежить від швидкості зміни параметра, що викликає реакцію регулювальника на різку зміну вимірюваного параметра, яка виникла, наприклад, в результаті зовнішньої збурюючої дії.

3.3.2 Передатна функція (ПФ) ПІД-регулятора представляється у трьох формах:

а) стандартна форма

$$C(s) = K_{p} \left(1 + \frac{1}{T_{i}s} + T_{d}s \right), \qquad (3.15)$$

де К_р – коефіцієнт передачі регулятора;

T_i – стала часу інтегральної складової або час ізодрому;

 T_d – стала часу диференціальної складової або час передування; б) паралельна форма:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s,$$
 (3.16)

де K_p , K_i та K_d – коефіцієнти передачі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно;

в) послідовна форма

$$C(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} (T_d s + 1).$$
(3.17)

3.1.3 Регулятори, що реалізують ці передатні функції, мають суттєву ваду: вони посилюють високочастотні шуми і завади. Це пояснюється тим, що при диференціюванні синусоїдального сигналу $A\sin(\omega t)$ диференціальна складова дає на виході $A\omega\cos(\omega t)$, тобто чим більша частота, тим більша амплітуда на виході. Для зменшення такого негативного впливу у диференціальну складову вводять фільтр першого порядку

$$\frac{1}{4s+1}$$
, (3.18)

де N=2÷20. Таким чином, передатні функції набувають вигляду:

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right],$$
 (3.19)

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_c s + 1},$$
(3.20)

$$C(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \frac{T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1},$$
(3.21)

де T_f – стала часу фільтра; $\alpha = 1/N$.

3.4 Класичний метод синтезу систем регулювання

3.4.1 Синтез системи автоматичного регулювання (САР) технологічного параметра звичайно починається з експериментального дослідження об'єкта управління і побудови кривої розгону, яку іноді називають розгінною характеристикою. Для її отримання на вхід об'єкта треба подати ступінчастий вплив. Визначають чинник, який впливає на регульовану величину, наприклад, температуру можна регулювати зміною подачі граючої пари. Стрибком змінюють вхідну дію на декілька відсотків ходу виконавчого механізму і спостерігають за зміною регульованої величини. Графік зміни регульованої величини обробляють, як показано на рис. 3.1. Тим самим реальний об'єкт (суцільна лінія) апроксимується об'єктом першого порядку з чистим запізненням L (пунктирна лінія).

Далі розраховується коефіцієнт передачі об'єкта $K_0 = \Delta y / \Delta x$, де приріст регульованої величини Δy і приріст вхідної дії Δx повинні бути виражені у відсотках.

За допомогою графіка визначають параметри a та L, відношення яких є рівним тангенсу кута нахилу дотичної прямої. Знаходять також коефіцієнт передачі як відношення приросту сталого значення вихідної змінної до амплітуди тестового стрибка.



3.4.2 Далі за допомогою ряду формул розраховують параметри налаштування регулятора і комп'ютерним моделюванням або на реальному об'єкті отримують перехідний процес системи регулятор-об'єкт. Найбільш вживаними безпошуковими методами розрахунку параметрів налаштувань регуляторів є методи Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick (CHR).

Формули для розрахунку методом Ziegler-Nichols наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора методом Ziegler-Nichols

Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	1/a	-	
ПІ	0,9/a	$3L/K_p$	-
ПІД	1,2/a	$0,9L/K_p$	$0,5L/K_p$

3.4.3 Метод Ziegler-Nichols дає параметри, далекі від оптимальних. Це пояснюється не лише спрощеністю самого методу (він використовує тільки два параметри для опису об'єкту), але і тим, що параметри регулятора в цьому методі визначалися Циглером і Нікольсом, виходячи з вимоги до декремента загасання, рівного 4, що і дає повільне загасання процесу коливань. Внаслідок повільного загасання перехідного процесу в системі запас стійкості малий.

3.4.4 За методом Cohen-Coon використовуються наступні параметри кривої розгону:

а) коефіцієнт передачі об'єкта K_0 , %/%;

б) чисте запізнювання L, хв.;

в) час, протягом якого регульована величина зростає до 63% від нового усталеного значення, *T*, хв.

Формули для розрахунку методом Cohen-Coon наведені в табл. 3.3.

таолиця э	– Формули	для	розрахунку	коефіцієнт	пв регулятора	
етодом Cohen-Co	on					
Derrigenon	V		T		T	1

Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	$\frac{0.54}{K_o}(\frac{T}{L}+0.34)$	_	_
ПІ	$\frac{0.45}{K_o}(\frac{T}{L}+0.092)$	$3,33L \frac{T+0,092L}{T+2,22L}$	_
ПІД	$\frac{0,67}{K_o}(\frac{T}{L}+0,185)$	$2,5L\frac{T+0,185L}{T+0,611L}$	$0,37L\frac{T}{T+0,185L}$

Перехідний процес, отриманий за допомогою методу Коэна-Куна характеризується украй високою мірою коливальності і найбільшим перерегулюванням.

3.4.5 Chien, Hrones та Reswick (CHR) використовували критерій максимальної швидкості наростання за відсутності перерегулювання або за наявності не більше ніж 20%-го перерегулювання. Такий критерій дозволяє отримати більший запас стійкості, чим в методі Циглера-Нікольса.

Метод CHR дає дві різні системи параметрів регулятора. Одна з них отримана при спостереженні відгуку на зміну уставки (табл. 3.4), друга - при спостереженні відгуку на зовнішні збурення (табл. 3.5). Яку систему параметрів обирати – залежить від того, що важливіше для конкретного регулятора: якість регулювання при зміні уставки, або послаблення зовнішніх дій.

Таблиця 3.4 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора методом CHR за відгуком на зміну уставки

	Без п	еререгулю	вання	З 20% -вим перерегулюванням			
Регулятор	K	Ti	T _d	K	Ti	T _d	
П	0,3/a	-	-	0,7/ <i>a</i>	-	-	
ПІ	0,35/a	1,2L/K	-	0,6/ <i>a</i>	1,0L/K	-	
ПІД	0,6/ <i>a</i>	1,0L/K	0,5L/K	0,95/a	1,4L/K	0,47L/K	

Таблиця 3.5 – Формули для розрахунку коефіцієнтів регулятора методом CHR за відгуком на зовнішні збурення

	Без п	еререгулюн	зання	З 20% -вим перерегулюванням			
Регулятор	Κ	Ti	T _d	K	Ti	T _d	
П	0,3/a	-	-	0,7/ <i>a</i>	-	-	
ПІ	0,6/a	4L/K	-	0,7/ <i>a</i>	2,3L/K	-	
ПІД	0,95/a	2,4L/K	0,42L/K	1,2/ <i>a</i>	2,0L/K	0,42L/K	

3.5 Приклад синтезу САР з ПІД-регулятором у середовищі МАТLAB

3.5.1 Нехай обробкою кривої розгону об'єкта управління згідно п. 3.4 отримані наступні нараметри:

а) коефіцієнт передачі об'єкта $K_0 = 2,5;$

б) чисте запізнювання L = 1 хв.;

в) час, протягом якого регульована величина зростає до 63% від нового усталеного значення, T=1,6 хв.;

г) параметр *a* = 1,55 (див. рис. 3.1).

Визначити налаштування ПІД-регулятора методами Ziegler-Nichols і та Cohen-Coon і дослідити САР з такими регуляторами.

3.5.2 За допомогою табл. 3.2 знаходимо параметри регулятора за методом Ziegler-Nichols:

 $K_p = 0,774; T_i = 1,16; T_d = 0,65.$

3.5.3 За допомогою табл. 3.3 знаходимо параметри регулятора за методом Cohen-Coon:

 $K_p = 0,48; T_i = 2; T_d = 0,33.$

3.5.4 Вважаємо, що об'єкт може бути представлений передатною функцією

$$W_o = \frac{K_o \cdot e^{-Lp}}{Tp+1}.$$
 (3.22)

3.5.5 Ланку запізнення e^{-T_p} у загальному вигляді можна представити рядом Паде

$$e^{-Tp} \rightarrow \frac{b_1 p^n + b_2 p^{n-1} + \dots}{a_1 p^m + a_2 p^{m-1} \dots},$$
 (3.23)

тоді для завдання передатної функції цієї ланки нам знадобиться команда

$$[Num, Den] = pade(T,N), \qquad (3.24)$$

де Т – період дискретизації;

N – число членів ряду, від якого залежить точність розрахунків.

3.5.6 Представимо передатну функцію об'єкту у вигляді послідовного з'єднання двох ланок (sys1 и sys2).

>> sys2=tf([2.5],[1.6 1])
>> Wobj=series(sys1,sys2)

3.5.7 Для ПІД-регулятора з налаштуваннями, підібраними методом Ziegler-Nichols, визначимо передатну функцію.

>> Ctf = pidstd(0.48,2,0.33, 10) %регулятор Z-N >> pidregZ_N = tf(Ctf);

3.5.8 Визначимо передатну функцію розімкненої системи. Це є послідовне з'єднання регулятора і об'єкта.

>> Z Nrazomk=series(pidregZ N,Wobj)

3.5.9 Визначимо передатну функцію замкнутої системи.

>> Z Nzamk=feedback(Z Nrazomk,1)

3.5.10 Будуємо реакцію на одиничну дію (рис. 3.2).

>> step(Z Nzamk),grid

3.5.11 Будуємо передатну функцію для ПІД-регулятора з налаштуваннями, підібраними за методом Cohen-Coon.

>> Ctf=pidstd(0.774,1.16,0.65,10) %регулятор Cohen-Coon >> pidregK_K = tf(Ctf)

3.5.12 Визначимо передатну функцію розімкненої системи.

>> K Krazomk=series(pidregK K,Wobj)

3.5.13 Визначимо передатну функцію замкнутої системи.

>> K Kzamk=feedback(K Krazomk,1)

40



Рис. 3.2 – Перехідна характеристика системи за методом Ziegler-Nichols

3.5.14 Будуємо реакцію на одиничну дію (рис. 3.3).

>> step(K Kzamk),grid



Рис. 3.3 – Перехідна характеристика системи за методом Cohen-Coon

3.5.15 Будуємо АЧХ системи, графіки представлені на рис. 3.4 та 3.5.

>> ffplot(Z_Nzamk)
>> ffplot(K Kzamk)



Рис. 3.4 – АЧХ системи з налаштуваннями ПИД-регулятора за методом Ziegler-Nichols



Рис. 3.5 – АЧХ системи з налаштуваннями ПІД-регулятора за методом Cohen-Coon

3.5.16 По графіках АЧХ розраховуємо показник коливальності *М* системи як відношення максимального значення АЧХ до її значення при нульовій частоті ω і заносимо у результуючу табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків

Параметр	Метод Ziegler-Nichols	Метод Cohen-Coon		
Коефіцієнт передачі Кр	0,774	0,48		
Час ізодрому T_i , хв.	1,16	2		
Час передування T_d , хв.	0,65	0,33		
Час регулювання t_p , хв.	7,8	4,35		
Перерегулювання σ, %	17,5	27		
Коливальність М	1,091	1,245		

3.6 Пошук налаштувань регуляторів конструктором PID Tuner

3.6.1 Програмний пакет Control System Toolbox системи MATLAB надає широкі можливості автоматизації пошуку налаштувань регуляторів. Зокрема в пакет Control System Toolbox входить конструктор PID Tuner.

3.6.2 PID Tuner призначений для проектування в інтерактивному режимі PID регулятора в колі замкнутої одновимірної (SISO) системи регулювання з головним одиничним негативним зворотним зв'язком (рис. 3.6)



PID – регулятор; Plant– об'єкт управління
Рис. 3.6 – Схема, що використовується програмою PID Tuner

3.6.3 PID Tuner запускається командою *pidtool*, яка вводиться у командному вікні MATLAB і спричиняє появу діалогового вікна, показаного на рис. 3.7.

Діалогове вікно дозволяє обирати спосіб синтезу *Design Mode* (Basic, Extended), форму опису *Form* (Parallel, Standard), тип регулятора *Type* (P, I, PI, PD, PDF, PID, PIDF), тип графіка *Plot* (Step, Bode) і вид аналізованої реакції в меню Response:

- *Reference tracking* – вплив завдання на керовану величину замкнутої системи (від r до y);

- *Controller effort* – вплив завдання на керуючу дію замкнутої системи (від *r* до *u*);

- Input disturbance Rejection – вплив збурення на вході об'єкту на керовану величину замкнутої системи (від f_1 до y)

- Output disturbance Rejection — вплив збурення на виході об'єкту (наприклад, шумів виміру) на керовану величину замкнутої системи (від f_2 до y);

- *Open-loop* – характеристики розімкненої системи (потрібні при частотних методах дослідження стійкості, наприклад, за ЛЧХ);

- *Plant* – характеристики тільки об'єкта управління.

3.6.4 У рядку меню діалогового вікна є кнопка ¹² імпорту об'єкту регулювання *Plant Model* або зразкового регулятора *Baseline Controller* з робочого простору Workspace системи MATLAB, кнопка ¹² експорту отриманого регулятора в робочий простір Workspace. PID Tuner створює за умовчанням перехідну характеристику замкнутої системи з регулятором,

параметри якого вибрані збалансовано між вимогами найменшого часу регулювання і задовільної робасності (прийнятних запасів стійкості).



Рис. 3.7 – Діалогове вікно PID Tuner

3.6.5 Усі стандартні показники якості (стале значення, час наростання, час регулювання, перерегулювання, час максимуму) можна викликати клацанням правої кнопки миші на графіці. Якщо значення показників не задовольняють технічним вимогам, що пред'являються, до системи, їх можна відкоригувати за допомогою повзунка *Response time*: у бік *Slower* (повільніше) або *Faster* (швидше), безпосередньо спостерігаючи зміни в табличках біля відповідних маркерів.

3.6.6 Кнопка Show parameters викликає додаткове поле з панелями, у яких виводяться параметри налаштування регулятора (Controller parameters) і характеристики перехідного процесу (Performance and robustness):

а) час регулювання t_p (Setting time);

б) перерегулювання σ (*Overshoot*);

в) пікове значення y_{max} (*Peak*);

г) запас стійкості по модулю ΔA (*Gain margin*);

д) запас стійкості по фазі $\Delta \varphi$ (*Phase margin*).

3.6.7 Для проектування регулятора з командного рядка використовується функція:

pidtune (plant, 'type') – для SISO-об'єкта *plant* проектується регулятор паралельної форми вказаного типу *type* (p, i, pi, pd, pid, pidf), параметри якого вибрані збалансовано між вимогами найменшого часу регулювання і задовільної робасності (запасів стійкості);

3.6.8 Як приклад розглянемо задачу визначення налаштувань ПІДрегулятора для об'єкта, параметри якого отримані в п. 3.1.6. Представимо ПФ об'єкта у вигляді послідовного з'єднання двох ПФ:

$$W_1(s) = \frac{K_{o\delta}}{T_1 s + 1} \text{ ra } W_2(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_2 s + 1}.$$
 (3.25)

Створимо скріпт:

W1=tf([2.0382, [2.4265 1]) W2=tf(1, [4.8308 1],'ioDelay', 2.0181) % Послідовне з'єднання W1 та W2: W=series(W1, W2) % Виклик програми PID Tuner: pidtool(W,'pid')

3.7 Оптимізація налаштувань ПІД-регулятора за інтегральним критерієм якості регулювання

3.7.1 Інтегральні оцінки якості регулювання характеризують відхилення реального перехідного процесу в системі від перехідного процесу, що ідеалізується. Як процес, що ідеалізується, зазвичай приймається ступінчастий (стрибкоподібний) перехідний процес або експоненціальний процес із заданими параметрами експоненти.

До теперішнього часу залишається не з'ясованим, який з інтегральних критеріїв, лінійний або квадратичний, краще вибрати для оптимізації налаштувань регуляторів. Для об'єднання переваг лінійного і квадратичного представлення визначення оптимальних налаштувань регулятора здійснюється на основі критерію оптимальності у вигляді суми лінійного і квадратичного інтегральних показників якості регулювання.

3.7.2 Для знаходження оптимальних налаштувань регулятора спочатку необхідно провести серію попередніх розрахунків для різних значень відношення постійних часу диференціювання і інтеграції α=Td/Ti. Після цього, маючи декілька варіантів налаштувань регулятора, побудувати для них перехідні процеси в замкнутій системі і за запропонованим критерієм відібрати оптимальні налаштування.

3.7.3 Для спрощення пошукових процедур на початку програми доцільно встановити початкові дані і привести готові списки частот окремо для кожної вирішуваної задачі. Для цього використовуються наступні оператори Python.

import numpy as np # модуль для роботи зі списками from scipy.integrate import quad # модуль для чисельної iнтеграції import matplotlib.pyplot as plt # модуль для побудови rpaфikiв T1=14; T2=18; T3=28; K=0.9; tau=6.4# Постійні часу, коефіцієнт посилення, запізнювання m=0.366; m1=0.221# Запас стійкості n= np.arange(0.001,0.15,0.0002)# Список частот для площини Kr-Ki n1=np.arange(0.0001,0.12,0.0001) # Список частот для rpaфiky Ki=f(w) n2=np.arange(0.0002,0.4,0.0001) # Масив частот для побудови АЧХ

3.7.4 Вводимо передатну функцію об'єкту управління з урахуванням кореневого показника коливальної m і передатну функцію ПІД-регулятора з урахуванням коефіцієнта передачі Kr, часу ізодрому Ti та часу передування Td, інші функції допоміжні :

```
def ImW(m,w):#Уявна частина передатної функції
           j = (-1) * * 0.5
           return WO(m,w).imag
def A0(m,w):#Допоміжна функція
          return -
(ImW(m,w)*m/(w+w*m**2)+ReW(m,w)/(w+w*m**2))
def Ti(alfa,m,w):#Коефіцієнт регулятора
         return (-ImW(m,w) - (ImW(m,w) **2 -
4*((ReW(m,w)*alfa*w-
ImW(m,w)*alfa*w*m)*A0(m,w)))**0.5)/(2*(ReW(m,w)*alfa*w-
ImW(m,w)*alfa*w*m))
def Ki(alfa,m,w):#Коефіцієнт регулятора
          return
1/(w*Ti(alfa,m,w)**2*alfa*(m*ReW(m,w)+ImW(m,w))-
Ti(alfa, m, w) * ReW(m, w) + (m * ReW(m, w) - ImW(m, w)) / (w + w * m * * 2))
def Kr(alfa,m,w):#Коефіцієнт регулятора
         if Ki(alfa,m,w)*Ti(alfa,m,w)<0:</pre>
                   z=0
         else:
                    z=Ki(alfa,m,w)*Ti(alfa,m,w)
         return z
def Kd(alfa,m,w):#Коефіцієнт регулятора
         return alfa*Kr(alfa,m,w)*Ti(alfa,m,w)
    3.7.5 Побудуємо три плошини налаштування ПІЛ-регулятора для
відношень alfa=Td/Ti=0.2; alfa=Td/Ti=0.7; alfa=Td/Ti=1.2.
alfa=0.2
Ki 1=[Ki(alfa,m1,w) for w in n]
Kr l=[Kr(alfa,ml,w) for w in n]
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr 2 = [Kr(alfa, m, w) for w in n]
Ki 3 = [Ki(alfa, 0, w) \text{ for } w \text{ in } n]
Kr^{3}=[Kr(alfa,0,w) \text{ for } w \text{ in } n]
plt.figure()
plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД
```

plt.xlabel("Коефіцієнти - Кі") plt.vlabel("Коефіцієнти - Kr") plt.legend(loc='best') plt.grid(True) alfa=0.7 Ki 1 = [Ki(alfa, 0.221, w) for w in n]Kr = [Kr(alfa, 0.221, w) for w in n]Ki = [Ki(alfa, 0.366, w) for w in n]Kr 2 = [Kr(alfa, 0.366, w) for w in n]Ki 3 = [Ki(alfa, 0, w) for w in n]Kr 3=[Kr(alfa,0,w) for w in n] plt.figure() plt.axis([0.0, round(max(Kr 3),3), 0.0, round(max(Ki 3),3)]) plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД perуляторa\n для alfa=%s"%alfa) plt.plot(Kr 1, Ki 1, label='Лінія запасу стійкості m=%s'%m1) plt.plot(Kr 2, Ki 2, label='Лінія запасу стійкості m=%s'%m) plt.plot(Kr 3, Ki 3, label='Лінія запасу стійкості m=0') plt.xlabel("Коефіцієнти - Кі") plt.ylabel("Коефіцієнти - Kr") plt.legend(loc='best') plt.grid(True) alfa=1.2Ki 1 = [Ki(alfa, 0.221, w) for w in n]Kr = [Kr(alfa, 0.221, w) for w in n]Ki = [Ki(alfa, 0.366, w) for w in n]Kr 2 = [Kr(alfa, 0.366, w) for w in n]Ki 3 = [Ki(alfa, 0, w) for w in n]Kr 3 = [Kr(alfa, 0, w) for w in n]plt.figure() plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД perулятора\n для alfa=%s"%alfa) plt.axis([0.0, round(max(Kr 3),3), 0.0, round(max(Ki 3),3)]) plt.plot(Kr 1, Ki 1, label='Лінія запасу стійкості m=%s'%m1) plt.plot(Kr 2, Ki 2, label='Лінія запасу стійкості m=%s'%m) plt.plot(Kr 3, Ki 3, label='Лінія запасу стійкості m=0') plt.xlabel("Коефіцієнти - Кі")

perулятора \n для alfa=%s"%alfa)

round(max(Ki 3), 4)])

m=%s'%m1)

m=%s'%m)

m=0')

plt.axis([0.0, round(max(Kr 3),4), 0.0,

plt.plot(Kr 1, Ki 1, label='Лінія запасу стійкості

plt.plot(Kr 2, Ki 2, label='Лінія запасу стійкості

plt.plot(Kr 3, Ki 3, label='Лінія запасу стійкості

```
plt.ylabel("Коефіцієнти - Кr")
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
plt.figure()
plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД
регулятора\n для запасу стійкості m=%s"%m)
alfa=0.2
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2,label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=0.4
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=0.7
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr 2=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2,label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=1.2
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
plt.axis([0.0, round(max(Kr 2),3), 0.0,
round(max(Ki 2),3)])
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
```

3.7.6 Для запасу стійкості m=0.386 при трьох значеннях alfa -0.2; 0.4; 0.7 побудуємо D-разбиття для визначення критичних значень alfa.

```
plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД
perулятора\n для запасу стійкості m=%s"%m)
alfa=0.2
Ki_2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr_2=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr_2, Ki_2,label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=0.4
Ki_2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr_2=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
```

plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti =%s'%alfa) alfa=0.7Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n] $Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) for w in n]$ plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti =%s'%alfa) alfa=1.2 Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n] $Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) for w in n]$ plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti =%s'%alfa) plt.axis([0.0, round(max(Kr 2),3), 0.0, round(max(Ki 2),3)]) plt.legend(loc='best') plt.grid(True)

3.7.7 Будуємо графік залежності коєффициента Кі від частоти w для двох виявлених з попереднього графіку значень alfa: 0.2 і 0.7. Налаштування Кі визначаються по резонансних частотах.

```
plt.title("Площина настроювальних параметрів ПІД
регулятора\n для запасу стійкості m=%s"%m)
alfa=0.2
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr 2=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=0.4
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr 2 = [Kr(alfa, m, w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=0.7
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr^{2}=[Kr(alfa,m,w) \text{ for } w \text{ in } n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
alfa=1.2
Ki 2=[Ki(alfa,m,w) for w in n]
Kr 2=[Kr(alfa,m,w) for w in n]
plt.plot(Kr 2, Ki 2, label=' Лінія для allfa=Td/Ti
=%s'%alfa)
plt.axis([0.0, round(max(Kr 2),3), 0.0,
round(max(Ki 2),3)])
```

```
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
```

3.7.8 Визначаємо три варіанти налаштувань ПІД-регулятора.

```
maxKi=max( [Ki(0.7,m,w) for w in n1])
wa=round([w for w in n1 if Ki(0.7, m, w) == maxKi][0], 3)
Kil=round(Ki(0.7,m,wa),3)
Kr1=round(Kr(0.7,m,wa),3)
Til=round(Kr1/Ki1,3)
Td1=round(0.7*Ti1,3)
d=[]
d[0]= "Налаштування №1 ПІД-регулятора (wa
=%s,m=0.366,alfa=0.7): Kr=%s; Ti=%s; Ki=%s; Td=%s
"%(wa,Kr1,Ti1,Ki1,Td1)
print(d[0])
maxKi=max( [Ki(0.2,m,w) for w in n1])
wa=round([w for w in n1 if Ki(0.2, m, w) == maxKi][0], 3)
Ki2=round(Ki(0.2,m,wa),3)
Kr2=round(Kr(0.2,m,wa),3)
Ti2=round(Kr2/Ki2,3)
Td2=round(0.2*Ti2,3)
d[1]= "Налаштування №2 ПІД-регулятора (wa
=%s,m=0.366,alfa=0.2): Kr=%s; Ti=%s; Ki=%s; Td=%s
"%(wa,Kr2,Ti2,Ki2,Td2)
print(d[1])
wa=fsolve(lambda w:Ki(0.7,m,w)-0.14,0.07)[0]
wa=round(wa,3)
Ki3=round(Ki(0.7,m,wa),3)
Kr3=round(Kr(0.7,m,wa),3)
Ti3=round(Kr3/Ki3,3)
Td3=round(0.7*Ti3,3)
d[2]= ("Налаштування №3 ПІД-регулятори (wa
=%s,m=0.366,alfa=0.7): Kr=%s; Ti=%s; Ki=%s; Td=%s
"%(wa,Kr3,Ti3,Ki3,Td3)
print(d[2])
def Wsys(w,Kr,Ti,Td):
         j = (-1) * * 0.5
         return
(WO(0,w) *WR(w,Kr,Ti,Td) / (1+WO(0,w) *WR(w,Kr,Ti,Td)))
Wsys 1=[abs(Wsys(w,Kr1,Ti1,Td1)) for w in n2]
Wsys 2=[abs(Wsys(w,Kr2,Ti2,Td2)) for w in n2]
Wsys 3=[abs(Wsys(w,Kr3,Ti3,Td3)) for w in n2]
plt.figure()
```

3.7.9 Визначаємо динаміку САР за значенням частотного показника коливальності:

plt.title("Амплітудно-частотні характеристики замкнутої CAP \n c ПІД-регулятором") plt.plot(n2, Wsys_1,label=' Для налаштування №1 ПІДperулятора ') plt.plot(n2, Wsys_2,label=' Для налаштування №2 ПІДperулятора ') plt.plot(n2, Wsys_3,label=' Для налаштування №3 ПІДperулятора') plt.legend(loc='best') plt.grid(True)

3.7.10 Будуємо АЧХ системи з ПІД-регулятором.

plt.title("Амплітудно-частотні характеристики замкнутої CAP \n с ПІД-регулятором") plt.plot(n2, Wsys_1,label=' Для налаштування №1 ПІД perулятора') plt.plot(n2, Wsys_2,label=' Для налаштування №2 ПІД perулятора') plt.plot(n2, Wsys_3,label=' Для налаштування №3 ПІД perулятора') plt.legend(loc='best') plt.qrid(True)

3.7.11 Визначаємо оптимальні налаштування регулятора за запропонованим інтегральним критерієм якості регулювання.

I21=round(guad(lambda t: h(t,Kr2,Ti2,Td2)**2,0, 200) [0],3) I3=round(quad(lambda t: h(t,Kr3,Ti3,Td3), 0,200)[0],3) I31=round(guad(lambda t: h(t,Kr3,Ti3,Td3)**2,0, 200) [0],3) print("Лінійний інтегральний критерій якості I1 =%s (налаштування №1)"%I1) print ("Квадратичний інтегральний критерій якості I2 =%s (налаштування №1"%I11) print("Лінійний інтегральний критерій якості I1 =%s (налаштування №2)"%I2) print("Квадратичний інтегральний критерій якості I2 =%s (налаштування №2)"%I21) print("Лінійний інтегральний критерій якості I1 =%s (налашт∨вання №З)"%ІЗ) print("Квадратичний інтегральний критерій якості ства I2 =%s (налаштування №3)"%I31) Rez=[I1+I11, I2+I21, I3+I31] In=Rez.index(min(Rez)) print("Оптимальні параметри за інтегральними критеріями: \n %s"%d[In]) plt.figure() plt.title("Оптимальні параметри за інтегральними критеріями \n з ПІД-регулятором ") plt.plot(tt,h1,'r',linewidth=1,label=' Для налаштування №1 ПІД-регулятора') plt.plot(tt,h2,'b',linewidth=1,label=' Для налаштування №2 ПІД-регулятора') plt.plot(tt,h3,'g',linewidth=1,label=' Для налаштування №3 ПІД-регулятора') plt.legend(loc='best') plt.grid(True) plt.show()

3.7.12 Результат роботи програми – текстовий вивід

Налаштування №1 ПІД-регулятора (wa=0.066,m=0.366,alfa=0.7): Kr=4.77; Ti=21.682; Ki=0.22; Td=15.177 Налаштування №2 ПІД-регулятора (wa=0.056,m=0.366,alfa=0.2): Kr=2.747; Ti=50.87; Ki=0.054; Td=10.174 Налаштування №3 ПІД-регулятора (wa=0.085,m=0.366,alfa=0.7): Kr=3.747; Ti=26.387; Ki=0.142; Td=18.471

Лінійний інтегральний критерій якості I1 =194.65 (настройки №1) Квадратичний інтегральний критерій якості I2 =222.428 (настройки №1 Лінійний інтегральний критерій якості I1 =179.647 (настройки №2) Квадратичний інтегральний критерій якості I2 =183.35 (настройки №2) Лінійний інтегральний критерій якості I1 =191.911 (настройки №3) Квадратичний інтегральний критерій якості I2 =204.766 (настройки №3) Оптимальні параметри за інтегральними критеріями: Налаштування №2 ПІД-регулятора (wa=0.056,m=0.366,alfa=0.2): Kr=2.747; Ti=50.87; Ki=0.054; Td=10.174











3.8.1 Задача вибору оптимального періоду дискретизації T_0 стосується однієї з основних проблем оптимальної витрати машинного часу програмованого контролера. При зменшенні T_0 підвищується точність регулювання, але машинний час витрачається нераціонально. Необхідним є компромісне рішення.

Виникає задача знаходження залежності точності управління від вибору періодів дискретизації керуючої дії *и* та керованої змінної *у*.

3.8.2 Вибір T_0 здійснюється на основі теореми Котельникова, згідно якої функція y(t) зі спектром, обмеженим частотою ω_3 , повністю визначається своїми значеннями в моменти часу nT_0 , проміжки між якими

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega_3} , \qquad (3.26)$$

тобто частота дискретизації обирається з умови $\omega_0 \ge 2\omega_3$. Тому необхідно оцінити значення максимальної частоти у спектрі керованої змінної $Y(j\omega)$.

3.8.3 Приймемо, що на регулятор подається завдання у вигляді синусоїдального сигналу з амплітудою, рівною одиниці: |G(jω)|=1. Тоді для

контуру, що включає об'єкт з частотною передатною функцією $W_o(j\omega)$ і регулятор $W_o(j\omega)$ можна записати:

$$\frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} = \varepsilon , \qquad (3.27)$$

де є = 0,01...0,05 – величина, що характеризує точність регулювання. Розв'язуючи рівняння (3.8) відносно частоти, знайдемо ω_3 і далі, за теоремою Котельникова, T_0 .

3.8.4 Розглянемо приклад визначення оптимального періоду дискретизації. Нехай ПФ об'єкта регулювання має вигляд

$$W_o(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$
(3.28)

де K=0,4, $T_1=22$ с, $T_2=11$ с. Визначити оптимальний період дискретизації в системі з цифровим ПІ-регулятором, що має коефіцієнт пропорційності $K_p = 2,9$ і час ізодрому $T_i = 190$ с. Необхідно забезпечити точність регулювання у сталому режимі $\varepsilon = 1\%$.

Частотна передатна функція ПІ-регулятора

$$W_p(j\omega) = K_p(1 + \frac{1}{j\omega \cdot T_i})$$
(3.29)

Згідно (3.27):

$$\left|\frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}\right| = \frac{K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega \cdot T_i}\right) \frac{K}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)}}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{j\omega \cdot T_i}\right) \frac{K}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)}} = 0.01. (3.30)$$

Аналітичне розв'язання такого рівняння є складною задачею.

