

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Методичні вказівки
до виконання розрахунків в дипломних проектах
спеціальностей 151 та 152 для студентів усіх форм навчання

Дніпропетровськ УДХТУ 2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Методичні вказівки

до виконання розрахунків в дипломних проектах
спеціальностей 151 та 152 для студентів усіх форм навчання

Затверджено на засіданні кафедри
автоматизації виробничих процесів.
Протокол № 1 від 28.08.2016

Дніпропетровськ УДХТУ 2017

Методичні вказівки до виконання розрахунків в дипломних проектах спеціальностей 151 та 152 для студентів усіх форм навчання / Укл.: Г.І. Манко. – Дніпро : УДХТУ, 2017. – 67 с.

Укладачі: Г.І. Манко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск Ю.К. Тараненко, д. т. н.

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання розрахунків в дипломних проектах спеціальностей 151 та 152 для студентів усіх форм навчання

Укладач: МАНКО Геннадій Іванович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку _____. Формат 60x84^{1/16}. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов.-друк. арк. _____ Облік. – вид. арк. _____ Тираж 100 прим. Зам. № _____.
Свідотцтво ДК №303 від 27.12.2000.

УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ-5, пр-т Гагаріна, 8

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	4
Вступ	5
1 Розрахунок звужуючого пристрою	6
1.1 Вибір звужуючого пристрою і дифманометра	6
1.2 Розрахунок значення витрати	7
1.3 Розрахунок діаметра отвору звужуючого пристрою	9
1.4 Розрахунок звужуючих пристроїв в програмі «КИП и А»	11
2 Розрахунки виконавчих пристроїв	14
2.1 Розрахунок регулюючого клапана для рідини	14
2.2 Розрахунок регулюючого клапана для газів	16
2.3 Розрахунок виконавчого механізму	18
2.4 Приклад розрахунку ВМ з односідельним регулюючим органом... ..	20
3 Розрахунки надійності	22
3.1 Загальні відомості	22
3.2 Розрахунок показників надійності АСК ТП	23
3.3 Розрахунок показників надійності засобів вимірювання	23
3.4 Приклад розрахунку показників надійності засобу вимірювання... ..	25
3.4 Метрологічна надійність засобів вимірювання	27
3.4.1 Загальні поняття	27
3.4.2 Приклади розрахунку параметрів метрологічної надійності	31
4 Проектний розрахунок метрологічних характеристик вимірювального каналу	34
4.1 Загальні відомості	34
4.2 Методика оцінки основної похибки вимірювальних каналів	35
4.3 Розрахунок невизначеності аналого-цифрового перетворення	38
4.4 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання температури... ..	41
4.5 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання тиску	42
5 Визначення статичних і динамічних характеристик вимірювальних каналів	46
5.1 Статичні характеристики вимірювальних каналів	46
5.2 Динамічні характеристики вимірювальних каналів	49
Література	53
Додаток А	56
Додаток Б	57
Додаток В	58
Додаток Г	59
Додаток Д	60
Додаток Е	62
Додаток Ж	63
Додаток И	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

FR – Failure Rate
IR – Intensity Failure
MTBF – Mean Time Between Failures
MTTF – Mean Time To First Failure
АСК – автоматизована система контролю
АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВК – вимірювальний канал
ВМ – виконавчий механізм
ВТ – вимірювальний трубопровід
ДП – дипломний проект
ЗВ – засіб вимірювання
ЗП – звужуючий пристрій
ЛЗ – лінія зв'язку
МО – математичне очікування
МПІ – міжпіврічний інтервал
НФС – надійносно-функціональна схема
ПФ – передатна функція
РД – регульована ділянка (трубопроводу)
РО – регулюючий орган
ТЗ – технічний засіб
ФЧХ – фазочастотна характеристика

ВСТУП

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

При виконанні конкретного ДП студент разом з керівником вибирають той обсяг розрахунків, який найбільше відповідає оптимальному забезпеченню теми ДП обчисленнями. Рекомендується виконати один-три розрахунки для бакалаврів і від трьох до п'яти різних розрахунків для магістрів.

В першому розділі наведена методика і приклад розрахунку звужуючого пристрою, який використовується при вимірюванні витрати рідини або газу методом змінного перепаду тиску.

У другому розділі розглядаються розрахунки виконавчих пристроїв АСК ТП.

У третьому розділі подані методика і приклад розрахунку надійності технічних засобів автоматизованої системи контролю (або керування) технологічного процесу. Зокрема розглянуті питання розрахунку метрологічної надійності засобів вимірювання.

В четвертому розділі описані методика, приклади і алгоритми проектного розрахунку метрологічних характеристик вимірювального каналу.

П'ятий розділ присвячений методам визначення статичних і динамічних характеристик вимірювальних каналів.

У додатках міститься довідкова інформація, необхідна для виконання розрахунків.

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

1 РОЗРАХУНОК ЗВУЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

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 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 виконання розрахунків стандартних ЗП вирішують чотири завдання:

а) визначення витрати потоку по вимірюваному перепаду 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 $\Delta p_{гр}$, який вибирається так, щоб відносна площа пристрою m була невелика (при середніх швидкостях потоків 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 вибирають, 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 безперервний 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 вибирати, 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_n , 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_n 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_n вибирають 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 ділянки трубопроводу).

1.1.5 Верхню межу вимірювань дифманометра Q_{np} встановлюють по заданій найбільшій вимірюваній витраті Q_{max} так, щоб найближче значення Q_{np} , взяте за 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 з шкалою 0–100% вибирають, виходячи з вимог п. 1.1.4. Для приладу з 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 [1–5].

1.2 Розрахунок значення витрати

1.2.1 Згідно [5], 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 $R_{ш}$ (береться з [1, Додаток Д]);
- 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_n входної кромки діафрагми, м;
 - 2) час τ_T експлуатації діафрагми з моменту визначення значення r_n або міжконтрольний інтервал τ_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 , °С, або термодинамічна температура середовища $T = 273,15 + t$, К.

1.2.2 Розраховують діаметр отвору в реальних умовах:

$$d = d_{20} K_{3П}; \quad (1.1)$$

$$K_{3П} = 1 + \alpha_{t3П}(t - 20), \quad (1.2)$$

де $\alpha_{t3П}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЗП (береться з [1, Додаток Д]).

1.2.3 Розраховують внутрішній діаметр ВТ у реальних умовах:

$$D = D_{20} K_T; \quad (1.3)$$

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

де α_{tT} – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ВТ (береться з [1, Додаток Д]).

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

$$\beta = d/D. \quad (1.5)$$

1.2.5 Розраховують значення коефіцієнта швидкості входу E :

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

1.2.6 Коефіцієнт витікання C знаходиться згідно [2, п. 5.3.2.1].

1.2.7 Поправочний коефіцієнт $K_{ш}$, що враховує шорсткість внутрішньої поверхні ВТ знаходиться згідно [2, п. 5.3.2.3].

1.2.8 Поправочний коефіцієнт, що враховує притуплювання вхідної кромки діафрагми

Якщо радіус вхідної кромки діафрагми r_n не перевищує $0,0004d$, то поправочний коефіцієнт $K_{п}$ приймають рівним одиниці.

Якщо значення r_n перевищує $0,0004d$, то поправочний коефіцієнт $K_{п}$ розраховують згідно формули:

$$K_{п} = 0,9826 + (r_n/d + 0,0007773)^{0,6}, \quad (1.7)$$

де

$$r_k = a - (a - r_n)e^{(-\tau_T/3)}; \quad (1.8)$$

a – параметр, що враховує тип вимірюваного середовища, який приймають рівним $0,19 \cdot 10^{-3}$ для рідини, $0,195 \cdot 10^{-3}$ для газу і $0,2 \cdot 10^{-3}$ для пари;

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

Для інших ЗП $K_{п} = 1$.

1.2.9 Коефіцієнт розширення:

а) для діафрагми:

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

б) для інших ЗП:

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

де $\tau = 1 - \Delta p/p$.

1.2.10 Розрахунок витрати виконують в наступній послідовності:

а) приймають перше наближення значення числа Рейнольдса Re_1 , рівне 10^6 ;

б) розраховують перше наближення значення коефіцієнта витікання C_1 згідно п. 1.2.6;

в) знаходять перше наближення значення $K_{ш1}$ 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:

$$q_m = 0,25 \pi d_{20}^2 K_{CV}^2 C E K_{ш} K_n \varepsilon (2 \Delta p p)^{0,5}; \quad (1.11)$$

2) для об'ємної витрати:

$$q_v = 0,25 \pi d_{20}^2 K_{CV}^2 C E K_{ш} K_n \varepsilon \left(2 \frac{\Delta p}{\rho} \right)^{0,5}. \quad (1.12)$$

д) за отриманим значенням q_1 , знаходять друге наближення значень Re_2 , C_2 , $K_{ш2}$ і q_2 , при чому число Рейнольдса, залежно від одиниці витрати середовища, розраховують по відповідній з наступних формул:

$$Re = \frac{4 q_m}{\pi D \mu}; \quad (1.13)$$

$$Re = \frac{4 q_v \rho}{\pi D \mu}. \quad (1.14)$$

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

$$|q_i - q_{i-1}| / q_i < 10^{-5}. \quad (1.14)$$

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 $\rho_{ном}$, кг/м³; температура середовища t , °С, або термодинамічна температура середовища $T = 273,15 + t$, К; тиск середовища p , Па; допустима втрата тиску на звужуючому пристрої при максимальній витраті газу $\Delta p_{нд}$, Па; динамічна в'язкість μ , Па·с;

внутрішній діаметр трубопроводу D , м; еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу $R_{ш}$, м; для газу додатково показник адіабати k . Для діафрагми з [2, п. 5.3.2.4] беруть початкове значення радіуса r_n вхідного канту та міжконтрольний інтервал τ_y .

1.3.2 Для газів перевіряють виконання нерівності

$$\Delta p_{nd} \leq 0,25p. \quad (1.15)$$

Якщо нерівність не виконується, то розрахунок припиняють, оскільки вимірювання витрати за такого режиму є неможливе, або вибирають іншу верхню границю вимірювань перепаду тиску, що задовольняє нерівності (1.15).

1.3.3 За даними відповідної частини комплексу стандартів (див. [2, п. 5.3.1], [3, п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [4, п. 5.5.2, 5.5.3, 5.5.4]) визначають верхню межу Re_v і нижню межу Re_n діапазону допустимих значень числа Рейнольдса Re для вибраного типу ЗП.

1.3.4 Обчислюють максимальне значення Re_{max} і мінімальне значення Re_{min} робочого діапазону значень Re за формулами:

$$Re_{max} = \frac{4q_{mmax}}{\pi D \mu}; \quad Re_{min} = \frac{4q_{mmin}}{\pi D \mu}$$

і перевіряють виконання нерівностей

$$Re_v \geq Re_{max}; \quad (1.16)$$

$$Re_n \leq Re_{min}. \quad (1.17)$$

Якщо нерівності (1.16) і (1.17) не виконуються, то обчислення припиняють і вибирають інший тип ЗП, для якого ці нерівності виконуються.

1.3.5 Обчислюють допоміжну величину

$$A = \frac{Re_{max} \mu}{D(2\rho \Delta p)^{0.5}}. \quad (1.18)$$

1.3.6 Використовуючи відповідну частину стандартів (див. [2, п. 5.3.1], [3, п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [4, п. 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4]), визначають значення верхньої межі β_v і нижньої межі β_n 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:

$$B_1 = E_1 C_1 K_{ш1} K_{n1} \beta_v^2 \varepsilon_1; \quad (1.19)$$

$$B_2 = E_2 C_2 K_{ш2} K_{n2} \beta_n^2 \varepsilon_2, \quad (1.20)$$

де E_1 та E_2 – коефіцієнти швидкості входження за β_v і β_n відповідно (п. 1.2.5);

C_1 – коефіцієнт витікання за Re_{max} і β_v (п. 1.2.6);

C_2 – коефіцієнт витікання за Re_{min} і β_n (п. 1.2.6);

$K_{п1}$ – поправковий коефіцієнт $K_{п}$ за $\beta_{в}$ (для решти ЗП $K_{п1} = 1$) (п. 1.2.8);
 $K_{п2}$ – поправковий коефіцієнт $K_{п}$ за $\beta_{н}$ (для решти ЗП $K_{п2} = 1$) (п. 1.2.8);
 $K_{ш1}$ – поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ за Re_{max} і $\beta_{в}$ (для труб Вентурі $K_{ш} = 1$) (п. 1.2.7);

$K_{ш2}$ – поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ за Re_{min} і $\beta_{н}$ (для труб Вентурі $K_{ш} = 1$) (п. 1.2.7);

ε_1 – коефіцієнт розширення за $\beta_{в}$, $\Delta p_{нд}$, κ і p (п. 1.2.9);

ε_2 – коефіцієнт розширення за $\beta_{н}$, $\Delta p_{нд}$, κ і p (п. 1.2.9).