3.8.5 Використаємо систему МАТLAB. Створимо скріпт:

global K KP Ti Td Epsylon T1 T2 K=0.4; % коефіцієнт передачі об'єкта T1=22; % перша стала часу об'єкта T2=11; % друга стала часу об'єкта KP = 2.9; % коефіцієнт передачі регулятора Ti = 190; % час ізодрому Td = 0; % час передування Epsylon=0.01; % точність регулювання w=fzero('equation',1) % частота T0=pi/w % періоду дискретизації

У цьому скрипті задаються вихідні данні і виконується розв'язання рівняння (3.8) за допомогою вбудованої функції fzero. Саме рівняння задається функцією, ім'я якої equation є першим аргументом fzero. Текст функції equation:

```
function y=equation(x)
global K KP Ti Td Epsylon T1 T2
% Чисельник рівняння:
TFU1=K*KP*(1+1/(j*x*Ti)+j*x*Td)/(j*x*T1+1)/(j*x*T2+1);
MTFU1=abs(TFU1);
% Знаменник рівняння:
TFU2=1+TFU1;
MTFU2=abs(TFU2);
% Нев'язка рівняння:
y=MTFU1-Epsylon*MTFU2;
```

Цю функцію можна використовувати для П, ПІ, ПД та ПІД-регуляторів. У нашому прикладі заданий ПІ-регулятор, тому в головному скрипті присутня команда Td = 0.

3.8.6 Запустивши на виконання головний скріпт, отримаємо результати: w=0,5469; T0=5,7443 с. Приймаємо T_0 = 5 с.

РОЗДІЛ 4. НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКА

4.1 Показники надійності

4.1.1 Методи оцінки надійності технічних засобів (ТЗ) обираються відповідно до вимог ДСТУ 3004-95.

4.1.2 Надійність ТЗ характеризується наступними показниками:

- ймовірність безвідмовної роботи, P(t);
- ймовірність відмови, Q(t);
- частота відмов, a(t);
- інтенсивність відмов, $\lambda(t)$;
- середнє напрацювання до першої відмови, *T*_{ср}.

4.1.3 Оскільки безвідмовна робота і відмова є подіями неспільними і протилежними, то між ними справедливе таке співвідношення:

$$P(t) + Q(t) = 1. (4.1)$$

4.1.4 Частота відмов (англ. Failure Rate – FR) є густиною ймовірності часу роботи ТЗ до першої відмови:

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{-dP(t)}{dt}.$$
(4.2)

4.1.5 Інтенсивність відмов (англ. Intensity Failure – IR) це ймовірність відмови в одиницю часу за умови, що до цього моменту відмови не виникало. Визначається відношенням частоти відмов a(t) до ймовірності безвідмовної роботи на даний момент часу t:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{a(t)}{1 - \int a(t)dt} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}.$$
(4.3)

Звідси

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt, \qquad (4.4)$$

або

$$P(t) = e^{-\int_{0}^{\lambda(t)dt}}.$$
(4.5)

4.1.6 Середнім напрацюванням до першої відмови (англ. Mean Time To First Failure – MTTF) називається математичне очікування (момент першого порядку) *M*[*t*] часу роботи T3 до відмови:

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{\infty} ta(t)dt, \qquad (4.6)$$

$$T_{cp} = \int_{0}^{+\infty} P(t)dt \tag{4.7}$$

Фактично $T_{\rm cp}$ визначає інтервал часу, по закінченню якого ймовірність відмови складає

$$T_{cp} = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-1} = 0,63$$

4.1.7 Середнім часом роботи між відмовами (англ. Mean Time Between Failures, MTBF) відновлюваного ТЗ показує, яке напрацювання в середньому доводиться на одну відмову:

$$\overline{T}_{cp} = \sum_{i=1}^{n} t_i / n \tag{4.8}$$

де t_i – час справної роботи ТЗ між (i–1)-ою та i-ою відмовами; *n* – число відмов.

Для розрахунку MTBF використовують наступну залежність:

$$\overline{T}_{cp} = \frac{1}{\lambda}.$$
(4.9)

4.1.8 Характеристикою ремонтопридатності пристроїв є середній час їх відновлення MTTR (Mean Time To Repair).

4.1.9 Між показниками надійності існують наступні співвідношення (рис. 4.1):



Рис 4.1 – Схематичне представлення МТТF, МТВF та МТТR

4.2 Інтегральні рівні безпеки

4.2.1 Вимоги щодо вибору обладнання засобів автоматизації, які використовуються в системах, пов'язаних із забезпеченням безпеки виробничих процесів, обумовлюються в європейських стандартах МЕК 61508 і 61511. У цих документах безпека визначається як «свобода від неприйнятних ризиків». При цьому під ризиком розуміється комбінація ймовірності виникнення збитків та тяжкості цієї шкоди. Небезпека - це

потенційне джерело шкоди. Допустимим вважається ризик, прийнятний в даних обставинах, з урахуванням існуючих у цей час соціальних цінностей.

4.2.2 Всі дії по забезпеченню безпеки повинні грунтуватися на розумінні й оцінці ризику, який неминуче присутній у будь-якій системі. Стандарт МЕК 61508 поділяє заходи щодо зниження ризику на два компоненти:

a) загальні, інтегральні вимоги безпеки (Safety integrity requirements);

б) функціональні вимоги (Functional requirements).

Відповідно, специфікація вимог безпеки повинна визначати:

a) специфікацію вимог інтегральної безпеки, яка містить загальні вимоги безпеки, які повинна забезпечувати система;

б) специфікацію вимог функціональної безпеки, що містить вимоги до функцій (контурів) безпеки, які повинна виконувати система.

4.2.3 Згідно МЕК 61508, функціональна безпека відноситься до систем, що відповідають за функції безпеки, вихід з ладу яких створює значні ризики для людей і навколишнього середовища. Щоб домогтися функціональної безпеки, система в разі аварії повинна привести обладнання в безпечний стан або забезпечити збереження такого стану. Мова йде не про загальні небезпеки експлуатації обладнання, таких, як, наприклад, від обертових деталей, а про небезпеки, що виникають внаслідок збоїв запобіжних функцій.

4.2.4 Пристрої захисту, використовувані для запобігання нанесення шкоди людям, середовищу і майну, повинні відповідати певним вимогам до надійності залежно від можливого обсягу збитку, який визначається на основі так званого класу безпеки експлуатації обладнання (Safety Integrity Level – SIL). Стандартом IEC 61508 визначено чотири рівня безпеки. Чим вище рівень SIL, тим вище ймовірність виконання системою завдання забезпечення безпеки:

SIL 1 - потрібний незначний захист устаткування та продукції;

SIL 2 - потрібний значний захист устаткування та продукції, захист від можливих травм обслуговуючого персоналу;

SIL 3 - потрібний захист обслуговуючого персоналу та суспільства (некатастрофічний вплив);

SIL 4 - потрібний захист від катастрофічного впливу на суспільство.

4.2.5 Загальна інтенсивність відмов λ_{tot} ділиться на дві основні категорії: інтенсивність безпечних відмов λ_s та інтенсивність небезпечних відмов λ_d :

$$\lambda_{tot} = \lambda_s + \lambda_d \tag{4.10}$$

Небезпечними є відмови, які призводять до втрати функціональної безпеки системи та/або до втрати її безпечного стану. Безпечними

вважаються відмови, які призводять до помилкового відключення виходу і зупинку контрольованого технологічного процесу (помилкове спрацювання).

У кожній із зазначених категорій відмови, в свою чергу, поділяються на детектовані (λ_{sd} , λ_{dd}) і недетектовані (λ_{su} , λ_{du}) онлайновою діагностикою:

$$\lambda_s = \lambda_{sd} + \lambda_{su}, \ \lambda_d = \lambda_{dd} + \lambda_{du} \tag{4.11}$$

4.2.6 Величина, зворотна λ_s - це MTBFs або середній час (в роках) між можливими помилковими зупинками. У свою чергу, величина, зворотна λ_d - це MTBFd, середній час (в роках) між можливими небезпечними відмовами.

4.2.7 Першим параметром, що визначає інтегральний рівень безпеки SIL, є середня ймовірність відмови на запит виконання функції безпеки PFDavg (Probability of Failure on Demand). Для систем без резервування формула розрахунку PFDavg має вигляд:

$$PFDavg(TI) = \lambda_{dd} \times RT + \lambda_{du} \times TI/2, \qquad (4.12)$$

де *RT* - час відновлення в годинах (зазвичай 8 годин);

TI - інтервал часу між функціональними перевірочними тестами (1–5–10 років), що позначається також як Тргооf.

У багатьох випадках, наприклад, коли ефективність періодичних тестів з виявлення небезпечних відмов дорівнює 100%, формула для розрахунку PFDavg спрощується:

$$PFDavg(TI) = \lambda_{du} \times TI/2.$$
(4.13)

4.2.8 Другим параметром, що визначає інтегральний рівень безпеки, є частка безпечних відмов SFF (Safety Failure Fraction).

$$SFF = \frac{\sum \lambda_{dd} + \sum \lambda_{sd} + \sum \lambda_{sd} + \sum \lambda_{su}}{\sum \lambda_{dd} + \sum \lambda_{du} + \sum \lambda_{sd} + \sum \lambda_{su}} = 1 - \frac{\sum \lambda_{dd}}{\sum \lambda_{dd} + \sum \lambda_{du} + \sum \lambda_{sd} + \sum \lambda_{su}}$$
(4.14)

4.2.9 Відповідно до стандарту МЕК 61508 компоненти або підсистеми відносяться до типу А або В (див. табл. 4.1 і табл. 4.2):

 а) компоненти типу А – це прості пристрої, поведінка і види відмов яких добре відомі;

б) компоненти типу В – це комплексні компоненти з потенційно невідомими видами відмов, наприклад мікропроцесори, спеціалізовані процесори і т.п. В табл. 4.1 і 4.2 представлені обмеження на використання простих і резервованих архітектур в системах з різними рівнями SIL.

Таблиця 4.1 - SFF для компонентів типу А

SFF	Стійкість до апаратних відмов 0	Стійкість до апаратних відмов 1	Стійкість до апаратних відмов 2
Менше 60%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
Від 60 до 90%	SIL 2	SIL 3	SIL4
Від 90 до 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4
Більше 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Таблиця 4.2 – SFF для компонентів типу В

SFF	Стійкість до апаратних відмов 0	Стійкість до апаратних відмов 1	Стійкість до апаратних відмов 2
Менше 60%	Не допускається	SIL 1	SIL 2
Від 60 до 90%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
Від 90 до 99%	SIL 2	SIL 3	SIL 4
Більше 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Примітка. Стійкість до апаратних відмов N означає, що (N+1)-а відмова може призвести до порушення функції безпеки пристрою.

4.2.10 У табл. 4.3 наведені необхідні характеристики системи автоматизації для різних рівнів безпеки.

Таблиця 4.3 – Необхідні характеристики системи автоматизації

Рівень SIL	Необхідна надійність	Імовірність помилки при виконанні заданої задачі (PFD)	Фактор зниження ризику (RRF)
SIL 4	Більше 99,99%	$10^{-5} \le PFD \le 10^{-4}$	100 000 10 000
SIL 3	99,90%	$10^{-4} \le PFD \le 10^{-3}$	10 000 1 000
SIL 2	Від 99,00 до 99,90%	$10^{-3} \le PFD \le 10^{-2}$	1 000 100
SIL 1	Від 90,00 до 99,00%	$10^{-2} \le PFD \le 10^{-1}$	100 10

4.2.11 Зазначений у четвертій графі табл. 4.3 фактор зниження ризику RRF (Risk Reduction Factor) являє собою відношення частоти інцидентів без прийняття заходів захисту до допустимої частоти інцидентів і є величиною, зворотною PFDavg:

RRF = <u>частота інцидентів без прийняття заходів захисту</u>

Допустима частота інцидентів

4.2.12 Для кожного потенційно небезпечного процесу проводиться оцінка ступеня небезпеки та рівня збитку, що виник унаслідок збою. Для цього може застосовуватися графік ризиків (див. рис. 4.2).



Рис. 4.2 – Графік ризиків для оцінки безпеки відповідно до МЕК 61508/61511

Тут використані наступні позначення:

а) розмір збитку:

C1 - травма малої ступені тяжкості однієї людини або малий збиток навколишньому середовищу;

С2 - важкі незворотні травми або смерть однієї людини;

С3 - смерть кількох людей;

С4 - смерть великої кількості людей.

б) запобігання небезпеки:

F1 - можливо за певних умов;

F2 - майже неможливо.

в) термін перебування людини в небезпечній зоні:

Р1 - від «рідко» до «часто».

Р2 - від «часто» до «тривало». г) імовірність виникнення:

W1 - дуже мала;

W2 - мала;

W3 - відносно висока.

Залежно від ступеня небезпеки та ймовірності її виникнення робиться висновок, чи потребує процес захисту за допомогою функції безпеки, і який рівень SIL така функція повинна забезпечувати.

4.2.13 Особливе місце серед небезпечних виробництв займають такі, в яких існує безпосередня можливість виникнення пожежі або вибуху. Для таких виробництв розроблені рекомендації МЕК 79-10, що грунтуються на тому, що будь-яке місце, де існує ймовірність наявності вибухонебезпечного середовища, має бути віднесено до однієї з наступних трьох зон:

Zone 0 – зона, в якій вибухонебезпечна суміш повітря і газу присутня постійно або протягом тривалого проміжку часу;

Zone 1 – зона, в якій існує ймовірність появи вибухонебезпечної суміші повітря і газу при нормальній роботі;

Zone 2 – зона, в якій утворення вибухонебезпечної суміші повітря і газу малоймовірне, але якщо це відбувається, то тільки на короткий проміжок часу.

Будь-які місця, які не підпадають під жодне з наведених визначень, вважаються безпечною зоною.

4.2.14 Для кожної горючої речовини існує мінімальна енергія підпалювання (МЕП), яка відповідає ідеальній пропорції палива і повітря, в якій суміш найлегше запалюється. Нижче МЕП підпалювання неможливо при будь-якій концентрації.

Для концентрації нижче, ніж величина, відповідна МЕП, кількість енергії, що вимагається для запалення суміші, збільшується до тих пір, поки значення концентрації не стане менше значення, при якому суміш не може спалахнути через малу кількість палива. Ця величина називається нижньою межею вибуху (HMB). Аналогічним чином при збільшенні концентрації кількість необхідної для займання енергії зростає, поки концентрація не перевищить значення, при якому займання не може статися через недостатню кількість окислювача. Це значення називається верхньою межею вибуху (BMB).

4.2.15 Зазвичай для Zone 0 рівень ймовірності наявності небезпечної суміші приймається рівним більш ніж 1%. Місця, що класифікуються як Zone 1, мають рівень ймовірності наявності небезпечної суміші між 0,01% і 1% (максимум 100 годин на рік), в той час як для місць, що класифікуються як Zone 2, небезпечна суміш присутня протягом не більше 1 години в рік.

4.3 Приклад визначення рівнів безпеки

4.3.1 Розрахуємо значення MTBF, MTBFs для помилкових спрацьовувань, PFDavg, RRF і можливий рівень SIL для функції безпеки системи, представленої на рис. 4.3. Ця система складається з датчикаперетворювача Тх, бар'єру іскробезпеки, програмованого логічного контролера (ПЛК) та електромагнітного клапана, який є кінцевим виконавчим елементом.





4.3.2 Як вихідні дані при розрахунку використані значення параметрів компонентів системи (МТВF, λ_{du} , λ_{dd} , λ_s), які можна знайти в посібниках з безпеки, що надаються їх виробниками.

Вихідні та розрахункові дані зведені в табл. 4.4. З таблиці видно, що основним критерієм визначення рівня SIL є PFDavg або фактор зниження ризику RRF.

Підсистеми	MTBF (p.)	λ/рік	MTBFs (p.)	λ _s /рік	λ _{dd} /piκ	λ _{du} /piκ	PFDavg= $\lambda_{dd}/2$	RRF = 1/PFDavg	SFF	SIL
Датчик Тх	102	0,00980	125	0,00800	0,0010	0,00080	0,000400	2500	91,8%	2
Бар'єр 010145	314	0,00318	629	0,00159	0,0014	0,00019	0,000095	10 526	94,0%	3
ПЛК	685	0,00146	741	0,00135	0,0001	0,00001	0,000005	200 000	99,3%	3
Клапан	12	0,08333	24	0,04150	0,0200	0,02183	0,010915	92	73,8%	1
Джерело живлення	167	0,00600	189	0,00530	0,0000	0,00070	0,000350	2 857	88,3%	3
Загальна	10	0,10377	17	0,05774	0,0225	0,02353	0,011765	85	_	1

Таблиця 4.4 – Вихідні та розрахункові дані

4.3.3 У випадках, коли значення PFDavg кінцевого елемента таке високе, як у розглянутому прикладі, інші компоненти системи повинні мати рівні безпеки не нижче SIL 3. Таким чином, компоненти з рівнем SIL 3 використовуються не тільки тоді, коли необхідно забезпечити рівень SIL 3 для всієї системи, але і в тих випадках, коли для системи потрібен рівень SIL 1, а один з її компонентів, маючи високу інтенсивність відмов, вносить великий внесок у загальну PFDavg.

4.3.4 Датчик, який має високий RRF (2500), тим не менш, придатний тільки для використання в системах з рівнем не вище SIL 2 (компонент типу В із стійкістю до апаратних відмов 0 – табл. 4.2), оскільки його SFF не відповідає застосуванню з рівнем SIL 3.

4.4 Розрахунок надійності АСК ТП

4.4.1 Архітектури систем

4.4.1.1 Архітектури систем, пов'язаних із забезпеченням безпеки, і використовувані в них компоненти вельми різноманітні. У багатьох випадках для підвищення надійності та відмовостійкості використовують системні архітектури з резервуванням, приклади яких показані на рис. 4.4.



Рис. 4.4 – Приклади архітектури систем

4.4.1.2 Архітектура 1001 (один з одного). Для системи без резервування з архітектурою 1001 безпечною відмовою є розмикання релейного контакту і відключення системи, що викликає помилкову зупинку. Прийнята безпечна інтенсивність відмов в даному випадку дорівнює 0,04 / рік; це означає, що в заданий період часу (1 рік) існує ймовірність

помилкового відключення системи, рівна 4%. Іншими словами, середній час між помилковими зупинками (MTBFS) для даної системи дорівнює 25 рокам.

Прикладом небезпечної відмови може бути випадок, коли контакти реле приварюються і не можуть розімкнутися в потрібний момент. Прийнята інтенсивність такої відмови дорівнює 0,02 / рік; це означає, що ймовірність відмови системи на виконання запиту в заданий період часу (1 рік) дорівнює 2% або середній час між відмовами MTBFD (для небезпечних відмов) 50 (1/0,02) років.

4.4.1.3 Архітектура 1002 *(один з двох)*. Система з дубльованою архітектурою 1002 має вихідні контакти, з'єднані послідовно і замкнуті при включеному живленні. Системі достатньо одного каналу, щоб забезпечити аварійне відключення. Якщо будь-який з каналів може зупинити систему, а каналів в системі в два рази більше, ніж в системі 1001, то і помилкових відключень може бути в два рази більше. Тому й інтенсивність таких подій збільшується з 0,04 до 0,08 / рік. Це означає, що 8 систем з 100 дадуть помилкове виключення протягом року або що MTBFS становить 12,5 років.

Небезпечна відмова для такої системи настає, коли в обох каналах одночасно сталися небезпечні відмови, оскільки, якщо тільки один вихідний контакт «залипнув», другий ще може відключити систему. Інтенсивність одночасних відмов становить $0,02 \times 0,02 = 0,0004 /$ рік. Це означає, що МТВFD дорівнює 2500 рокам.

Системи з архітектурою 1002 відрізняються високою безпекою (ймовірність небезпечної відмови системи вкрай мала), проте вони мають в два рази більшу ймовірність помилкових спрацьовувань, що небажано з точки зору втрат продукції, пов'язаних з простоєм.

4.4.1.4 *Архітектура* 2002 (*два з двох*). Система з дубльованою архітектурою 2002 має вихідні контакти, з'єднані паралельно. В даному випадку обидва канали мають бути знеструмлені, щоб зупинити процес.

Відмова в роботі такої системи настає, якщо відбувається небезпечна відмова в одному з каналів. Оскільки система має в два рази більше компонентів (каналів), ніж система 1001, кількість небезпечних відмов у ній може бути в два рази більшою. Тому прийнята інтенсивність небезпечних відмов тут збільшується в два рази до 0,04 / рік, а MTBFD = 25 рокам.

Помилкове спрацьовування в даній системі відбувається, коли в обох каналах одночасно трапляється безпечна відмова. Інтенсивність таких одночасних відмов складає $0,04 \ge 0,0016$ / рік. МТВР5 = 1 / 0,0016 = 625 років.

Таким чином, система з архітектурою 2002 захищає від помилкових спрацьовувань (ймовірність безпечної відмови дуже мала), проте за частиною небезпечних відмов вона менш безпечна, ніж навіть нерезервованої система з архітектурою 1001.

4.4.1.5 Архітектура 2003 (два з трьох). Рішення в ній приймається на основі результатів голосування два з трьох. Система 2003 має більш високу інтенсивність помилкових спрацьовувань, ніж система 2002, і більшу ймовірність відмов, ніж система 1002. Однак архітектури 1002 і 2002 незадовільні з точки зору небезпечних відмов і помилкових спрацьовувань, в той час як системи з архітектурою 2003 мають гарні показники по відмовах обох видів (безпечних і небезпечних).

Завдяки вдосконаленню апаратної частини і програмного забезпечення відмови в комп'ютерній системі з подвійним резервуванням тепер можуть діагностуватися досить добре, що дозволяє визначити, який з двох каналів справний у випадку, якщо між ними виникає суперечність. У промисловості цю нову подвійну архітектуру систем називають 1002D.

4.4.1.6 У табл. 4.5 наведені рекомендовані системні архітектури для різних рівнів безпеки.

Таблиця 4.5 – Вибір архітектури ПАЗ в залежності від інтегрального рівня безпеки

SIL	Зона	Архітектура			Примітка
		входів	контролерів	виходів	примпка
2	Zone 2	1001 або	ПЛК з двома процесорами	1001	Періодичне
		1002	або резервованими модулями		тестування
			управління		входів і
					виходів
3	Zone 1	1002	1002D або 2003	1001	Оперативне
					тестування
					входів і
					виходів
3	Zone 0	1002 або	1002D або 2003	1002	Те ж саме
		2003			

4.4.2 Проектний розрахунок надійності АСКТП

4.4.2.1 Відповідно до ГОСТ 24.701-86, оцінка надійності проводиться за наступними показниками:

а) надійність реалізації функцій системи;

б) небезпека виникнення в системі аварійних ситуацій.

Для опису безвідмовності і ремонтопридатності по безперервним функціям встановлюються наступні показники:

а) середнє напрацювання системи на відмову у виконанні *і*-тої функції (відповідні показники стандарту IEC 61508 – МТТГ або МТВГ);

б) ймовірність безвідмовного виконання системою *і*-тої функції протягом заданого часу (1 – PFD).

Допускається використовувати такі показники:

а) середнє напрацювання системи до відмови у виконанні *і*-тої функції (MTTP):

б) інтенсивність відмов системи у виконанні і-тої функції.

4.4.2.2 Для всіх функцій і задач АСКТП визначаються критерії відмов і необхідні показники надійності. Далі будуються надійнісно-функціональні схеми (НФС) задач і функцій. Елементами НФС є технічні засоби. Елементи з'єднуються послідовно, якщо відмова кожного з них веде до відмови задачі. Елементи з'єднуються паралельно, якщо невиконання задачі має місце тільки тоді, коли відмовлять усі елементи.

4.4.2.3 Для НФС, що являють собою послідовні структури, оцінка імовірності безвідмовної праці проводиться за формулами:

$$\lambda_i = \lambda_{i1} + \lambda_{i2} + \ldots + \lambda_{in}; \qquad (4.15)$$

$$P_i(t) = \prod_{j=1}^{n} P_{ij}(t), \tag{4.16}$$

де λ_{ij} та P_{ij} – інтенсивність відмов та імовірність безвідмовної праці *j*-го елемента при реалізації і-тої задачі (або функції);

n – кількість елементів, що беруть участь у реалізації задачі (функції).

4.4.2.4 Імовірність безвідмовної роботи паралельних структур за наявністю резервування розраховується за формулами: λ_i

$$=\lambda_{i1}+\lambda_{i2}+\ldots\lambda_{in}; \qquad (4.17)$$

$$P_{i}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^{n} P_{i}(t)\right]^{m}, \qquad (4.18)$$

де P_i (t) – імовірність безвідмовної роботи елементів у групі, яка складається з однотипних елементів;

т-кількість паралельних гілок.

Для однотипних відновлюваних елементів

$$\lambda_i = 2 \cdot \lambda_{ij}^m \cdot \text{MTTR.}$$
(4.19)

4.4.2.5 Часто систему керування вважають працездатною і при відмові частини технічних засобів автоматизації. Наприклад, оцінюючи надійність задачі «Введення аналогових сигналів», за критерій відмови приймають вихід за апаратні уставки більше як заданого числа сигналів *т*. В цьому випадку імовірність безвідмовної роботи можна визначити за теоремою про повторення дослідів. Нехай подія А – це вихід за уставку одного з сигналів. Для сукупності таких незалежних подій:

$$P_{m,n} = P_1 P_2 \dots P_m q_{m+1} \dots q + \dots + P_1 q_2 P_3 \dots q_{n-1} P_n + \dots +$$
$$+ q_1 q_2 \dots q_{n-m} P_{n-m+1} \dots P_m$$
(4.20)

де *P_{m,n}* – імовірність появи події *Ат* разів у *n* дослідах;

m – кількість відмов, що виникли одночасно;

n – загальна кількість дослідів (сигналів);

P_i – імовірність появи події *А* в і-ом досліді;

 $q_i = 1 - P_i$ – імовірність непояви події A.

4.4.2.6 Знаючи імовірність безвідмовної роботи $P_i(t)$, розраховують середній час безвідмовної роботи задачі:

$$T_{cp} = \frac{-t}{\ln P(t)}.$$
 (4.21)

4.4.2.7 На основі розрахованих значень характеристик надійності задач визначаються характеристики надійності функцій. Їх значення порівнюються з тими, що задані технічним завданням на розробку АСК ТП. Якщо надійність не задовольняє вимогам технічного завдання, необхідно застосувати резервування технічних засобів.

4.4.3 Приклад розрахунку надійності підсистеми протиаварійного захисту (ПАЗ)

4.4.3.1 Вибір показників надійності і методики розрахунку

Обираємо необхідні показники надійності автоматизованих функцій і задач ПАЗ. Критерії відмов та необхідні показники надійності (середнє напрацювання на відмову) для автоматизованих функцій приведені в табл. 4.6.

Виконання кожної з функцій забезпечується розв'язуванням відповідних задач. Види і критерії відмов та необхідні показники надійності задач по кожній з функцій задаються, як показано в табл. 4.7.

4.4.3.2 Розрахунок характеристик надійності технічних засобів ПАЗ Будуємо НФС технічних засобів ПАЗ з архітектурою 2003 (рис. 4.5).



Рис. 4.5 – НФС технічних засобів ПАЗ з архітектурою 2003

Таблиця 4.6 — Перелік критеріїв відмов і необхідні показники надійності

Функція	Критерії рідмор	MTBF,
Функція	критери відмов	годин
01 Збирання та обробка інформації	Відмова розв'язання	4 000
про стан об'єкта керування	будь-якої зі задач функції	4 000
02 Аналіз стану технологічного	T	4000
процесу	Геж саме	4000
03 Зберігання та резервування	Tankaawa	4000
даних	Тежсаме	4000
04 Обмін інформацією з РСУ	Те ж саме	4000
05 Оперативне відображення, облік		
ходу технологічного процесу та стану	Те ж саме	4000
обладнання		
06 Діагностика комплексу	Відмова розв'язання	4000
технічних засобів та дій персоналу	будь-якої зі задач функції	4000
07 Відпрацювання аварійних	Τ	10000
ситуацій	те ж саме	10000
08 Диспетчеризація розв'язування	To m conto	10000
задач	те ж саме	10000

Таблиця 4.7 – Перелік задач, критерії відмов та характеристики надійності для функції 01 ПАЗ

Залана	Вид	Критерій рілмори	MTBF,	
Задача	відмови	Критерии відмови	годин	
0101 Введення аналогових	Раптова,	Вихід за апаратні уставки	5000	
сигналів	незалежна	більш як 10 сигналів	5000	
0102 Введення дискретних		Відсутність реакції на		
сигналів	Те ж саме	вхідні сигнали більш як по	5000	
		10 каналах		
0103 Нормалізація і	Tawaaaya	Tanganya	5000	
фільтрація сигналів	те ж саме	Те ж саме	3000	
0104 Подавлення	Tawaaaya	Відмова розв'язання	5000	
брязкотіння контактів	те ж саме	задачі	5000	
0105 Контроль виходу	Tawaaaya	To we only o	5000	
сигналів за апаратні уставки	те ж саме	Те ж саме	3000	
0106 Контроль сигналів на	Tawaaaya	To we only o	5000	
припустимий тренд	те ж саме	те ж саме	3000	

Позначення позицій на НФС:

LS – контролер 2003 (плюс модулі вводу-виводу);

SF – автомат живлення, 5 дубльованих пар;

PS – блок живлення бар'єрів іскробезпеки, 3 дубльовані пари;

ВР – панель для установки бар'єрів, 3 шт.;

HiD – бар'єр іскробезпеки аналогових входів, 16 шт.;

RL – реле, 250 шт.

Інтенсивність відмов системи ПАЗ і підключених до неї пристроїв в цілому може бути знайдена за виразом:

 $\lambda_{ESD} = \lambda_{LS} + 5(2 \cdot \lambda_{SF}^2 MTTR) + 3(2 \cdot \lambda_{PS}^2 MTTR) + 3\lambda_{BP} + 16\lambda_{HID} + 250\lambda_{RL} \quad (4.22)$

де λ_{ESD} – інтенсивність відмов системи ПАЗ;

λ_{LS} – інтенсивність відмов контролера;

 λ_{SF} – інтенсивність відмов мережевого автомата живлення;

 $\lambda_{PS}-$ інтенсивність відмов блоку живлення бар'єрів;

 λ_{BP} – інтенсивність відмов панелі для установки бар'єрів;

λ_{ніD} – інтенсивність відмов бар'єрів аналогових;

 λ_{RL} – інтенсивність відмов реле.

На часовому відрізку без відмов і відновлення значення надійності P(t) і готовності A(t) збігаються. Готовність контролера ПАЗ і підключених пристроїв в цілому може бути знайдена з наступного співвідношення.

$$A_{ESD} = A_{LS} (1 - (1 - A_{SF})^2)^5 \cdot (1 - (1 - A_{PS})^2)^3 (A_{BP})^3 (A_{HID})^{16} (A_{RL})^{250},$$
(4.23)

де $A_{\rm ESD}$ – готовність системи ПАЗ;

 $A_{\rm LS}$ – готовність контролера;

 $A_{\rm SF}$ – готовність автомата живлення;

 $A_{\rm PS}$ – готовність блоку живлення бар'єрів;

*А*_{ВР} – готовність панелі для установки бар'єрів;

 $A_{\rm HiD}$ – готовність бар'єрів аналогових входів;

 $A_{\rm RL}$ – готовність реле.

Результати розрахунку зведені в таблицю 4.8.