1.3.8 Обчислюють допоміжні величини формулами:

$$\delta_{1z} = (B_1 - A) / A ,$$

$$\delta_{2z} = (B_2 - A) / A .$$

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 β розв'язують таке рівняння:

$$A = E \cdot C \cdot K_{ш} \cdot K_{п} \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon. \quad (1.21)$$

Розв'язання рівняння (1.9) може бути виконано будь-яким з методів ітерацій.

1.3.10 Для знайденого значення β за даними відповідної частини комплексу стандартів (див. [2, п. 5.3.1], [3, п. 5.1.6.1, 5.2.6.1, 5.3.4.1], [4, 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 і перевіряють нерівності (8.11) і (8.12). Якщо нерівності виконано, 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

$$d_{20} = \beta \cdot D / K_{зп}, \quad (1.22)$$

де $K_{зп}$ – коефіцієнт зміни діаметра отвору внаслідок температурного розширення. Для сталі 1Х18Н9Т $K_{зп} = 1,0012$.

1.3.12 Перевіряють, чи міститься d_{20} в діапазоні допустимих значень (див. [2, п. 5.3.1]). Якщо цю умову виконано, то значення d_{20} вважають знайденим.

1.4 Розрахунок звужуючих пристроїв в програмі «КИП и А»

1.4.1 Програма «КИП и А» [6] призначена для широкого круга користувачів, що працюють у сфері метрології, контрольно-вимірювальних приладів і автоматики, а також АСК ТП. Також може бути корисна студентам технічних університетів і фахівцям технічних спеціальностей.

1.4.2 Блок розрахунку ЗП для виміру витрати середовища повністю базується на матеріалах стандарту [1].

1.4.3 Блок розрахунку звужуючих пристроїв викликається із списку головного меню при виборі 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.



Рис. 1.1 – Меню вибору типу звужуючого пристрою для розрахунку



Рис. 1.2 – Картка звужуючого пристрою (діафрагма, природний газ)

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 передвстановленими 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 міняти як завгодно. При натисненні клавіші [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.

2 РОЗРАХУНКИ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОІВ

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:

$$K_v = q\psi \sqrt{\frac{\rho}{1000\Delta P}}, \quad (2.1)$$

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

ψ – коефіцієнт, що враховує вплив в'язкості рідини, визначуваний залежно від числа Рейнольдса по графіку на рис. 2.1;

ρ – густина рідини, кг/м³;

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

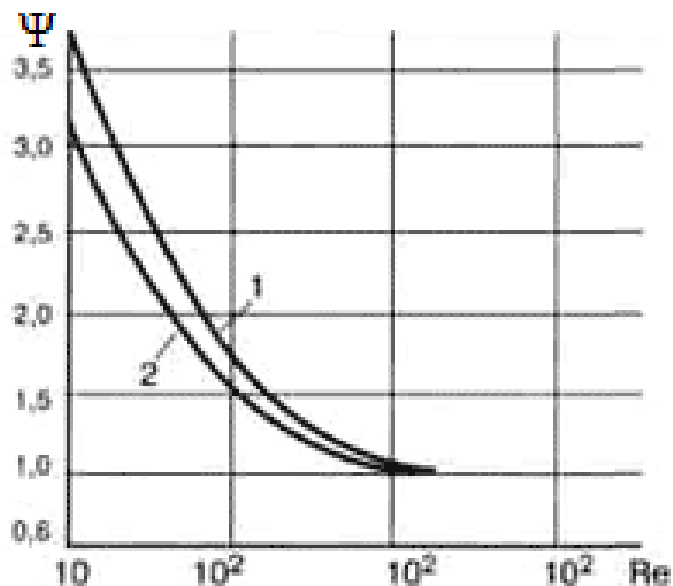


Рис. 2.1 – Графік для визначення коефіцієнта ψ для двохсідельних (1) і односідельних (2) клапанів

2.1.4 Формула для визначення числа Рейнольдса:

$$Re = 3530 \frac{q}{v \cdot d}, \quad (2.2)$$

де v - кінематична в'язкість рідини, що змінюється залежно від температури і концентрації розчиненої речовини для водних розчинів, cm^2/s ;

d - діаметр умовного проходу клапана, мм.

2.1.5 Відносна пропускна спроможність клапана:

$$\sigma = \frac{K_v}{K_{vy}}, \quad (2.3)$$

де K_v , K_{vy} - коефіцієнти пропускної спроможності дійсний і умовний, $m^3/год$.

2.1.6 Відносне переміщення затвора клапана:

$$\ell = \frac{S}{S_y}, \quad (2.4)$$

де S , S_y - 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:

$$\sigma = \ell, \text{ рідше рівновідсотковою } \sigma = 0,04^{1-\ell}.$$

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, або більше або дорівнювати перепаду тиску на елементах технологічної мережі:

$$\Delta P \geq 0,5 \Delta P_{py} \text{ або } \Delta P \geq \Delta P_c. \quad (2.5)$$

Правильно підібраним вважається такий клапан, який повністю відкритий при максимальному об'ємі протікаючого вередовища 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:

$$K_{vH} = 1,2 G_p / (\Delta P_{кл})^{0,5}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (2.5)$$

де 1,2 – коефіцієнт запасу;

G_p – розрахункова витрата теплоносія через клапан, $m^3/год$;

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

2.1.10 Необхідна пропускна спроможність може бути також визначена на номограмі (Додаток А) при $G = 1,2 G_p$.

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

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

$$\Delta P_{\text{кл max}} = Z (P_1 - P_{\text{нас}}), \quad (2.5)$$

де Z – коефіцієнт початку кавітації. Приймається 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;

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

Якщо розрахований $\Delta P_{\text{кл max}}$ 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 $P_{\text{нас}}$ для води.

Таблиця 2.1 – Значення надлишкового тиску насиченої пари води

Т, °С	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
$P_{\text{нас}}$, 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 вибирається клапан, для якого K_{vs} є рівним, або трохи більшим, ніж необхідна пропускну спроможність, визначена за формулою (2.6). У Додатку Б 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 °С;
- t_2 – температура на виході °С;
- 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 $\Delta p < 0,5P_1$):

$$K_V = \frac{Q_N}{514} \sqrt{\frac{p_N(t_1 + 273)}{\Delta p \times p_2}}; \quad (2.7)$$

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

$$K_V = \frac{Q_N}{257 \times p_1} \sqrt{p_N(t_1 + 273)}. \quad (2.8)$$

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:

$$Q = \frac{Q_N(273 + t)}{p \times 273}. \quad (2.9)$$

2.2.4 Необхідний діаметр трубопроводу

$$d = 18,8 \sqrt{\frac{Q}{w}}. \quad (2.10)$$

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:

$$w = 354 \frac{Q}{d^2}. \quad (2.11)$$

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 $p_{вх} = 2,013$ бар і абсолютному вихідному тиску $p_{вих} = 1,013$ бар. Зв'язок між K_{vs} і K_G має вигляд:

$$K_G = 34 \cdot K_{vs}. \quad (2.12)$$

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_n пр.газ згідно формули:

$$q_n \text{ пр.газ} = q_n / f, \quad (2.13)$$

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	Водород	3,04

2.3 Розрахунок виконавчого механізму

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

а) забезпечувати необхідну швидкість регулювання, визначувану 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 елемента і робочим ходом затвора регулюючого органу. Якщо ця рівність не виконується, необхідно підібрати відповідний механічний зв'язок між ВМ і РО.

2.3.2 Перестановочне зусилля на штоку олносідельного регулюючого органу:

$$N_{\text{пс}} = \pm N_c \pm N_{\text{ш}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{ущ}}, \quad (2.14)$$

де N_c – сила тиску середовища на затвор;

$N_{\text{ш}}$ – сила тиску середовища на шток;

$N_{\text{тр}}$ – сила тертя штока в сальнику;

$N_{\text{ущ}}$ – сила, необхідна для створення контакту ущільнючого затвора з сідлом.

2.3.3 Сила тиску середовища на затвор:

$$N_z = F_c (P_1 - P_2) = F_c \Delta P, \quad (2.15)$$

де F_c – площа проходу у сідлі, см^2 ;

P_1, P_2 – тиск перед і після РО, $\text{кгс}/\text{см}^2$;

ΔP – перепад тиску на регулюючому органі, $\text{кгс}/\text{см}^2$.

2.3.4 Сила тиску середовища на шток:

$$N_{ш} = 0,785d_{ш}^2 P_2, \quad (2.16)$$

де $d_{ш}$ – діаметр штока в сальнику, см.

Знаки перед N_c і $N_{ш}$ в рівнянні (2.14) приймаються залежно від напрямку цих сил. Якщо напрям співпадає з напрямом напрямку 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

$$N_{тр} = 0,6 d_{ш} + 0,01 d_{ш} P, \text{ кгс}, \quad (2.17)$$

де $d_{ш}$ – діаметр штока, мм;

P – тиск середовища під сальниковою камерою, кгс/см².

б) для сальників з іншими набивальними матеріалами

$$N_{тр} = 1,1 d_{ш} + 0,02 d_{ш} P, \text{ кгс}. \quad (2.18)$$

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

$$N_{тр} = 0,4d_{ш} + 0,01d_{ш}\Delta P, \text{ кгс}, \quad (2.19)$$

де $d_{ш}$ – 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 $P_y < 100$ кгс/см²:

$$N_{ущ} \approx 0,75\pi \cdot d_c, \text{ кгс}, \quad (2.20)$$

де d_c – діаметр проходу сідла, мм;

б) при умовному тиску $P_y > 100$ кгс/см²

$$N_{ущ} \approx 0,75\pi \cdot d_c P_y / 100, \text{ кгс}, \quad (2.21)$$

2.3.7 РО з поступальною ходою затвора зручно зчленовувати з ВМ за допомогою шарнірного важільного механізму, як це показано на рис. 3.1.

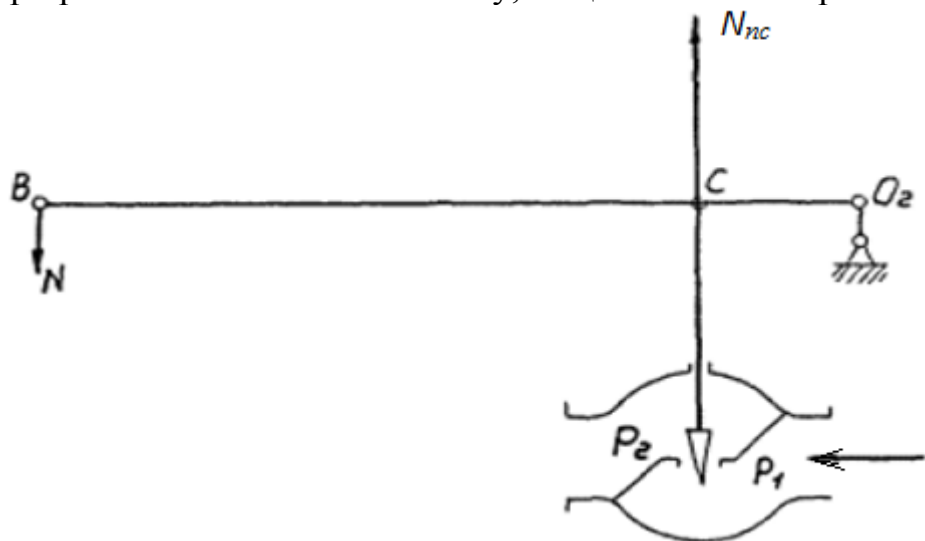


Рис. 3.1 – Важільний механізм

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:

$$M = nbN_{nc}, \quad (2.22)$$

де n – коефіцієнт запасу:

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

б) для швидкого і прецизійного управління положенням затвора РО $n = 3$.

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

$$M_c = n_0 \cdot M/k, \quad (2.23)$$

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_n вибраного ВМ має бути рівний або більше величини M_c .

2.4 Приклад розрахунку ВМ з односідельним регулюючим органом

2.4.1 Вихідні дані для розрахунку

Регульоване середовище – вода.

Тиск перед регулюючим органом $P_1 = 60$ кгс/см².

Приєднувальний (умовний) діаметр регулюючого органу $d = 20$ мм.

Діаметр сідла $d_c = 18$ мм.

Діаметр штока $d_{ш} = 20$ мм.

Хід штока $h_{ш} = 22$ 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 $d_{ш} > d_c$, то найбільша сила тиску середовища на шток буде в положенні "відкрито", коли перепад тиску мінімальний. Нехтуючи величиною цього перепаду, знайдемо:

$$(N_z + N_{ш})_{\max} = 0,785d_{ш}^2 P_1 = 0,785 \cdot 2^2 \cdot 60 = 189 \text{ кгс.}$$

2.4.3 Визначимо силу тертя штока в сальнику:

$$M_{тр} = 1,1d_{ш} + 0,02d_{ш}P_1 = 1,1 \cdot 20 + 0,02 \cdot 20 \cdot 60 = 46 \text{ кгс.}$$

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

$$N_{ущ} \approx 0,75\pi d_c = 0,75 \cdot 3,14 \cdot 18 = 42 \text{ кгс.}$$

2.4.5 Визначимо максимальне перестановочне зусилля на штоку:

$$N_{nc} = (N_c + N_{ш})_{max} + N_{тр} + N_{ущ} = 189 + 46 + 42 = 277 \text{ кгс.}$$

2.4.6 Приймавши коефіцієнт запасу $n = 2$, визначимо необхідний момент на важелі регулюючого органу

$$M = nb \cdot N_{nc} = 2 \cdot 0,045 \cdot 277 = 25 \text{ кгс} \cdot \text{м.}$$

2.4.7 Визначимо необхідний обертаючий момент на вихідному органі ВМ:

$$M_c = \frac{n_0 M}{k} = \frac{4 \cdot 25}{1,7} = 59 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 578 \text{ н} \cdot \text{м},$$

де $n_0 = 4$ – коефіцієнт послаблення обертаючого моменту механізмом зчленування. За каталогами виробників вибираємо МЭО-630/25-0,63-92К, що має номінальний обертаючий момент 630 н·м.

3 РОЗРАХУНКИ НАДІЙНОСТІ

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Методи оцінки надійності технічних засобів (ТЗ) вибираються відповідно до вимог ДСТУ 3004-95 [10, 11].

3.1.2 Надійність ТЗ характеризується наступними показниками [12]:

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

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

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (3.1)$$

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

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.2)$$

3.1.5 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 :

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{a(t)}{1 - \int_0^t a(t)dt} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.3)$$

Звідси

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt. \quad (3.4)$$

Або

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (3.5)$$

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

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} ta(t)dt, \quad (3.6)$$

або

$$T_{cp} = \int_0^{+\infty} P(t)dt. \quad (3.7)$$

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

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

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

$$\bar{T}_{cp} = \sum_{i=1}^n t_i / n, \quad (3.8)$$

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

Для розрахунку MTBF використовують наступну залежність:

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.9)$$

3.2 Розрахунок показників надійності АСК ТП

3.2.1 Оцінка показників надійності комплексу технічних засобів АСК ТП проводиться по функціях і задачах АСК ТП. Для всіх функцій і задач визначаються критерії відмов і необхідні показки надійності. Далі будуються надійносно-функціональні схеми (НФС). Елементами НФС задачі є технічні засоби, призначені для виконання цієї задачі. 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. У випадку резервування технічних засобів відповідні часті НФС з'єднуються паралельно. Елементами НФС функції є задачі, що входять в цю функцію.

3.2.2 Методи і приклади оцінки надійності АСК ТП описані в [13].

3.3 Розрахунок показників надійності засобів вимірювання

3.3.1 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.

3.3.2 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 , °C;
- 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 $P_H(t_0)$;
 - електричні режими роботи елементів (струм, напруга, потужність тощо).
- 3.3.3 Визначають інтенсивність відмов елементів для кожної j -тої групи:

$$\lambda_j = \frac{\lambda_{0j}}{t_0} (t_1 F_1 + t_2 F_2) z_j, \quad (3.10)$$

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

z_j – кількість елементів у групі;

F_1, F_2 – поправочні функції, що є добутком поправочних коефіцієнтів згідно таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Поправочні функції для типових елементів

Тип елемента	Функція F_1	Функція 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_1	$a_1 \cdot a_3$
Індикатори	$a_1 \cdot a_2$	$a_1 \cdot a_3$
Електричні машини	$a_1 \cdot a_4$	$a_1 \cdot a_3$

Примітка: m – число контактних пар; n – число обмоток.

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

a_2 – температурний режим;

a_3 – відсутність навантаження (режим зберігання);

a_4 – вплив несправностей типу «коротке замикання» і обрив;

a_5 – конструкцію корпусу елемента;

a_6 – складність (для мікросхем);

a_8 – функціональне призначення;

a_{11} – розсіювану потужність;

a_{12} – номінальний опір.

Значення коефіцієнтів a_i наведені у Додатку Д.

3.3.4 Визначається інтенсивність відмов ЗВ в цілому формулою:

$$\lambda = K b_{np} \sum_{j=1}^L n_j \lambda_j, \quad (3.11)$$

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

b_{np} – коефіцієнт, що враховує тип приладу (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта b_{np}

Група засобів вимірювання	Клас точності	b_n
Електровимірювальні стрілочні прилади	0,5	1,5
	0,2	2
	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

3.3.5 Розраховують час безвідмовної роботи ЗВ за формулою (3.9).

3.3.6 Визначають ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0}. \quad (3.12)$$

3.3.7 Перевіряють відповідність ЗВ нормі надійності:

$$P(t_0) \geq P_n(t_0). \quad (3.13)$$

Якщо умова (3.13) виконується, роблять висновок про достатню надійність ЗВ і розрахунок закінчується.

Якщо умова (3.13) не виконується, роблять висновок про необхідність резервування і розрахунок продовжується.

3.3.8 Визначають ймовірність безвідмовної роботи резервованого ЗВ:

$$P_p(t_0) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{R+1}, \quad (3.14)$$

де R – кратність резервування.

3.3.9 Визначають густину розподілу часу відмов:

$$f_p(t) = \lambda(R+1)e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t})^R. \quad (3.15)$$

3.3.10 Розраховують інтенсивність відмов резервованого ЗВ:

$$\lambda_p(t) = \frac{f_p(t)}{P_p(t)}. \quad (3.16)$$

3.3.11 Поторюють дії за п.п. 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7.

3.3.12 Роблять рекомендації з підвищення надійності.

3.4 Приклад розрахунку показників надійності засобу вимірювання

3.4.1 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 $P_n(t_0) = 0,95$;
 з) складові елементи ЗВ перелічені у табл. 3.2.
 Час перебування у ввімкненому стані $t_2 = t_0 - t_1 = 3500$ год.

Таблиця 3.2 – Характеристики елементів вимірювального перетворювача

Група	Підгрупа	Тип	Кільк.	Режим роботи				Розраховане значення λ_j , 1/год
				T , °C	K_n	U , В	P , Вт	
1 Мікросхеми	1	Цифрові біполярні	4	40	0,3			$0,617 \cdot 10^{-6}$
	2	Аналогові	1	20	0,3			
2 Конденсатори	1	Керамічні	6	40		800		$1,201 \cdot 10^{-6}$
	2	Електролітичні	2	30	0,1			
3 Резистори	1	Плівчасті	2	35			0,5	$0,013 \cdot 10^{-6}$
	2	Змінні дрітові	2	40			0,1	
4 Перемикачі			1	40				$0,0196 \cdot 10^{-6}$
5 Трансформатори			1	50				$6,197 \cdot 10^{-6}$

3.4.2 Розраховуємо поправочний коефіцієнт a_1 , урахувавши умови і дані з Додатку Г:

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 ($b_4 = 1$).

$$a_1 = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1 = 2,184.$$

3.4.3 Для підгрупи 1 групи 1:

а) у Додатку В 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:

$$\lambda_{11} = \frac{\lambda_{01}}{t_0} (t_1 F_1 + t_2 F_2) z_{11} = \frac{0,1 \cdot 10^{-6}}{5000} (1500 \cdot 3,423 + 3500 \cdot 1,009 \cdot 10^{-3}) \cdot 4 = 0,411 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

3.4.4 Для підгрупи 2 групи 1:

а) номінальна інтенсивність відмов $\lambda_{02} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/год;

б) розраховуємо поправочні функції:

$$F_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6 \cdot a_8 = 2,184 \cdot 1 \cdot 0,25 \cdot 0,28 \cdot 1,5 = 0,685;$$

$$F_2 \text{ те ж саме, що у п. 3.4.3;}$$

в) інтенсивність відмов:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_{02}}{t_0} (t_1 F_1 + t_2 F_2) z_{12} = \frac{0,1 \cdot 10^{-6}}{5000} (1500 \cdot 0,685 + 3500 \cdot 1,009 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 =$$

$$= 0,206 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год.}$$

3.4.5 Інтенсивність відмов першої групи:

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

3.4.6 Аналогічно знаходимо значення інтенсивності відмов для усіх груп і заносимо їх в останню графу таблиці 3.2.

3.4.7 Коефіцієнт K , що враховує кількість механіко-кінематичних ланок, знаходимо за номограмою Додатку Е: $K = 1,1$.

3.4.8 Коефіцієнт b_{np} беремо з табл. 3.1: $b_{np} = 1$.

3.4.9 Інтенсивність відмов засобу в цілому згідно (3.11):

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

3.4.10 Розраховуємо час безвідмовної роботи засобу за формулою (3.9):

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

3.4.11 Розраховуємо ймовірність безвідмовної роботи за формулою (3.12):

$$P(t_0) = e^{-\lambda t_0} = e^{-8,048 \cdot 10^{-6} \cdot 5000} = 0,96.$$

3.12 Оскільки нерівність (3.13) виконується, засіб відповідає умовам з надійності.

3.4 Метрологічна надійність засобів вимірювання

3.4.1 Загальні поняття

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

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

Явна відмова діагностується без залучення спеціальних засобів діагностики: ввімкнули – не працює.

Прихована відмова зовнішньо себе не виявляє, проте покази ЗВ не відповідають дійсності.

3.4.1.3 Для кількісного опису характеристик метрологічної надійності ЗВ використовують такі показники.

Коефіцієнт готовності K_G - ймовірність того, що за заданий проміжок часу не виникне неприхованої відмови. Проміжок часу визначається часом від початку експлуатації, або від моменту повернення з ремонту до моменту відправлення ЗВ на черговий ремонт з причини явної відмови.

Коефіцієнт вірогідності K_D - ймовірність того, що за деякий час не виникне прихованої відмови.

Час напрацювання на явну відмову T_J - математичне очікування проміжку часу, за який виникає хоча б одна явна відмова.

Час напрацювання на приховану відмову T_C - математичне очікування проміжку часу, за який виникає хоч би одна прихована відмова.

Час, напрацювання на ремонт $T_{рем}$ - математичне очікування проміжку часу від моменту відновлення ЗВ після попереднього ремонту до моменту здачі ЗВ до наступного ремонту незалежно від причин.

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

3.4.1.6 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 на відміну від неприхованої відмови, яка діагностується відразу без залучення спеціальних засобів діагностики.

3.4.2 Математична модель метрологічної надійності

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

3.4.2.1 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;

C (check) - ЗВ знаходиться в повірці;

R (repair) - ЗВ знаходиться в ремонті.