T 7 10	D		•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	•		TIND
$120 \pi \mu \mu \sigma / 1 X =$	POWELTSTU DA	ODDAVUUVU	UQ TIMUOCTI	TOVU1UUUV	22C001P	$\Pi \Delta \prec$
1 ao m d n - 1 - 1 - 1	I COVIDIATE D	υσραλγπκγ	падилост	телнини	Sacourb	IIAJ
,	2 1		, ,			

Параметр	Значення	
Інтенсивність відмов системи ПАЗ	λ_{ESD}	1,66.10-4
МТВF для системи ПАЗ (в годинах)	MTBF	6000
Готовність обладнання ПАЗ	A _{ESD}	0,998666

4.4.2.3 Розрахунок надійності функції ПАЗ

Критерієм відмов для функції 01 «Збирання та обробка інформації про стан об'єкта керування» (див. табл. 4.8) вважається розв'язання будь-якої із задач функції. Критерієм відмов задачі 0101 «Введення аналогових сигналів» є вихід за апаратні уставки більш як 10 сигналів. Вихід за апаратні уставки можливий при відмові відповідного датчика. Оскільки критерієм відмови для задачі є вихід за апаратні уставки більше як 10 сигналів, то визначити імовірність безвідмовної роботи з заданою кількістю появ подій (відмов) A можна за теоремою про повторення дослідів. Ймовірність $P_{m,n}$ того, що подія A в n дослідах, в кожному з яких ймовірність її появи p (а ймовірність непояви q=1-p), з'явиться рівно m раз

 P_m

$$C_n^m = C_n^m p^m q^{n-m};$$
 (4.24)

де

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \, .$$

Імовірність того, що подія *А* відбудеться не менше, ніж *k* раз, визначиться за формулою:

$$P(m \ge k) = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} C_n^m p^m q^{n-m} .$$
(4.25)

Для розрахунку надійності задачі 0101 задаємося кількістю вхідних аналогових сигналів n = 42. Згідно критерію відмов k = 10. Розрахунок імовірності безвідмовного введення аналогових сигналів

$$P_{a\mu} = \sum_{m=0}^{k} C_{n}^{m} p^{m} q^{n-m} \cdot$$
(4.26)

зручно виконувати у програмі Microsoft Excel. Будується таблиця у формі, показаній на рис. 4.6.

	В	С	D	Е	F	G
2	n	42	т	C_n^m	$C_n^m p^m q^{n-m}$	P_{0101}
3	р	0,09	0	1	0,019	0,019043
4	q	0,91	1	42	0,079	0,098145
5			2	861	0,16	0,258523
6			3	11480	0,211	0,47001
7			4	111930	0,204	0,673944
8			5	850668	0,153	0,827231
9			6	5245786	0,093	0,920719
10			7	26978328	0,048	0,96827
11			8	118030185	0,021	0,988845
12			9	445891810	0,008	0,996532
13			10	1471442973	0,003	0,999041

Рис. 4.6 – Вигляд таблиці Microsoft Excel

У комірку C3 вводиться ймовірність відмови датчика аналогового сигналу, у комірку E3 формула

=ФАКТР(C2)/(ФАКТР(D3)*ФАКТР(C2-D3)). У комірку F3 вводиться формула =E3*C3^D3*(1-C3)^(C2-D3). Зміст ЕЗ і F3 розповсюджується вниз до кінця таблиці.

У комірку G3 переноситься вміст F3. У комірку G4 – формула =G3+F4, яка розповсюджується вниз до кінця таблиці. У комірці G13 одержуємо результат розрахунку P_{an} =0,999.

Тепер можна розрахувати ймовірність безвідмовного виконання задачі 0101:

$$P_{0101} = P_{aH} \cdot A_{ESD} = 0,999 \cdot 0,998666 = 0,997667.$$

Середній час безвідмовного виконання задачі:

$$T_{cp} = \frac{-1000}{\ln P(1000)} = -\frac{-1000}{\ln 0,997667} = 428193$$
годин.

Аналогічно виконується розрахунок надійності інших задач ПАЗ. НФС функцій можна розглядати як послідовне з'єднання задач, що входять в функцію.

Імовірність *P*_{ПАЗ} безвідмовної роботи ПАЗ визначається як добуток ймовірностей безвідмовної роботи всіх функцій.

Середній час безвідмовної роботи ПАЗ :

$$T_{cp} = -\frac{-1000}{\ln P_{\Pi A3}}.$$
 (4.27)

Ці значення порівнюються з тим, що задано технічним завданням на розробку ПАЗ. Низькі показники надійності вимагають застосування додаткового резервування технічних засобів.

4.5 Розрахунок ефекту оперативної діагностики технічних засобів

4.5.1 Покажемо, як тестування шляхом часткової зміни положення клапана здатне реально підвищити рівень безпеки системи за рахунок зменшення імовірності небезпечної відмови, і без установки додаткової арматури. Нехай інтервал функціонального тестування (міжтестовий інтервал) дорівнює 1 року. Тоді ймовірність відмови клапана впродовж року визначиться як

$$PFD = \lambda_D \cdot \frac{TI}{2} = \lambda_D \cdot \frac{1}{2} = 0,5\lambda_D.$$
(4.28)

4.5.2 Якщо допустити можливість частішого, але часткового тестування клапана протягом міжтестового пробігу *TI*, то ймовірність відмови складатиметься з двох компонентів:

$$PFD = \lambda_{DP} \cdot \frac{T_p}{2} + \lambda_{DF} \cdot \frac{T_F}{2}, \qquad (4.29)$$

де λ_{DP} — інтенсивність відмов протягом інтервалу часткового тестування T_p ;

 λ_{DF} — інтенсивність відмов протягом інтервалу повного функціонального тестування $T_p = TI$.

4.5.3 Позначимо долю діагностичного охоплення в час часткового тестування клапана як *а*. Тоді інтенсивності відмов на інтервалах часткового і повного тестування виразяться таким чином:

$$\lambda_{DP} = \alpha \cdot \lambda_D \tag{4.30}$$

$$\lambda_{DF} = (1 - \alpha) \cdot \lambda_D \tag{4.31}$$

і остаточно

$$PFD = \alpha \cdot \lambda_D \cdot \frac{T_p}{2} + (1 - \alpha) \cdot \lambda_D \cdot \frac{T_F}{2}$$
(4.32)

Оцінки α можуть бути різними, але зазвичай вважається, що міра упевненості в працездатності або непрацездатності клапана після часткового тестування досить висока, адже одне впевнене визначення працездатності клапана складає половину успіху. Виходячи з припущення, що головне завдання відсічного клапана - не застрягти і не заклинити і точно виконати команду, адже саме ці несправності визначаються при тестуванні в першу чергу, рекомендується прийняти $\alpha = 0.8$.

4.5.4 Припустимо, що часткове тестування клапана проводиться щоквартально, тобто 4 рази в рік. Тоді ймовірність відмови визначиться як

$$PFD = 0, 8 \cdot \lambda_D \cdot \frac{1/4}{2} + 0, 2 \cdot \lambda_D \cdot \frac{1}{2} = 0, 1 \cdot \lambda_D + 0, 1 \cdot \lambda_D = 0, 2 \cdot \lambda_D$$

Вище ми набули значення ймовірності відмови протягом 1 року без проміжного щоквартального тестування: РРО = 0.5 λ_0 .

Таким чином, проміжне тестування дійсно дозволяє істотно понизити ймовірність відмови, і, головне, істотно підвищити впевненість технологічного персоналу в дієздатності системи безпеки.

4.5.5 Знайдемо еквівалентний час повного функціонального тестування, який був би потрібний для досягнення отриманих характеристик нашої системи з комбінованим тестуванням:

$$0, 2 \cdot \lambda_D = \lambda_D \cdot \frac{TI}{2} = 0.4$$
роки.

Бачимо, що можливість оперативного тестування польового устаткування дає можливість реального підвищення рівня інтегральної безпеки SIL без установки додаткового устаткування.

4.6 Розрахунок надійності засобів вимірювання

4.6.1 Розрахунок проводиться при наступних припущеннях:

а) засіб вимірювання (ЗВ) вважається неремонтованим виробом;

б) відмова ЗВ настає після відмови будь-якого комплектуючого елемента, з яких цей засіб складається;

в) інтенсивність відмов є постійною величиною;

г) відмова є раптовою і катастрофічною.

4.6.2 Вихідні дані для розрахунку:

- кількість груп однотипних елементів, що мають однакові температуру і коефіцієнт електричного навантаження L;

- кількість однотипних елементів у *j*-тій групі *n_j*;

- загальна кількість елементів *N*;

- температура елементів *j*-тої групи T_j , °С;

- клас точності ЗВ;

- кількість механіко-кінематичних ланок r;

- час експлуатації ЗВ *t*₀, год.;

- час перебування ЗВ у ввімкненому t_1 і вимкненому t_2 станах, год.;

- нормоване значення ймовірності безвідмовної роботи $P_{\rm H}(t_0)$;

- електричні режими роботи елементів (струм, напруга, потужність тощо).

4.6.3 Визначають інтенсивність відмов елементів для кожної *j*-тої групи:

$$\lambda_{j} = \frac{\lambda_{0j}}{t_{0}} (t_{1}F_{1} + t_{2}F_{2})z_{j}, \qquad (4.33)$$

де λ_{0j} – номінальна інтенсивність відмов у нормальних умовах (Додаток Д);

 z_i – кількість елементів у групі;

 F_1, F_2 – поправочні функції, що є добутком поправочних коефіцієнтів згідно таблиці 4.9.

Поправочний коефіцієнт $a_1 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4$ (див. Додаток Е). Інші поправочні коефіцієнти враховують:

а₂ – температурний режим;

а₃ – відсутність навантаження (режим зберігання);

*а*₄ – вплив несправностей типу «коротке замикання» і обрив;

а₅ – конструкцію корпусу елемента;

 a_6 – складність (для мікросхем);

а₈ – функціональне призначення;

 a_{11} – розсіювану потужність;

*а*₁₂ – номінальний опір.

Значення коефіцієнтів *a*_i наведені у Додатку Ж.

Таблиця 4.9 – Поправочні функції для типових елементів

Тип елемента	Функція F_1	Φ ункція F_2
Мікросхеми	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6 \cdot a_8$	$a_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot a_7$
Оптрони	$a_1 \cdot a_5$	$a_1 \cdot a_4 \cdot a_5$
Діоди і транзистори	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_5$	$a_1 \cdot a_4 \cdot a_5$
Резистори	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_{11} \cdot a_{12}$	$a_1 \cdot a_4 \cdot a_{11} \cdot a_{12}$
Конденсатори	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$
Комутаційні елементи	$a_1 \cdot a_2 \cdot m$	$a_1 \cdot a_3 \cdot m$
Конектори	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot m$	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot m$
Реле	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot (m+n)$	$a_1 \cdot a_3 \cdot (m+n)$
Трансформатори	$a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot n$	$a_1 \cdot a_3 \cdot n$
П'єзоелементи	a_{I}	$a_1 \cdot a_3$
Індикатори	$a_1 \cdot a_2$	$a_1 \cdot a_3$
Електричні машини	$a_1 \cdot a_4$	$a_1 \cdot a_3$

Примітка: *т* – число контактних пар; *п* – число обмоток.

4.6.4 Визначається інтенсивність відмов ЗВ в цілому формулою:

$$\lambda = K b_{np} \sum_{j=1}^{L} n_j \lambda_j, \qquad (4.34)$$

де K – коефіцієнт, що враховує кількість механіко-кінематичних ланок (Додаток Ж);

b_{np} – коефіцієнт, що враховує тип приладу (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Значення коефіцієнта *b_{np}*

Група засобів вимірювання	Клас точності	b_n
Електроримірноральні стрідонні	0,5	1,5
принали	0,2	2
прилади	0,1	3
Аналогові електронні прилади		3
Цифрові прилади		1,5
Міри зразкові		4
Магазини R, L, C		3
Вимірювальні трансформатори		1,5
Вимірювальні перетворювачі		1

4.6.5 Розраховують час безвідмовної роботи ЗВ за формулою (4.21).

4.6.6 Визначають ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0}.$$
 (4.35)

4.6.7 Перевіряють відповідність ЗВ нормі надійності:

$$P(t_0) \ge P_{_{\mathcal{H}}}(t_0).$$
 (4.36)

Якщо умова (4.36) виконується, роблять висновок про достатню надійність ЗВ і розрахунок закінчується.

Якщо умова (4.36) не виконується, роблять висновок про необхідність резервування і розрахунок продовжується.

4.6.8 Визначають ймовірність безвідмовної роботи резервованого ЗВ:

$$P_p(t_0) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{R+1}, \qquad (4.37)$$

де R – кратність резервування.

4.6.9 Визначають густину розподілу часу відмов:

$$f_p(t) = \lambda(R+1)e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^R.$$
(4.38)

4.6.10 Розраховують інтенсивність відмов резервованого ЗВ:

$$\mathcal{A}_p(t) = \frac{f_p(t)}{P_p(t)}.$$
(4.39)

4.6.11 Повторюють дії за п.п. 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7.

4.6.12 Роблять рекомендації з підвищення надійності.

4.7 Приклад розрахунку показників надійності засобу вимірювання

4.7.1 Вихідні дані:

а) ЗВ – вимірювальний перетворювач, що є тривало включеним;

б) клас точності 0,1;

в) кількість груп однотипних елементів L=5;

г) кількість механіко-кінематичних ланок r=1;

д) час експлуатації ЗВ *t*₀=5000 год.;

е) час перебування у ввімкненому стані t_1 =1500 год.;

ж) норма надійності $P_{\rm H}(t_0) = 0.95;$

з) складові елементи ЗВ перелічені у табл. 4.11.

Час перебування у ввімкненому стані $t_2 = t_0 - t_1 = 3500$ год.

4.7.2 Розраховуємо поправочний коефіцієнт a_1 , ураховуючи умови і дані з Додатку Д:

а) хімічне виробництво, вібрації та удари не амортизовані ($b_1 = 1,4$; $b_2 = 1,2$);

б) приміщення неопалюване, пилобризкозахищене ($b_3 = 1,3$); в) якість обслуговування – управління технологією ($b_4 = 1$). $a_1 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1 = 2,184.$ Таблиця 4.11 – Характеристики елементів вимірювального перетворювача

	Під-		К.	Режим роботи			оти	Розраховане
Група	гру-	Тип	iJIb	Τ,	v	<i>U</i> ,	Ρ,	значення λ_j ,
	па		К	°C	Λ_{H}	В	Вт	1/год.
1 Mirpoovovu	1	Цифрові біполярні	4	40	0,3			$0.617.10^{-6}$
т мпкросхеми	2	Аналогові	1	20	0,3			0,01710
	1	Керамічні	6	40		800		1 201 10-6
2 конденсатори	2	Електролітичні	2	30	0,1			1,201.10
2 Dopustoru	1	Плівчасті	2	35			0,5	$0.012.10^{-6}$
з резистори	2	Змінні дротові	2	40			0,1	0,013.10
4 Перемикачі			1	40				0,0196.10-6
5 Трансформа-			1	50				$6.107.10^{-6}$
тори			1	50				0,19/10

4.7.3 Для підгрупи 1 групи 1:

а) у Додатку Γ знаходимо номінальну інтенсивність відмов у нормальних умовах $\lambda_{01} = 0, 1 \cdot 10^{-6}$ 1/год.;

б) розраховуємо поправочні функції:

 $F_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6 \cdot a_8 = 2,184 \cdot 5 \cdot 0,25 \cdot 0,28 \cdot 1,5 = 3,423;$

 $F_2 = a_1 \cdot a_3 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot a_7 = 2,184 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 0,28 \cdot 0,5 = 1,009 \cdot 10^{-3};$

в) інтенсивність відмов:

$$\begin{split} \lambda_{11} = & \frac{\lambda_{01}}{t_0} (t_1 F_1 + t_2 F_2) z_{11} = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{5000} (1500 \cdot 3.423 + 3500 \cdot 1.009 \cdot 10^{-3}) \cdot 4 = \\ & = 0.411 \cdot 10^{-6} \, 1/\text{год.} \end{split}$$

4.7.4 Для підгрупи 2 групи 1: а) номінальна інтенсивність відмов $\lambda_{02} = 0, 1 \cdot 10^{-6}$ 1/год.; б) розраховуємо поправочні функції: $F_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6 \cdot a_8 = 2,184 \cdot 1 \cdot 0,25 \cdot 0,28 \cdot 1,5 = 0,685;$ F_2 те ж саме, що у п. 4.4.3;

в) інтенсивність відмов:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_{02}}{t_0} (t_1 F_1 + t_2 F_2) z_{12} = \frac{0.1 \cdot 10^{-6}}{5000} (1500 \cdot 0.685 + 3500 \cdot 1.009 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 = 0.206 \cdot 10^{-6} \, 1/\text{год.}$$

4.7.5 Інтенсивність відмов першої групи:

 $\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = 0,411 \cdot 10^{-6} + 0,206 \cdot 10^{-6} = 0,617 \cdot 10^{-6} 1/1006 \cdot 10^{-6}$

4.7.6 Аналогічно знаходимо значення інтенсивності відмов для усіх груп і заносимо їх в останню графу таблиці 4.2.

4.7.7 Коефіцієнт *К*, що враховує кількість механіко-кінематичних ланок, знаходимо за номограмою Додатку 3: *К* = 1,1.

4.7.8 Коефіцієнт b_{np} беремо з табл. 4.1: $b_{np}=1$.

4.7.9 Інтенсивність відмов засобу в цілому згідно (4.34):

$$\lambda = Kb_{np} \sum_{j=1}^{L} n_j \lambda_j = 1, 1 \cdot 1 \cdot \sum_{j=1}^{L} \lambda_j = 8,048 \cdot 10^{-6} 1/$$
год

4.7.10 Розраховуємо час безвідмовної роботи засобу за формулою (4.9):

$$\overline{T}_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{8,048 \cdot 10^{-6}} = 124254 \text{ rog}.$$

4.7.11 Розраховуємо ймовірність безвідмовної роботи за формулою (4.35):

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0} = e^{-8.048 \cdot 10^{-6} \cdot 5000} = 0,96.$$

4.7.12 Оскільки нерівність (4.36) виконується, засіб відповідає умовам з надійності.

4.8 Метрологічна надійність засобів вимірювання

4.8.1 Загальні поняття

4.8.1.1 Метрологічна надійність — це властивість ЗВ зберігати встановлені значення метрологічних характеристик протягом певного часу при нормальних режимах і робочих умовах експлуатації.

4.8.1.2 У силу свого фізичного старіння ЗВ зазнає відмов явних і прихованих.

<u>Явна відмова</u> діагностується без залучення спеціальних засобів діагностики: ввімкнули – не працює.

<u>Прихована відмова</u> зовнішньо себе не виявляє, проте покази 3В не відповідають дійсності.

4.8.1.3 Для кількісного опису характеристик метрологічної надійності 3В використовують такі показники.

<u>Коефіцієнт готовності</u> K_{Γ} – ймовірність того, що за заданий проміжок часу не виникне явна відмова. Проміжок часу визначається часом від початку експлуатації, або від моменту повернення з ремонту до моменту відправлення ЗВ на черговий ремонт з причини явної відмови.

<u>Коефіцієнт вірогідності</u> $K_{\mathcal{A}}$ - ймовірність того, що за деякий час не виникне прихованої відмови.

<u>Час напрацювання на явну відмову</u> $T_{\mathcal{A}}$ - математичне очікування проміжку часу, за який виникає хоча б одна явна відмова.

<u>Час напрацювання на приховану відмову</u> T_{C} - математичне очікування проміжку часу, за який виникає хоч би одна прихована відмова.

<u>Час напрацювання на ремонт</u> T_{pem} - математичне очікування проміжку часу від моменту відновлення 3В після попереднього ремонту до моменту здачі 3В до наступного ремонту незалежно від причин.

4.8.1.4 У вузькому сенсі під метрологічною надійністю розуміють властивість ЗВ зберігати значення похибки Δ_{3B} у межах допустимих значень $\pm \Delta_{\text{доп}}$ протягом деякого часу *t*.

4.8.1.5 Як правило, похибка засобів виявляється тільки у результаті спеціальних повірочних робіт. Тому метрологічну відмову часто не вдається своєчасно діагностувати, і ЗВ експлуатуються в непрацездатному стані. Така відмова в метрологічній практиці називається прихованою.

4.8.2 Математична модель метрологічної надійності

4.8.2.1 Оцінювання параметрів метрологічної надійності проводять на основі розрахунків за математичною моделлю метрологічної надійності 3В, що враховує параметри метрологічного обслуговування. При цьому зручно використовувати топологічну модель у вигляді графа станів 3В.

4.8.2.2 Визначимо для довільного ЗВ п'ять основних станів, в яких цей засіб може знаходитися:

I (intact) - справний стан;

L (latent) - стан прихованої відмови;

D (defective) - стан явної відмови;

С (check) - ЗВ знаходиться в повірці;

R (repair) - ЗВ знаходиться в ремонті.

4.8.2.3 На рис. 4.7 показаний граф станів ЗВ. Вершинами графа є стани ЗВ, а дугами – можливі переходи між станами. Для спрощення вважатимемо, що повірка ЗВ після ремонту є частиною ремонту.



Рис. 4.7 – Граф станів ЗВ

4.8.2.4 У графі станів можна виділити характерні шляхи, показані на рис. 4.8.



Рис. 4.8 – Характерні шляхи у графі станів

Згідно з першим шляхом (рис. 4.8, а) справний ЗВ (І) переходить в стан прихованої відмови (L), яка виявляється під час повірки (C). Після ремонту (R) ЗВ повертається в справний стан.

ЗВ може потрапити в ремонт і до чергової повірки, якщо буде виявлена явна відмова (рис. 4.8, б і в).

I, нарешті, ЗВ може знаходитися в справному стані до чергової повірки (рис. 4.8, г).

4.8.2.5 Описом графа станів може служити матриця переходів:

Елементами матриці є часи переходів ЗВ з одного стану в інше. Деякі елементи матриці переходів являють собою звичайно використовувані параметри технічної і метрологічної надійності:

*t*_{ID} – математичне очікування (МО) напрацювання на явну відмову ЗВ;

 t_{IL} – МО напрацювання на приховану відмову ЗВ;

*t*_{*IC*} – міжповірочний інтервал (МПІ);

*t*_{LC} – МО часу роботи ЗВ в справному стані.

Для подальшого спрощення моделі можна прийняти:

 $t_{CR} = t_{CI} = t_C$ – середній час повірки;

 $t_{RI} = t_R$ – середній час ремонту.

4.8.2.6 Розглянемо найцікавіший (з точки зору розрахунку метрологічної надійності) характерний шлях графа станів (рис. 4.9).



Загальний час проходження цього шляху назвемо часом циклу функціонування ЗВ:

$$T_{\rm II} = t_{LL} + t_{LC} + t_C + t_R, \qquad (4.40)$$

Причому міжповірочний інтервал:

 $t_{IC} = t_{IL} + t_{LC} \,. \tag{4.41}$

Кожній ділянці цього шляху відповідають певні економічні витрати. Питомі витрати, віднесені до часу роботи ЗВ в справному стані, визначимо таким чином:

$$3_{y} = \frac{A + C_{n} \cdot t_{C} + C_{p} \cdot t_{R} + V \cdot t_{LC}}{t_{IL}}, \qquad (4.42)$$

де A – амортизація ЗВ за час $T_{\rm u}$; $C_{\rm n}$ – вартість перевірки, грн./год.; $C_{\rm p}$ – вартість ремонту, грн./год.; V – збитки від роботи з несправним ЗВ, грн./год.

Амортизацію A можна розрахувати, виходячи із співвідношення T_{μ} з терміном служби t_{cn} ЗВ:

$$A = C \frac{T_u}{t_{cs}},\tag{4.43}$$

де С – вартість ЗВ.

4.9.3 Оптимізація міжповірочного інтервалу

4.9.3.1 При розробці моделі метрологічної надійності і виконанні розрахунків зручно використовувати безрозмірні відносні координати часу:

$$\theta_n = \frac{t_{IC}}{t_{ID}}; \quad \theta_c = \frac{t_{LC}}{t_{ID}}. \tag{4.44}$$

Тоді завдання оптимізації МПІ можна сформулювати так:

$$\Psi = \min_{\theta_n, \theta_c} 3_y \tag{4.45}$$

при обмеженнях

$$\theta_{c\min} < \theta_c < \theta_{c\max}, \qquad (4.46)$$

$$\theta_{n\min} < \theta_n < \theta_{n\max} \,. \tag{4.47}$$

4.9.3.2 Необхідні для вирішення цього завдання дані можуть бути визначені наступним чином. Згідно [19], МО часу знаходження ЗВ в справному стані

$$t_{IL} = \frac{T_{g}T_{c}}{T_{g} + T_{c}} \left(1 - e^{-\frac{(T_{\Pi} - t_{c})(T_{g} + T_{c})}{T_{g}T_{c}}} \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_{\neg c,k} , \qquad (4.48)$$

а МО сумарного часу знаходження ЗВ в справному стані і стані явної відмови

$$t_{\Sigma} = T_{g} \left(1 - e^{-\frac{T_{\Pi} - t_{C}}{T_{g}}} \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_{k} , \qquad (4.49)$$

де T_{s} – МО напрацювання на явну відмову; $T_{n} = (t_{lC} + t_{C})$ – періодичність повірки; T_{c} – МО напрацювання на приховану відмову; p_{k} – ймовірність того, що після k-ої повірки ЗВ залишиться в роботі:

$$p_k = p_{c,k} + p_{-c,k}. \tag{4.50}$$

Тут $p_{c,k}$ и $p_{-c,k}$ – ймовірність того, що ЗВ знаходиться в роботі з прихованою і явною відмовою відповідно відразу після *k*-й повірки. Для їх визначення в [19] запропоновані рекурентні співвідношення:

$$p_{c,k+1} = (p_{c,k} + \varDelta P_c \cdot p_{-c,k}) \mathbf{P}_{\neg \mathcal{I}} (1 - \varDelta P_s); \qquad (4.51)$$

$$p_{-c,k+1} = (p_{-c,k} - \Delta P_c \cdot p_{-c,k}) \mathbf{P}_{\neg n} (1 - \Delta P_s);$$
(4.52)

де $\Delta P_{c} \Delta P_{g}$ – ймовірність прихованої і явної відмови відповідно в міжповірочному інтервалі; $P_{\neg \mu} = 1 - P_{\mu}$; P_{μ} – ймовірність правильної діагностики в ході повірки; $P_{\neg \mu} = 1 - P_{\mu}$; P_{μ} – ймовірність помилкової діагностики:

$$P_{\neg \pi} = 1 - P_{\neg \pi} (1 - P_{\neg \pi}). \tag{4.53}$$

4.9.3.3 Як початкові значення для обчислення за рекурентними формулами (4.51) і (4.52) приймаються:

$$p_{\neg c,0} = \left[1 - P_{\neg \mathcal{I}} - \left(1 - e^{-\frac{t_{\rm C}}{T_c}} \right) (1 - P_{\rm cp}) \right] P_{\neg \mathcal{I}} e^{-\frac{t_{\rm C}}{T_s}}$$
(4.54)

$$p_{c,0} = \left| P_{cp} + \left(1 - e^{-\frac{T_{c}}{T_{c}}} \right) \left(1 - P_{cp} \right) \right| P_{cp} e^{-\frac{T_{c}}{T_{s}}},$$
(4.55)

де *P*_{ср} – ймовірність прихованої відмови відразу після ремонту.

4.9.3.4 Обчислення за формулами (4.49) і (4.50) слід продовжувати до тих пір, поки виконується умова

$$p_{c,k} + p_{-c,k} > \varepsilon, \tag{4.56}$$

де ε – точність обчислень. Рекомендується обирати $\varepsilon = e^{-10}$.

4.9.3.5 Час роботи в стані прихованої відмови

$$t_{LC} = t_{\Sigma} - t_{\mathrm{IL}}.\tag{4.57}$$

4.9.3.6 Загальний алгоритм розрахунків за математичною моделлю метрологічної надійності запишеться таким чином:

1) вводимо початкові дані *С*, *C_n*, *C_p*, *Y*, *t_C*, *t_R*, *T_s*, *P*_{¬Д}, *P*_{ср};

2) задаємося значеннями θ_{Π} и θ_{c} ;

3) організовуємо цикл обчислень за рекурентними формулами (4.51) і (4.52) до тих пір, поки виконується умова (4.56), одночасно накопичуємо суми $p_{-c,k}$ та p_k ;

4) визначаємо за формулами (4.48), (4.49) і (4.57) t_{IL} , t_{Σ} та t_{LC} ;

5) розраховуємо питомі витрати за формулою (4.42).

Цей алгоритм використовується для вирішення оптимізаційної задачі (4.45).

4.10.2 Приклади розрахунку метрологічної надійності

4.10.2.1 Алгоритм за п. 4.4.3.6 легко реалізується програмним пакетом МАТLAB, який, зокрема, дає можливість побудови графіків залежності питомих витрат від θ_n та θ_c . На рис. 4.10 показаний такий графік, отриманий для випадку ідеальної перевірки ($P_{-\chi} = 0$) і ідеального ремонту ($P_{cp} = 0$).

4.8.2.2 Графік на рис. 4.10 дає можливість визначення оптимального МПІ в залежності від заданого значення МО часу роботи ЗВ в справному стані без проведення розрахунків.



Рис. 4.10 – Залежність питомих витрат від міжповірочного проміжку $\theta_{\rm n}$

4.8.2.3 Для обчислення значень коефіцієнта готовності K_{Γ} і коефіцієнта вірогідності $K_{\mathcal{A}}$. можна використати алгоритм, схема якого надана у Додатку И. Він досить просто реалізується засобами МАТLAB. На рис. 4.11 і 4.12 показані графіки, побудовані з використанням цього алгоритму. Вони відповідають випадку ідеальної повірки ($P_{\mathcal{A}} = 1$ і, відповідно, $P_{\neg \mathcal{A}} = 0$) з ідеальною діагностикою та ідеальним ремонтом, тобто приховані відмови після ремонту відсутні.



Рис. 4.11 — Графік залежності коефіцієнта готовності K_{Γ} від міжповірного проміжку θ_{n}



Рис. 4.12 — Графік залежності коефіцієнта вірогідності $K_{\mathcal{I}}$ від міжповірочного проміжку θ_{n}

4.8.2.4 Графіки 4.10, 4.11 та 4.12 дозволяють знаходити без розрахунків значення МПІ, K_{Γ} та $K_{\mathcal{A}}$ для вищевказаних умов ідеальної повірки. У випадках, коли $P_{\mathcal{A}} < 1$ $P_{\neg \mathcal{A}} > 0$ (тобто за наявності помилок у діагностиці, прихованих під час повірки) або $P_{CP} > 0$ (тобто при допущенні помилок відновлення під час ремонту) треба виконувати розрахунки за алгоритмами п. 4.4.3.6 і Додатку И. Величина $P_{\neg \mathcal{A}}$ визначається на підставі аналізу якості проведених повірочних робіт. Величина P_{CP} визначається якістю ремонтних робіт.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ІСКРОБЕЗПЕЧНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

5.1 Загальні поняття

5.1.1 У разі розміщення засобів КВПіА в зоні класу В-І (Zone 0, необхідний рівень вибухозахисту – «іа», особливовибухобезпечний), де, за визначенням, виділяються горючі гази або пари рідин в такій кількості і які володіють такими властивостями, що можуть утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші при нормальних режимах, необхідне використання вибухозахищеного обладнання. Це обладнання пов'язане електричними проводами з іншим обладнанням, розміщеним поза вибухонебезпечною зоною що називаються пов'язаними пристроями. Відповідно до визначення, приведеного в ГОСТ 22782.5-78, пов'язаним енергоустаткуванням або пов'язаними електричними колами називаються енергоустаткування або його кола, які при нормальному або аварійному режимах роботи не відділені гальванічно від іскробезпечних кіл.

5.1.2 Електричні кола, в які входить вибухозахищене обладнання, повинні бути іскробезпечні. Для таких кіл повинен бути проведений розрахунок на перевірку іскробезпечності з метою підтвердження наявності в цих колах іскробезпечних значень струму, напруги, потужності або енергії.

5.1.3 Існують два основних види іскробезпечних електричних кіл:

а) електричні кола тільки з одним пов'язаним пристроєм (елементарне іскробезпечне електричне коло);

б) електричні кола з більш ніж одним пов'язаним пристроєм, здатним виробляти електричну енергію в нормальному або аварійному режимах роботи (об'єднані кола).

5.1.4 Оцінка іскробезпечності елементарного електричного кола може бути виконана за довідковим даними про електричні параметри зовнішніх кіл, які приводяться на паспортній табличці або в «Умовах застосування», що є невід'ємними частинами Свідоцтва про вибухозахищеність енергоустаткування і Сертифіката відповідності, з використанням значень ємності і індуктивності з'єднувальних кабелів і проводів. У тому випадку, коли значення смності і індуктивності з'єднувальних кабелів невідомі, можливе застосування наступних типових значень параметрів кабелів із загальною довжиною 1 км: $L_c=l$ мГн, $C_c=110$ нФ.