3.4.2.3 На рис. 3.1 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.

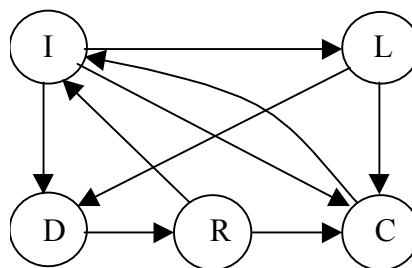


Рис. 3.1 – Граф станів ЗВ

3.4.2.4 У графі станів можна виділити характерні шляхи, показані на рис. 3.2.

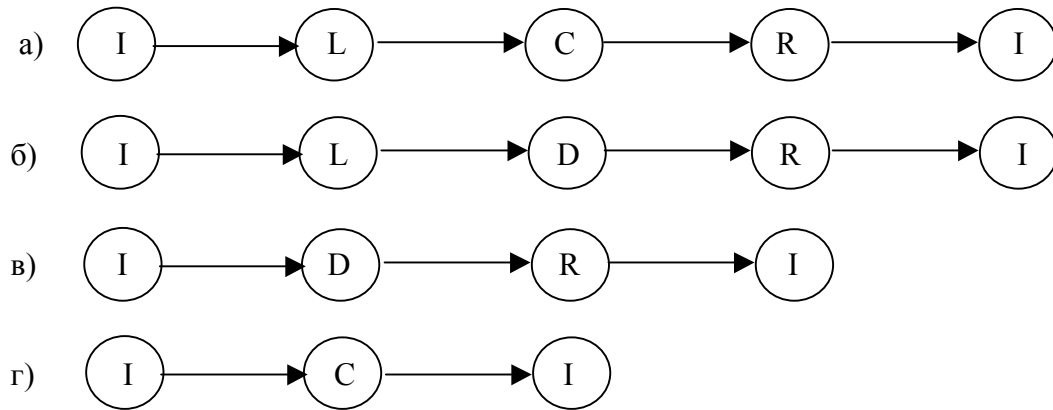


Рис. 3.2 – Характерні шляхи у графі станів

Згідно з першим шляхом (рис. 2, а) справний ЗВ (I) переходить в стан прихованої відмови (L), яка виявляється під час перевірки (C). Після ремонту (R) ЗВ повертається в справний стан.

ЗВ може потрапити в ремонт і до чергової перевірки, якщо буде виявлена явна відмова (рис. 2, б і в).

І, нарешті, ЗВ може знаходитися в справному стані до чергової перевірки (рис. 2, г).

3.4.2.5 Описом графа станів може служити матриця переходів:

	C	R	I	L	D
C	–	t_{CR}	t_{CI}	–	–
R	–	–	t_{RI}	–	–
I	t_{IC}	–	–	t_{IL}	t_{ID}
L	t_{LC}	–	–	–	t_{LD}
D	–	t_{DR}	–	–	–

Елементами матриці є часи переходів ЗВ з одного стану в інше. Деякі елементи матриці переходів являють собою 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 перевірки;

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

3.4.2.5 Розглянемо найцікавіший (з точки зору розрахунку метрологічної надійності) характерний шлях графа станів (рис. 3.3).

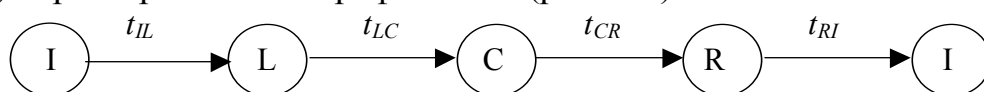


Рис. 3.3

Загальний час проходження цього шляху назвемо часом циклу функціонування ЗВ:

$$T_{ц} = t_{LL} + t_{LC} + t_C + t_R, \quad (3.17)$$

причому міжповірочний інтервал:

$$t_{IC} = t_{IL} + t_{LC}. \quad (3.18)$$

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

$$3_y = \frac{A + C_n \cdot t_C + C_p \cdot t_R + Y \cdot t_{LC}}{t_{IL}}, \quad (3.19)$$

де A – амортизація ЗВ за час $T_{ц}$; C_n – вартість перевірки, грн./год; C_p – вартість ремонту, грн./год; Y – збитки від роботи з несправним ЗВ, грн./год.

Амортизацію A можна розрахувати, виходячи із співвідношення $T_{ц}$ з терміном служби t_{cl} ЗВ:

$$A = C \frac{T_y}{t_{cl}}, \quad (3.20)$$

де C – вартість ЗВ.

3.4.3 Оптимізація міжповірочного інтервалу

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

$$\theta_n = \frac{t_{IC}}{t_{ID}}; \quad \theta_c = \frac{t_{LC}}{t_{ID}}. \quad (3.21)$$

Тоді завдання оптимізації МПІ можна сформулювати так:

$$\Psi = \min_{\theta_n, \theta_c} 3_y \quad (3.22)$$

при обмеженнях

$$\theta_{c \min} < \theta_c < \theta_{c \max}, \quad (3.23)$$

$$\theta_{n \min} < \theta_n < \theta_{n \max}. \quad (3.24)$$

3.4.3.2 Необхідні для вирішення цього завдання дані можуть бути визначені наступним чином. Згідно [16], МО часу знаходження ЗВ в справному стані

$$t_{IL} = \frac{T_y T_c}{T_y + T_c} \left(1 - e^{-\frac{(T_{II} - t_C)(T_y + T_c)}{T_y T_c}} \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_{-c,k}, \quad (3.25)$$

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

$$t_{\Sigma} = T_y \left(1 - e^{-\frac{T_{II} - t_C}{T_y}} \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_k, \quad (3.26)$$

де T_y – МО напрацювання на явну відмову; $T_{II} = (t_{IC} + t_C)$ – періодичність перевірки; T_c – МО напрацювання на приховану відмову; p_k – ймовірність того, що після k -ої перевірки ЗВ залишиться в роботі:

$$p_k = p_{c,k} + p_{-c,k}. \quad (3.27)$$

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 перевірки. Для їх визначення в [16] запропоновані рекурентні співвідношення:

$$p_{c,k+1} = (p_{c,k} + \Delta P_c \cdot p_{-c,k}) P_{-Д} (1 - \Delta P_y); \quad (3.28)$$

$$p_{-c,k+1} = (p_{-c,k} - \Delta P_c \cdot p_{-c,k}) P_{-Д} (1 - \Delta P_y); \quad (3.29)$$

де $\Delta P_c, \Delta P_y$ – ймовірність прихованої і явної відмови відповідно в міжповірочному інтервалі; $P_{-Д} = 1 - P_D$; P_D – ймовірність правильної діагностики в ході перевірки; $P_{-Л} = 1 - P_L$; P_L – ймовірність помилкової діагностики:

$$P_{-Л} = 1 - P_{-Д} (1 - P_{-Д}). \quad (3.30)$$

3.4.3.3 Як початкові значення для обчислення за рекурентними формулами (3.28) і (3.29) приймаються:

$$p_{-c,0} = \left[1 - P_{-Д} - \left(1 - e^{-\frac{t_c}{T_c}} \right) (1 - P_{cp}) \right] P_{-Л} e^{-\frac{t_c}{T_y}} \quad (3.31)$$

$$p_{c,0} = \left[P_{cp} + \left(1 - e^{-\frac{t_c}{T_c}} \right) (1 - P_{cp}) \right] P_{cp} e^{-\frac{t_c}{T_y}}, \quad (3.32)$$

де P_{cp} – ймовірність прихованої відмови відразу після ремонту.

3.4.3.4 Обчислення за формулами (3.26) і (3.27) слід продовжувати до тих пір, поки виконується умова

$$p_{c,k} + p_{-c,k} > \varepsilon, \quad (3.33)$$

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

3.4.3.5 Час роботи в стані прихованої відмови

$$t_{LC} = t_{\Sigma} - t_{IL}. \quad (3.34)$$

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

- 1) вводимо початкові дані $C, C_n, C_p, Y, t_c, t_R, T_y, P_{-Д}, P_{cp}$;
- 2) задаємося значеннями θ_n и θ_c ;
- 3) організуємо цикл вичислень за рекурентними формулами (3.28) і (3.29) до тих пір, поки виконується умова (3.33), одночасно накопичуємо суми $p_{-c,k}$ и p_k ;
- 4) визначаємо за формулами (3.25), (3.26) і (3.34) t_{IL}, t_{Σ} та t_{LC} ;
- 5) розраховуємо питомі витрати за формулою (3.19).

Цей алгоритм використовується для вирішення оптимізаційної задачі (3.22).

3.4.2 Приклади розрахунку параметрів метрологічної надійності

3.4.2.1 Алгоритм за п. 3.4.3.6 легко реалізується програмним пакетом MATLAB, який, зокрема, дає можливість побудови графіків залежності питомих витрат від θ_n та θ_c . На рис. 3.4 показан такої графік, отриманий для випадку ідеальної перевірки ($P_{-Д} = 0$) і ідеального ремонту ($P_{cp} = 0$).

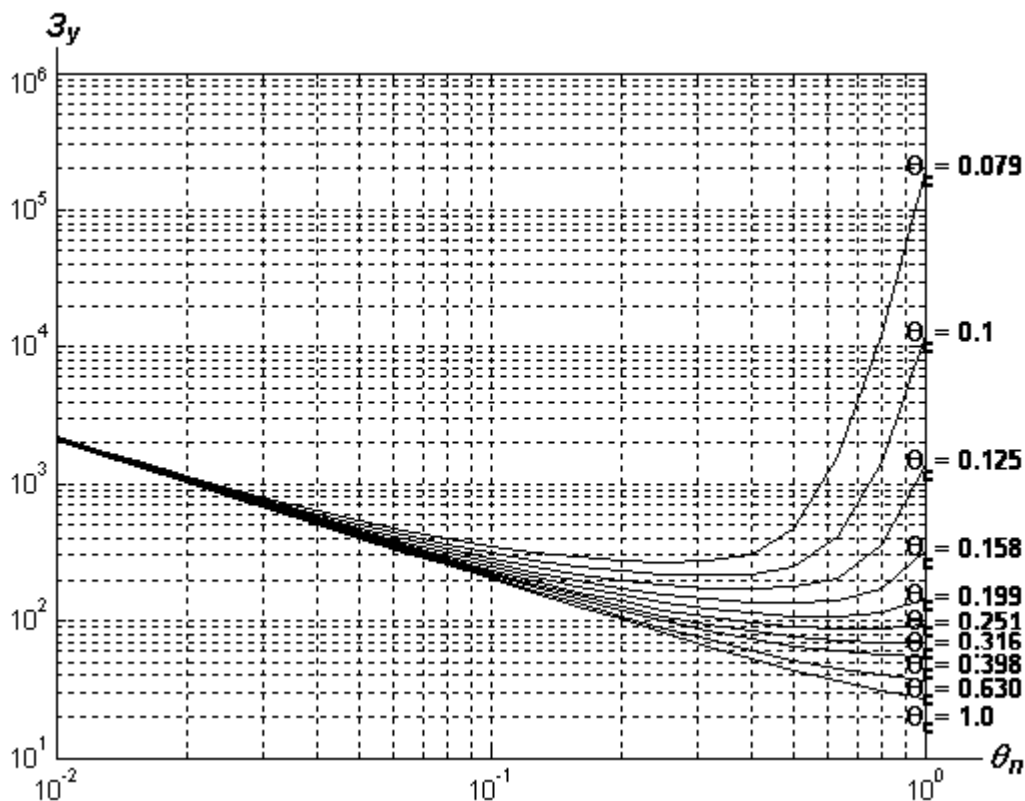


Рис. 3.4 – Залежність питомих витрат від міжповірного проміжку θ_n

3.4.2.2 Графік на рис. 3.4 дає можливість визначення оптимального МПІ в залежності від заданого значення МО часу роботи ЗВ в справному стані без проведення розрахунків.

3.4.2.3 Для обчислення значень коефіцієнта готовності K_G і коефіцієнта вірогідності K_D можна використати алгоритм, схема якого надана у Додатку Е. Він просто реалізується засобами MATLAB. На рис. 3.5 і 3.6 показані графіки, побудовані з використанням цього алгоритму. Вони відповідають випадку ідеальної повірки ($P_D = 1$ і, відповідно, $P_{\neg D} = 0$) з ідеальною діагностикою та ідеальним ремонтом, тобто приховані відмови після ремонту відсутні.