5.1.5 Іскробезпечність елементарного електричного кола підтверджується, якщо виконуються співвідношення, приведені в таблиці 5.1. Таблиця 5.1 – Співвідношення, що підтверджують іскробезпечність кола

Іскробезпечне енергоустаткування + з'єднувальний кабель	Умова підтвердження іскробезпечності	Пов'язане енергоустаткування
U_i	>	U_0
I_i	>	I_0
P_i	>	P_{0}
$L_i + L_c$	<	L_0
$C_i + C_c$	<	C_0

У таблиці 5.1 використані наступні позначення:

 $U_0 I_0$ — максимальні значення, відповідно, напруги і струму для пов'язаного обладнання;

U_i, *I_i* – максимально допустимі значення, відповідно, напруги і струму для іскробезпечного енергоустаткування, встановленого у вибухонебезпечній зоні;

*L*₀ – максимальне допустиме значення індуктивності у зовнішньому іскробезпечному колі;

 C_0 – максимальне допустиме значення ємності у зовнішньому іскробезпечному колі;

L_i – значення власної індуктивності;

Сі-значення власної ємності.

5.1.6 З таблиці 5.1 видно, що індуктивність і ємність іскробезпечних кіл з урахуванням ємності і індуктивності з'єднувальних кабелів, визначених за довідковим даними, розрахунком або вимірюванням, не повинні перевищувати максимальних значень, обумовлених в технічній документації на ці кола.

5.1.7 Для електричних кіл із зосередженими параметрами (індуктивними і ємносно-резистивними дільницями) встановлений коефіцієнт іскробезпечності, рівний 1,5, може опускатися значно нижче за 1, що може вважатися рівнозначним присутності джерела підпалення (коефіцієнт іскробезпечності – це відношення мінімальних запалюючих параметрів до відповідних іскробезпечним).

5.2 Розрахункова оцінка іскробезпечності для об'єднаних кіл

5.2.1 При з'єднанні діючого пов'язаного енергоустаткування в комплект електричні параметри, приведені в Сертифікаті відповідності кожної

одиниці обладнання, не можуть бути безпосередньо використані для оцінки загальної іскробезпечності комплекту. Підключене пов'язане енергоустаткування повинно розглядатися єдиним електричним пристроєм, для якого розраховуються нові граничні значення електричних параметрів.

5.2.2 У залежності від виду і порядку з'єднання або можливого аварійного режиму повинні розглядатися послідовне, паралельне або змішане з'єднання, особливо при аварійному режимі, при якому можлива зміна електричних і конструктивних параметрів елементів, що впливають на іскробезпечність кола (послідовна або паралельна схема з'єднання).

5.2.3 Допустимі значення напруги холостого ходу і струму короткого замикання для різних видів з'єднань обчислюються по різних критеріях:

а) для паралельного з'єднання (рис. 5.1) U_0 визначається за найбільшими значеннями окремих напруг холостого ходу, I_0 – за сумою значень окремих допустимих струмів короткого замикання.



Рис. 5.1 – Паралельне з'єднання

б) для послідовного з'єднання (рис. 5.2) U_0 обчислюється за сумою окремих значень напруг холостого ходу, I_0 – за найбільшими значеннями окремих допустимих струмів короткого замикання.



Рис. 5.2 – Послідовне з'єднання

в) для послідовно-паралельного з'єднання (рис. 5.3) U_0 або I_0 обчислюються за сумою відповідних окремих значень U_{0n} або I_{0n} .



Рис. 5.3 – Паралельне і послідовне з'єднання

Цей метод визначення максимально допустимих параметрів потрібно застосовувати, в основному, у разі простих або ясно скомпонованих з'єднань. Метод передбачає план дій для найгіршого випадку і тому дає вищу міру безпеки. Максимально допустимі значення U_{0} , I_0 , L_0 и C_0 можуть бути отримані по графіках залежності мінімальних запалюючих струмів і напруг для вибухонебезпечних сумішей оптимального складу, приведених в ГОСТ 22782.5-78.

5.2.4 Для визначення іскробезпечного значення струму (напруги) необхідно для заданих електричних параметрів кола знайти значення мінімального запалюючого струму (напруги) для даної вибухонебезпечної суміші і потім розділити його на коефіцієнт іскробезпечності, тобто на 1,5.

При розрахунку кіл змінного струму необхідно приймати амплітудні значення струму і напруги.

5.2.5 Індуктивність і ємність іскробезпечних кіл, в тому числі з'єднувальних кабелів і проводів, ємність і індуктивність яких визначається за довідковими характеристиками, розрахунком або вимірюванням, не повинні перевищувати максимальних значень, обумовлених в технічній документації на ці кола.

5.3 Приклад оцінки іскробезпечності схеми для тензовимірювань

5.3.1 Зусилля, що прикладається, повинне бути виміряне тензодавачем – перетворювачем, який перетворює зміну зусилля, що прикладається, в зміну електричного опору. Як правило, такий перетворювач застосовується разом з мостом Уїтстона, в якому одне, два або навіть всі чотири плечі являють собою тензодавачі, а вихідна напруга змінюється у відповідь на варіації вимірюваного зусилля. При цьому давач зусилля встановлений у вибухонебезпечній зоні. Як розділові елементи між іскробезпечними і іскронебезпечними колами застосовані блоки іскрозахисту на стабілітронах (БІС). Схема зображена на рис. 5.4.

Міст Уїтстона живиться через БІС Z765, який забезпечує живлення з номінальним значенням напруги 8 В вимірювального моста з внутрішнім опором 350 Ом. Коло зворотного зв'язку через БІС Z764 може не використовуватися. Сигнал мілівольтового діапазону передається в безпечну зону через БІС Z964.



Рис. 5.4 – Іскробезпечна схема для тензовимірювань

5.3.2 Оцінка іскробезпечності проводиться поетапно:

a) на першому етапі зіставляються електричні параметри енергоустаткування (табл. 5.2 і 5.3);

Таблиця 5.2 – Електричні параметри БІС

Вибухозахи електроустат	ищене кування	Виробник	Сертифікат відповідності	U ₀ , B	<i>I</i> ₀ , мА	<i>Р₀,</i> мВт	<i>L</i> ₀ , мГн	С ₀ , нФ	Залеж- ність
Опис	Модель								
Блок іскрозахисту	Z765	Pepperl +		14,7	75	276	15	750	лінійна
Блок іскрозахисту	Z764	Fuchs GmbH	D.95C.050 (ИСЦ ВЭ)	11,6	12	30	230	1600	лінійна
Блок іскрозахисту	Z964			11,6	12	30	230	1600	

5.3.3 Визначаються найбільші значення напруги і струму в системі по значеннях параметрів U_0 і I_0 , вказаних для пов'язаного енергоустаткування (див. п.п. 5.2.2–5.2.4).

Таблиця 5.3 –	Електричні	параметри	тензодавача
---------------	------------	-----------	-------------

Вибухозахищене Ви		Виробник	Сертифікат	U_{i}	I_{i}	P_{i}	L _i ,	C_{i}
електроуст	гаткування		відповідності	В	мА	мВт	мГн	нΦ
Опис	Модель							
Тензода-	Z6H	Hottinger	Ex-90 C2094	23	196	1130	0	0
вач	2011	Baldwin	EA 90.02091	20	170	1150	Ŭ	v
Індуктівность і ємність з'єднувального кабелю: L _c =1								
мГн/км C_c =110нФ/км або технічні дані, надані виробником							0,5	55
кабелю для <i>l</i> =500 м								
Суммарні значення індуктивності та ємності: <i>SL_i</i> і <i>SC_i</i>							0,5	55
			-				,	

Максимальне значення з окремих значень напруг $U_0 = 14,7$ В.

Сумарний струм в паралельному електричному колі $I_0 = (75+12+12)$ мА = 99,0 мА.

5.3.4 Перевіряється умова: найбільше значення струму в системі (I_0), помножене на коефіцієнт іскробезпечності 1,5, не повинне перевищувати значення струму, отриманого із залежності мінімального запалюючого струму $I_{3 \min}$ від напруги джерела U_{dwc} в омічному колі для відповідної групи енергоустаткування при максимальному значенні напруги в системі U_0 (рис. 5.5).





Рис. 5.5. Залежність мінімального запалюючого струму від напруги джерела *U*_{дж}. Рис. 5.6. Залежність мінімального запалюючого струму від індуктивності кола L Рис. 5.7. Залежність мінімальної запалюючої напруги U_{3 тіп} від ємності кола С

З графіків на рис. 5.5 видно, що при напрузі $U_0 = 14,7$ В для вибухонебезпечної суміші підгрупи ІІС (водородо-повітряна) максимальне допустиме значення струму короткого замикання $I_{\text{макс}} = 980$ мА, що істотно перевищує $I_0 \cdot 1,5 = 99 \cdot 1,5 = 148,5$ мА.

Отже, умову іскробезпечності відповідно до залежності мінімального запалюючого струму від напруги джерела для омічного кола можна вважати виконаною.

5.3.5 Максимально допустиме значення індуктивності L_0 визначається із залежності мінімального запалюючого струму від індуктивності кола і напруги джерела для відповідної підгрупи енергоустаткування по найбільшому значенню струму в системі (I_0), помноженому на коефіцієнт іскробезпечності 1,5 (рис. 5.6).

Для значення струму 148,5 мА отримуємо індуктивність 4 мГн для підгрупи енергоустаткування IIC.

5.3.6 Максимально допустиме значення ємності C_0 визначається із залежності мінімальної запалюючої напруги від ємності кола водне-повітряної суміші (підгрупа IIC) по найбільшому значенню напруги в системі U_0 , помноженому на коефіцієнт іскробезпечності 1,5 (рис. 5.7).

З рис. 5.7 видно, що при напрузі 14,7·1,5 = 22,05 В для воднеповітряної суміші (підгрупа IIC) максимально допустиме значення ємності дорівнює 620 нФ. 5.3.7 Перевіряється умова: максимально допустимі значення C_0 і L_0 повинні задовольняти вимогам іскробезпечності електричного кола. Ці вимоги визначають умови іскробезпечності електричного кола тільки з одним пов'язаним електропристроєм.

При оцінці іскробезпечності враховується з'єднувальна лінія довжиною 500 м з параметрами $C_c=55 \text{ н}\Phi$, $L_c=0,5 \text{ м}\Gamma\text{ н}$ (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Перевірка умов іскробезпечності кола

Іскробезпечне енергоустаткування + параметри з'єднувальної лінії	Умова іскробезпечності	Пов'язане енергоустатку- вання
(0+55) нФ	\leq	620 нФ
(0+0,5) мГн	\leq	4мГн
23 B	>	14,7 B
196 мА	>	99,0 мА
1130мВт	>	364 мВт

5.3.8 Визначається група вибухозахищеного енергоустаткування системи, з урахуванням того, для якого типу вибухонебезпечної суміші обиралася залежність мінімальних запалюючих струмів і напруг.

Все енергоустаткування є схваленим для використання у воднеповітряній суміші ІІС. Всі значення параметрів отримані із залежності мінімальних запалюючих струмів і напруг для водне-повітряної суміші (підгрупа ІІС). Оскільки іскробезпечність підтверджена відповідно до цих параметрів, система задовольняє вимогам для підгрупи вибухозахищеного енергоустаткування ІІС.

5.3.9 Визначається група вибухонебезпечної суміші газів і пари в залежності від величини температури самозапалення. Для вибухозахищеного енергоустаткування групи ІІ в залежності від значення максимальної температури поверхні встановлюються температурні класи, вказані в таблиці 5.5. Максимальна температура поверхні визначається формулою:

$$T = P_0 \cdot R_{th} + T_{HBK},\tag{5.1}$$

де T — максимальна температура поверхні, °C;

 P_o — максимальна потужність, що виділяється джерелами енергії з лінійними вольтамперними характеристиками, визначається з співвідношення $P_o = U_0 I_0 / 4$;

 R_{th} — специфікується виробником комплектуючих виробів;

 $T_{_{HGK}}$ — температура навколишнього середовища (звичайно приймається 40 °C).

Таблиця 5.5 – Визначення температурних класів

Температурний клас	Максимальна температура поверхні, °С
T1	450
Τ2	300
T3	200
Τ4	135
Т5	100
Т6	85

РОЗДІЛ 6. ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

6.1 Загальні відомості

6.1.1 На стадії техно-робочого проектування розв'язуються наступні задачі метрологічного забезпечення автоматизованої системи контролю (ACK):

a) визначення оптимальності номенклатури контрольованих параметрів з точки зору забезпечення якісного функціонування АСК;

б) визначення структурних схем вимірювальних каналів (ВК);

в) уточнення нормованих метрологічних характеристик ВК;

г) розрахунок показників точності виконання функцій, що реалізуються за допомогою ВК, та аналіз їх відповідності вимогам технічного завдання.

Як характеристики точності виконання функцій використовуються відносні (δ), зведені (γ) або абсолютні (Δ) похибки каналів, визначені з довірчою імовірністю 0,95.

Результати розрахунку похибок ВК використовуються також для обгрунтування вибору засобів вимірювання шляхом порівняння різних варіантів побудови каналів і вибору найбільш прийнятного (по відношенню до надійності, вартості тощо) варіанта, що забезпечує задану точність вимірювання.

6.1.2 Розрахунок похибок ВК виконується для статичних режимів і робочих умов експлуатації.

6.1.3 Вихідними даними для розрахунку є:

а) структурні схеми вимірювальних каналів АСК;

б) характеристики погрішності технічних засобів, що створюють канали;

в) характеристики умов експлуатації технічних засобів;

г) характеристики вимірюваних технологічних параметрів у відповідності з технічним завданням.

6.1.4 На етапі технічного проектування розраховується інструментальна похибка каналу, що є інтегральною характеристикою, яка включає в себе основну похибку, варіацію, і додаткову похибку. Розрахункове визначення результуючих похибок проводиться шляхом статистичного сумування характеристик окремих складових похибок.

6.1.5 В ході розрахунку характеристик точності виконання функцій АСК приймаються наступні допущення:

а) значення технологічних параметрів вважаються випадковими і статистично незалежними величинами;

б) фактори, що діють на технічні засоби АСК в робочих умовах експлуатації, вважаються випадковими і статистично незалежними величинами;

в) похибки, що виникають в каналах АСК, вважаються випадковими і статистично незалежними величинами;

г) закон розподілу основної похибки технічних засобів вважається нормальним;

д) закон розподілу інших складових погрішності технічних засобів вважається рівномірним.

6.2 Методика оцінки основної похибки вимірювальних каналів

6.2.1 Межі основної відносної похибки ВК (окрім ВК температури) $\delta_{_{HK_{-OCH}}}$, %, визначають, виходячи із складу ВК АСК, за формулою:

$$\delta_{HK_och} = K \cdot \sqrt{\delta_{\Pi H\Pi}^2 + \delta_{B\Pi}^2 + \delta_K^2 + \delta_{an^2}^2 + \delta_{\Pi C}^2} , \qquad (6.1)$$

де K = 1,2;

 $\delta_{\Pi\Pi\Pi}$ – відносна похибка первинних вимірювальних перетворювачів, %;

 $\delta_{\scriptscriptstyle B\Pi}$ — відносна похибка вторинного перетворювача, % (за наявності);

 δ_{κ} – відносна похибка контролера, %;

 δ_{an} – відносна похибка алгоритму, % (за наявності);

 $\delta_{\pi 3}$ – відносна похибка лінії зв'язку (ЛЗ), %.

Примітки:

1. Відносна похибка алгоритму є істотною тільки для ВК витрати, визначуваної методом змінного перепаду тиску.

2. Похибка ^{*б*_{лз}} визначається втратами в ЛЗ. Між вимірювальними і комплексними компонентами лінії зв'язку є побудованими з контрольних кабелів та/або кабелів управління. Довжина ЛЗ невелика, вхідний опір контролера великий, тому втрати в ЛЗ малі. Між комплексними і обчислювальними компонентами побудований цифровий канал зв'язку. Застосовані мережеві технології Ethernet, ControlNet, Profibus DP.

Приймаємо $\delta_{\pi} = 0$.

6.2.2 Межі основної абсолютної похибки ВК температури $\Delta_{BK_{ocu}}$, °С, визначають виходячи зі складу ВК АСК:

$$\Delta_{BK_och} = K(\Delta_{\Pi B\Pi} + \Delta_{B\Pi} + \Delta_K), \tag{6.2}$$

де K = 1,2;

Δ_{*пвп*} – абсолютна похибка первинних вимірювальних перетворювачів, °C;

 $\Delta_{B\Pi}$ – абсолютна похибка вторинного перетворювача, °С (при наявності);

 Δ_{κ} – абсолютна похибка контролера, °C.

6.2.3 Для обчислення похибки ВК за формулою (6.1) похибку компонентів ВК АСК переводять у відносну форму δ , %:

 $\delta = \frac{\Delta}{X_{HOM}} \cdot 100 = \gamma \cdot \frac{X_B - X_H}{X_{HOM}}, \qquad (6.3)$

де △ – межі допустимої абсолютної похибки компонента ВК АСК;

γ – межі допустимої приведеної похибки, нормованої для різниці між вимірів компонента ВК АСК;

 X_{B}, X_{H} – верхня і нижня межі вимірів компонента ВК АСК (у тих же одиницях, що і $X_{_{HOM}}$);

 $X_{_{HOM}}$ – номінальне значення вимірюваного параметра ФВ, для якого розраховується похибка вимірів.

Якщо приведена похибка є нормованою для верхньої межі вимірів, то $X_H = 0$.

6.2.4 Для обчислення похибки ВК за формулою (6.2) похибку компонента ВК АСК переводять в абсолютну форму Δ :

$$\Delta = \gamma \cdot \frac{X_B - X_H}{100}.$$
 (6.4)

6.2.5 Відносну похибку обчислюють в точках $X_{i_{HOM}}$ (*i*=1,..., 5), що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів, і обирають максимальне значення.

6.2.6 Для модулів аналогового введення контролера, похибка яких нормована в приведеній формі, необхідно визначити значення струму, електричного опору, (TEPC), що відповідає номінальному значенню X_{nomi} . Розрахунок значення струму I_{nomi} , мА, що відповідає номінальному значенню X_{nomi} , проводять згідно формули:

$$I_{now} = \frac{D_{curn.} \cdot X_{now}}{D_{\phi B}} + 4, \tag{6.5}$$

де $D_{curh.}$ – різниця між верхнім і нижнім межами діапазону вхідного сигналу, мА;

 $X_{_{\rm HOM}}$ – номінальне значення фізичної величини (ФВ) у одиницях вимірів ФВ;

 $D_{\phi B}$ – різниця між верхнім і нижнім межами діапазону вимірів ФВ, в одиницях вимірів ФВ.

Якщо діапазон сигналу 4–20 мА, то до обчисленого за формулою (6.5) значення $I_{\text{ном}}$ необхідно додати 4 мА.

6.2.7 Значення опору на виході термоперетворювачів опору визначають за номінальною статичною характеристикою перетворення:

$$R_t = W_t \cdot R_0, \tag{6.6}$$

де R_t – опір термоперетворювача опору при температурі t, Ом;

 W_t – значення відношення опорів при температурі t до опору при 0 °C.

Значення *W*^t обирають з таблиць Додатку А ДСТУ 2858-94.

6.2.8 Значення ТЕРС термопар різних типів у залежності від температур їх робочих кінців при температурі вільних кінців 0 °С обирають відповідно до ДСТУ EN 60584-1:2016.

6.2.9 Межі основної приведеної похибки ВК тиску γ_{HK_och} , %, визначають наступним чином:

а) переводять похибку компонентів ВК з приведеної форми у відносну форму за формулою (6.6) в точках X_{now_i} , що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів;

б) відносну похибку ВК обчислюють за формулою (6.1);

в) переводять значення похибки ВК, що відповідають п'яти точкам діапазону, з відносної форми в приведену:

$$\gamma_i = \frac{\delta \cdot X_{\text{HOMI}}}{X_B - X_H}.$$
(6.7)

З п'яти отриманих значень обирають максимальне і приписують похибці ВК.

6.2.10 Для ВК витрати, визначуваної методом змінного перепаду тиску, межі основної приведеної похибки ВК витрати δ_{HK_och} , %, визначають таким чином:

а) відносну похибку ВК обчислюють в п'яти точках діапазону вимірів витрати :

$$\delta_{HK_{ochi}} = K \cdot \sqrt{\delta_{\Pi K}^2 + \delta_{\Pi 3}^2} , \qquad (6.8)$$

де K = 1,2;

 $\delta_{\rm IIK}$ — відносна похибка обчислень програмного комплексу, що використовується;

б) переводять значення похибки ВК, що відповідають п'яти точкам діапазону, з відносної форми в приведену за формулою (6.7). З п'яти отриманих обирають максимальне значення і приписують похибці ВК.

6.2.11 Відносна похибка ВК витрати (при використанні витратомірів) в робочих умовах експлуатації, $\delta_{_{RK}}$, %:

$$\delta_{BK_{-}p.y.} = K \cdot \sqrt{\delta_{\Pi B\Pi}^{2} + \delta_{B\Pi}^{2} + \delta_{K}^{2} + \delta_{an}^{2} + \delta_{\Pi 3}^{2} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} \delta_{\partial j}^{2}}, \qquad (6.9)$$

де $\delta_{\partial ij}$ – додаткова відносна похибка *i*-го компонента ВК від *j*-ої впливаючої величини, %;

n – число компонентів;

l – число впливаючих величин.

6.2.12 Межі абсолютної похибки ВК температури в робочих умовах Δ_{BK} _{*p.v.*}, %, визначають, виходячи із складу ВК АСК:

$$\Delta_{BK_{-P},y.} = \Delta_{\Pi B\Pi} + \Delta_{B\Pi} + \Delta_{K} + \sum_{k=1}^{3} \sum_{j=1}^{l} \Delta_{okj} , \qquad (6.10)$$

де $\Delta_{\delta kj}$ – абсолютна додаткова похибка *k*-го компонента ВК від *j*-ої впливаючої величини, °С.

Переведення додаткової похибки в абсолютну форму здійснюють аналогічно п. 5.2.3.

6.2.13 Межі приведеної похибки ВК тиску в робочих умовах $\gamma_{BK_{-}p.y.}$, %, визначають з використанням формули (5.9).

6.2.14 Для ВК витрати, визначуваної методом змінного перепаду тиску, межі приведеної похибки ВК витрати в робочих умовах $\gamma_{BK_{-}p.y.}$, %, обчислюють в п'яти точках діапазону вимірів витрати за формулою:

$$\delta_{BK_{-}p.y.} = K \cdot \sqrt{\delta_{IIK}^2 + \delta_{JI3}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^l \delta_{\partial kj}^2} .$$
(6.11)

6.3 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання температури



Термоперетворювач опору ТСМ 50М	-,	Вимірювальний перетворювач dTRANS T02		Модуль аналогового введення SM331 6ES7
------------------------------------	----	---	--	--

Рис. 6.1 – Структурна схема каналу вимірювання температури

6.3.2 Вихідними даними для розрахунку є граничні значення похибок елементів ВК:

а) термоперетворювача опору: $\Delta_{TCM} = \pm (0.25 + 0.0035 \cdot t)$ °C;

б) вимірювального перетворювача: $\Delta_{dTRANS R} = \pm 0.3 \text{ Om};$

в) модуля аналогового введення: $\gamma = \pm 0.05\%$.

6.3.3 Межі основної абсолютної похибки ВК температури:

$$\Delta_{BK \quad och} = \Delta_{TCM} + \Delta_{dTRANS} + \Delta_{K}$$

6.3.4 Похибка первинного вимірювального перетворювача: $\Delta_{TCM} = = \pm (0,25 \pm 0,0035 \cdot t)$ °C.

6.3.5 Похибку вторинного перетворювача dTRANS T02 необхідно перевести в одиниці вимірів температури. Для цього визначимо відносну похибку вимірів опору δ_R :

$$\delta_{R} = \frac{\Delta_{dTRANS_{R}}}{X_{HOM}} \cdot 100, \%$$

де за $X_{\text{ном}}$ приймають значення фізичної величини, що відповідає 100% діапазону вимірів ($X_{\text{ном}} = X_{\theta} - X_{\mu}$).

6.3.6 Визначимо опір, що відповідає нижній межі діапазону вимірів температури (мінус 50 °C):

$$R_t = W_t \cdot R_0.$$

Для термоперетворювача опору типу TCM з HCX перетворення 50M опір при температурі 0 °C:

*R*₀ =50 Ом.

Значення відношення опорів W_t при температурі мінус 50 °C і плюс 50 °C до опору при 0 °C визначають для номінального значення відношення опорів $W_{100} = 1,4280$ (нормовано в Описі типу TCM 50M) з таблиці А.З Додатку А ДСТУ 2858-94:

$$W_{-50 \circ C} = 0,7845;$$

 $W_{50 \circ C} = 1,2139.$
Тоді: $R_{t(-50^{\circ}C)} = 0,7845 \cdot 50 = 39,225 \text{ Ом}; R_{t(50^{\circ}C)} = 1,2139 \cdot 50 = 60,955 \text{ Ом}.$

Відносна похибка вимірів опору

$$\delta_R = \frac{0.3}{60,695 - 39,225} \cdot 100 = 1,40\%$$

6.3.7 Абсолютна похибка вторинного перетворювача dTRANS T02 в одиницях виміру температури:

$$\Delta_{dTRANS} = \Delta_{dTRANS_T} = \frac{\delta_R}{100} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) = \frac{1,40}{100} \cdot 100 = 1,40 \text{ °C}$$

6.3.8 Похибку модуля аналогового введення контролера SM331 6ES7 331-7NF00-0AB0 необхідно перевести в абсолютну форму похибки вимірів температури:

$$\Delta_{K} = \frac{\gamma}{100} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \frac{0.05}{100} \cdot 100 = 0.05 \text{ °C}.$$

6.3.9 Похибка ВК температури: $\Delta_{BK_{och}} = 0.25 + 0.0035 \cdot t + 0.05 = \pm (0.3 + 0.0035 \cdot t)$ °C.

6.3.10 Визначимо похибку ВК в робочих умовах. Для термоперетворювача опорів ТСМ 50М і для перетворювача вимірювального багатофункціонального dTRANS T02 додаткова похибка не нормована. Для модуля SM331 6ES7 331-7NF00-0AB0 контролера SIMATIC S7-300 нормовані межі похибки в робочих умовах (від 0 до 40 °C):

 $\gamma_{p.y.} = \pm 0.3 \% / {}^{0}C.$

Похибку модуля аналогового введення контролера SIMATIC S7-300 необхідно перевести в абсолютну форму похибки вимірів температури:

$$\Delta_{K_{p.y.}} = \frac{\gamma_{p.y.}}{100} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \frac{0.3}{100} \cdot 100 = 0.3 \,^{\circ}\text{C}.$$

Обчислюємо похибку ВК температури в робочих умовах:

 $\Delta_{BK} = 0.25 + 0.0035 \cdot t + 0.3 = (0.55 + 0.0035 \cdot t) \circ C.$

6.4 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання тиску

6.4.1 Структурна схема вимірювального каналу показана на рис. 6.2.



Рис. 6.2 – Структурна схема каналу вимірювання тиску

6.4.2 Вихідні дані для розрахунку:

а) для перетворювача тиску серії 40 мод. 4385:

1) діапазон вимірів тиску від 0,1 до 10 кгс/см²;

2) граничне значення похибок $\gamma_{nr} = \pm 0.5\%$;

3) робочі умови експлуатації від мінус 40 до 40 °С;

4) температурний коефіцієнт похибки ±0,1% / 10 °С;

5) додаткова похибка, викликана зміною напруги живлення на кожні 10 В, $\pm 0.1\% / 10$ В.

б) для модуля аналогового введення 1756-IF6I:

1) граничне значення похибок $\gamma = \pm 0,1\%$;

2) межі похибки в робочих умовах (від 0 до 60 °C) $\gamma_{p,y} = \pm 0,54\%$.

6.4.3 Похибку перетворювача тиску необхідно перевести у відносну форму за формулою (6.3), у яку підставляємо X_H =0,1 кгс/см², X_B =10 кгс/см².

Згідно п. 6.2.5, відносну похибка обчислюють в точках $X_{i_{nom}}$, що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів. Отже, X_{nom} =0,5 кгс/см² і маємо:

$$\delta_{\rm nr} = 0.5 \cdot \frac{10 - 0.1}{0.5} = 9.9\%$$

Результати розрахунків усіх значень $\delta_{\rm nr}$ наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати розрахунків значень δ_{nr}

№ точки	X_{HOM} , кгс/см ²	$\delta_{\scriptscriptstyle \Pi T}$, %
1	0,5	9,9
2	2,5	1,98
3	5	0,99
4	7,5	0,99
5	9,5	0,521

6.4.4 Похибку модуля аналогового введення необхідно перевести у відносну форму за формулою (6.3).

Розрахунок значення струму $I_{\text{ном}}$, мА, що відповідає номінальному значенню $X_{\text{ном}}$, проводимо згідно формули (6.5), у яку підставляємо $D_{\text{сигн.}}$ =16 мА, $X_{\text{ном1}}$ =0,5 кгс/см²; $D_{\phi B}$ =9,9 кгс/см². Отже:

$$I_{HOM} = \frac{D_{CU2H.} \cdot X_{HOM}}{D_{\Phi B}} + 4 = \frac{16 \cdot 0.5}{9.9} + 4 = 4.8 \text{ MA.}$$

Результати розрахунків усіх значень І_{ном} зводимо у таблицю 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати розрахунків похибки модуля аналогового введення

№ точки	$X_{\rm HOM},$ кгс/см ²	$I_{\rm HOM},$ мА	$\delta_{\scriptscriptstyle m K},\%$	$\delta_{\rm BK \ och}, \%$	<i>ү</i> ВК осн, %
1	0,5	4,8	0,33	12	0,6
2	2,5	8	0,2	2,4	0,606
3	5	12	0,13	1,2	0,606
4	7,5	16	0,1	1,2	0,909
5	9,5	19,35	0,08	0,64	0,614

6.4.5 Визначаємо похибку модуля аналогового введення у відносній формі:

$$\delta_{K} = 0.1 \cdot \frac{20 - 4}{8} = 0.2\%$$

6.4.6 Обчислюємо межі основної відносної похибки ВК тиску за формулою (6.1):

$$\delta_{BK_{ocH_1}} = 1.2 \cdot \sqrt{(9.9)^2 + (0.33)^2} = 12\%.$$

Переводимо значення похибки ВК з відносної форми у зведену:

$$\gamma_{BKochl} = \frac{12 \cdot 0.5}{10 - 0.1} = 0.6\%$$

Результати розрахунків δ_{ВК осн} заносимо в таблицю 6.4.

6.4.7 Обираємо з таблиці 6.4 найбільше значення похибки: $\gamma_{BK \text{ осн}}=0,9 \%$.

6.4.8 Для визначення похибок ВК у робочих умовах враховуємо, що оскільки в АСК проведені заходи для стабілізації напруги живлення, то додаткову похибку, викликану зміною напруги живлення, не враховуємо.

6.4.9 Нормальна температура експлуатації 20 ± 5 °C. Максимальне відхилення від нормальних умов 60 – 25 = 55 °C, що складає 5,5 разів по 10 °C. Округливши до більшого цілого 6 і врахувавши температурний коефіцієнт похибки $\pm 0,1\%/10$ °C, визначимо додаткову похибку перетворювача тиску як

$$\gamma_{\partial} = 0, 1 \cdot 6 = 0, 6\%.$$

Додаткову похибку перетворювача тиску переводимо у відносну форму за формулою (6.3), у яку підставляємо $X_H=0,1 \text{ кгс/см}^2$, $X_B=10 \text{ кгс/см}^2$, $X_{now}=0,5 \text{ кгс/см}^2$:

$$\delta_{\text{nr}_{\mathcal{A}}} = 0.6 \cdot \frac{10 - 0.1}{0.5} = 11,88\%$$

Аналогічно розраховуємо відносну похибку у точках X_{HOM} , що відповідають 5, 25, 50, 75 і 95 % від діапазону вимірів.

6.4.10 Додаткову похибку модуля аналогового введення необхідно перевести у відносну форму за формулою (6.3).

Розрахунок значення струму $I_{\text{ном}}$, мА, що відповідає номінальному значенню $X_{\text{ном}}$, проводимо згідно формули (5.5), у яку підставляємо $D_{\text{сигн.}}$ =16 мА, $X_{\text{ном}}$]=0,5 кгс/см²; $D_{\phi B}$ =9,9 кгс/см². Отже:

$$I_{HOM} = \frac{D_{CU2H.} \cdot X_{HOM}}{D_{\Phi B}} + 4 = \frac{16 \cdot 0.5}{9.9} + 4 = 4.8 \text{ MA.}$$

Результати розрахунків інших значень І_{ном} приведені в таблиці 6.5.