3.4.2.4 Графіки 3.4, 3.5 та 3.6 дозволяють знаходити без розрахунків значення МПІ, K_G та K_D для вищевказаних умов ідеальної повірки. У випадках, коли $P_D < 1$ $P_{\neg D} > 0$ (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. 3.4.3.6 і Додатку Е. Величина $P_{\neg D}$ визначається на підставі аналізу якості проведених повірочних робіт. Величина P_{CP} визначається якістю ремонтних робіт.

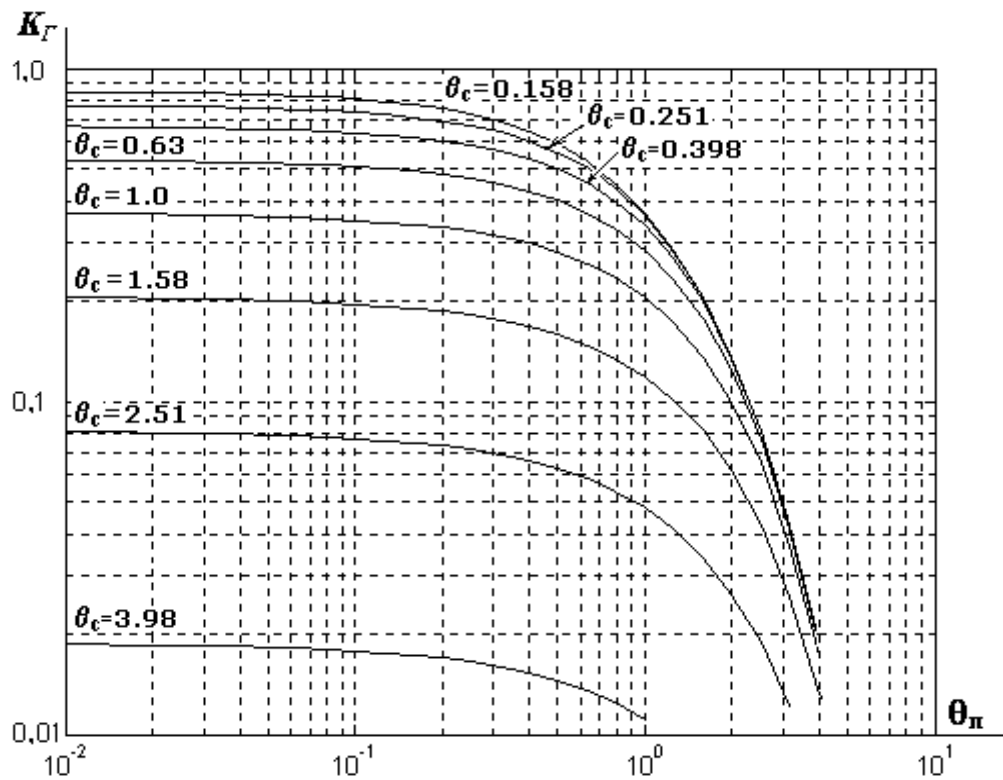


Рис. 3.5 – Графік залежності коефіцієнта готовності K_r від міжповірного проміжку θ_π

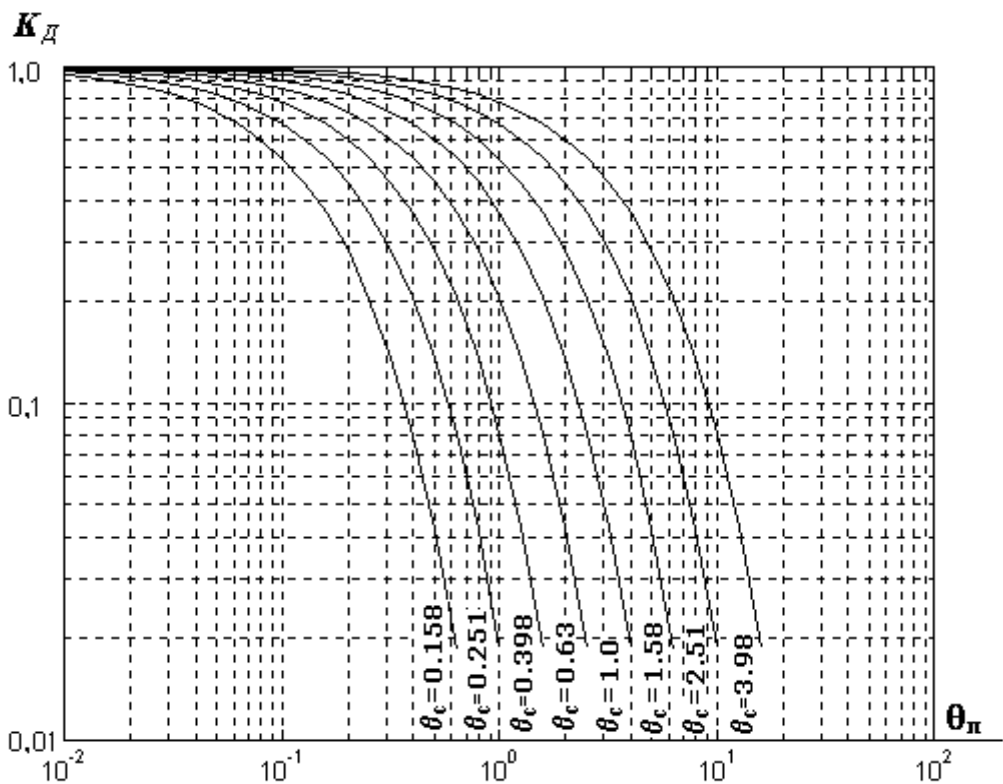


Рис. 3.6 – Графік залежності коефіцієнта вірогідності K_d від міжповірного проміжку θ_π

4 ПРОЕКТНИЙ РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

4.1 Загальні відомості

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

- а) 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 обґрунтування вибору засобів вимірювання шляхом порівняння різних варіантів побудови каналів і вибору найбільш прийняттого (по відношенню до надійності, вартості і т.д.) варіанта, що забезпечує задану точність вимірювання.

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

4.1.3 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.

4.1.4 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.

4.1.5 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.

4.2 Методика оцінки основної похибки вимірювальних каналів

4.2.1 Межі основної відносної похибки ВК (окрім ВК температури) $\delta_{ИК_осн}$, % визначають, виходячи із складу ВК АСК, за формулою:

$$\delta_{ИК_осн} = K \cdot \sqrt{\delta_{ПВП}^2 + \delta_{ВП}^2 + \delta_K^2 + \delta_{алг}^2 + \delta_{ЛЗ}^2}, \quad (4.1)$$

де $K = 1,2$;

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

$\delta_{ВП}$ – відносна похибка вторинного перетворювача, % (за наявності);

δ_K – відносна похибка контролера, %;

$\delta_{алг}$ – відносна похибка алгоритму, % (за наявності);

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

Примітки:

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

2. Похибка $\delta_{ЛЗ}$ 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 $\delta_{ЛЗ} = 0$.

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

$$\Delta_{ВК_осн} = K(\Delta_{ПВП} + \Delta_{ВП} + \Delta_K), \quad (4.2)$$

де $K = 1,2$;

$\Delta_{ПВП}$ – абсолютна похибка первинних вимірювальних перетворювачів, °С;

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

Δ_K – абсолютна похибка контролера, °С.

4.2.3 Для обчислення похибки ВК за формулою (4.1) похибку компонентів ВК АСК переводять у відносну форму δ , %:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{ном}} \cdot 100 = \gamma \cdot \frac{X_B - X_H}{X_{ном}}, \quad (4.3)$$

де Δ – межі допустимої абсолютної похибки компонента ВК АСК;

γ – межі допустимої приведенної 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 $X_{ном}$);

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

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

4.2.3 Для обчислення похибки ВК за формулою (4.2) похибку компонента ВК АСК переводять в абсолютну форму Δ :

$$\Delta = \gamma \cdot \frac{X_B - X_H}{100}. \quad (4.4)$$

4.2.5 Відносну похибку обчислюють в точках $X_{iном}$ ($i=1, \dots, 5$), що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів, і вибирають максимальне значення.

4.2.6 Для модулів аналогового введення контролера, похибка яких нормована в приведеній формі, необхідно визначити значення струму, електричного опору, термоелектрорушійної сили (ТЕРС), що відповідає номінальному значенню $X_{номі}$. Розрахунок значення струму $I_{номі}$, мА, що відповідає номінальному значенню $X_{номі}$, проводять згідно формули:

$$I_{ном} = \frac{D_{сигн.} \cdot X_{ном}}{D_{ФВ}} + 4, \quad (4.5)$$

де $D_{сигн.}$ – різниця між верхнім і нижнім межами діапазону вхідного сигналу, мА;

$X_{ном}$ – номінальне значення фізичної величини (ФВ) у одиницях вимірів ФВ;

$D_{ФВ}$ – різниця між верхнім і нижнім межами діапазону вимірів ФВ, в одиницях вимірів ФВ.

Якщо діапазон сигналу 4–20 мА, то до обчисленого за формулою (4.5) значення $I_{ном}$ необхідно додати 4 мА.

4.2.7 Значення опору на виході термоперетворювачів опору визначають за номінальною статичною характеристикою перетворення:

$$R_t = W_t \cdot R_0, \quad (4.6)$$

де R_t – опір термоперетворювача опору при температурі t , Ом;

W_t – значення відношення опорів при температурі t до опору при 0 °С.

Значення W_t вибирають з таблиць Додатку А ДСТУ 2858-94.

4.2.8 Значення ТЕРС термопар різних типів у залежності від температур їх робочих кінців при температурі вільних кінців 0 °С вибирають відповідно до ДСТУ EN 60584-1:2016.

4.2.9 Межі основної приведенної похибки ВК тиску $\gamma_{ПК_осн}$, %, визначають таким чином:

а) переводять похибку компонентів ВК з приведенної форми у відносну форму за формулою (4.6) в точках $X_{номі}$, що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів;

б) відносну похибку ВК обчислюють за формулою (4.1);

в) переводять значення похибки ВК, що відповідають п'яти точкам діапазону, з відносної форми в приведену:

$$\gamma_i = \frac{\delta \cdot X_{номі}}{X_B - X_H} \quad (4.7)$$

З п'яти отриманих значень вибирають максимальне і приписують похибці ВК.

4.2.10 Для ВК витрати, визначуваної методом змінного перепаду тиску, межі основної приведенної похибки ВК витрати $\delta_{ПК_осн}$, %, визначають таким чином:

а) відносну похибку ВК обчислюють в п'яти точках діапазону вимірів витрати :

$$\delta_{ПК_осн} = K \cdot \sqrt{\delta_{ПК}^2 + \delta_{ЛЗ}^2}, \quad (4.8)$$

де $K = 1,2$;

$\delta_{ПК}$ – 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 (4.7). З п'яти отриманих вибирають максимальне значення і приписують похибці ВК.

4.2.11 Відносна похибка ВК витрати (при використанні витратомірів) в робочих умовах експлуатації, $\delta_{ВК_р.у.}$, %:

$$\delta_{ВК_р.у.} = K \cdot \sqrt{\delta_{ПВП}^2 + \delta_{ВП}^2 + \delta_K^2 + \delta_{алг}^2 + \delta_{ЛЗ}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \delta_{\delta_{ij}}^2}, \quad (4.9)$$

де $\delta_{\delta_{ij}}$ – додаткова відносна похибка i -го компонента ВК від j -ої впливаючої величини, %;

n – число компонентів;

l – число впливаючих величин.

4.2.12 Межі абсолютної похибки ВК температури в робочих умовах $\Delta_{ВК_р.у.}$, %, визначають виходячи із складу ВК АСК:

$$\Delta_{BK_p.y.} = \Delta_{ПВП} + \Delta_{ВП} + \Delta_K + \sum_{k=1}^3 \sum_j^l \Delta_{okj}, \quad (4.10)$$

де Δ_{okj} – абсолютна додаткова похибка k -го компонента ВК від j -ої впливаючої величини, °С.

Переведення додаткової похибки в абсолютну форму здійснюють аналогічно п. 4.2.3.

4.2.13 Межі приведеної похибки ВК тиску в робочих умовах $\gamma_{BK_p.y.}$, %, визначають з використанням формули (4.9).

4.2.14 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:

$$\delta_{BK_p.y.} = K \cdot \sqrt{\delta_{ПК}^2 + \delta_{ЛЗ}^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^l \delta_{okj}^2}. \quad (4.11)$$

4.3 Розрахунок невизначеності аналого-цифрового перетворення

4.3.1 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 [17]:

- похибка квантування, яка визначається зазвичай як половина одиниці молодшого розряду (ОМР);
- диференціальна нелінійність АЦП, яка визначається 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 значенням 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.

4.3.2 Розглянемо оцінку невизначеності АЦП на прикладі мікроконтролера АТmega164. Десятибітовий однокристальний АЦП мікроконтролера перетворює напругу 0...5 В за 2^N кроків. Похибки аналого-

цифрового перетворення в документації мікроконтролера приведені по відношенню до одиниці молодшого розряду, англійською мовою Least Significant Bit (LSB), яка може бути вчислена за формулою:

$$LSB = V_{REF} / 2^N, \quad (4.12)$$

де N – разрядність АЦП;

V_{REF} – опорна напруга.

Нижчий код відповідає 0, вищий 2^{N-1} .

4.3.3 Оскільки АЦП мікроконтролера ATmega164 працює за принципом послідовного наближення, то й 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 ATmega164 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 [18] приведені наступні похибки АЦП мікроконтролера ATmega164 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.

4.3.4 За даними документації на ATmega164 [18] 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.

4.3.5 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:

$$\Delta_{NL} = \delta_{NL} \frac{V_{REF}}{2^N}. \quad (4.13)$$

4.3.6 Оцінку стандартної невизначеності за типом В визначаємо згідно формули:

$$\hat{u}_{B,NL} = \frac{\Delta_{NL}}{K(p)\sqrt{3}}, \quad (4.14)$$

де $K(p)$ – коефіцієнт, рівний 1,1 для імовірності $p=0,95$ і 1,4 для імовірності $p=0,99$.

4.3.7 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:

$$\Delta_{GO} = \delta_{GO} \frac{V_{REF}}{2^N}; \hat{u}_{BGO} = \frac{\Delta_{GO}}{K(p)\sqrt{3}}. \quad (4.15)$$

4.3.8 Абсолютні межі шуму квантування аналогово-цифрового перетворення дорівнюють половині одиниці молодшого розряду:

$$\Delta_Q = 0,5 \cdot \text{LSB}. \quad (4.16)$$

Невизначеність квантування u_Q дорівнює межі похибки квантування, яка ділиться на коефіцієнт охоплення для рівномірного закону розподілу:

$$u_Q = \Delta_Q / \sqrt{3}. \quad (4.17)$$

4.3.9 У таблиці 4.1 приведений бюджет невизначеності аналогово-цифрового перетворення.

Таблиця 4.1 – Бюджет невизначеності аналогово-цифрового перетворення

Вхідні величини	Оцінки вхідних величин	Стандартна невизначеність	Розподіл імовірності
Похибка нелінійності перетворення		$\hat{u}_{B_{NL}} = \frac{\Delta_{NL}}{K(p)\sqrt{3}}$	Рівномірний
Похибка зсуву і посилення		$\hat{u}_{B_{GO}} = \frac{\Delta_{GO}}{K(p)\sqrt{3}}$	Рівномірний
Похибка квантування		$u_Q = \frac{\Delta_Q}{\sqrt{3}}$	Рівномірний
Y	0...5 В	$u(y)$	Рівномірний

4.3.10 Сумарну невизначеність u_s вихідного коду визначаємо наступним чином:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)},$$

$$u_s = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{NL}}{K(p)\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{GO}}{K(p)\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_Q}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (4.18)$$

4.3.11 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 $u_1(y) \geq u_2(y)$. Значення коефіцієнта охоплення k_B вибираємо з таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнта охоплення при рівномірно розподілених вхідних величинах

$ u_2(y)/u_1(y) $	1...0,8	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

Приведені в табл. 4.1 і 4.2 дані дозволяють розрахувати розширену невизначеність за формулою:

$$U = k_{BU_s}. \quad (4.19)$$

4.4 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання температури

4.4.1 Структурна схема вимірювального каналу показана на рис. 4.1.

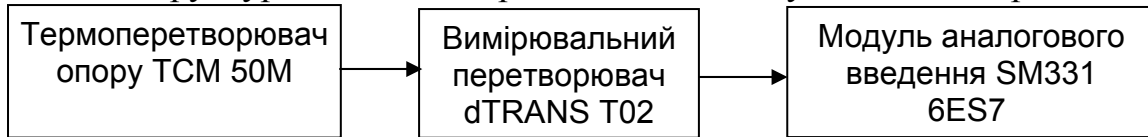


Рис. 4.1 – Структурна схема каналу вимірювання температури

4.4.2 Вихідними даними для розрахунку є граничні значення похибок елементів ВК:

- а) термоперетворювача опору: $\Delta_{TCM} = \pm(0,25 + 0,0035 \cdot t) \text{ } ^\circ\text{C}$;
- б) вимірювального перетворювача: $\Delta_{dTRANS_R} = \pm 0,3 \text{ Ом}$;
- в) модуля аналогового введення: $\gamma = \pm 0,05\%$.

4.4.3 Межі основної абсолютної похибки ВК температури:

$$\Delta_{BK_осн} = \Delta_{TCM} + \Delta_{dTRANS} + \Delta_K.$$

4.4.4 Похибка первинного вимірювального перетворювача:

$$\Delta_{TCM} = \pm(0,25 + 0,0035 \cdot t) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4.5 Похибку вторинного перетворювача dTRANS T02 необхідно перевести в одиниці вимірів температури. Для цього визначимо відносну похибку вимірів опору δ_R :

$$\delta_R = \frac{\Delta_{dTRANS_R}}{X_{ном}} \cdot 100, \text{ } \%$$

де за $X_{ном}$ приймають значення фізичної величини, що відповідає 100% діапазону вимірів ($X_{ном} = X_e - X_n$).

4.4.6 Визначимо опір, що відповідає нижній межі діапазону вимірів температури (мінус $50 \text{ } ^\circ\text{C}$):

$$R_t = W_t \cdot R_0.$$

Для термоперетворювача опору типу ТСМ з НСХ перетворення 50М опір при температурі $0 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$R_0 = 50 \text{ Ом}.$$

Значення відношення опорів W_t при температурі мінус $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ і плюс $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ до опору при $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ визначають для номінального значення відношення опорів $W_{100} = 1,4280$ (нормовано в Описі типу ТСМ 50М) з таблиці А.3 Додатку А ДСТУ 2858-94:

$$W_{-50 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,7845;$$

$$W_{50 \text{ } ^\circ\text{C}} = 1,2139.$$

Тоді: $R_{t(-50 \text{ } ^\circ\text{C})} = 0,7845 \cdot 50 = 39,225 \text{ Ом}$; $R_{t(50 \text{ } ^\circ\text{C})} = 1,2139 \cdot 50 = 60,695 \text{ Ом}$.

Відносна похибка вимірів опору

$$\delta_R = \frac{0,3}{60,695 - 39,225} \cdot 100 = 1,40\%$$

4.4.7 Абсолютна похибка вторинного перетворювача dTRANS T02 в одиницях виміру температури:

$$\Delta_{dTRANS} = \Delta_{dTRANS_T} = \frac{\delta_R}{100} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \frac{1,40}{100} \cdot 100 = 1,40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4.8 Похибку модуля аналогового введення контролера SM331 6ES7 331-7NF00-0AB0 необхідно перевести в абсолютну форму похибки вимірів температури:

$$\Delta_K = \frac{\gamma}{100} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \frac{0,05}{100} \cdot 100 = 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4.9 Похибка ВК температури:

$$\Delta_{BK_очн} = 0,25 + 0,0035 \cdot t + 0,05 = \pm(0,3 + 0,0035 \cdot t) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.4.10 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 °С):

$$\gamma_{p.y.} = \pm 0,3 \text{ } \%/^\circ\text{C}.$$

Похибку модуля аналогового введення контролера SIMATIC S7-300 необхідно перевести в абсолютну форму похибки вимірів температури:

$$\Delta_{K_{p.y.}} = \frac{\gamma_{p.y.}}{100} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) = \frac{0,3}{100} \cdot 100 = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Обчислюємо похибку ВК температури в робочих умовах:

$$\Delta_{BK_p.y.} = 0,25 + 0,0035 \cdot t + 0,3 = (0,55 + 0,0035 \cdot t) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.5 Приклад розрахунку похибки каналу вимірювання тиску

4.5.1 Структурна схема вимірювального каналу показана на рис. 4.2.

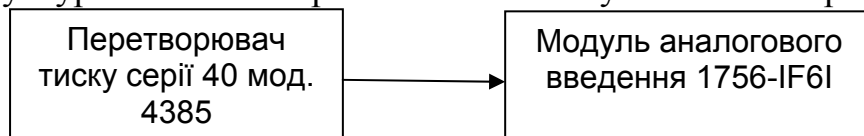


Рис. 4.2 – Структурна схема каналу вимірювання тиску

4.5.2 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 $\gamma_{пт} = \pm 0,5\%$;
- 3) робочі умови експлуатації від мінус 40 до 40 °С;
- 4) температурний коефіцієнт похибки $\pm 0,1\% / 10 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- 5) додаткова похибка, викликана зміною напруги живлення на кожні 10 В, $\pm 0,1\% / 10 \text{ В}$.

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 °С) $\gamma_{p.y.} = \pm 0,54\%$.

4.5.3 Похибку перетворювача тиску необхідно перевести у відносну форму за формулою (4.3), у яку підставляємо $X_H = 0,1$ кгс/см², $X_B = 10$ кгс/см².

Згідно п. 4.2.5, відносну похибка обчислюють в точках $X_{ном}$, що відповідають 5, 25, 50, 75 та 95% від діапазону вимірів. Отже, $X_{ном1} = 0,5$ кгс/см² і маємо:

$$\delta_{пт} = 0,5 \cdot \frac{10 - 0,1}{0,5} = 9,9\%.$$

Результати розрахунків усіх значень $\delta_{пт}$ наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків значень $\delta_{пт}$

№ точки	$X_{ном}$, кгс/см ²	$\delta_{пт}$, %
1	0,5	9,9
2	2,5	1,98
3	5	0,99
4	7,5	0,99
5	9,5	0,521

4.5.4 Похибку модуля аналогового введення необхідно перевести у відносну форму за формулою (4.3).

Розрахунок значення струму $I_{ном}$, мА, що відповідає номінальному значенню $X_{ном}$, проводимо згідно формули (4.5), у яку підставляємо $D_{сигн.} = 16$ мА, $X_{ном1} = 0,5$ кгс/см²; $D_{ФВ} = 9,9$ кгс/см². Отже:

$$I_{ном} = \frac{D_{сигн.} \cdot X_{ном}}{D_{ФВ}} + 4 = \frac{16 \cdot 0,5}{9,9} + 4 = 4,8 \text{ мА}.$$

Результати розрахунків усіх значень $I_{ном}$ зводимо у таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 - Результати розрахунків похибки модуля аналогового введення

№ точки	$X_{ном}$, кгс/см ²	$I_{ном}$, мА	δ_k , %	$\delta_{ВК\text{ осн}}$, %	$\gamma_{ВК\text{ осн}}$, %
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

4.5.5 Визначаємо похибку модуля аналогового введення у відносній формі:

$$\delta_K = 0,1 \cdot \frac{20 - 4}{8} = 0,2\%.$$

4.5.6 Обчислюємо межі основної відносної похибки ВК тиску за формулою (4.1):

$$\delta_{BK_осн1} = 1,2 \cdot \sqrt{(9,9)^2 + (0,33)^2} = 12\%.$$

Переводимо значення похибки ВК з відносної форми в приведену:

$$\gamma_{BKосн1} = \frac{12 \cdot 0,5}{10 - 0,1} = 0,6\%.$$

Результати розрахунків $\delta_{BK_осн}$ заносимо в таблицю 4.4.