6.4.11 Визначаємо похибку модуля аналогового введення у відносній формі:

$$\delta_{\mathrm{K}_{4,1}} = 0.54 \cdot \frac{20 - 4}{4.8} = 1.8\%$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 – Результати розрахунків додаткової похибки

№ точки	$X_{\rm HOM},$ кгс/см 2	$I_{\text{ном}}$, м \mathbf{A}	Δ_{IIT} , %	$\delta_{K_{_{_{_{_{_}}}}}}$, %	$\delta_{BKp.y.},\%$	γ _{BK p.y.} , %
1	0,5	4,8	11,88	1,8	18,7	0,95
2	2,5	8	2,38	4,32	6,4	1,6
3	5	12	1,2	0,72	2,1	1,1
4	7,5	16	0,8	0,54	1,7	1,3
5	9,5	19,35	0,6	0,45	1,1	1,1

6.4.12 Обчислюємо похибку ВК тиску в робочих умовах:

$$_{BK}$$
 p.y. = 1,2 $\cdot \sqrt{(9,9)^2 + (0,33)^2 + (11,88)^2 + (1,8)^2} = 18,7\%$

Переводимо значення похибки ВК з відносної форми в приведену:

$$\gamma_{BK_{-}p.y._{1}} = \frac{18,7.0,5}{10-0,1} = 0,95\%$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 6.5.

6.4.13 Обираємо з таблиці 6.5 найбільше значення похибки: _{увк_р.у.}=1,6%.

6.5 Порядок оцінки невизначеності засобів вимірювання

6.5.1 Виразіть математично залежність між вимірюваною величиною Y і вхідними величинами X_i , від яких вона залежить: $Y=f(X_1, X_2, ..., X_N)$. Функція f повинна містити кожну величину, включаючи усі поправки і поправочні множники, які можуть внести значну складову в невизначеність результату виміру.

6.5.2. Визначте x_i – оцінене значення вхідної величини X_i на основі статистичного аналізу рядів спостережень або іншими засобами (дані із зовнішніх джерел, напрмер, величини, пов'язані з атестованими еталонами, стандартними зразками речовин і матеріалів або стандартними довідковими даними). У випадку використання результатів багатократних вимірів оцінкою вхідної величини є середнє значення згідно формули

$$\bar{c}_i = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n x_{ig},$$
 (6.12)

де x_{ig} – окремі спостереження для цієї вхідної величини.

6.5.3. Оцініть стандартну невизначеність $u(x_i)$ кожної вхідної оцінки x_i . Для вхідної оцінки, отриманої зі статистичного аналізу рядів спостережень і визначеної з *n* незалежних повторних спостережень X_{ik} (оцінка за типом A), стандартна невизначеність $u(x_i)$ її оцінки визначається як експериментальне стандартне відхилення середнього значення, рівне позитивному квадратному кореню з експериментальної дисперсії середнього, що визначається за допомогою формули

$$u(x_i) = u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{g=1}^n \left(x_{ig} - \overline{x_i}\right)^2} .$$
(6.13)

Для вхідної оцінки, отриманої іншими засобами, стандартна невизначеність $u(x_i)$ оцінюється на базі наукового судження, заснованого на усій доступній інформації можливої мінливості X_i (оцінка за типом В).

Використовувана для цього інформація може включати:

- дані попередніх вимірів;

- дані, отримані в результаті досвіду, або загальне знання про поведінку і властивості відповідних матеріалів і приладів;

- специфікації виготівника;

- дані, які наводяться у свідченнях про калібрування і в інших сертифікатах;

- невизначеності, приписувані довідковим даним, узятим з довідників.

6.5.4. Якщо значення яких-небудь вхідних величин корельовані, відповідне вираження для сумарної дисперсії, пов'язаної з результатом виміру, буде

$$u_{c}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} c_{i}^{2} u^{2}(x_{i}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} c_{i} c_{j} u(x_{i}) u(x_{j}) r(x_{i}, x_{j})$$
(6.14)

де $c_i = (df/dX_i); r(x_i, x_j) -$ коефіцієнт кореляції:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{k=1}^{n} (x_{ik} - \overline{x_i})(x_{jk} - \overline{x_j})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{ik} - \overline{x_i})^2 \sum_{k=1}^{n} (x_{jk} - \overline{x_j})^2}}.$$
 (6.15)

6.5.5. Розрахуйте результат виміру, тобто оцінку y вимірюваної величини Y з функціональній залежності f, використовуючи для вхідних величин X_i оцінки x_i , отримані на етапі 2 (див. п. 6.5.2).

6.5.6. Визначте сумарну стандартну невизначеність $u_c(y)$ результату виміру *y* зі стандартних невизначеностей і коваріацій, пов'язаних з вхідними оцінками. Сумарна стандартна невизначеність розраховується по формулі:

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right)^{2} u^{2}(x_{i})}, \qquad (6.16)$$

де $u(x_i)$ - стандартна невизначеність, оцінена, як описано в п. 6.5.3; $\frac{\partial f}{\partial x_i}$

- часткова похідна функції f по аргументу x_i.

Якщо вимір визначає одночасно більше за одну вхідну величину, розрахуйте їх коваріації (див. п. 6.5.4) і використайте формулу:

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_{i}} \frac{\partial f}{\partial x_{j}} u(x_{i}, x_{j})} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right)^{2} u^{2}(x_{i}) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i=1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_{i}} \frac{\partial f}{\partial x_{j}} u(x_{i}, x_{j})} .$$
(6.17)

6.5.7. Якщо вимагається дати розширену невизначеність U, чиєю метою є забезпечення інтервалу від y-U до y+U, в межах якого, імовірно, знаходиться велика частина розподілу значень, які можна з достатньою основою приписати вимірюваній величині Y, помножте сумарну стандартну невизначеність $u_c(y)$ на коефіцієнт охоплення k, що зазвичай знаходиться в діапазоні від 2 до 3, щоб отримати $U = k u_c(y)$. Виберіть k, виходячи з бажаного рівня довіри, потрібної для інтервалу. Прийняття k = 2 дає інтервал, що має рівень довіри приблизно 95 відсотків.

Тоді результат виміру зручно виражається як $Y = y \pm U$, це означає, що найкращою оцінкою значення, що приписується вимірюваній величині Y, є y, і що інтервал від y - U до y + U містить, можна чекати, велику частину розподілу значень, які можна з достатньою основою приписати Y. Такий інтервал також виражається у вигляді $y - U \le Y \le y + U$.

6.5.8. Повідомте результат виміру y разом з його сумарною стандартною невизначеністю $u_c(y)$ чи розширеною невизначеністю U, як розглянуто в п.п. 6.5.6 і 6.5. Опишіть, яким чином були отримані y і $u_c(y)$ або U.

6.6 Приклад розрахунку оцінки невизначеності виміру температури

6.6.1 Вихідні дані для розрахунку

6.6.1.1 В процесі вимірів було зроблено 30 спостережень, приведених у табл. 6.6.

6.6.1.2 Розрахункова величина поправки, необхідної для обліку впливу тепловідводу по корпусу термометра і термічного опору між чутливим елементом термометра і стінкою каналу металевого блоку, складає 0,025 °C. Невизначеність величини поправки з використанням теплового моделювання

лежить в межах від 0,005 до мінус 0,005 °С. Є підстави припускати, що густина імовірності невизначеності має рівномірний розподіл.

Номер	Результат	Номер	Результат	Номер	Результат
спостере-	спостереження	спостере-	спостереження	спостере-	спостереження
ження і	T_i , °C	ження і	T_i , °C	ження і	T_i , °C
1	160,751	11	160,743	21	160,756
2	160,733	12	160,755	22	160,771
3	160,728	13	160,761	23	160,770
4	160,775	14	160,749	24	160,755
5	160,750	15	160,750	25	160,744
6	160,762	16	160,748	26	160,747
7	160,750	17	160,755	27	160,750
8	160,766	18	160,768	28	160,753
9	160,751	19	160,771	29	160,742
10	160,748	20	160,745	30	160,749

Таблиця 6.6 – Результати спостережень

6.6.1.3 У свідоцтві перевірки використаного вимірювального приладу вказана його довірча погрішність, рівна 0,01 °C з імовірністю 0,95 (2σ).

6.6.2 У задачі розглядається випадок прямих вимірів, що не вимагає представлення вимірюваної величини у вигляді функціональної залежності. В цьому випадку невизначеність результату вимірів може бути представлена у вигляді суми невизначеностей, викликаних впливом різних чинників, які можуть бути визначені на основі усієї доступної інформації. При цьому можна припустити, що усі складові невизначеності не корельовані.

6.6.3 З умови задачі можна визначити наступні джерела невизначеності результату виміру:

а) випадкова складова показів термометра T_i , викликана випадковою зміною усіх можливих ефектів, що впливають на результат виміру;

б) неточність методу оцінки поправки, що вводиться для обліку впливу ефекту тепловідводу по корпусу термометра;

в) імовірнісний характер оцінки погрішності термометра.

6.6.4 Сумарна стандартна невизначеність u_{Σ} вимірів температури може бути описана наступним співвідношенням

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_a^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

де u_A – оцінка випадкової складової сумарної невизначеності результату виміру температури, що оцінюється за типом А; *u*_{B1} — оцінка складової невизначеності результату виміру температури, обумовлена невизначеністю поправки, що вводиться для обліку ефекту тепловідводу по корпусу термометра;

*u*_{B2} – оцінка складової невизначеності результату виміру температури, обумовлена невизначеністю оцінки погрішності термометра.

6.6.5 Невизначеність випадкової складової результату виміру температури, що оцінюється за типом А

6.6.5.1 Визначаємо оцінку результату вимірів температури в каналі металевого блоку, як середнє арифметичне з результатів 30 спостережень:

$$\overline{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_i = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} T_i = 160,7532$$

6.6.5.2 Визначаємо стандартну невизначеність *u*_A за типом А оцінки *T*

$$u_{A} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (T_{i} - \overline{T})^{2}}{n(n-1)}} = 0,002^{\circ}C.$$

6.6.5.3 Виправлене значення результату виміру температури у блоці, що враховує вплив тепловідводу, може бути отримано шляхом введення поправки

$$T$$
изм. = $T + \Delta T = 160,7532 + 0,025 = 160,7557$ °C.

6.6.6 Оцінки стандартних невизначеностей результату вимірів, викликані невизначенностями поправки, що вводиться для обліку ефекту тепловідводу і погрішності термометра, визначуваними за типом В

6.6.6.1 Оцінка невизначеності *u*_{B1} поправки, що вводиться для обліку ефекту впливу тепловідводу по корпусу термометра.

Із загальних міркувань і отриманих експериментальних даних відомо, що невизначеність величини поправки лежить в межах \pm 0,005 °C. Тобто, верхньою межею b_+ розподілу поправки є значення плюс 0,005 °C, а нижньою, b_- – мінус 0,005 °C. В цьому випадку стандартна невизначеність поправки u_{B1} може бути визначена із співвідношення:

$$u_{B1} = \frac{b_+ - b_-}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,005 - (-0,005)}{2 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,0015^{\circ} C$$

6.6.6.2 Оцінка невизначеності u_{B2} результату виміру, викликана імовірнісним характером оцінки погрішності термометра, виконується таким чином. У свідоцтві про повірку термометра вказана його довірча погрішність, рівна 0,01 °C з імовірністю 0,95, що відповідає коефіцієнту Ст'юдента

рівному величині 1,96. З цього виходить, що стандартна невизначеність термометра $u(\delta)$

$$u_{B2} = 0.01 / 1.96 \approx 0.005$$
 °C

де 1,96 – коефіцієнт Ст'юдента, що відповідає 95% рівню довіри для нормального розподілу.

6.6.7 Оцінка сумарної стандартної невизначеності

Вважаючи, що впливаючі чинники не коррелированны, оцінка сумарної стандартної невизначеності u_{Σ} може бути отримана у вигляді позитивного квадратного кореня з суми дисперсій:

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_{a}^{2} + u_{B1}^{2} + u_{B2}^{2}} = \sqrt{(0,002)^{2} + (0,0015)^{2} + (0,005)^{2}} \approx 0,006^{\circ} \text{C}$$

6.6.8 Відповідь: u_Σ = 0,006 °С.

6.7 Розрахунок невизначеності аналого-цифрового перетворення

6.7.1 На метрологічні властивості ВК комп'ютерно-інтегрованих АСК істотно впливають метрологічні властивості аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Похибка переведення вимірювальної інформації з аналогової форми в цифрову робить істотний вплив на невизначеність вимірів усього вимірювального каналу.

До таких основних похибок АЦП відносяться:

- похибка квантування, яка визначається зазвичай як половина одиниці молодшого розряду (ОМР);

- диференціальна нелінійність АЦП, яка викликається тим, що в різних діапазонах перетворення значення кроку квантування може мати невиключену систематичну похибка, визначувану в долях ОМР;

- напруга зсуву нуля, обумовлена зміщенням нуля компаратора АЦП і відхиленням опору першого резистора дільника опорної напруги від номінального значення;

- мультиплікативна похибка коефіцієнта перетворення АЦП, визначувана як різниця між дійсним і номінальним значеннями коефіцієнта перетворення;

- монотонність характеристики перетворення як незмінність напряму приросту вихідного сигналу при монотонній зміні вхідного сигналу за наявності шумів усередненого приросту, визначається як величина, залежна від ОМР, і характеризує непропажу кодів на виході АЦП;

- апертурна похибка (джитер) АЦП – це невизначеність амплітуди миттєвого значення сигналу внаслідок кінцевого (ненульового) часу перетворення аналогового сигналу в цифровий.

6.7.2 Розглянемо оцінку невизначеності АЦП на прикладі мікроконтролера ATmega164 [1]. Десятибітовий однокристальний АЦП мікроконтролера перетворює напругу 0...5 В за 2^N кроків. Похибки аналогоцифрового перетворення в документації мікроконтролера приведені по відношенню до одиниці молодшого розряду (англійською мовою Least Significant Bit – LSB), яка може бути вичислена за формулою:

$$LSB = V_{REF} / 2^N , \qquad (6.17)$$

де N – розрядність АЦП; V_{REF} – опорна напруга. Нижчий код відповідає 0, вищий 2^{N-1}.

6.7.3 Оскільки АЦП мікроконтролера ATmega164 працює за принципом послідовного наближення, той час перетворення істотно залежить від величини аналогового сигналу. Час перетворення – це час, за який на виході АЦП з'являється стійкий код, що відповідає вхідному сигналу. Для даного мікроконтролера ця величина лежатиме в межах 13...260 мс. Частота вибірки значення при максимальному значенні вхідного сигналу 15 кГц. Мікроконтролер АТmega164 має вісім мультиплексованих несиметричних вхідних каналів АЦП. Тут розглядається розрахунок невизначеності вимірів при виконанні вимірів одним каналом для отримання інформації про повільно протікаючі процеси з частотою не вище 1 кГц. Вхідний опір аналогового входу досить високий – 100 МОм для виконання більшості вимірів. У [1] приведені наступні похибки АЦП мікроконтролера АТmega164 при напрузі живлення V_{CC} = 4 В, опорній напрузі V_{REF} = 4 В і тактовій частоті 200 кГц:

- інтегральна нелінійність перетворення (INL) 1,1 LSB;
- диференціальна нелінійність перетворення (DNL) 0,3 LSB;
- похибка підсилювача (GE) 1,6 LSB;
- похибка зсуву (OE) мінус 1,5 LSB;
- похибка квантування (QE) 0,5 LSB.

6.7.4 За даними документації на ATmega164 температура довкілля несуттєво впливає на вольтамперну характеристику мікроконтролера. Отже, впливом температури на похибку перетворення можна нехтувати. Також при повільно протікаючих процесах можна не брати до уваги апертурну похибку.

6.7.5 Максимальні значення похибки нелінійності перетворення, пов'язані з алгоритмом перетворення в АЦП, розраховуємо з умови найгіршого можливого поєднання інтегральної і диференціальної нелінійності: $\delta_{NL} = INL + DNL$. Невизначеність, пов'язану з нелінійністю перетворення, обчислюємо, виходячи зі значення δ_{NL} у припущенні про рівномірний розподіл похибки. Оскільки величина похибки δ_{NL} визначається в долях LSB, то похибка вимірюваної величини Δ_{NL} буде рівною:

$$\Delta_{NL} = \delta_{NL} \frac{V_{REF}}{2^N} \tag{6.18}$$

6.7.6 Оцінку стандартної невизначеності за типом В визначаємо згідно формули:

$$\hat{u}_{B_{NL}} = \frac{\Delta_{NL}}{K(p)\sqrt{3}},\tag{6.19}$$

де K(p) – коефіцієнт, рівний 1,1 для імовірності p=0.95 і 1,4 для імовірності p=0.99.

6.7.7 Сумарна похибка посилення і зсуву δ_{GO} вихідного коду відносно вхідного сигналу є рівною $\delta_{GO} = GE + OE$. Оцінка стандартної невизначеності за типом В, пов'язана з посиленням і зсувом, визначається аналогічним чином:

$$\Delta_{GO} = \delta_{GO} \frac{V_{REF}}{2^{N}}; \ \hat{u}_{B_{GO}} = \frac{\Delta_{GO}}{K(p)\sqrt{3}}.$$
(6.20)

6.7.8 Абсолютні межі шуму квантування аналогово-цифрового перетворення дорівнюють половині одиниці молодшого розряду:

$$\Delta_O = 0.5 \cdot \text{LSB}. \tag{6.21}$$

Невизначеність квантування u_Q дорівнює межі похибки квантування, яка ділиться на коефіцієнт охоплення для рівномірного закону розподілу:

$$u_Q = \Delta_Q / \sqrt{3} . \tag{6.22}$$

6.7.9 У таблиці 6.7 приведений бюджет невизначеності аналоговоцифрового перетворення.

6.7.10 Сумарну невизначеність u_s вихідного коду визначаємо наступним чином:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} u_i^2(y)},$$
$$u_s = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{NL}}{K(p)\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{GO}}{K(p)\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\Delta_Q}{\sqrt{3}}}\right)^2}$$
(6.23)

Таблиця 6.7 – Бюджет невизначеності аналогово-цифрового перетворення

Вхідні величини	Оцінки вхідних	Стандартна не-	Розподіл
	величин	визначеність	імовірності
Похибка		$\sim \Delta_{\rm M}$	Рівномірний
нелінійності		$u_{B_{NL}} = \frac{NL}{V(N)}$	
перетворення		$K(p)\sqrt{3}$	
Похибка зсуву і		$\sim \Delta_{GO}$	Рівномірний
посилення		$u_{B_{GO}} = \frac{30}{K(p)\sqrt{3}}$	
Похибка		Δ_{α}	Рівномірний
квантування		$u_Q = \frac{Q}{\sqrt{3}}$	
Y	05 B	u(y)	Рівномірний

6.7.11 Розширену невизначеність розраховуємо з урахуванням коефіцієнта охоплення, величина якого визначається для рівномірного розподілу за величиною відношення $|u_2(y)/u_1(y)|$, що відповідає відношенню двох найбільших вкладів до бюджету невизначеності, при цьому $u_1(y) \ge u_2(y)$. Значення коефіцієнта охоплення k_B обираємо з таблиці 6.8.

Приведені в табл. 6.7 і 6.8 дані дозволяють розрахувати розширену невизначеність за формулою:

$$U = k_B u_s. \tag{6.24}$$

Таблиця 6.8 – Значення коефіцієнта охоплення при рівномірно розподілених вхідних величинах

$ u_2(y)/u_1(y) $	10,8	0,9	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
k_B	1,94	1,93	1,92	1,90	1,87	1,82	1,75	1,68

РОЗДІЛ 7. ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

7.1 Статичні характеристики вимірювальних каналів

7.1.1 Функціональна залежність вихідного сигналу у вимірювального засобу від вхідної величини х у статичному режимі роботи ЗВ називається його статичною характеристикою:

y = f(x) (7.1) Частіше за все залежність (7.1) представляють у вигляді полінома: $y=a_0+a_1x+a_2x^2+...+a_nx^n$, (7.2) де $a_0, a_1, a_2, ..., a_n$ - коефіцієнти статичної характеристики.

В ідеальному випадку всі коефіцієнти, крім a_1 , дорівнюють нулю, і статична характеристики має вигляд прямої $y=a_1x$, що проходить через початок координат з кутом, тангенс якого дорівнює a_1 .

Для багатьох засобів вимірювання статичну характеристику з достатньою для практичних цілей точністю представляють поліномом першого або другого степеня.

7.1.2 Аналітичним градуюванням називається операція визначення (відтворення) значення вимірювальної величини *x* за сигналом *y* вимірювальної інформації на виході ЗВ. Операцію аналітичного градуювання виконують, використовуючи градуювальну характеристику засобу вимірювання, яка є оберненою функцією його статичної характеристики:

 $x^{*=f^{-1}(y)}$, (7.3) де x^{*} – значення вимірюваної величини, яке, згідно градуювальній характеристиці ЗВ, відповідає значенню сигналу вимірювальної інформації *у*.

Градуювальна характеристика, або статична характеристика, наводиться в паспорті засобу вимірювання у вигляді аналітичної функції. Для ряду засобів вимірювання, наприклад, терморезисторів і термопар, градуювальну характеристику визначають експериментально і записують у паспорт у вигляді графіка або таблиці. Спосіб аналітичного градуювання при цьому полягає в апроксимації графічної або табульованої характеристики аналітичним виразом. Частіше за все як апроксимуючу функцію застосовують поліном не вище третього степеня.

7.1.3 Статичну або градуювальну характеристику вимірювального каналу можна знайти, якщо відомі відповідні характеристики компонентів, з яких складається канал. При послідовному з'єднанні N компонентів, коли вихідний сигнал попереднього компонента є вхідним сигналом наступного, а статичні характеристики компонентів представлені поліномом першого ступеня, статичну характеристику вимірювального каналу можна описати наступним рівнянням:

$$v = a_o + A_o \cdot x, \tag{7.4}$$

$$\text{ge } A_o = \prod_{i=1}^N A_i;$$

$$a_o = \sum_{i=1}^N (\prod_{j=i+1}^N A_i x_i) a_i, i = 1, 2, 3, \dots, N-1.$$

7.1.4 Приклади аналітичного визначення статичних і градуювальних характеристик

7.1.4.1 Гідростатичний рівнемір рідини перетворює значення вимірюваного рівня L у перепад тиску Δp між точками відбору імпульсів (у найбільш низькій точці апарата і над рівнем рідини):

 $\Delta p = s \rho L$,

де ρ – густина рідини, *s* – крутизна перетворення.

Перепад тиску лінійно перетворюється дифманометром у стандартний електричний сигнал. Статична характеристика описується рівнянням:

$$y = k_1 s \rho L, \tag{7.6}$$

де $k_1 = y_{\rm B}/\Delta p_{\rm B}$. Тут $y_{\rm B}$ – значення вихідного сигналу дифманометра, яке відповідає верхній межі вимірювання $\Delta p_{\rm B}$.

Номінальну статичну характеристику одержуємо з (7.6) при номінальному значенні густини ρ=ρ₀=const:

$$y = kL, \tag{7.7}$$

де $k = s\rho_0$ =const. Їй відповідає градуювальна характеристика

(7.8)

7.1.4.2 Канал вимірювання температури складається з наступних компонентів: термопари ХА(К), нормуючого перетворювача з вихідним сигналом 4...20 мА, електропневмоперетворювача з пневматичним вихідним сигналом 0,02...0,1 МПа і пневматичного вторинного приладу. Діапазон вимірюваних температур від 500 до 1000 °C.

 $L^* = v / k$.

Знайдемо статичні характеристики для кожного компонента вимірювального каналу.

7.1.4.3 За номінальною статичною характеристикою для термопари знаходимо термоЕРС, що відповідає нижній T_{μ} =500 °С і верхній T_{e} =1000 °С межам вимірювання. Отримаємо E_{μ} =20,64 мВ і E_{e} =41,269 мВ. Рівняння статичної характеристики термопари запишемо в наступній формі:

$$E = a_1 T_{\scriptscriptstyle H} + A_1 T \quad , \tag{7.9}$$

де *T* - поточне значення температури в діапазоні від 500 до 1000 °С.

Знайдемо параметри a_1 і A_1 :

$$a_1 = \frac{E_{\mu}}{T_{\mu}} = \frac{20,64}{500} = 0,04128 \,\mathrm{MB/^{\circ}C};$$
 (7.10)

117

$$A_{1} = \frac{E_{s} - E_{\mu}}{T_{s} - T_{\mu}} = \frac{41,269 - 20,64}{1000 - 500} = 0,04126 \text{ MB/°C.}$$
(7.11)

3 урахуванням (7.10) і (7.11) одержимо:

$$E = 20,64 + 0,04126 \cdot T - E_{_{H}} \text{ MB.}$$
(7.12)

7.1.4.4 Рівняння статичної характеристики нормуючого перетворювача має вигляд:

$$V = a_2 E_{_{H}} + A_2 E \quad . \tag{7.13}$$

Обчислимо параметри a_2 і A_2 :

$$a_2 = \frac{I_{\mu}}{E_{\mu}} = \frac{4}{20,64} = 0,1938 \text{ MA/MB};$$
 (7.14)

$$A_2 = \frac{I_{\kappa} - I_{\mu}}{E_{\kappa} - E_{\mu}} = \frac{20 - 4}{41,269 - 20,64} = 0,7756 \text{ MA/MB.}$$
(7.15)

3 урахуванням (7.14) і (7.15) маємо:

$$I = 4 + 0,7756 \cdot E - E_{\mu} \text{ MA.}$$
(7.16)

7.1.4.5 Статичну характеристику електропневмоперетворювача опишемо виразом

$$P = a_3 I_{\mu} + A_3 I \quad . \tag{7.17}$$

Обчислимо параметри a_3 i A_3 :

$$a_3 = \frac{P_n}{I_n} = \frac{0.02}{4} = 0.005 \,\mathrm{M}\Pi \mathrm{a/m}\mathrm{A};$$
 (7.18)

$$A_{3} = \frac{P_{\kappa} - P_{\mu}}{I_{\kappa} - I_{\mu}} = \frac{0.1 - 0.02}{20 - 4} = 0.005 \text{ M}\Pi a/\text{MA}.$$
 (7.19)

3 урахуванням (7.18) і (7.19) рівняння (7.17) приймає наступний вигляд: *P*=0,02+0,005 *I*-*P*_{*u*} МПа. (7.20)

7.1.4.6 Статична характеристика вторинного приладу починається з нуля й описується рівнянням

$$\Pi = A_4 \cdot P \,, \tag{7.21}$$

де П – покази приладу.

Шкала повинна бути відградуйована в одиницях вимірювання технологічного параметра, тобто в градусах. Оскільки діапазон вимірювання $T_e - T_{\mu} = 500$ °C, то параметр

$$A_4 = \frac{T_{\kappa} - T_{\mu}}{P_{\kappa} - P_{\mu}} = \frac{1000 - 500}{0.1 - 0.02} = 6250 \text{ °C/MIIa.}$$
(7.22)

3 урахуванням (7.22) для вторинного приладу маємо: $\Pi = 6250 \cdot P$. (7.23) 7.1.4.7 Знайдемо статичну характеристику вимірювального каналу. Обчислимо параметри a_0 і A_0 :

$$a_{0} = a_{1}A_{2}A_{3}A_{4}T_{\mu} - a_{2}A_{3}A_{4}E_{\mu} + a_{3}A_{4}I_{\mu} = = 0,04128 \cdot 0,7756 \cdot 0,005 \cdot 6250 \cdot 500 - -0,1938 \cdot 0,005 \cdot 6250 \cdot 20,64 + 0,005 \cdot 6250 \cdot 4 = 500; (7.24)$$

$$A_o = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 = 0,04126 \cdot 0,7756 \cdot 0,005 \cdot 6250 = 1,0.$$
(7.25)

З врахуванням (7.24) і (7.25) вираз для статичної характеристики каналу приймає вигляд

$$\Pi = a_o + A_o T = 500 + T - T_{_H} \,^{\circ} \text{C}. \tag{7.26}$$

7.2 Динамічні характеристики вимірювальних каналів

7.2.1 Теоретичні відомості

7.2.1.1 Більшість компонентів вимірювальних каналів, принцип роботи яких заснований на зрівноваженні зусиль із застосуванням інтегруючих властивостей, має динамічні властивості.

Якщо вхідна величина x(t) вимірювального каналу є функцією часу, то і вихідний сигнал y(t) також змінюється з плином часу. Залежність «вхідвихід» каналу від інерційних властивостей компонентів описується диференціальним рівнянням:

$$b_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) = ax(t).$$
(7.27)

Коефіцієнти b_0 , …, b_n залежать від внутрішніх властивостей (інерції, пружності, тертя тощо) компонентів, в той час як коефіцієнт a – від зовнішніх причин і коефіцієнта підсилення.

7.2.1.3 Первинні вимірювальні перетворювачі можуть являти собою підсилювальну ланку (діафрагми, датчики електромагнітних витратомірів, радіоізотопні датчики, ультразвукові та ін.), аперіодичну ланку першого чи другого порядку (манометричні датчики температури, термометри опору, термопари, більшість датчиків для аналізу газів і рідин), коливальну ланку з загасанням (буйкові і поплавкові рівнеміри, ротаметри, пружинні манометри та ін.).

7.2.1.4 Нормуючі перетворювачі володіють дуже малої інерційністю і їх можна розглядати як підсилювальну ланку. Значна кількість проміжних перетворювачів (дифманометри, силові перетворювачі: зусилля-тиск, зусилля-струм, тиск-струм, струм-тиск, частота-тиск та ін.), а також вторинні прилади (потенціометри, мости, пневматичні прилади) відносяться до коливальних ланок. 7.2.1.5 За певних умов у вимірювальному каналі можуть виникати незатухаючі чи слабо затухаючі коливання. Канал вважається налагодженим у динамічному відношенні, якщо при подачі на вхід одиничного ступінчастого впливу вихідний сигнал робить не більш двох повних коливань.

Забезпечення заданої якості перехідного процесу каналу досягається шляхом введення різних зворотних зв'язків у компонентах, що є джерелами виникнення коливань. Так, наприклад, у потенціометрах, мостах і інших пристроях, у яких використовуються підсилювачі, застосовують негативний зворотний зв'язок з коефіцієнтом, що змінюється (рис. 7.1, а). Для заспокоєння силових перетворювачів і приладів застосовують різні демпфуючі пристрої. Вони являють собою диференцюючі ланки, включені в зворотний зв'язок (рис. 7.1, б).



Рис. 7.1 - Структурні схеми компонентів вимірювального каналу

Передатна функція (ПФ) для схеми рис. 7.1, а) має вигляд:

$$W(S) = \frac{\frac{1}{K_{3.c.}}}{\frac{T_2^2 S^2}{K_n K_{3.c.}} + \frac{T_1 S}{K_n K_{3.c.}} + 1}.$$
 (7.28)

З теорії автоматичного управляння відомо, що ланка другого порядку буде коливальною, якщо відношення $T_1/T_2 < 2$. Для рівняння (7.28) маємо

$$\left(\frac{T_1}{K_n K_{3.c.}}\right) \left| \left(\frac{T_2}{\sqrt{K_n K_{3.c.}}}\right) \ge 2.$$
(7.29)

З умови (7.29) можна визначити коефіцієнт *К*_{з.с.}, при якому це відношення буде близьким до 2:

$$K_{_{3,c.}} \approx \frac{4}{K_n} (T_2 / T_1)^2.$$
 (7.30)

ПФ для схеми рис. 7.1, б) буде наступною:

$$W(S) = \frac{K_n}{(1+K_n) \left[\frac{T_2^2}{(1+K_n)} S^2 + \frac{(T_1+T_o)}{(1+K_n)} S + 1 \right]}.$$
 (7.31)

Приймаючи, що K_n =const, з умови $T_1/T_2 \approx 2$ для рівняння (7.31) маємо

$$\left[\frac{(T_1+T_{\delta})}{(1+K_n)}\right] \left/ \left(\frac{T_2}{\sqrt{1+K_n}}\right) \approx 2.$$
(7.32)

3 (7.32) знаходимо сталу демпфування
$$T_{\partial}$$
:
 $K_n T_{\partial} = 2T_2 \sqrt{1 + K_n} - T_1.$ (7.33)

7.2.1.6 У такий спосіб при дослідженні динамічних характеристик ВК необхідно розв'язати задачу вибору $K_{3.c.}$ чи T_{∂} , які забезпечують задану якість перехідного процесу. Постійні часу і коефіцієнти передачі вимірювальних нормуючих і проміжних перетворювачів, а також вторинних приладів приведені у Додатку К.