4.5.7 Вибираємо з таблиці 4.4 найбільше значення похибки:

$$\gamma_{BK_осн} = 0,9\%.$$

4.5.7 Для визначення похибок ВК у робочих умовах враховуємо, що оскільки в АСК прийняті заходи для стабілізації напруги живлення, то додаткову похибку, викликану зміною напруги живлення, не враховуємо.

4.5.8 Нормальна температура експлуатації 20 ± 5 °С. Максимальне відхилення від нормальних умов $60 - 25 = 55$ °С, що складає 5,5 разів по 10 °С. Округливши до більшого цілого 6 і врахувавши температурний коефіцієнт похибки $\pm 0,1\%/10$ °С, визначимо додаткову похибку перетворювача тиску як

$$\gamma_\theta = 0,1 \cdot 6 = 0,6\%.$$

Додаткову похибку перетворювача тиску переводимо у відносну форму за формулою (4.3), у яку підставляємо $X_H = 0,1$ кгс/см², $X_B = 10$ кгс/см², $X_{ном} = 0,5$ кгс/см²:

$$\delta_{пт_д} = 0,6 \cdot \frac{10 - 0,1}{0,5} = 11,88\%.$$

Аналогічно розраховуємо відносну похибку у точках $X_{ном}$, що відповідають 5, 25, 50, 75 і 95 % від діапазону вимірів.

4.5.9 Додаткову похибка модуля аналогового введення необхідно перевести у відносну форму за формулою (4.3).

Розрахунок значення струму $I_{ном}$, мА, що відповідає номінальному значенню $X_{ном}$, проводимо згідно формули (4.5), у яку підставляємо $D_{сигн.} = 16$ мА, $X_{ном1} = 0,5$ кгс/см²; $D_{ФВ} = 9,9$ кгс/см². Отже:

$$I_{ном} = \frac{D_{сигн.} \cdot X_{ном}}{D_{ФВ}} + 4 = \frac{16 \cdot 0,5}{9,9} + 4 = 4,8 \text{ мА}.$$

Результати розрахунків інших значень $I_{ном}$ приведені в таблиці 4.5.

4.5.10 Визначаємо похибку модуля аналогового введення у відносній формі:

$$\delta_{К_д1} = 0,54 \cdot \frac{20 - 4}{4,8} = 1,8\%.$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунків додаткової похибки

№ точки	$X_{ном}$, кгс/см ²	$I_{ном}$, мА	$\Delta_{пт}$, %	$\delta_{к_д}$, %	$\delta_{ВК_{р.у.}}$, %	$\gamma_{ВК_{р.у.}}$, %
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

4.5.11 Обчислюємо похибку ВК тиску в робочих умовах:

$$\delta_{ВК_{р.у.}} = 1,2 \cdot \sqrt{(9,9)^2 + (0,33)^2 + (11,88)^2 + (1,8)^2} = 18,7\%.$$

Переводимо значення похибки ВК з відносної форми в приведену:

$$\gamma_{ВК_{р.у.1}} = \frac{18,7 \cdot 0,5}{10 - 0,1} = 0,95\%.$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 4.5.

4.5.12 Вибираємо з таблиці 4.5 найбільше значення похибки:

$$\gamma_{ВК_{р.у.}} = 1,6\%.$$

5 ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

5.1 Статичні характеристики вимірювальних каналів

5.1.1 Функціональна залежність вихідного сигналу y у вимірювального засобу від вхідної величини x у статичному режимі роботи ЗВ називається його статичною характеристикою [21]:

$$y = f(x) \quad (5.1)$$

Частіше за все залежність (5.1) представляють у вигляді полінома:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (5.2)$$

де $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти статичної характеристики.

В ідеальному випадку всі коефіцієнти, крім a_1 , дорівнюють нулю і статична характеристика 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.

5.1.2 Аналітичним градуюванням називається операція визначення (відтворення) значення вимірювальної величини x за сигналом y у вимірювальної інформації на виході ЗВ. Операцію аналітичного градуювання виконують, використовуючи градуювальну характеристику засобу вимірювання, яка є оберненою функцією його статичної характеристики:

$$x^* = f^{-1}(y), \quad (5.3)$$

де x^* – значення вимірюваної величини, яке, згідно градуювальної характеристики ЗВ, відповідає значенню сигналу у вимірювальної інформації y .

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.

5.1.3 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 [22]:

$$y = a_o + A_o \cdot x, \quad (5.4)$$

де $A_o = \prod_{i=1}^N A_i$;

$$a_o = \sum_{i=1}^N \left(\prod_{j=i+1}^N A_j x_j \right) a_i, i = 1, 2, 3, \dots, N - 1.$$

5.1.4 Приклади аналітичного визначення статичних і градуювальних характеристик

5.1.4.1 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):

$$\Delta p = \rho s L, \quad (5.5)$$

де ρ – густина рідини, s – крутизна перетворення.

Перепад тиску лінійно перетворюється дифманометром у стандартний електричний сигнал. Статична характеристика описується рівнянням:

$$y = k_1 \rho s L, \quad (5.6)$$

де $k_1 = y_B / \Delta p_B$. Тут y_B – значення вихідного сигналу дифманометра, яке відповідає верхній межі вимірювання Δp_B .

Номінальну статичну характеристику одержуємо з (5.6) при номінальному значенні густини $\rho = \rho_0 = \text{const}$:

$$y = k L, \quad (5.7)$$

де $k = \rho_0 s = \text{const}$.

Їй відповідає градуювальна характеристика

$$L^* = y / k. \quad (5.8)$$

5.1.4.2 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 °С.

Знайдемо статичні характеристики для кожного компонента вимірювального каналу.

5.1.4.3 За номінальною статичною характеристикою для термопари знаходимо термоЕРС, що відповідає нижній $T_n = 500$ °С і верхній $T_g = 1000$ °С межах вимірювання. Отримаємо $E_n = 20,64$ мВ і $E_g = 41,269$ мВ. Рівняння статичної характеристики термопари запишемо в наступній формі:

$$E = a_1 T_n + A_1 T, \quad (5.9)$$

де T – поточне значення температури в діапазоні від 500 до 1000 °С.

Знайдемо параметри a_1 і A_1 :

$$a_1 = \frac{E_n}{T_n} = \frac{20,64}{500} = 0,04128 \text{ мВ/}^\circ\text{С}; \quad (5.10)$$

$$A_1 = \frac{E_g - E_n}{T_g - T_n} = \frac{41,269 - 20,64}{1000 - 500} = 0,04126 \text{ мВ/}^\circ\text{С}. \quad (5.11)$$

З урахуванням (5.10) і (5.11) одержимо:

$$E = 20,64 + 0,04126 \cdot T - E_n \text{ мВ}. \quad (5.12)$$

5.1.4.4 Рівняння статичної характеристики нормуючого перетворювача має вигляд:

$$I = a_2 E_n + A_2 E . \quad (5.13)$$

Обчислимо параметри a_2 і A_2 :

$$a_2 = \frac{I_n}{E_n} = \frac{4}{20,64} = 0,1938 \text{ мА/мВ}; \quad (5.14)$$

$$A_2 = \frac{I_k - I_n}{E_k - E_n} = \frac{20 - 4}{41,269 - 20,64} = 0,7756 \text{ мА/мВ}. \quad (5.15)$$

З урахуванням (5.14) і (5.15) маємо:

$$I = 4 + 0,7756 \cdot E - E_n \text{ мА}. \quad (5.16)$$

5.1.4.5 Статичну характеристику електропневмоперетворювача опишемо виразом

$$P = a_3 I_n + A_3 I . \quad (5.17)$$

Обчислимо параметри a_3 і A_3 :

$$a_3 = \frac{P_n}{I_n} = \frac{0,02}{4} = 0,005 \text{ МПа/мА}; \quad (5.18)$$

$$A_3 = \frac{P_k - P_n}{I_k - I_n} = \frac{0,1 - 0,02}{20 - 4} = 0,005 \text{ МПа/мА}. \quad (5.19)$$

З урахуванням (5.18) і (5.19) рівняння (5.17) приймає наступний вигляд:

$$P = 0,02 + 0,005 I - P_n \text{ МПа}. \quad (5.20)$$

5.1.4.6 Статична характеристика вторинного приладу починається з нуля й описується рівнянням

$$\Pi = A_4 \cdot P , \quad (5.21)$$

де Π – покази приладу.

Шкала повинна бути відградуєвана в одиницях вимірювання технологічного параметра, тобто в градусах. Оскільки діапазон вимірювання $T_v - T_n = 500 \text{ }^\circ\text{C}$, то параметр

$$A_4 = \frac{T_k - T_n}{P_k - P_n} = \frac{1000 - 500}{0,1 - 0,02} = 6250 \text{ }^\circ\text{C/МПа}. \quad (5.22)$$

З урахуванням (5.22) для вторинного приладу маємо:

$$\Pi = 6250 \cdot P . \quad (5.23)$$

5.1.4.7 Знайдемо статичну характеристику вимірювального каналу. Обчислимо параметри a_0 і A_0 :

$$\begin{aligned} a_0 &= a_1 A_2 A_3 A_4 T_n - a_2 A_3 A_4 E_n + a_3 A_4 I_n = \\ &= 0,04128 \cdot 0,7756 \cdot 0,005 \cdot 6250 \cdot 500 - \\ &- 0,1938 \cdot 0,005 \cdot 6250 \cdot 20,64 + 0,005 \cdot 6250 \cdot 4 = 500; \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$A_0 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 = 0,04126 \cdot 0,7756 \cdot 0,005 \cdot 6250 = 1,0 . \quad (5.25)$$

З врахуванням (5.24) і (5.25) вираз для статичної характеристики каналу приймає вигляд

$$P = a_0 + A_0 T = 500 + T - T_n \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.26)$$

5.2 Динамічні характеристики вимірювальних каналів

5.2.1 Теоретичні відомості

5.2.1.1 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 “вхід-вихід” каналу від інерційних властивостей компонентів описується диференціальним рівнянням:

$$b_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) = ax(t). \quad (5.27)$$

Коефіцієнти b_0, \dots, b_n залежать від внутрішніх властивостей (інерції, пружності, тертя тощо) компонентів, в той час як коефіцієнт a – від зовнішніх причин і коефіцієнта підсилення.

5.2.1.3 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.).

5.2.1.4 Нормуючі перетворювачі володіють дуже малою 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.

5.2.1.5 За певних умов у вимірювальному каналі можуть виникати незатухаючі чи слабозатухаючі 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. 5.1, а). Для заспокоєння силових перетворювачів і приладів застосовують різні пристрої, які демпфують. Вони представляють собою диференціюючі ланки, включені в зворотний зв'язок (рис. 5.1, б).