7.2.1.7 Амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) вимірювального каналу можна знайти за формулою:

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^{N} A_i(\omega) , \qquad (7.34)$$

де $A_i(\omega)$ – АЧХ *i*-го компоненту каналу.

7.2.1.8 Фазочастотна характеристика (ФЧХ) вимірювального каналу:

$$(\omega) = \sum_{i=1}^{N} (-1)\varphi_i(\omega), \qquad (7.35)$$

де $\varphi_i(\omega) - \Phi \Psi X i$ -го компонента.

7.2.1.9 Для розрахунку перехідного процесу необхідно знайти дійсну частотну характеристику (ДЧХ), приймаючи до уваги, що

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + j\operatorname{Im}(\omega) = A(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)} .$$
(7.36)

Розрахунок кривої перехідного процесу зручно виконувати на комп'ютері з використанням пакету Simulink системи MATLAB.

7.2.2 Приклад розрахунку динамічних характеристик

7.2.2.1 Розрахунок ведеться для каналу, що описаний в п. 7.1.4.2. Використовуючи паспортні дані компонентів каналу або інформацію з Додатку К, знаходимо передатні функції компонентів ІВК:

а) ПФ термопари ХА(К) у захисному чохлі

$$W_1(S) = \frac{K_1}{(T_1S+1)(T_2S+1)} = \frac{0.96}{(30S+1)(5S+1)}$$

б) ПФ нормуючого перетворювача

$$W_2(S) = K_2 = 0,7786;$$

в) ПФ електропневмоперетворювача

$$W_3(S) = \frac{K_3}{T_2^2 S^2 + T_1 S + 1} = \frac{0.8}{6S^2 + 2.5S + 1};$$
122

в) ПФ вторинного пневматичного приладу

$$W_4(S) = \frac{K_4}{T_2^2 S^2 + T_1 S + 1} = \frac{1,3}{5,29S^2 + 2S + 1}.$$

Аналіз передатних функцій компонентів показує, що електропневмоперетворювач і вторинний прилад є коливальними ланками. Для заспокоєння електропневмоперетворювача використовуємо рідинний демпфер з ПФ

$$W_{3\partial}(S) = T_{3\partial} \cdot S$$

а для заспокоєння вторинного приладу пневматичний диференціатор, що представляє собою реальну диференцюючу ланку з ПФ

$$W_{4\partial}(S) = \frac{T_{4\partial}S}{0,1 \cdot T_{4\partial}S + 1}.$$

7.2.2.2 Для електропневмоперетворювача скористаємося рівнянням (7.33) і обчислимо постійну диференціювання $T_{3\varrho}$:

$$T_{3\partial} = (2 \cdot 6 \cdot \sqrt{1 + 0.8} - 2.5) / 0.8 \approx 17 \ c$$

7.2.2.3 Знайдемо сталу демпфування для вторинного приладу

$$T_{4\partial} = (2 \cdot 5,29\sqrt{1+1,672} - 2)/1,672 = 9,1$$
 c.

7.2.2.4 Перехідний процес розраховується з допомогою пакету Simulink системи МАТLAB. Побудуємо динамічну модель вимірювального каналу, як показано на рис. 7.2.



Рис. 7.2 - Структурна схема моделі вимірювального каналу

В цій моделі ПФ термопари представлена двома блоками: "Термопара" та "Термопара2". Також двома блоками ("Демпфер" та "Демпфер2") представлена передатна функція демпфера електропневмоперетворювача.

На вході моделі стоїть блок-джерело "Step", що формує збурення у вигляді ступінчастого сигналу. Параметри блоку встановлюються так, щоб вимірювана температура змінювалась стрибком з 500 °C до 550 °C. Момент стрибка обирається таким, щоб на цей час закінчились перехідні процеси після запуску моделі. 7.2.2.5 Крива перехідного процесу будується блоком XYGraph. На його вхід "Х" подається сигнал від блока-джерела Clock ("Таймер" на рис. 7.3), що формує координату часу графіка перехідного процесу.

Результат моделювання показаний на рис. 7.3.



Рис. 7.3 – Графік перехідного процесу вимірювального каналу

Як видно з графіка перехідного процесу, ВК має значну інерційність. Для її зменшення до припустимого рівня можна підібрати інші компоненти каналу, користуючись інформацією з Додатку К.

РОЗДІЛ 8. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ КОНТРОЛЮ СПРАВНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Однією з важливіших характеристик технічного пристрою є стратегія підтримки його технічного стану при експлуатації, яка вибирається на етапі проектування. Особливо це стосується систем автоматики, які мають складну структуру й велику кількість елементів. Для вибору раціональної стратегії необхідно мати як математичні моделі, так і алгоритми розрахування показників ефективності використання технічного пристрою.

У монографії [44] розглянута задача комбінованого контролю справності технічного пристрою при агрегатному методі ремонту.

Нехай S = {S₁, S₂, S₃} групи параметрів технічного пристрою, які відрізняються видом контролю. S₁ – група параметрів, що контролюються безперервно. S₂ – параметри, що контролюються із заданою періодичністю. S₃ – параметри, що не контролюються на протязі всього терміну експлуатації.

Для комбінованого контролю справності введено вісім станів технічного пристрою: E_1 – працездатний стан; E_1 , E_4 – відновлення працездатності через відхилення від норм параметрів S_1 , S_2 ; E_3 , E_5 – проведення робот з відновлення, що викликані хибним сигналом про несправність за параметрами S_1 , S_2 ; E_6 , E_7 , E_8 – прихована відмова по параметрам S_1 , S_2 , S_3 відповідно.

Позначимо λ_i – інтенсивність відмов по і-ої групі параметрів, μ_i – інтенсивність відновлень з-за відмов по і-ої групі параметрів, а T – час експлуатації.

Якщо мають місце похибки контролюючою апаратури, то інтенсивність відновлень $\mu_1 = \mu_2$ і $\mu_2 = \mu_4$, λ_{11} – інтенсивність відмов контролюючої апаратури з ознакою «прихована відмова», а λ_{12} – інтенсивність відмов контролюючої апаратури з ознакою «помилкова відмова».

8.1 Неперервний контроль справності

8.1.1 Ідеальний контроль у повному обсязі описаний у ряді робот [45, 46, 47, 48].

Для безперервного контролю $S_2 = \emptyset$. Покладемо початок відліку часу t_0 рівним нулю. Ймовірність перебування у стані E_1

$$R_1(t) = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_1} e^{-(\mu_1 + \lambda_1)t},$$

а коефіцієнт готовності

$$K_{\rm r} = \frac{\mu_{\rm 1}}{\mu_{\rm 1} + \lambda_{\rm 1}} + \frac{\lambda_{\rm 1}}{T(\mu_{\rm 1} + \lambda_{\rm 1})^2} \left[1 - e^{-(\mu_{\rm 1} + \lambda_{\rm 1})T} \right]$$

8.1.2 Контроль в повному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і однакової інтенсивністю відновлення

В цьому випадку стани пристрою – (E₁, E₂, E₃), $\lambda_3 = \lambda_{12} = 0$, $\mu_1 = \mu_3$. Визначимо $\lambda_1^{\circ} = \lambda_1 + \lambda_{12}$.

Ймовірність знаходження пристрою в момент t в стані E₁ за умови, що в початковий момент він знаходиться в стані E₁, визначаються за формулами:

$$R_{1}(\mathbf{t}) = \frac{\mu_{1}}{\mu_{1} + \lambda_{1}^{2}} + \frac{\lambda_{1}}{\mu_{1} + \lambda_{2}^{2}} e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{2})\mathbf{t}},$$

$$R_{2}(\mathbf{t}) = \frac{\lambda_{1}^{2}}{\mu_{1} + \lambda_{1}^{2}} [1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{2}^{2})\mathbf{t}}],$$

$$R_{3}(\mathbf{t}) = \frac{\lambda_{1}}{\mu_{1} + \lambda_{1}^{2}} [1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{2}^{2})\mathbf{t}}],$$
a на інтервалі тривалістю *T* котовності
$$K_{r} = \frac{\mu_{2}}{\mu_{2} + \lambda_{2}^{2}} + \frac{\lambda_{1}^{2}}{T(\mu_{1} + \lambda_{2}^{2})^{2}} [1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{2})T}].$$
При $\frac{\lambda_{1}^{2}}{\mu_{1}} \ll 1$

$$K_{r} > 1 - \frac{\lambda_{1}^{2}}{\mu_{1}} + \frac{\lambda_{1}^{2}}{T(\mu_{1} + \lambda_{2}^{2})^{2}} [1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{2})T}].$$
(8.1)
При $\frac{\lambda_{2}^{2}}{\mu_{1}} \ll 1$

$$H = \frac{\mu_{2}\lambda_{1}^{2}}{\mu_{1} + \lambda_{1}^{2}} T - \frac{\mu_{2}\lambda_{2}^{2}}{(\mu_{1} + \lambda_{2}^{2})^{2}} [1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{2})T}].$$
(8.1)
При $\frac{\lambda_{2}^{2}}{\mu_{1}} \ll 1$

$$H < \lambda_{1}^{\alpha} T \left(1 - \frac{1}{\mu_{1}T}\right).$$
Середня сумарна тривалість відновлень $T_{B} = \frac{\mu}{\mu_{1}}.$
8.1.3 Контроль в повному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і різної інтенсивністю відновлення
Відмінність від попереднього випадку полягає в допущенні $\mu_{1} \neq \mu_{3}$
Визначимо
$$s_{1} = 0,$$

$$s_{2}^{-1} = -\lambda_{1}^{\alpha},$$

$$s_{2} = 0,5 \left[-(\mu_{1} + \mu_{2} + \lambda_{1}^{\alpha}) + \sqrt{\lambda_{1}^{\alpha}{}^{2} + (\mu_{1} - \mu_{2})^{2} + 2(\lambda_{1} - \lambda_{11})(\mu_{1} - \mu_{2})} \right],$$

$$s_{4} = 0,5 \left[-(\mu_{1} + \mu_{2} + \lambda_{1}^{\alpha}) - \sqrt{\lambda_{1}^{\alpha}{}^{2} + (\mu_{1} - \mu_{2})^{2} + 2(\lambda_{1} - \lambda_{11})(\mu_{1} - \mu_{2})} \right],$$

$$r = \mu_{1}\mu_{2} + \mu_{1}\lambda_{11} + \mu_{2}\lambda_{1}.$$
Termi

Тоді

$$\begin{split} R_{1}(t) &= \frac{\mu_{1}\mu_{8}}{r} + \frac{(\mu_{1} + s_{8})(\mu_{8} + s_{5})}{s_{8}(s_{8} - s_{4})} e^{s_{9}t} + \frac{(\mu_{1} + s_{4})(\mu_{8} + s_{4})}{s_{4}(s_{4} - s_{8})} e^{s_{4}t}, \\ R_{2}(t) &= \frac{\lambda_{1}\mu_{3}}{r} + \frac{\lambda_{1}(\mu_{8} + s_{3})}{s_{8}(s_{8} - s_{4})} e^{s_{8}t} + \frac{\lambda_{1}(\mu_{4} + s_{4})}{s_{4}(s_{4} - s_{8})} e^{s_{4}t}, \\ R_{2}(t) &= \frac{\lambda_{11}\mu_{1}}{r} + \frac{\lambda_{11}(\mu_{1} + s_{2})}{s_{2}(s_{2} - s_{4})} e^{s_{8}t} + \frac{\lambda_{11}(\mu_{1} + s_{4})}{s_{4}(s_{4} - s_{2})} e^{s_{4}t}. \\ R_{2}(t) &= \frac{\mu_{1}\mu_{3}}{r} - \frac{(\mu_{1} + s_{3})(\mu_{3} + s_{3})}{Ts_{2}^{2}(s_{3} - s_{4})} (1 - e^{s_{8}T}) - \frac{(\mu_{1} + s_{4})(\mu_{3} + s_{4})}{Ts_{4}^{2}(s_{4} - s_{2})} (1 - e^{s_{4}T}). \\ H_{2}(t) &= 0 \text{ відновлень 3 інтенсивністю } \mu_{1} \end{split}$$

$$H^{(\mu_{1})} = \lambda_{1} \mu_{1} \left[\frac{T\mu_{2}}{r} - \frac{\mu_{2} + s_{2}}{s_{2}^{2}(s_{2} - s_{4})} (1 - e^{s_{2}T}) - \frac{\mu_{2} + s_{4}}{Ts_{4}^{2}(s_{4} - s_{2})} (1 - e^{s_{4}T}) \right]$$
(8.2)

Число відновлень з інтенсивністю µ₃

$$H^{(\mu_{3})} = \lambda_{11} \mu_{3} \Big[\frac{T\mu_{1}}{r} - \frac{\mu_{1} + s_{3}}{s_{3}^{2}(s_{3} - s_{4})} (1 - e^{s_{3}T}) - \frac{\mu_{1} + s_{4}}{Ts_{4}^{2}(s_{4} - s_{3})} (1 - e^{s_{4}T}) \Big]$$
(8.3)

8.1.4 Контроль в повному обсязі з помилками типу «прихована відмова» ~

Стани пристрою – (E₁, E₂, E₆),
$$\lambda_{11} = \lambda_3 = \mu_3 = 0$$
,
 $s_1 = -\lambda_1$,
 $s_2 = 0,5 \left[-(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_{12}) + \sqrt{(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_{12})^2 - 4\mu_1\lambda_{12}} \right]$, (8.4)
 $s_3 = 0,5 \left[-(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_{12}) - \sqrt{(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_{12})^2 - 4\mu_1\lambda_{12}} \right]$.
Ймовірності перебування пристрою у станах:
 $R_1(t) = \frac{\lambda_{12}(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_2)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{(\mu_1 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)}{(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_2)} e^{s_2 t} + \frac{(\mu_1 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)}{(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_2)} e^{s_2 t}$,
 $R_2(t) = \frac{\lambda_1}{(s_2 - s_3)} (e^{s_2 t} - e^{s_3 t})$,
 $R_2(t) = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_2)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1\lambda_{12}(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_2)} e^{s_2 t} + \frac{\lambda_1\lambda_{12}(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_2)} e^{s_3 t}$.
 $K_r = \frac{1}{T} \left[\frac{\lambda_{12}(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_2)} (1 - e^{\lambda_1 T}) - \frac{(\mu_1 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)}{s_2(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_2)} (1 - e^{s_2 T}) - \frac{(\mu_1 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)}{s_2(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_2)} (1 - e^{s_2 T}) \right]$.
Середне число відновлень

$$H = \lambda_1 \mu_1 \left[\frac{(1 - e^{\mu_2 T})}{a_2 (a_2 - a_2)} + \frac{1 - e^{\mu_3 T}}{a_2 (a_2 - a_2)} \right].$$
(8.5)
127

8.1.5 Ідеальний контроль в неповному обсязі Пристрій може перебувати в станах (E_1, E_2, E_8), $\lambda_{11} = \lambda_{12} = \mu_3 = 0$. Имовірності знаходження пристрою у станах:

$$\begin{split} R_{1}(t) &= \frac{\lambda_{1}\mu_{1}}{(\lambda_{1} + \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})} + \frac{\lambda_{1}\mu_{1}}{(\mu_{1} - \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})}e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1})t} \\ &+ \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} - \lambda_{1} - \lambda_{3})}{(\lambda_{1} + \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{1})}e^{-(\lambda_{1} + \lambda_{2})t}, \\ R_{2}(t) &= \frac{\lambda_{1}}{\mu_{1} + \lambda_{1}}\left[1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1})t}\right], \\ R_{3}(t) &= \lambda_{3}\left[\frac{\mu_{1}}{(\lambda_{1} + \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})} - \frac{\lambda_{1}}{(\mu_{1} - \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})}e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1})t} - \frac{(\mu_{1} - \lambda_{1} - \lambda_{3})}{(\lambda_{1} + \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{2})}e^{-(\lambda_{1} + \lambda_{3})t}\right], \\ R_{5}(t) &= \frac{\lambda_{1}\mu_{1}}{(\lambda_{1} + \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})} + \frac{\lambda_{1}\mu_{1}}{T(\mu_{1} - \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1})^{2}}\left[1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1})T}\right] \\ &+ \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} - \lambda_{1} - \lambda_{3})}{T(\lambda_{1} + \lambda_{3})^{2}(\mu_{1} - \lambda_{3})}\left[1 - e^{-(\lambda_{1} + \lambda_{3})T}\right]. \\ L_{\text{DIS}}(\lambda_{1} + \lambda_{2}) \ll \mu_{1} \\ \end{split}$$

 $K_r > 1 - \frac{n_{B^2}}{2} + \frac{n_1}{T\mu_1^2} - \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)\mu_1} + \frac{1}{2\mu_1}$ Число відновлень визначається згідно з формулами: $\lambda_* \mu_* (-1) = 1 - \frac{1}{r_*} - \frac{-(\mu_1 + \lambda_2)T_1}{2}$

$$\begin{split} H &= \frac{\lambda_1 \mu_1}{\mu_1 + \lambda_1} \Big\{ T - \frac{1}{\mu_1 + \lambda_1} \Big[1 - e^{-(\mu_1 + \lambda_1)T} \Big] \Big\} \\ H &< \lambda_1 T \Big(1 - \frac{1}{\mu_1 T} \Big). \end{split}$$

8.1.6 Контроль в неповному обсязі з помилками типу «помилковий відмова» і однаковою інтенсивністю відновлення

В цьому випадку $\lambda_{12} = 0$, $\mu_1 = \mu_3$. Стани пристрою – (E₁, E₂, E₃, E₈). Визначимо ймовірності перебування пристрою у станах:

$$\begin{split} R_{1}(t) &= \frac{\lambda_{1}^{a}\mu_{1}}{(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})} + \frac{\lambda_{1}^{a}\mu_{1}}{(\mu_{1} - \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})}e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})t} \\ &+ \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{a} - \lambda_{2})}{(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{3})}e^{-(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})t}, \\ R_{2}(t) &= \frac{\lambda_{1}}{(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})}[1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})t}], \\ R_{3}(t) &= \frac{\lambda_{1}\mu_{1}}{(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})}[1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})t}], \\ R_{3}(t) &= \frac{\lambda_{2}\mu_{1}}{(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})} - \frac{\lambda_{1}^{a}\lambda_{2}}{(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})(\mu_{1} - \lambda_{3})}e^{-(\mu_{1} + \lambda_{1}^{a})t} \\ &- \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{a} - \lambda_{3})}{(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{3})}e^{-(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{3})t}. \end{split}$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{\lambda_{1}^{s} \mu_{1}}{(\lambda_{1}^{s} + \lambda_{2})(\mu_{1} + \lambda_{1}^{s})} + \frac{\lambda_{1}^{s} \mu_{1}}{T(\mu_{1} - \lambda_{2})(\mu_{1} + \lambda_{1}^{s})^{2}} \begin{bmatrix} 1 - e^{-(\mu_{1} + \lambda_{2}^{s})T} \end{bmatrix} \\ + \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{s} - \lambda_{2})}{T(\lambda_{1}^{s} + \lambda_{2})^{2}(\mu_{1} - \lambda_{2})} \begin{bmatrix} 1 - e^{-(\lambda_{1}^{s} + \lambda_{2})T} \end{bmatrix}.$$
Коли $(\lambda_{1}^{s} + \lambda_{2}) \ll \mu_{1}$
 $K_{r} > 1 - \frac{\lambda_{8}T}{2} + \frac{\lambda_{1}^{s}}{T\mu_{1}^{2}} - \frac{\lambda_{1}^{s2} + \lambda_{2}^{s}}{(\lambda_{1}^{s} + \lambda_{8})\mu_{1}} + \frac{T\lambda_{8}^{s}}{2\mu_{1}}.$
Число відновлень визначається згідно з формулою (8.1)

8.1.7 Контроль в неповному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і різною інтенсивністю відновлення

В цьому випадку $\lambda_{12} = 0, \mu_1 \neq \mu_3.$ Визначимо:

$$\begin{split} s_{1} = 0, \\ s_{2} = -\lambda_{1}^{2}, \\ s_{2} = 0,5 \begin{bmatrix} -(\mu_{1} + \mu_{2} + \lambda_{1}^{2}) + \sqrt{\lambda_{1}^{2}{}^{2} + (\mu_{1} - \mu_{2})^{2} + 2(\lambda_{1} - \lambda_{11})(\mu_{1} - \mu_{3})} \\ -(\mu_{1} + \mu_{2} + \lambda_{1}^{2}) - \sqrt{\lambda_{1}^{2}{}^{2} + (\mu_{1} - \mu_{2})^{2} + 2(\lambda_{1} - \lambda_{11})(\mu_{1} - \mu_{3})} \\ \\ \tilde{M} \text{ мовірності знаходження пристрою у станах:} \\ R_{1}(t) = \frac{\lambda_{1}^{\alpha} \mu_{1} \mu_{3}}{(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{2})r} + \frac{(\lambda_{1}^{\alpha} + s_{3})(\mu_{1} + s_{3})(\mu_{3} + s_{3})}{s_{2}(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{2} + s_{2})(s_{2} - s_{4})} e^{s_{2}t} \\ + \frac{(\lambda_{1}^{c} + s_{4})(\mu_{1} + s_{4})(\mu_{2} + s_{4})}{s_{4}(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3} + s_{4})(s_{4} - s_{3})} e^{s_{4}t} \\ + \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{\alpha} - \lambda_{2})(\mu_{3} - \lambda_{1}^{\alpha} - \lambda_{3})}{(\lambda_{1}^{c} + \lambda_{3})(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3} + s_{3})(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3} + s_{4})} e^{-(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{5})t}, \\ R_{2}(t) = \frac{\lambda_{1}\mu_{3}}{r} + \frac{\lambda_{1}(\mu_{1} + s_{3})}{s_{5}(s_{2} - s_{4})} e^{s_{2}t} + \frac{\lambda_{1}(\mu_{2} + s_{4})}{s_{4}(s_{4} - s_{3})} e^{s_{4}t}, \\ R_{3}(t) = \frac{\lambda_{1}\mu_{3}}{(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3})r} + \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} + s_{2})(\mu_{2} + s_{3})}{s_{2}(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3} + s_{3})(s_{2} - s_{4})} e^{s_{2}t} \\ + \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} + s_{4})(\mu_{3} + s_{4})}{s_{4}(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{2} + s_{4})(s_{2} - s_{4})} e^{s_{2}t} \\ - \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{\alpha} - \lambda_{2})(\mu_{2} - \lambda_{1}^{\alpha} - \lambda_{2})}{(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{3})(s_{3} - \lambda_{1}^{\alpha} - \lambda_{3})} e^{-(\lambda_{1}^{\alpha} + \lambda_{2})t}, \\ \end{array}$$

Коефіцієнт готовності

$$\begin{split} K_{\rm r} &= \frac{\lambda_1^{\rm u} \mu_1 \mu_3}{(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_3) r} - \frac{(\lambda_1^{\rm u} + s_8)(\mu_1 + s_8)(\mu_3 + s_8)}{s_8^2 (\lambda_1^{\rm u} + \lambda_8 + s_8)(s_8 - s_4) T} (1 - e^{s_8 T}) \\ &- \frac{(\lambda_1^{\rm u} + s_4)(\mu_1 + s_4)(\mu_8 + s_4)}{s_4^2 (\lambda_1^{\rm u} + \lambda_8 + s_4)(s_4 - s_8) T} (1 - e^{s_4 T}) \\ &+ \frac{\lambda_3 (\mu_1 - \lambda_1^{\rm u} - \lambda_3)(\mu_3 - \lambda_1^{\rm u} - \lambda_3)}{(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_8 + s_8)(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_8 + s_4)} [1 - e^{-(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_8) T}] \end{split}$$

Значення Н обчислюються за формулами (8.2), (8.3).

8.1.8 Контроль в неповному обсязі з помилками типу «прихована відмова»

В цьому випадку $\lambda_{11} = 0$. Стани пристрою – (E₁, E₂, E₆, E₈). Величина s_{ℓ} визначаеться згідно з (8.4). Ймовірності знаходження пристрою у станах: $R_1(t) = \frac{(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + s_2)(s_2 - s_3)} e^{s_2 t} + \frac{(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_3)(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + s_2)(s_2 - s_3)} e^{s_2 t} + \frac{(\mu_1 - \lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_{12} - \lambda_3)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + s_3)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t},$ $R_2(t) = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \lambda_2 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + s_3)} e^{s_2 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_{12}(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_3)} e^{s_2 t},$ $R_6(t) = 1 - \frac{\lambda_{12}(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_3)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_{12}(\mu_1 + s_2)}{s_2(\lambda_1 + s_2)(s_2 - s_3)} e^{s_2 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_{12}(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + s_2)(\lambda_1 + s_3)} e^{s_2 t},$ $R_8(t) = \frac{\lambda_{12}(\mu_1 - \lambda_1)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + s_3)(\lambda_1 + s_3)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)(\mu_1 + s_2)}{(\lambda_1 + \lambda_3 + s_2)(\lambda_1 + s_3)} e^{s_2 t} + \frac{\lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_{12} + s_3)(\mu_1 + s_3)}{(\lambda_1 + \lambda_3 + s_2)(\lambda_1 + s_3)} e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t},$ Koeфinieht rorobhocti $K_{\Gamma} = \frac{1}{T} \left[-\frac{(\mu_1 + s_2)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_2)}{(s_2(\lambda_1 + \lambda_3 + s_2))(s_2 - s_3)} (1 - e^{s_2 T}) - \frac{(\mu_1 + s_3)(\lambda_1 + \lambda_{12} + s_3)}{(\lambda_1 + \lambda_3 + s_2)(s_2 - s_3)} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t}) \right].$

Число відновлень визначається згідно з формулою (8.5).

8.1.9 Контроль в повному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і «прихована відмова» з однаковою інтенсивністю відновлення.

Стани пристрою – (E_1, E_2, E_3, E_6) . Визначимо

$$z = \prod_{\substack{i=1, i\neq j \\ 2}}^{n} (s_i - s_j),$$

$$s_1 = \mu_1 + \lambda_1^{\alpha}, s_2 = \frac{\lambda_1^{\alpha} + \lambda_{12}}{2} [\sqrt{1 - \frac{4\lambda_1 \lambda_{12}}{(\lambda_1^{\alpha} + \lambda_{12})^2}} + 1, s_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_{12} \mu_1}{s_1 s_2}.$$

Имовірності перебування пристрою у станах:

$$R_{1}(t) = \sum_{i=1}^{s} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{12} + s_{i})}{z} e^{s_{i}t},$$

$$R_{2}(t) = \sum_{i=1}^{s} \frac{\lambda_{1}(\lambda_{1}^{u} + s_{i})}{z} e^{s_{i}t}$$

$$R_{3}(t) = \sum_{i=1}^{s} \frac{\lambda_{11}(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{12} + s_{i})}{z} e^{s_{i}t}$$

$$R_{6}(t) = 1 + \sum_{i=1}^{s} \frac{\lambda_{1}\lambda_{12}(\mu_{1} + s_{i})}{s_{i}z} e^{s_{i}t}.$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{1}{T} \Biggl[-\sum_{i=1}^{3} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{e} + \lambda_{12} + s_{i})}{s_{i}z} (1 - e^{s_{i}T}) \Biggr].$$

Середнє число відновлень:

$$H = -\sum_{1}^{2} \frac{\mu_{1}[\lambda_{1}^{a}(\lambda_{1}^{a} + s_{1}) + \lambda_{11}\lambda_{12}]}{\nu_{1}a} (1 - e^{s_{1}T}).$$
(8.6)

8.1.10 Контроль в повному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і «прихована відмова» з різною інтенсивністю відновлення Визначимо:

$$\begin{split} s_1 &= \mu_2 + \lambda_{11}, \\ s_2 &= \mu_1 + \lambda_1, \ s_3 = \frac{\lambda_1^2 + \lambda_{12}}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4\lambda_1 \lambda_{12}}{(\lambda_1^2 + \lambda_{12})^{2^2}}} \, s_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_{12} \mu_1 \mu_2}{s_1 s_2 s_3} \right] \\ z_4 &= \prod_{i=1, i \neq i}^4 \left(s_i - s_j \right). \end{split}$$

Ймовірності знаходження пристрою у станах:

$$R_{1}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\mu_{2} + s_{i})(\lambda_{1}^{a} + s_{i})}{z_{4}} e^{s_{i}t},$$

$$R_{2}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{1}(\mu_{2} + s_{i})(\lambda_{1}^{a} + s_{i})}{z_{4}} e^{s_{i}t}$$

$$R_{2}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{11}(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{a} + \lambda_{12} + s_{i})}{z_{4}} e^{s_{i}t}$$

$$R_{3}(t) = 1 + \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{1}\lambda_{12}(\mu_{1} + s_{i})(\mu_{2} + s_{i})}{s_{i}z_{4}} e^{s_{i}t}.$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{\rm r} = \frac{1}{T} \left[-\sum_{1}^{4} \frac{(\mu_1 + s_l)(\mu_2 + s_l)(\lambda_1^{\rm e} + \lambda_{12} + s_l)}{s_l z_4} (1 - e^{s_l T}) \right]$$

Середнє число відновлень:

$$H^{(\mu_1)} = -\sum_{1}^{4} \frac{\mu_1 \lambda_1 (\lambda_1^{u} + s_l) (\mu_2 + s_l)}{s_l z_a} (1 - e^{z_l T}), \qquad (8.7)$$

$$H^{(\mu_{3})} = -\sum_{1}^{4} \frac{\mu_{3} \lambda_{11} (\lambda_{1}^{0} + \lambda_{12} + s_{l}) (\mu_{1} + s_{l})}{s_{l} z_{4}} (1 - e^{s_{l} T}).$$
(8.8)

8.1.11 Контроль в неповному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і «прихована відмова» з однаковою інтенсивністю відновлення

Стани пристрою – $(E_1, E_2, E_3, E_6, E_8)$.

Имовірності перебування пристрою у станах:

$$\begin{split} R_{1}(t) &= \sum_{i=1}^{5} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{n} + s_{i})(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{12} + s_{i})}{z(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{3} + s_{i})} e^{s_{i}t} + \\ &+ \frac{\lambda_{3}(\lambda_{12} - \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{1}^{n} - \lambda_{3})}{\prod_{i=1, i\neq j}^{3}(s_{i} + \lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})} e^{-(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})t}, \\ &+ \frac{\lambda_{3}(\lambda_{12} - \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{1}^{n} - \lambda_{3})}{\prod_{i=1, i\neq j}^{3}(s_{i} + \lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})} e^{-(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})t}, \\ &R_{2}(t) = \sum_{i=1}^{3} \frac{\lambda_{1}(\lambda_{1}^{n} + s_{i})}{z} e^{s_{i}t}, \\ &R_{3}(t) = \sum_{i=1}^{3} \frac{\lambda_{11}(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{12} + s_{i})}{z} e^{s_{i}t}, \\ &R_{6}(t) = 1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{\lambda_{1}\lambda_{12}(\mu_{1} + s_{i})}{s_{i}z} e^{s_{i}t}, \\ &R_{8}(t) = \sum_{i=1}^{3} \frac{\lambda_{2}(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{12} + s_{i})}{(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{2} + s_{i})z} e^{-(\lambda_{1} + \lambda_{2})t} \frac{R_{8}(t)}{\prod_{i=1, d\neq i}^{3}(s_{i} + \lambda_{1}^{n} + \lambda_{12})} e^{-(\lambda_{1} + \lambda_{2})t}. \\ &K_{0}e\phiinientr rorobhocrii \\ &K_{r} = \frac{1}{T} \Biggl[-\sum_{i=1}^{3} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{n} + s_{i})(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{12} + s_{i})z}{s_{i}(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{2} + s_{i})z} (1 - e^{s_{i}T}) \\ &+ \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} - \lambda_{1}^{n} - \lambda_{3})(\lambda_{12} - \lambda_{3})}{(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{2})\prod_{i=1}^{3}(s_{i} + \lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})} [1 - e^{-(\lambda_{1}^{n} + \lambda_{3})T}] \Biggr]. \end{split}$$

Середнє число відновлень визначається згідно з формулою (8.6).

8.1.12 Контроль в неповному обсязі з помилками типу «помилкова відмова» і «прихована відмова» з різною інтенсивністю відновлення Стани пристрою – (E₁, E₂, E₃, E₆, E₈). Имовірності знаходження пристрою у станах:

$$R_{1}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{(\mu_{1} + s_{i})(\mu_{3} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{12} + s_{i})}{(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{3} + s_{i})z_{4}} e^{s_{i}t} +$$

$$+ \frac{\lambda_{3}(\lambda_{12} - \lambda_{3})(\mu_{1} - \lambda_{1}^{u} - \lambda_{3})(\mu_{3} - \lambda_{1}^{u} - \lambda_{3})}{\prod_{i=1, i\neq j}^{4}(s_{i} + \lambda_{1}^{u} + \lambda_{3})} e^{-(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{3})t},$$

$$R_{2}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{1}(\mu_{3} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + s_{i})}{z_{4}} e^{s_{i}t}$$

$$R_{3}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{11}(\mu_{1} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{12} + s_{i})}{z_{4}} e^{s_{i}t}$$

$$R_{6}(t) = 1 + \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{1}\lambda_{12}(\mu_{1} + \theta_{i})(\mu_{3} + \theta_{i})}{s_{4}} e^{s_{i}t}.$$

$$R_{8}(t) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\lambda_{3}(\mu_{1} + s_{i})(\mu_{3} + s_{i})(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{12} + s_{i})}{(\lambda_{1}^{u} + \lambda_{3} + s_{i})z_{4}} e^{s_{i}t}.$$

$$+\frac{\lambda_3(\lambda_{12}-\lambda_3)(\mu_1-\lambda_1^{\mathfrak{n}}-\lambda_3)(\mu_3-\lambda_1^{\mathfrak{n}}-\lambda_3)}{\prod_{i=1,i\neq i}^4(s_i+\lambda_1^{\mathfrak{n}}+\lambda_3)}e^{-(\lambda_1^{\mathfrak{n}}+\lambda_3)t}.$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{\rm r} = \frac{1}{T} \left[-\sum_{1}^{4} \frac{(\lambda_1^{\rm u} + s_i)(\mu_1 + s_i)(\mu_3 + s_i)(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_{12} + s_i)}{(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_3 + s_i)s_i z_4} (1 - e^{s_i T}) - \frac{\lambda_3(\mu_1 - \lambda_1^{\rm u} - \lambda_3)(\mu_3 - \lambda_1^{\rm u} - \lambda_3)(\lambda_{12} - \lambda_3)}{(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_3)\prod_{i=1}^{4} (s_i + \lambda_1^{\rm u} + \lambda_3)} [1 - e^{-(\lambda_1^{\rm u} + \lambda_2)T}] \right].$$

Середнє число відновлень визначається за формулами (8.7), (8.8).

8.2 Періодичний контроль справності

На практиці не завжди вдається здійснювати неперервний контроль за поведінкою частини параметрів, що визначають його працездатність, або відмови за параметрами групи S_1 можуть бути настільки рідкісні, що враховувати їх в моделі процесу експлуатації недоцільно. Можуть бути випадки, коли провести безперервний контроль параметрів групи S_1 неможливо. В математичних моделях, що розглядаються нижче, прийнята умова: $S_1 = \emptyset$.

8.2.1 Ідеальний контроль у повному обсязі В цьому випадку $\lambda_3 = \lambda_{21} = \lambda_{22} = \mu_4 = 0$. Стани пристрою – (E₁, E₄, E₇), Позначимо t $\mathbf{t_k} < \mathbf{t} \leq \mathbf{t_{k+1}}, \mathbf{k} \geq \mathbf{1}, \mathbf{k}$ – номер перевірки, $\mathbf{k} = \overline{\mathbf{1}, \mathbf{N}}$. Перевірка починається у момент $\mathbf{t'_k}$, а закінчується у момент $\mathbf{t_k}$. Тривалість міжперевірочного інтервалу $\boldsymbol{\theta_k} = \mathbf{t'_k} - \mathbf{t_{k-1}}$. Передбачається, що $\mathbf{t_k}$ і $\mathbf{t'_k}$, - невипадкові величини, що обрані стадії проектування.

Матриця перехідних ймовірностей

$$A(t) = \begin{vmatrix} a_{11}(t) & 0 & a_{17}(t) \\ a_{41}(t) & a_{44}(t) & a_{47}(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$
(8.9)

де

Матриця

$$a_{11}(t) = e^{-\lambda_2 t},$$

$$a_{17}(t) = 1 - a_{11}(t),$$

$$a_{41}(t) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\mu_2 t}),$$

$$a_{44}(t) = e^{-\mu_2 t},$$

$$a_{47}(t) = 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\mu_2 t} - \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}.$$
перехідних ймовірностей *B* за час перевірки
$$B = \begin{bmatrix} p_2 & q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

де p_2 – ймовірність безвідмовної роботи пристрою за час перевірки, а q_2 – ймовірність його відмови за час перевірки.

Имовірності перебування у різних станах R₁ знаходяться за формулами:

$$\begin{split} R_{1}(t) &= R_{1}(t_{k-1})a_{11}(t - t_{k-1}) + R_{4}(t_{k-1})a_{41}(t - t_{k-1}) \\ &= R_{1}(t_{k-1})e^{-\lambda_{2}(t - t_{k-1})} + R_{4}(t_{k-1})\frac{\mu_{2}}{\mu_{2} - \lambda_{2}}[e^{-\lambda_{2}(t - t_{k-1})} \\ &- e^{-\mu_{2}(t - t_{k-1})}], \\ &R_{4}(t) = R_{4}(t_{k-1})e^{-\mu_{2}(t - t_{k-1})}, \\ &R_{1}(t) = R_{1}(t_{k-1})a_{11}(t - t_{k-1}) + R_{4}(t_{k-1})a_{41}(t - t_{k-1}) = \\ &= R_{1}(t_{k-1})e^{-\lambda_{2}(t - t_{k-1})} + R_{4}(t_{k-1})\frac{\mu_{2}}{\mu_{2} - \lambda_{2}}[e^{-\lambda_{2}(t - t_{k-1})} - e^{-\mu_{2}(t - t_{k-1})}], \end{split}$$

Ймовірності станів пристрою в довільний момент часу t знаходяться наступним чином:

$$R(t) = R(t_0) \prod_{j=1}^{k-1} U_j V_j A(t - t_{j-1}),$$

де R(t), $R(t_0)$ – матриці ймовірностей станів пристрою в моменти t і t_0 відповідно.

U₁ – матриці ймовірностей проведення ј-ої планової перевірки справності,

$$U_j = \|U_j \quad \overline{U}_j\|, \ \overline{U}_j = 1 - U_j,$$

$$V_{j} = \|V_{1j} \quad V_{2j}\|^{T}, V_{1j} = A(\theta_{j})B, V_{2j} = A(\theta_{j} + \tau_{j})$$

Тут Т – знак транспонування.

А і *В* – матриці ймовірностей переходів в міжперевірочний період і при перевірці.

 $R(t_k)$ можна знаходити за допомогою рекурентних формул. Позначимо $R_i(t_{k-1})$ як R_i а $a_{i,j}(t_k)$ як $a_{i,j}$ тоді

$$\begin{aligned} R_1(t_j) &= (1 - U_j q_2) (R_1 a_{11} + R_4 a_{41}), \\ R_4(t_j) &= R_1 U_j (1 - a_{11} p_2) + R_4 [U_j (a_{41} q_2 + a_{47}) + a_{44}] + R_7 U_j, \\ R_7(t_j) &= (1 - U_j) (R_1 a_{17} + R_4 a_{47} + R_7). \end{aligned}$$

Тут

$$U_{j} = R_{1}(t_{j-1}'') + R_{7}(t_{j-1}'')$$

де

$$t_j^{"} = t_j + \tau_{j+1}, \le t_j^{"} < t_{j+1}'.$$

Коли т_і « θ_i :

$$K_{\rm r} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N+1} \left\{ \frac{1 - e^{-\lambda_2 \theta_j}}{\lambda_2} \left[R_1(t_{j-1}) + R_4(t_{j-1}) \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} \right] - \frac{R_4(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-\mu_2 \theta_j}}{\mu_2 - \lambda_2}}{R_4(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-\mu_2 \theta_j}}{\mu_2 - \lambda_2}} \right\}.$$
(8.10)

Середнє число відновлень:

$$\mathbf{H} = \sum_{j=1}^{N+1} R_4(t_{j-1}) (1 - e^{-\mu_2 \theta_j}). \tag{8.11}$$

Середня сумарна тривалість відновлень $T_{\mathbf{p}} = \frac{H}{\mu_{\mathbf{r}}}$.

8.2.2 Контроль у повному обсязі з помилками типу «помилкова відмова»

В цьому випадку $\lambda_3 = \lambda_{22} = 0$. Стани пристрою – (E₁, E₄, E₅, E₇).

У матриці A(t) $a_{14} = a_{15} = a_{45} = a_{54} = a_{71} = a_{74} = a_{75} = 0$, $a_{77} = 1$. Інші елементи першого і другого рядків матриць визначаються за формулами (8.9), $a_{51} = a_{41}$, $a_{55} = a_{44}$, $a_{57} = a_{47}$.

У матриці B при відсутності збоїв $\mathbf{b_{11}} = \mathbf{p_2}\mathbf{p_{21}}, \mathbf{b_{14}} = \mathbf{q_2}, \mathbf{b_{15}} = \mathbf{p_2}\mathbf{q_{21}}, \mathbf{b_{44}} = \mathbf{b_{55}} = \mathbf{b_{74}} = \mathbf{1}$, інші елементи переходу дорівнюють нулю.

Ймовірності станів можливо визначити за допомогою наступних рекурентних формул:

$$\begin{aligned} R_1(t_j) &= [1 - U_j(1 - p_2 p_{21})](R_1 a_{11} + R_4 a_{41} + R_5 a_{51}), \\ R_4(t_j) &= R_1 U_j(1 - a_{11} p_2) + R_4 [a_{44} + U_j(a_{41} q_2 + a_{47})] + R_5 (U_j a_{51} q_2 + a_{57}) \\ R_5(t_j) &= R_1 a_{11} p_2 q_{21} + R_4 U_j a_{41} p_2 q_{21} + R_5 (U_j a_{51} p_2 q_{21} + a_{55}), \\ R_7(t_j) &= (1 - U_j)(R_1 a_{17} + R_4 a_{47} + R_5 a_{57} + R_7). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 135 \end{aligned}$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N+1} \left\{ \frac{1 - e^{-\lambda_{2}\theta_{j}}}{\lambda_{2}} \left[R_{1}(t_{j-1}) + R_{4}(t_{j-1}) + R_{5}(t_{j-1}) \frac{\mu_{2}}{\mu_{2} - \lambda_{2}} \right] - \frac{1 - e^{-\mu_{2}\theta_{j}}}{\mu_{2} - \lambda_{2}} \left[(R_{4}(t_{j-1}) + R_{5}(t_{j-1})) \right] \right\}.$$

Середнє число відновлень:

$$H - \sum_{j=1}^{n+1} [R_4(t_{j-1}) + R_5(t_{j-1})](1 - e^{-\mu_0 \theta_j}).$$

Коли µ₄ ≠ µ₂, то

$$a_{51}(t) = \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 \theta_j} - e^{-\mu_4 \theta_j}),$$

$$a_{55}(t) = e^{-\mu_4 \theta_j},$$

$$a_{57}(t) = 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_4 - \lambda_2} e^{-\mu_4 \theta_j} - \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 \theta_j}).$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N+1} \left\{ \frac{1 - e^{-\lambda_{2}\theta_{j}}}{\lambda_{2}} \left[R_{1}(t_{j-1}) + R_{4}(t_{j-1}) \frac{\mu_{2}}{\mu_{2} - \lambda_{2}} + R_{5}(t_{j-1}) \frac{\mu_{4}}{\mu_{4} - \lambda_{2}} \right] - R_{4}(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-\mu_{2}\theta_{j}}}{\mu_{2} - \lambda_{2}} - R_{5}(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-\mu_{4}\theta_{j}}}{\mu_{4} - \lambda_{2}} \right\}.$$

Середнє число відновлень:

$$\begin{aligned} H^{(\mu_2)} &= \sum_{j=1}^{N+1} R_4(t_{j-1}) \left(1 - e^{-\mu_2 \theta_j} \right), \\ H^{(\mu_4)} &= \sum_{j=1}^{N+1} R_5(t_{j-1}) \left(1 - e^{-\mu_4 \theta_j} \right). \end{aligned}$$
(8.12)

8.2.3 Контроль у повному обсязі з помилками типу «прихована відмова»

Стани пристрою – (Е₁, Е₄, Е₇). Матриця *А* аналогічна матриці (8.9).

У матриці **В**:

$$b_{11} = p_2, \ b_{14} = q_2 p_{22}, \ b_{17} = q_2 q_{22}, \ b_{18} = p_2 p_{21} q_3, \\ b_{74} = p_{22}, \ b_{77} = q_{22}.$$

Ймовірності перебування у станах:

$$R_{1}(t_{j}) = (1 - U_{j}q_{2})(R_{1}a_{11} + R_{4}a_{41}),$$

$$R_{4}(t_{j}) = R_{1}U_{j}p_{22}(1 - a_{11}p_{2}) + R_{4}[a_{44} + U_{j}(a_{41}q_{2}p_{22} + a_{47}p_{22})] + R_{7}U_{j}p_{2},$$

$$R_{7}(t_{j}) = R_{1}[U_{j}a_{11}q_{2}q_{22} + a_{17}(1 - U_{j}p_{22})] + R_{4}[U_{j}a_{41}q_{2}q_{22} + a_{47}(1 - U_{j}p_{22})] + R_{7}(1 - U_{j}p_{2}).$$

Коефіцієнт готовності та середнє число відновлень визначаються з виразів (8.10) – (8.11).

136

8.2.4 Ідеальний контроль у неповному обсязі Стани пристрою – (Е₁, Е₄, Е₇, Е₈). Елементи матриці *А* визначаються за формулами:

$$a_{11}(t) - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t}, a_{14}(t) = 0, \qquad (8.14)$$

$$a_{41}(t) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2 - \lambda_3} [e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} - e^{-\mu_2 t}], \qquad (8.15)$$

$$a_{44}(t) = e^{-\mu_2 t}$$

$$a_{47}(t) = 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\mu_2 t} - \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}.$$

$$(8.16)$$

$$a_{47}(t) = 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\mu_2 t} - \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}.$$

$$(8.17)$$

$$(8.17)$$

$$(8.17)$$

$$a_{48}(t) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\mu_2}{\mu_2 - \lambda_2 - \lambda_3} e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} + \frac{\mu_2 \lambda_3}{(\mu_2 - \lambda_2 - \lambda_3)(\mu_2 - \lambda_2)} e^{-\mu_2 t}.$$
(8.18)
$$a_{71}(t) = a_{74}(t) = a_{78}(t) = 0, a_{77}(t) = 1,$$
(8.19)

$$a_{91}(t) = a_{94}(t) = 0, a_{97}(t) = 1 - e^{-\lambda_2 t}, a_{99}(t) = e^{-\lambda_2 t}.$$
 (8.20)

У матриці B $b_{11} = p_2 p_3$, $b_{14} = q_2$, $b_{18} = p_2 q_3$, $b_{44} = b_{54} = 1$, $b_{07} = q_2$, $b_{00} = p_2$.

Имовірності перебування у станах:

$$\begin{split} R_1(t_j) &= [1 - U_j(1 - p_2 p_3)](R_1 a_{11} + R_4 a_{41}), \\ R_4(t_j) &= R_1 U_j(a_{11} q_2 + a_{17}) + R_4 [a_{44} + U_j(a_{41} q_2 + a_{47})] + U_j(R_7 + R_8 a_{87}), \\ R_7(t_j) &= R_1 [a_{17} - U_j(a_{17} - a_{18} q_2)] + R_4 [a_{47} - U_j(a_{47} - a_{48} q_2) + R_7 (1 - U_j) + R_8 [a_{87} - U_j(a_{87} - a_{88} q_2)], \\ R_8(t_j) &= R_1 [a_{18} - U_j(a_{18} q_2 - a_{11} p_2 q_3)] + R_4 [a_{48} - U_j(a_{48} q_2 - a_{41} p_2 q_3)] \\ &+ R_0 a_{99} (1 - U_f q_2). \end{split}$$

Величина **U**₁ визначається за формулою:

$$U_{j} = R_{1}(t_{j-1}^{\prime\prime}) + R_{7}(t_{j-1}^{\prime\prime}) + R_{0}(t_{j-1}^{\prime\prime}).$$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N+1} \{ R_{1}(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-(\lambda_{2} + \lambda_{2})\theta_{j}}}{\lambda_{2} + \lambda_{3}} + R_{4}(t_{j-1}) \frac{\mu_{2}}{\mu_{2} - \lambda_{2} - \lambda_{3}} \left[\frac{(1 - e^{-(\lambda_{2} + \lambda_{2})\theta_{j}})}{(\lambda_{2} + \lambda_{3})} - \frac{1 - e^{-\mu_{2}\theta_{j}}}{\mu_{2}} \right] \}.$$
(8.21)

Середнє число відновлень визначається за формулою (8.11).

8.2.5 Контроль у неповному обсязі з помилками типу «помилкова відмова»

Стани пристрою – $(E_1, E_4, E_5, E_7, E_8)$. Елементи матриці A, крім елементів третього рядку, визначаються з виразів (8.14) – (8.20), а елементи третього рядку – з наступних виразів:

$$\begin{aligned} a_{51}(t) &= \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3} [e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} - e^{-\mu_4 t}], \\ a_{55}(t) &= e^{-\mu_4 t}, \\ a_{37}(t) &= 1 + \frac{\lambda_2}{\mu_4 - \lambda_2} e^{-\mu_4 t} - \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{58}(t) &= \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\mu_4}{\mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3} e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} + \\ &+ \frac{\mu_4 \lambda_3}{(\mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3)(\mu_4 - \lambda_2)} e^{-\mu_4 t}. \end{aligned}$$
Y матриці **B**:
$$\begin{aligned} b_{11} &= p_2 p_{21} p_3, \ b_{14} &= q_2, \ b_{15} &= p_2 q_{21}, \ b_{18} &= p_2 p_{21} q_3, \ b_{44} &= b_{55} &= b_{74} = 1, \\ b_{84} &= q_2, \ b_{85} &= p_2 q_{21}, \ b_{88} &= p_2 p_{21}. \end{aligned}$$
Ймовірності знаходження пристрою у станах:
$$\begin{aligned} R_1(t_j) &= [1 - U_j(1 - p_2 p_{21} p_3)](R_1 a_{11} + R_4 a_{41} + R_5 a_{51}), \\ R_4(t_j) &= R_1 U_j [a_{17} + q_2(1 - a_{17})] + R_4 [a_{44} + U_f(a_{47} + q_2 a_{41} + q_2 a_{42})] \\ &+ R_5 U_f [a_{57} + q_2 (a_{51} + a_{50})] + R_7 + R_0 U_j (a_{07} + q_2 a_{00}), \end{aligned}$$
 $R_5(t_j) - R_1 U_j p_2 q_{21} (a_{11} + a_{13}) + R_4 p_2 q_{21} (a_{11} + a_{43}) \\ &+ R_5 [a_{55} + U_j p_2 q_{21} (a_{51} + a_{58})] + R_8 U_j p_2 q_{21} a_{88}, \end{aligned}$
 $R_7(t_j) = (1 - U_j)(R_1 a_{17} + R_4 a_{47} + R_5 a_{57} + R_8 a_{87}),$
 $R_8(t_j) = R_1 \{a_{18} - U_j [a_{18}(1 - p_2 p_{21}) - a_{11} p_2 p_{21} q_2]\} \\ &+ R_4 \{a_{48} - U_j [a_{59}(1 - p_2 p_{21}) - a_{51} p_2 p_{21} q_3]\} \\ &+ R_8 a_{88}[(1 - U_j (1 - p_2 p_{21})]]. \end{aligned}$

Коефіцієнт готовності

$$K_{r} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N+1} \{R_{1}(t_{j-1}) \frac{1 - e^{-(\lambda_{2} + \lambda_{2})\theta_{j}}}{\lambda_{2} + \lambda_{3}} + R_{4}(t_{j-1}) [\frac{\mu_{2}[1 - e^{-(\lambda_{2} + \lambda_{2})\theta_{j}}]}{(\mu_{2} - \lambda_{2} - \lambda_{3})(\lambda_{2} + \lambda_{2})} - \frac{1 - e^{-\mu_{2}\theta_{j}}}{\mu_{2} - \lambda_{2} - \lambda_{3}}] + R_{5}(t_{j-1}) [\frac{\mu_{4}[1 - e^{-(\lambda_{2} + \lambda_{2})\theta_{j}}]}{(\mu_{4} - \lambda_{2} - \lambda_{3})(\lambda_{2} + \lambda_{2})} - \frac{1 - e^{-\mu_{4}\theta_{j}}}{\mu_{4} - \lambda_{2} - \lambda_{3}}]\}.$$

Середнє число відновлень визначається за формулами (8.12) і (8.13).

8.2.6 Контроль у повному обсязі з помилками типу «прихована відмова»

Стани пристрою – (E₁, E₄, E₇, E₈). Елементи матриці A визначаються з виразів (8.14) – (8.20).

Елементи матриці **В**:

$$b_{11} = p_2 p_3, \ b_{14} = q_2 p_{22}, \ b_{17} = q_2 q_{22}, \\ b_{18} = p_2 q_3, \\ b_{44} = 1, \\ b_{74} = p_{22}, \ b_{77} = q_{22}, \\ b_{84} = q_2 p_{22}, \ b_{87} = q_2 q_{22}, \\ b_{88} = p_2.$$

Имовірності знаходження пристрою у станах:

 $R_1(t_j) = [1 - U_j(1 - p_2 p_3)](R_1 a_{11} + R_4 a_{41}),$

$$\begin{split} R_4(t_j) &= R_1 U_j p_{22}[(a_{11} + a_{18})q_2 + a_{17}] \\ &+ R_4 \{a_{44} + U_j p_{22}[(a_{47} + q_2(a_{41} + a_{48})]\} + R_7 U_j p_{22} \\ &+ R_8 U_j p_{22} (q_2 + p_2 a_{87}), \\ R_7(t_j) &= R_1 \{a_{17} - U_j [a_{17} p_{22} - q_2 q_{22}(a_{11} + a_{18})]\} + R_4 \{a_{47} - U_j [a_{47} p_{22} \\ &- q_2 q_{22}(a_{41} + a_{48})]\} + R_7 (1 - U_j p_{22}) \\ &+ R_8 [a_{81} - U_j (a_{87} p_{22} - a_{88} q_2 q_{22})], \\ R_8(t_j) &= R_1 [a_{18} - U_j (a_{18} q_2 - a_{11} p_2 q_2) + R_4 \{a_{48} - U_j (a_{48} q_2 - a_{41} p_2 q_2) + R_8 (1 - U_j q_2). \end{split}$$

Коефіцієнт готовності визначається за формулою (8.21), а середнє число відновлень – за формулою (8.11).

8.2.7 Вибір характеристик контролю справності пристрою

Як критерії оптимальності характеристик контролю використовують зазвичай інформаційні характеристики [49, 50], вартість контролю [51, 52], ефективність експлуатації пристрою, її вартість та інші.

Розглянемо приклади вибору деяких характеристик контролю з використанням наведених вище математичних моделей.

Припустимо, що пристрій складається з множини Э елементів, стан яких визначається сукупністю Ω параметрів. Для кожного параметра відома підмножина елементів (Э₁), справність яких може бути виявлена при контролі цього параметра. Оптимальну стратегію контролю параметрів можна визначити з умови

 $C(\pi^*) = \min_{p(\pi^*), \pi^* \in \Pi} C(\pi),$

або

$$P(\pi^*) = \max_{C(\pi^*), \pi^* \in \Pi} P(\pi),$$

де $C(\pi)$, $P(\pi)$ - вартість, ефективність експлуатації з сукупністю стратегій контролю параметрів π , Π - область допустимих рішень.

Нехай, наприклад, у пристрої є чотири елементи ($\{\mathbf{p}_i\}, \mathbf{i} - \overline{\mathbf{1}}, \mathbf{4}$, справність характеризується чотирма параметрами ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$).

Технічно можливо здійснити безперервний контроль, який охоплює наступні елементи:

 $\omega_1 - (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_4), \omega_2 - (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2), \omega_3 - (\mathfrak{Z}_2, \mathfrak{Z}_3), \omega_4 - (\mathfrak{Z}_2, \mathfrak{Z}_4).$

Для контролю кожного параметра потрібне створення контролюючої апаратури у складі: $D_1 - (d_1, d_2)$, $D_2 - (d_2, d_3, d_5)$, $D_3 - (d_3, d_4, d_6)$, $D_4 - (d_1, d_4)$.

Аналізуємо сукупність стратегій контролю $\pi = (\pi_1), ge$

$$\pi_1 - \omega_1$$

 $\begin{array}{l} \pi_2-\omega_2,\pi_3-\omega_3,\pi_4-\omega_4,\pi_5-\omega_1\cup\omega_2,\pi_6-\omega_1\cup\omega_3,\pi_7-\omega_1\cup\omega_4,\pi_8-\omega_2\cup\omega_3,\pi_9-\omega_2\cup\omega_4,\pi_{10}-\omega_3\cup\omega_4. \end{array}$

Вартість вузлів контролюючої апаратури: $c(d_1) = 80, c(d_2) = 20, c(d_3) = 15, c(d_4) = 20, c(d_5) = 30, c(d_6) = 10, пристрою c_n = 1000.$

Інтенсивності відновлення $\mu_1 = 10 1/p$, $\mu_2 = 20 1/p$, призначений термін експлуатації $T_0 = 5$ років.

Ефективність експлуатації оцінюється ймовірністю виконання завдання Р, а вартість експлуатації визначається відповідно до виразу:

$C = c_1 + c_n H_1 + c_2 H_2 + c_2 (T_{\mathbf{B}_1} + T_{\mathbf{B}_2}) + c_0 P,$

де c_1 – вартість контролю, c_2 – вартість усунення однієї помилкової несправності, c_2 – вартість одиниці часу робіт по відновленню справного стану, $T_{\mathbf{B}_1}$ і $T_{\mathbf{B}_2}$ – середня тривалість робіт по усуненню істинної і помилкової несправності, $c_0 P$ – втрати з- за неможливості використання пристрою за призначенням. Характеристики пристрою, апаратури, що контролює, ефективності експлуатації наведені у таблиці (8.1).

Таблиця 8.1. Розрахунок впливу стратегії контролю на ефективність використання пристрою

Характеристика					Страте	гія контро	лю			
стратегії	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}
$\lambda_1 \times 100$	7	5	3	5	8	10	9	7	10	6
$\lambda_3 \times 100$	3	5	7	5	2	0	1	3	0	4
$\lambda_{11} \times 100$	7	9	7	5	11	14	10	11	14	9
$\lambda_{12} \times 100$	5	3	5	7	7	10	8	6	10	9
	<i>D</i> ₁	D_2	D ₃	D_4	$d_{1}, d_{2},$	$d_1, d_2,$	$d_{1}, d_{2},$	$d_2, d_3,$	$d_1, d_2,$	$d_{1}, d_{3},$
Склад КА					d_3, d_5	$d_{3}, d_{4},$	d_4	d_{4}, d_{5} ,	$d_{3}, d_{4},$	d_{4}, d_{6}
						d_6		d_6	d_5	
Вартість КА (c_3)	100	65	45	100	145	145	120	9 5	165	125
Вартість	20	13	0	20	20	20	24	10	23	25
контролю	20	15		20	29	29	24	19	25	25
Kr	0,922	0,894	0,855	0,884	0,935	0,957	0,948	0,922	0,957	0,900
C										
P = 0,9	405	318	367	364	509	631	534	421	639	381
P = 0,95	580	627	726	686	605	631	547	595	639	682

При P = 0,9 оптимальною сукупністю контрольованих параметрів є π_2 , а при P = 0,95 – π_7 . Якщо ефективність експлуатації оцінювати коефіцієнтом готовності, а у вартості експлуатації не враховувати с₀, то для Кгтр \geq 0,9 оптимальна сукупність контрольованих параметрів π_{10} , тобто контроль третього і четвертого параметрів, а для Кгтр \geq 0,95 – π_6 , тобто контроль першого і третього параметрів, що охоплює всі елементи пристрою.

Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик пристроїв є інтервал між перевірками параметрів S_2 . Для кінцевого терміну експлуатації задачу вибору оптимальної стратегії перевірок параметрів S_2 можна вирішувати в два етапи: спочатку при заданому числі перевірок знаходиться їх оптимальне розташування всередині інтервалу (0, T_{e}), а потім шукається оптимальне число перевірок.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1 Atmel-8272G-AVR-01/2015 ATmega164A / 164PA / 324A / 324PA / 644A / 644PA /1284 /1284 P 8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64/128K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet [Text] // Atmel Corporation. Rev.: Atmel-8272G-AVR-Document-Title-or-Devices-FilenameDatasheet_01. - 2015. - 659 p.

2 Payne, L. Tuning PID control loops for fast response [Електронний pecypc] / Lee Payne. – Режим доступу : http://www.controleng.com/single-article/tuning-pid-control-loops-for-fast-

response/495b3c78823d6ccfa58f2f83d58dc85c.html

3 Sung, S.W. Modified Proportional – Integral Derivative (PID) Controller and a new tuning method for the PID controller [Text] / S.W. Sung., I-B. Lee, J. Lee // Ind.Eng.Chem.Res. – 1995. – V. 34. – P. 4127-4132.

4 Zigler, J.C. Optimum settings for automatic controllers [Text] / J. C. Zigler, N. B. Nichols // ASME Transactions – 1942. – Vol. 64, № 8. – P. 759.

5 Белова, Е.М. Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами [Текст] / Е.М. Белова. – М.: Евроклимат, 2003.– 400 с.

6 Боровиков, С.М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие [Текст] / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян ; под ред. С.М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.

7 Васілевський, О.М. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник [Текст] / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с

8 Выбор и расчёт регуляторов давления газа [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://proekt-gaz.ru/ fr/5/0734346.pdf. – Заголовок з екрану.

9 Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.

10 Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2 [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2007 . – № 1. – С. 78–88.

11 ГОСТ 22782.0-81. Электрооборудование взрывозащищённое. Общие технические требования и методы испытаний [Текст]. – Введен в дествие 1982-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.

12 ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги [Текст]. – Надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 39 с.

13 ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними [Текст]. – На заміну РД 50-690-89 ; надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 123 с.

14 ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ИСО 5167-1:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги [Текст]. – На заміну ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2007 (ИСО 5167-1:2003) ; надано чинності 2010-04-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с.

15 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги [Текст]. – На заміну ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2007 (ИСО 5167-2:2003) ; надано чинності 2010-04-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.

16 ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 (ИСО 5167-3:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 3. Сопла та сопла Вентурі. Технічні вимоги [Текст]. – На заміну ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2007 (ИСО 5167-3:2003) ; надано чинності 2010-04-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.

17 ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009 (ИСО 5167-4:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 4. Труби Вентурі. Технічні вимоги [Текст]. – На заміну ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2007 (ИСО 5167-4:2003) ; надано чинності 2010-04-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.

18 ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 (ИСО 5167-5:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу з застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірів [Текст]. – На заміну ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2007 (ИСО 5167-5:2003) ; надано чинності 2010-04-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.

19 Жданкин, В.К. Оценка искробезопасности электрических цепей [Текст] / В.К. Жданкин // ПСА. – 2000. – №3. – с. 70–78.

20 Зайко, А.И. Точность аналоговых измерительных каналов ИИС [Текст] / А.И. Зайко. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 136 с.

21 Игнаткин, В.У. Определение и анализ зависимостей показателей надежности средств измерений [Текст] / В.У. Игнаткин, Б.М. Беляев, В.И. Колпаков // Измерительная техника. – 1988. – № 7. – С.11–13.

22 Игнаткин, В.У. Оценка, контроль и прогнозирование метрологической надежности средств измерений [Текст] / В.У. Игнаткин. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 190 с.

23 КИП и Автоматика. Программа КИП и А [Електронний ресурс] / Igor Brovin. – Режим доступу : http://www.axwap.com/kipia/index.htm. – Заголовок з екрану.

24 Ландрини, Г. Интегральные уровни безопасности в соответствии со стандартами МЭК 61508 и 61511 и анализ их связи с техническим обслуживанием [Текст] / Глизенте Ландрини // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 1. – С. 72–79.

25 Ландрини, Г. Критерии выбора компонентов с уровнем SIL 3 для РСУ и систем ПАЗ в соответствии со стандартами МЭК. Часть 1 [Текст] / Глизенте Ландрини // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 3. – С. 110–114.

26 Ландрини, Г. Критерии выбора компонентов с уровнем SIL 3 для РСУ и систем ПАЗ в соответствии со стандартами МЭК. Часть 2 [Текст] /
Глизенте Ландрини // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 4. – С. 86–88.

27 Манко, Г.И. Математическое моделирование метрологической надежности средств измерения с целью оптимизации межповерочных интервалов [Текст] / Г.И. Манко, Н.М. Смунёва // Вопросы химии и химической технологи. – 2005. – № 4.

28 Манко, Г.І. Методичні вказівки з дипломного проектування систем автоматизації вибухонебезпечних виробництв [Текст] / Укл. : Г.І. Манко, І.Л. Левчук, К.О. Довгопола. – Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ. – 2015. – 60 с.

29 Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники [Текст] / Под ред. В.А.Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 238 с.

30 Нестеров, А.Л. Проектирование АСУТП. Методическое пособие. Книга 1 [Текст] / А.Л. Нестеров. — СПб : Изд-во ДЕАН, 2006. – 552 с.

31 Нестеров, А.Л. Проектирование АСУТП. Методическое пособие. Книга 2 [Текст] / А.Л. Нестеров. — СПб : Изд-во ДЕАН, 2006. – 944 с.

32 Оборский, Г.А. Неопределенность измерений с использованием АЦП для медленно протекающих процессов [Текст] / Г.А. Оборский, Р.П. Мигущенко, Л.М. Перпери, Ю.Г. Паленный // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 131–136.

33 Походун, А.И. Экспериментальные методы исследований. Погрешностии неопределенности измерений : Учебное пособие [Текст] / А.И. Походун. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 112 с.

34 Расчет настроек регуляторов по кривой отклика : Методические указания к лабораторным и практическим занятиям по дисциплине «Теория автоматического управления» [Текст] / Сост. : Л.Н. Макарова, А.В. Макаров, Н.В. Попова. – Тюмень : Издательство «Нефтегазовый университет», 2005. – 23 с.

35 РМ 4-173-79. Системы автоматизации технологических процессов. Расчет электрических исполнительных механизмов при проектировании [Електронний ресурс]. – Надано чинності 1979-01-12. – М. : Проектмонтажавтоматика, 1979. – 31 с. – Режим доступу : http://citm.ho.ua/Dist/Txt/RM_4-173-79.pdf.

36 Системы автоматического управления на основе программируемых логических контроллеров [Текст] // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – Вып. 16. – 77 с.

37 Способы нормирования метрологических характеристик измерительных каналов измерительных систем АСУ ТП металлургических производств : отчет о научно-исследовательской работе [Текст]. – Томск : НИТПУ, 2011. – 46 с.

38 Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике [Текст] / Под ред. А.В. Калиниченко. – М. : «Инфро-Инженерия», 2008. – 576 с.

39 Таланчук, П.М. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах : Підручник [Текст] / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. – К. : Райдуга, 1994. – 672 с.

40 Федоров, Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП. Проектирование и разработка : учебно-методическое пособие [Текст] / Ю.Н. Федоров. – М. : Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.

41 Чертков А.А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами МАТLАВ [Текст] / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – Вып. № 5. – С. 166–170.

42 Энциклопедия АСУТП [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.bookasutp.ru/Default.aspx. – Заголовок з екрану.

43 Яншин, А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА : Учеб. пособие для вузов / А.А. Яншин. – М. : Радио и связь, 1983. – 312 с.

44 Переверзєв, Е.С. Параметрические модели отказов и методы оценки надежности технических систем [Текст] / Е.С. Переверзев, Л.Д. Чумаков. – Киев : Наукова думка, 1989. – 184 с.

45 Барлоу, Р. Математическая теория надежности [Текст] / Р. Барлоу, Φ. Прошан. – М. : Сов. радио, 1969. – 488 с.

46 Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.

47 Кокс, Д.Р. Теория восстановления [Текст] / Д.Р. Кокс, В.Л. Смит. – М. : Сов. радио, 1967. – 300 с.

48 Сандлер, Дж. Техника надежности систем [Текст] / Дж. Сандлер – М. : Наука, 1966. – 300 с.

49 Быкадоров, А.К. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / А.К. Быкадоров, Л.И. Кульбак, В.Ю. Лавриненко. – М. : Высшая школа, 1968. – 400 с.

50 Сердаков, А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика [Текст] / А.С. Сердаков. – Киев : Техника, 1971. – 244 с.

51 Верзаков, Г.Ф. Введение в техническую диагностику [Текст] / Г.Ф. Верзаков, Н.В. Кинш, В.И. Рабинович, Л.С. Тимонен / Под ред. К.Б. Карандеева, – М. : Энергия, 1968. – 224 с.

52 Кузнецов, П.И. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах [Текст] / П.И. Кузнецов, Л.А. Пчелинцев, В.С. Гайденко. М. : Сов. радио, 1969. – 240 с.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

P1. A universal model for reliability prediction of Electronics components. PCBs and equipment. RDF 2000 : reliability data handbook [Text] / Paris : UTE C 80-810. 2000. – 99 p.

P2. Francisco André, Correa Alegria. Uncertainty of ADC random noise estimates obtained with the IEEE 1057 standard test [Text] / Correa Alegria Francisco André, Antonio Manuel Da Cruz Serra // IEEE transactions on instrumentation and measurement. -2005. $-N_{2}$ 54(1).-P. 110-116.

P3. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Text]. – Geneva : JCGM, 2008. – 120 p.

P4. Shick, G.J. and Wolverton R.W. An analysis of computing software reliability models [Text] // IEEE Transations on Software Engineering. -1978. - July. - Vol. SE-4. - P. 104-120.

Р5. Ануфриев, И.Е. МАТLАВ 7 [Текст] / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб. : БХВ Петербург, 2005. – 1104 с.

Рб. Ануфриев, И.Е. МАТLАВ 7 [Текст] / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова– СПб.: БХВ-Петербург.– 2005. – 1104 с

Р7. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 572 с.

Р8. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности [Текст] / Т.А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1977. – 159 с.

Р9. Емельянов, Л. И. Практические расчеты в автоматике [Текст] /Л.И. Емельянов, В. Л. Емельянов, С А. Калинина. – М. : Машиностроение, 1967. – 316 с.

Р10. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики : Учебное пособие для вузов [Текст] / Ю.М. Коршунов. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

Р11. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в МАТLАВ. Учебный курс [Текст] / Ю. Лазарев. – СПб. : Питер ; Киев: Издательская группа ВИУ, 2005. – 512 с.

Р12. Луцкий, В.А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / В.А. Луцкий. – К.: Наукова думка, 1966. – 205 с.

Р13. Надежность и эффективность в технике: Справочник : В 10 т. Т. 1: Методология. Организация. Терминология / Под ред. А. И. Рембезы. — М. : Машиностроение, 1986. — 224 с.

Р14. Надежность и эффективность в технике: Справочник : В 10 т. Т. 5 : Проектный анализ надежности / Под ред. В. И. Патрушева и А. И. Рембезы. — 316 с.

Р15. Надежность и эффективность в технике: Справочник : В 10 т. Т. 10 : Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под ред. В. А. Кузнецова, — 336 с.

Р16. Перельмутер, В.М. Пакеты расширения МАТLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox [Текст] / В.М. Перельмутер. – М.: СОЛОН-ПРЕСС. – 2008. – 224 с.

Р17. Рего, К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений : Справ. пособие [Текст] / К.Г. Рего. – К. : Техніка, 1987. – 128 с.

Р18. Сотсков, Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники [Текст] / Б.С. Сотсков. – М.: Высшая школа, 1970. – 267 с.

Р19. Фабрикант, В. Л. Элементы автоматических устройств: Учебник для вузов [Текст] / В.Л. Фабрикант, В.П. Глухов, Л.Б. Паперно, В.Я. Путниньш. – М.: Высш. школа, 1981. – 400 с.

Р20. Шеин, А. Методы проектирования электронных устройств [Текст] / А. Шеин, Н. Лазарева. – М. : Litres, 2017. – 455 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ВКАЗІВНИК

С

Chien-Hrones-Reswick, 34, 35, 36 Cohen-Coon, 34, 35

М

Ρ

z

А

Mean Time Between Failures (MTBF), 5, 57, 62, 63, 66, 68, 69, 146, 147 Mean Time To First Failure (MTTF), 5, 56, 57, 66 Mean Time Te Repair (MTTR), 5, 57, 67

Python, 3, 26, 29, 30, 44

Ziegler-Nichols, 34, 35

архітектура 1001, 64, 65, 66 1002, 65 2002, 65 2003, 65, 69

В

вибухонебезпечне середовище, 62 виконавчий механізм, 19 вимірювальний канал (ВК), 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 106, 114, 117 відмова безпечна, 59 небезпечна, 59 помилкова, 123 прихована, 78, 79, 82, 120, 123, 125, 129, 131 явна, 78, 79, 81

граф станів ЗВ, 79

дифманометр, 7, 8, 111 діафрагма, 7, 13

Ε

Г

Д

Ефективність експлуатації, 132

3

звужуючий пристрій, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14

Й

ймовірність безвідмовної роботи, 56, 75, 77, 127

ідентифікація, 24 параметрична, 26, 29 інтегральний рівень безпеки, 5, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 66, 73, 135 інтенсивність відмов, 56, 73, 74, 75, 76, 77, 118, 148 інтерполяція кубічними сплайнами, 30

к

клапан, 15, 17, 18, 145 вибір, 17 двохсідельний. 16 односідельний, 16 пропускна спроможність, 16, 17 регулюючий, 15, 16, 17, 18 коефіцієнт витрати, 7, 19 вірогідності, 78 готовності, 78, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 132 кореляції, 103 охоплення, 109 передачі, 114 підсилення. 113 поправочний, 9, 74, 150 контролер, 98

М

н

межа вибуху верхня, 62 нижня, 62 міжперевірочний період, 128 міжповірочний інтервал, 5, 80 мінімальна енергія підпалювання, 5, 62 модель адекватність, 27, 32 динамічна, 116 топологічна, 79

надійнісно-функціональна схема, 5, 66, 69, 71 надійність, 56, 134 АСК ТП, 64 засобів вимірювання, 6, 73 засобу вимірювання приклад, 76 метрологічна, 6, 78, 80, 81, 82 показники, 56 небезпечна суміш, 62 невизначеність АЦП, 106 бюджет, 108 квантування, 108 розширена, 103, 109 стандартна, 102, 105, 108 сумарна, 109 сумарна, стандартна, 103, 106

оцінка ризику, 58

обертаючий момент, 23

0

п

ΠA3. 5. 66. 68. 69. 70. 71. 72. 135 перерегулювання, 32, 35, 36, 42 Перестановочне зусилля, 20 перетворювач аналого-цифровий (АЦП), 5, 106, 107, 108 вимірювальний, 76, 97 нормуючий, 113 перехідний процес, 113, 114, 115, 116, 117 період дискретизації, 54, 55 ПІД-регулятор, 32, 33, 43, 48 ПІ-регулятор, 54, 55 похибка абсолютна, 94, 95, 96, 97 апертурна, 107 відносна, 94, 96, 97, 98, 101 додаткова, 97, 101 каналу вимірювання, 97, 99 квантування. 108 нелінійності. 108 основна, 94

т

теорема Котельникова, 54

термоперетворювач опору, 96, 97, 98 тривалість відновлень, 119, 128

Φ

функція pidtune, 43 автоматизована, 68 безпеки, 62 передатна, 5, 33, 114, 115, 116, 155, 156, 157, 158 частотна передатна, 54

Х

характеристика амплітудно-частотна, 115 градуювальна, 110 динамічна, 115 перехідна, 38 пропускна, 16 статична, 110 фазочастотна, 115

Ч

частота відмов, 56 число відмов, 57 відновлень, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 132 перевірок оптимальне, 133 Рейнольдса, 8, 10, 11, 12, 15

ш

шум квантування, 108

147

ДОДАТОК А

А.1 Шорскість внутрішньої поверхні трубопроводів

Таблиця А.1 – Еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні R_{u} та середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості R_a

Вид труби	Стан поверхні	R_{u} ·10 ³ , м	$R_a \cdot 10^3$, м
З нержавіючої сталі, латуні,	Без відкладнень	0,03	0,01
міді, алюмінію			
Холоднотягнута сталева	Нова	0,03	0,01
Гарячетягнута сталева	Нова	0,10	0,03
Пркатна сталева	Нова	0,10	0,03
Ціліснозварна сталева	Нова	0,03	0,01
Сталева	Незначна іржа	0,15	0,045
	Іржава	0,25	0,08
	Покрита накипом	1,5	0,5
	Оцинкована	0,13	0,04

А.2 Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу

Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЗП і ВТ можна розрахувати залежно від температури *t* згідно формули:

 $\alpha_t = 10^{-6} [a_0 + a_1(t/1000) + a_2(t/1000)^2],$

де *a*₀, *a*₁, *a*₂ – коефіцієнти, які беруть з таблиці А1

Таблиця А1 – Значення коефіцієнтів a_0, a_1, a_2

Марка сталі	Значення коефіцієнтів				
Марка сталі	a_0	a_1	a_2		
10	10,8	9	-4,2		
20	11,1	7,7	-3,4		
30, 35	10,2	14,7	-5,6		
40, 45	10,8	17,9	-11		
15XM	11,5	12,6	-7,1		
38XA	12,3	5,4	5,4		
12X1MΦ	10	9,6	-6		
25X2M1Φ	12	8	0		
15X5M	10,1	2,7	0		
12X18H9T	15,6	8,3	-8,5		
31Х19Н9МВБТ	16,2	6,4	0		
38ХНЗМФА	11,5	9,6	-4,9		







ДОДАТОК В

Таблиця B1 – Клапани регулюючі фірми Danfoss

Тип	Д _у , мм	<i>К_{vs}</i> , м ³ /год.	Хід штоку, мм	Кодовий номер
	15	0,25	4	065P2111
	15	0,4	4	065P2112
v S2 – Клапан регулюючий латунний 13	15	0,63	4	065P2113
30BHIШHIM DI3LOJICHHAM HEDO3BAHTAWEHUU D = 16 for $T = 120$ °C AD = 10 for	15	1	4	065P2114
$\Gamma_y = 10$ 0ap, $T_{\text{Make}} = 150$ C, $\Delta \Gamma_{\text{Make}} = 10$ 0ap, $7 = 0.5$	15	1,6	4	065P2115
$\Sigma = 0,3$	20	2,5	5	065P2120
	25	4	5	065P2125
	15	0,25	5	065B2050
	15	0,4	5	065B2051
	15	0,63	5	065B2052
	15	1	5	065B2053
VB2 – Клапан регулюючий чавунний	15	1,6	5	065B2054
фланцевий розвантажений P _v = 25 бар,	15	2,5	5	065B2055
$\hat{T}_{\text{макс}} = 150 \text{ °C}, \Delta P_{\text{макс}} = 16 \text{ бар}, Z = 0.5$	20	6,3	5	065B2057
	25	10	7	065B2058
	32	16	10	065B2059
	40	25	10	065B2060
	50	40	10	065B2061
	65	63	20	065B3170
	80	100	30	065B3185
VF2 – Клапан регулюючии чавунний	100	145	30	065B3205
ϕ ланцевии нерозвантажении Ду = 65–100	125	220	40	065B3230
мм, $P_y = 16$ бар при $T_{\text{макс}} = 130$ °C	150	320	40	065B3255

Продовження табл. В.1

Тип	Д _у , мм	<i>К_{vs},</i> м ³ /год	Хід штоку, мм	Кодовий номер
	15	4		065B2388
	20	6,3		065B2389
	25	8		065B2390
	32	16		065B2391
VFS2 – Універсальний регулюючий клапан	40	20		065B2392
чавунний фланцевий розвантаже-ний Р _у =	50	32		065B2393
16 бар при Т _{макс} = 200 °С	65	50		065B2394
	80	80		065B2395
	100	125		065B2396
	125	160		065B2397
	150	280		065B2424
	200	320		065B2425
	250	400		065B2426

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.2 – Характеристики надійності технічних засобів АСКТП

Обладнання	Інтенсивність відмов (10 ⁻⁹ 1/год.)	МТВF (год.)
Аналоговий вхідний модуль (4–20 мА, 16-канальний, неізольований)	3 000	333 333
Аналоговий модуль введення-виведення (вхід 4–20 мА, вихід 4–20 мА, 8 вхідних каналів / 8 вихідних каналів, неізольовані)	3 200	312 500
Частотний вхідний модуль (8-канальний, лічильник імпульсів, 0- 10 кГц, канали ізольовані)	6 500	153 846
Дискретний вхідний модуль (64 канали, 24 В, 25 мА, ізольований)	1 600	625 000
Дискретний вхідний модуль (64 канали, ізольований, загальний мінус на кожні 16 каналів)	2 900	344 828
Дискретний вихідний модуль (64 канали, ізольований, загальний мінус на кожні 16 каналів)	4 400	227 273
RS-422 / RS-485 Комунікаційний модуль (2 порти)	2 400	416 667
Іскробезпечний бар'єр для АІ 4-20 мА, двоканальний	119	8 370 000
Іскробезпечний бар'єр для термометра опору (термопари) двоканальний	586	1 700 000
Іскробезпечний бар'єр для АТ 4-20 мА, двоканальний	147	6 800 000
Панель об'єднавча для 16 активних іскробезпечних бар'єрів	500	2 000 000
Релейна панель дискретних входів (32 каналу / зовнішнє живлення ~ 220 В)	600	1 666 666
Релейна панель дискретних входів (32 каналу / зовнішнє живлення = 24 В)	600	1 666 666
Автомати живлення	300	3 333 333
Джерело живлення 24 В 12 A	7 407	135 000

Продовження табл. Г.1

Обладнання	Інтенсивність відмов (10 ⁻⁹ 1/год.)	МТВF (год.)
Реле (пускач)	400	2 500 000
Пристрій автоматичного вибору резерву	1 000	1 000 000
Джерело безперебійного живлення	237	4211 412
Трансформатор	11 415	87 600

Примітка. В інтенсивності відмов модулів враховані відмови, пов'язані з відмовами з'єднувачів.

ДОДАТОК Д

Табл. Д.1 – Інтенсивність відмов елементів електронної апаратури

Тип	λ _{0j} ·10 ⁻⁶ , 1/год.	Тип	λ _{0j} ·10 ⁻⁶ , 1/год.
Мікросхеми		Транзистори	
цифрові біполярні	0,1	малопотужні низькочастотні	0,3
цифрові інші	0,3	малопотужні	0.5
		високочастотні	0,5
аналогові	0,8	малопотужні НВЧ	1,2
		середньої потужності	0,6
Оптопари		потужні низькочастотні	1,0
тріодні	0,1	потужні високочастотні і НВЧ	1,2
діодні	0,5	польові	0,3
		МОП низькочастотні	0,012
Діоди		МОП високочастотні	0,06
випрямні малої потужності	0,05		
випрямні великої потужності	0,1	Резистори	
імпульсні	0,03	плівкові	0,008
високочастотні	0,1	об'ємні	0,005
стабілізатори малопотужні	0,03	дротові	0,02
стабілізатори потужні	0,08	дротові регульовані	0,04
тунельні	0,1	змінні недротові	0,02
тиристори	0,5	змінні дротові	0,04
світлодіоди	0,5	терморезистори	0,06
варікапи	0,03	фоторезистори	0,05
надвисокочастотні (НВЧ)	1,0	варістори	0,1
лазерні	4,0	плівкові	0,04

Продовження табл. Д.1

Тип	λ _{0j} ·10 ⁻⁶ , 1/год.	Тип	λ _{0j} · 10 ⁻⁶ , 1/год.
Конденсатори		Комутаційні елементи	
керамічні	0,1	перемикачі	0,05
керамічні високовольтні	0,5	тумблери	0,4
склокерамічні	0,04	кнопки	0,2
слюдяні	0,3	конектори приладні	0,003
металопаперові	0,05	те ж для друкованих плат	0,005
електролітичні	0,3	Контакти реле	0,5
танталові	0,6	Геркони	0,2
оксидні	0,004		
		Інші елементи	
Індикатори		Кварцові резонатори	0,2
тліючого розряду	4,0	Запобіжники	0,1
вакуумні люмінесцентні	8,5	Тримачі запобіжників	0,05
рідкокристалічні	1,5	Лінії затримки	0,6
світлодіодні	2,0	Двигуни постійного струму	15,0
газорозрядні панелі	6,0	Двигуни змінного струму	1,5
осцилографічні	8,0		
лампи розжарювання	0,5		

ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1 – Поправочні коефіцієнти для врахування вібрації та ударів

	Вібр	ація (b ₁)	Удари (<i>b</i> ₂)		
VMORU	амор	не	амор	не	
э мови	ти-	амор-	ти-	амор-	
	зована	тизована	зовані	тизовані	
Приладобудівні підприємства, лабораторії	1	1	1	1	
Поле	1,05	1	1	1	
Судна	1,3	1,2	1,05	1	
Металургійні та хімічні підприємства, авіатранспорт	1,35	1,25	1,2	1,1	
Залізничний транспорт	0,5	1,3	1,2	1,15	
Автотранспорт	1,6	1,3	1,3	1,2	
Металообробні цехи	1,35	1,2	1,1	1,05	
Прокатні стани, преси, молоти	1,7	1,4	1,6	1,3	

Таблиця Е.2 – Поправочний коефіцієнт b_3 для врахування впливу клімату

		Опал	ювальне	Неопалювальне		
I/ min com	Vourniouon	прим	пщення	прим	ищення	
Климат	кондиціонер	відкрите пилобриз-козахищене		відкрите	пилобриз- козахищене	
Холодний	1	1,2	1	2	1,3	
Помірний,						
середня	1	1,1	1	1,5	1,1	
полоса						
Степовий	1	1,2	1,3	1	1,05	
Субтропічний	1	1,7	1,2	2,5	1,5	
Морський	1 1	17	1.2	3	1.5	
холодний	1,1	1,/	1,2	C	1,5	
Морський жаркий	1,2	2,2	1,2	3,2	2	

Таблиця Е.3 — Поправочний коефіцієнт b_4 для врахування виду обслуговування

Призначення засобу	b ₄	Призначення засобу	b ₄
Побутове	15	Управління технікою	2
Транспорт	3	Управління технологією	1

157

1... > 1000 1000 $^{1,1}_{-}$ додаток ж Опір, кОм a_{12} 1,5 1,5 $\overline{\vee}$ $^{0,7}_{0,9}$ $2 \ BT$ $0,2 \\ 1,1$ Потужність $_{
m BT}^{
m 0.5}$ 1,0 a_{11} $_{
m BT}^{0,125}$ 0,5 0,9 1,01,5 a_8 $\begin{array}{c}
 12 \\
 3,1 \\
 2,5
 \end{array}$ Склад-Висока HICTL a_6 $1,0 \\ 0,85 \\ 0,8$ Низька 1,0 0,35 Корпус 0,5 0,50,5 Метал a_5 1,01,1 1, 0Пластик $-a_{12}$ ∢ Струм, 0,05 – Поправочні коефіцієнти а2 <0.0 a_4 $\begin{array}{c} 0,67 & 0,43 \\ 0,43 & 0,43 \end{array}$ >0.8 0,25 0,43 0,67 0,11 0,25 0,25 0,25 0,11,00,05 0,01 0,670.3... 0.8 0,1 1,0 \mathcal{K}_{μ} 0,1 0,43<0.3 1,00,1 0, 1Т 10^{-2} 10^{-3} $^{2\times}_{10^{-3}}$ 10^{-3} 2×10^{-3} 10^{-3} a_3 ${1,1\atop 1,3}$ 1,3 1,0 1,0 1,35 1,83 70 0,9 0,69 $^{\circ}{\rm O}$ $0,9 \\ \begin{array}{c} 0,8\\ 1,05\\ 1,0\\ 1,0\\ 1,29\end{array}$ $3,0 \\ 4,0 \\ 10$ $1,4 \\ 1,5 \\ 1,6 \\ 1,09 \\ 1,4$ 60 Табл. Е.1 Температура, 0,49 ($1,2 \\ 1,3 \\ 1,3 \\ 0,99 \\ 1,07 \\ 1,0$ $0,75 \\ 0,7$ $\begin{array}{c} 0,7\\ 0,78\\ 0,95\\ 1,06 \end{array}$ 50 a_2 0,34 $1,1 \\ 1,15 \\ 1,1 \\ 1,1 \\ 0,96 \\ 0,91$ $\begin{array}{c} 0,65\\ 0,5\\ 0,9\\ 0,66\\ 0,67\\ 0,92\\ 0,96\end{array}$ 1,72,03,240 0,24 $\begin{array}{c} 0.52 \\ 0.32 \\ 0.32 \\ 0.7 \\ 0.63 \\ 0.63 \\ 0.64 \\ 0.6 \\ 0.61 \\ 0.9 \\ 0.91 \\ 0.91 \\ 0.91 \\ \end{array}$ 1,01,00,90,890,8630 $\begin{array}{c} 0,9\\ 0,95\\ 0,8\\ 0,88\\ 0,74\end{array}$ 20 0,2 - - -<u>Мікросхеми</u> цифрові біполярні цифрові інші аналогові дротові змінні недротові змінні дротові Конденсатори керамічні склокерамічні слюдяні металопаперові плівкові оксидні електролітичні Тип елемента Гранзистори <u>Резистори</u> плівкові об'ємні Оптопари Діоди

a_{12}	Опір, кОм	<1 1000 > 1000								
_	ність	Brl Br								
a_1	Потуж	$_{\rm BT}^{0,125}$								
	a_8)								
	a_6	`								
	a_{ξ}	2								
	Α,								5 0,5	÷
	трум	1,05.							1 0,2:	1,0
a_4	0	3 ≤0.0		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			2		0, 1	
	,	-0->0.5	1),1	3),3:	0,1	I),2			
	K,	.3 ³	1 0,	33),3		1		0,1		
	13	, ,	0-2 0	0-3);	0 ⁻³	0 ⁻³ -	0 ⁻² -	0 ⁻²	0^{-2}	0^{-2}
	J	02	, 6 1		1	-	08 1		-	-
	ç	09	1,8 2 1,5 1	1,3	1		2,0)			
	ypa, [°]	50	1,5 1,4	0,15		_	0,87		_	_
a_2	перат	40	$1,3 \\ 1,3$	1,05	1,0	2,0	0,56	1,0	6,0	3,0
	Тем	30	1,1 1,2	,95),56			
		20	1,0 1,0	6,0),56			
	Тип елемента		Комутаційні елементи конектори приладні для друкованих плат	Електровакуумні, газорозрядні і фотопро- меневі індикатори	Лампи розжарювання	Кварцові резонатори	Трансформатори	Електродвигуни колекторні безколекторні	Контакти реле	Геркони

Продовження табл. Ж.1



ДОДАТОК И

Рис. И.1 – Номограма для визначення коефіцієнта К з урахуванням загальної кількості N складових елементів ЗВ і кількості r механікокінематичних ланок

160



Рис. К.1 – Схема алгоритму обчислення величин K_{Γ} і $K_{\mathcal{A}}$ (див. розшифровку умовних позначень у п. 4.8)

додаток л	Клас точності						0,1				L C	0,5			1,5; 2,5; 4,0	1,0; 1,5	2,5; 4,0
налів	Φ]	T_{2}, c		5-20	4-20	5-20	10-20	10-20	10-40	20-60	-	4-10	2-10				
ювальних ка	Параметри П	T_1, c		30-70	20-60	20-100	40-100	40-80	60-120	60-180		10-20	2-5		60-120	15-30	60-100
нтів вимір		К		0,96	0,94	0,92	0,88	0,93	0,86	0,88	-	_	1		0,85	0,92	0,79
ні характеристики компоне	Передатна функція				K	W(S) =	$(1_1S+1)(1_2S+1)$				K W(S) =	$(T_1S+1)(T_2S+1)$		2	N(S) =	T_1S+1	
Табл. Л.1 – Динамічі	Найменування засобу	вимірювання	1 Термопари	XA(K)	XA(L), (E)	IIII(S), (R))KK(I)	IIP(B)	MP 60/0	BP(A)-1	2 Термометри опору	ICM	TCII	3 Манометричні термометри	ra30Bi	рідинні	конденсаційні

	Продовження табл. Л.	1			
Найменування засобу	Передатна функція	[Параметри П	Φ	Клас точності
вимірювання		K	T_1, c	T_2, c	
4 Вторинні прилади					
KCIII, KCMI		1	2,5; 5,0	4-20	1,0
KCV1	K	1	2,5; 5,0	10,4	1,0
A542, A543	W(s) =	1	1; 2,5; 10	5-20	0,5
KCII2, KCM2	$T_{2}S^{2} + T_{1}S + T_{2}S$	1	2,5; 10	10-20	0,5
КСП4, КСМ4		1	2,5; 10	10-20	0,5
КСПЗ, КСМЗ, КСДЗ		1	5;10	10-40	0,5
5 Нормуючі перетворювачі					
III-71, III-72					0,5
III-703, III-709	$1 - I_{ m H}/I_{ m K}$				0,4
П-234, П-236	W(s) = K	I	Ι	I	0,4
III-72, III-72N	$1-E_{\rm H}/E_{\rm K}$				1,0
III-708, III-705					1,0
П-221					0,5
6 Перетворювачі термоопорів	$1 - I_{\rm H}/I_{\rm K}$				
TCMY-0283	$W(s) = K - \dots$	Ι	I	Ι	0,5
TCIIY-0183	I TNH/ INK				0,5

Продовження табл. Л.1

Клас точності		0,5; 1,0; 1,5 0.25; 0.5; 1,0		1,5	4,0	0,2; 0,5; 1,0 2,5
Ф	T_2, c	16 8		0,8	I	- 0,96
[араметри П	T_1, c	2,5-4 0.5-2,5		2,5-4	1,5-2	- 1,5-3
Π	К	1 1.08	0,8	18	14	0,4-0,9 0,4-0,7
Передатна функція		$W(s) = \frac{K}{T_2s^2 + T_1s + 1}$		$W(s) = \frac{K}{T_2s^2 + T_1s + 1}$	$W(s) = \frac{K}{T_1s+1}$	$W(s) = K$ K $W(s) = \frac{K}{T_2s^2 + T_1s + 1}$
Найменування засобу	вимірювання	7 Вимірювачі тиску: МП-4 Сапфир-22М	Метран-100	8 Вимірювачі рівня буйкові УБ-П	9 Вимірювачі рівня ізотопні	10 Вимірювачі витрати: звужуючі пристрої ротаметри РЭ

Ë.
5
ā
E
Ĥ
H
¥
ä
БС
õ
H

Найменування засобу	Передатна функція		Параметр	и ПФ	Клас точності
вимірювання		К	T_1, c	T_2, c	
11 Вимірювачі густини:	K				
ra3iB	W(s) =	0,9	3	I	1,5
рідин	T_{1S+1}	1	2,5-4	Ι	1,0; 2,5
12 Газоаналізатори:	K				
термомагнітні	$W(s) =e^{-103}$, T_{s+1}	1	5-10	Ι	4,0
фотоколометричні	$T_0 = 5-10 c$	0,7	300	Ι	4,0
електрохімічні		0,5	3-5	Ι	4,0
полум'яно-іонізаційні	$W(s) = Ke^{-ToS}$,	0,6	I	Ι	4,0
оптичні	$T_0 = 5-20 c$	0,9	I	I	2,5
13 РН-метри	W(s) = K				
		0,65	I	I	6,5; 1,0; 1,5
14 Віскозіметри	W(s) =	0			
	T_{1S+1}	0,9 1	en c z	I	1,5 10.75

Навчальне видання

Манко Геннадій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерноінтегрованих технологій ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Тараненко Юрій Карлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та контролю якості програмних засобів ДВНЗ «Український державний хімікотехнологічний університет»

Тітова Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерноінтегрованих технологій ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Тришкін Владислав Якович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій ДВНЗ «Український державний хімікотехнологічний університет»

Швачка Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій ДВНЗ «Український державний хімікотехнологічний університет»

Чумаков Лев Дмитрович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

РОЗРАХУНКИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

Навчальний посібник

Авторська редакція Комп'ютерна верстка Технічний редактор Г.І. Манко Г.М. Колісник Г.М. Колісник

Підписано до друку 04.04.2019. Формат 60×84/16. Папір ксерокс Умов. друк. арк. 9,2. Тираж 300 прим. Зам. № 57 Друк ризограф. Гарнітура Times New Roman Редакційно-видавничий відділ ДВНЗ УДХТУ пр. Гагаріна 8, м. Дніпро, 49005 Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5026 від 16.12.2015.