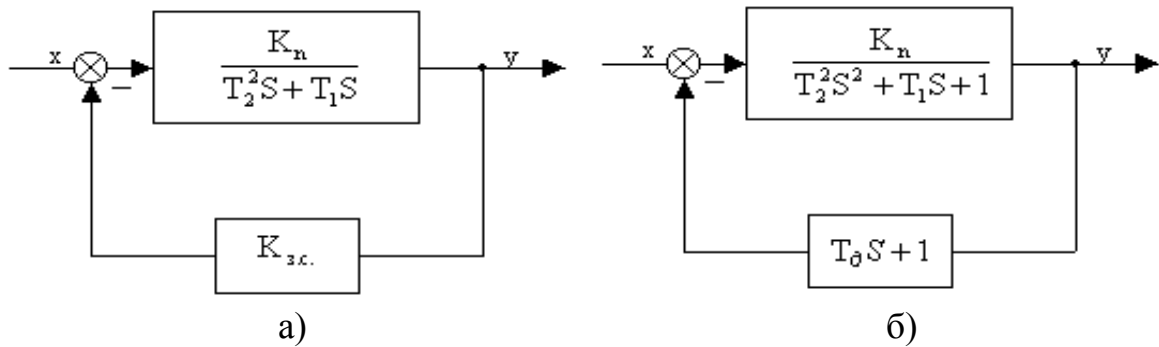


Рис. 5.1 – Структурні схеми компонентів вимірювального каналу
Передатна функція (ПФ) для схеми рис. 5.1, а) має вигляд:

$$W(S) = \frac{1/K_{з.с.}}{\frac{T_2^2 S^2}{K_n K_{з.с.}} + \frac{T_1 S}{K_n K_{з.с.}} + 1}. \quad (5.28)$$

З теорії автоматичного управління відомо, що ланка другого порядку буде коливальною, якщо відношення $T_1/T_2 < 2$. Для рівняння (5.28) маємо

$$\left(\frac{T_1}{K_n K_{з.с.}} \right) / \left(\frac{T_2}{\sqrt{K_n K_{з.с.}}} \right) \geq 2. \quad (5.29)$$

З умови (5.29) можна визначити коефіцієнт $K_{з.с.}$, при якому це відношення буде близьким до 2.

$$K_{з.с.} \approx \frac{4}{K_n} (T_2/T_1)^2. \quad (5.30)$$

ПФ для схеми рис. 5.1, б) буде дорівнювати

$$W(S) = \frac{K_n}{(1+K_n) \left[\frac{T_2^2}{(1+K_n)} S^2 + \frac{(T_1+T_0)}{(1+K_n)} S + 1 \right]}. \quad (5.31)$$

Приймаючи, що $K_n = \text{const}$, з умови $T_1/T_2 \approx 2$ для рівняння (5.31) маємо

$$\left[\frac{(T_1+T_0)}{(1+K_n)} \right] / \left(\frac{T_2}{\sqrt{1+K_n}} \right) \approx 2. \quad (5.32)$$

З (5.32) знаходимо сталу демпфування T_0 :

$$K_n T_0 = 2T_2 \sqrt{1+K_n} - T_1. \quad (5.33)$$

5.2.1.6 У такий спосіб при дослідженні динамічних характеристик ВК необхідно розв'язати задачу вибору $K_{з.с.}$ чи T_0 , які забезпечують задану якість перехідного процесу. Постійні часу і коефіцієнти передачі вимірювальних нормуючих і проміжних перетворювачів, а також вторинних приладів приведені у Додатку И.

5.2.1.7 Амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) вимірювального каналу можна знайти за формулою:

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^N A_i(\omega), \quad (5.34)$$

де $A_i(\omega)$ – АЧХ i -го компоненту каналу.

5.2.1.8 Фазочастотна характеристика (ФЧХ) вимірювального каналу:

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^N (-1) \varphi_i(\omega), \quad (5.35)$$

де $\varphi_i(\omega)$ – ФЧХ i -го компонента.

5.2.1.9 Для розрахунку перехідного процесу необхідно знайти дійсну частотну характеристику (ДЧХ), приймаючи до уваги, що

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + jI_m(\omega) = A(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (5.36)$$

Розрахунок кривої перехідного процесу зручно виконувати на комп'ютері з використанням пакету Simulink системи MATLAB.

5.2.2 Приклад розрахунку динамічних характеристик

Розрахунок ведеться для каналу, що описаний в п. 5.1.4.2.

Використовуючи паспортні дані компонентів каналу або інформацію з Додатку И, знаходимо передатні функції компонентів ІВК:

а) ПФ термопари ХА(К) у захисному чехлі

$$W_1(S) = \frac{K_1}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} = \frac{0,96}{(30S + 1)(5S + 1)};$$

б) ПФ нормуючого перетворювача

$$W_2(S) = K_2 = 0,7786;$$

в) ПФ електропневмоперетворювача

$$W_3(S) = \frac{K_3}{T_2^2 S^2 + T_1 S + 1} = \frac{0,8}{6S^2 + 2,5S + 1};$$

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 диференціюючу ланку з ПФ

$$W_{4\partial}(S) = \frac{T_{4\partial} S}{0,1 \cdot T_{4\partial} S + 1}.$$

Для електропневмоперетворювача скористаємося рівнянням (5.33) і обчислимо постійну диференціювання $T_{3\partial}$:

$$T_{3\partial} = (2 \cdot 6 \cdot \sqrt{1 + 0,8} - 2,5) / 0,8 \approx 17 \text{ с}.$$

Знайдемо сталу демпфування для вторинного приладу

$$T_{4\partial} = (2 \cdot 5,29 \sqrt{1 + 1,672} - 2) / 1,672 = 9,1 \text{ с}.$$

Перехідний процес розраховується з допомогою пакету Simulink системи MATLAB. Побудуємо динамічну модель вимірювального каналу, як показано на рис. 5.2.

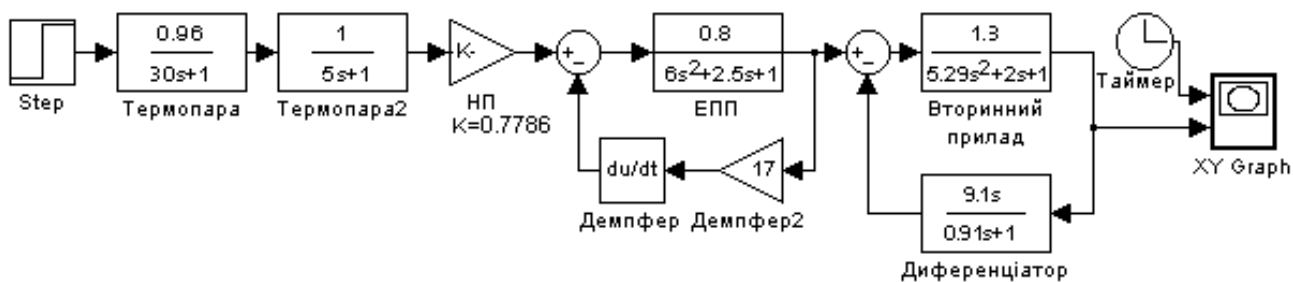


Рис. 5.2 – Структурна схема моделі вимірювального каналу

В цій моделі ПФ термопари представлена двома блками: “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 °С до 550 °С. Момент стрибка вибирається таким, щоб на цей час закінчились перехідні процеси після запуску моделі.

Крива перехідного процесу будується блоком XY Graph. На його вхід “X” подається сигнал від блока-джерела Clock (“Таймер” на рис. 5.3), що формує координату часу графіка перехідного процесу.

Результат моделювання показаний на рис. 4.4.

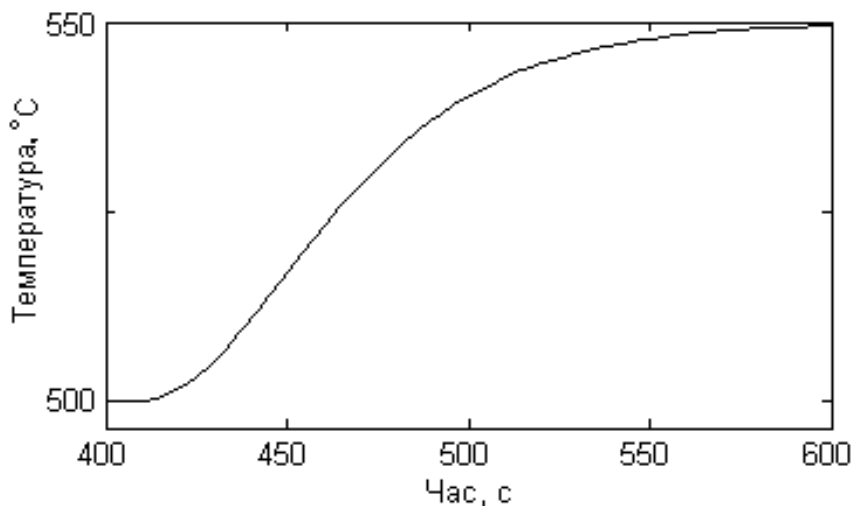


Рис. 4.4 – Графік перехідного процесу вимірювального каналу

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 И.

ЛІТЕРАТУРА

Цитована

1 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.

2 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.

3 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.

4 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.

5 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.

6 КИП и Автоматика. Программа КИП и А [Електронний ресурс] / Igor Brovin. – Режим доступу : <http://www.axwar.com/kipia/index.htm>. – Заголовок з екрану.

7 Белова, Е.М. Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами / Е.М. Белова. – М. : Евроклимат, 2003. – 400 с.

8 Выбор и расчёт регуляторов давления газа [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://proekt-gaz.ru/_fr/5/0734346.pdf. – Заголовок з екрану.

9 РМ 4-173-79. Системы автоматизации технологических процессов. Расчет электрических исполнительных механизмов при проектировании [Електронний ресурс]. – Надано чинності 1979-01-12. – М. : Проектмонтаж-автоматика, 1979. – 31 с. – Режим доступу : http://citm.ho.ua/Dist/Txt/RM_4-173-79.pdf.

10 ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – Надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 39 с.

11 ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – На заміну РД 50-690-89 ; надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 123 с.

12 Васілевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с

13 Манко, Г.І. Методичні вказівки з дипломного проектування систем автоматизації вибухонебезпечних виробництв / Укл. : Г.І. Манко, І.Л. Левчук, К.О. Довгопола. – Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ. – 2015. – 60 с.

14 Боровиков, С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян ; под ред. С.М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.

15 Манко, Г.И. Математическое моделирование метрологической надежности средств измерения с целью оптимизации межповерочных интервалов / Г.И. Манко, Н.М. Смунова // Вопросы химии и химической технологии. –2005. – № 4.

16 Игнаткин, В.У. Определение и анализ зависимостей показателей надежности средств измерений / В.У. Игнаткин, Б.М. Беляев, В.И. Колпаков // Измерительная техника. – 1988. – № 7. – С. 11–13.

17 Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Под ред. В.А.Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 238 с.

18 Оборский, Г. А. Неопределенность измерений с использованием АЦП для медленно протекающих процессов / 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.

19 Atmel-8272G-AVR-01/2015 ATmega164A / 164PA / 324A / 324PA / 644A / 644PA /1284 /1284P 8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64/128K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet. Atmel Corporation. Rev.: Atmel-8272G-AVR-Document-Title-or-Devices-FilenameDatasheet_01. – 2015. – 659 p.

20 Способы нормирования метрологических характеристик измерительных каналов измерительных систем АСУ ТП металлургических производств : отчет о научно-исследовательской работе. – Томск : НИТПУ, 2011. – 46 с.

21 Таланчук, П.М. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах : Підручник / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. – К. : Райдуга, 1994. – 672 с.

22 Зайко, А.И. Точность аналоговых измерительных каналов ИИС / А.И. Зайко. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 136 с.

Рекомендована

1 A universal model for reliability prediction of Electronics components. PCBs and equipment. RDF 2000 : reliability data handbook / Paris : UTE C 80-810. 2000. – 99 p.

- 2 Francisco André, Correa Alegria. Uncertainty of ADC random noise estimates obtained with the IEEE 1057 standard test / Correa Alegria Francisco André, Antonio Manuel Da Cruz Serra // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 2005. – № 54 (1). – P. 110-116.
- 3 JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Text]. – Geneva : JCGM, 2008. – 120 p.
- 4 Shick, G.J. and Wolverton R.W. An analysis of computing software reliability models // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1978. – July. – Vol. SE-4. – P. 104–120.
- 5 Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб. : БХВ Петербург, 2005. – 1104 с.
- 6 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 572 с.
- 7 Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности / Т.А. Голинкевич. – М. : Высшая школа, 1977. – 159 с.
- 8 Емельянов, Л. И. Практические расчеты в автоматике / Л.И. Емельянов, В. Л. Емельянов, С А. Калинина. – М. : Машиностроение, 1967. – 316 с.
- 9 Игнаткин, В.У. Оценка, контроль и прогнозирование метрологической надежности средств измерений / В.У. Игнаткин. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 190 с.
- 10 Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики: Учебное пособие для вузов / Ю.М. Коршунов. – М. : Энергия, 1980. – 424 с.
- 11 Луцкий, В.А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Луцкий. – К. : Наукова думка, 1966. – 205 с.
- 12 Рего, К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений : Справ. Пособие / К.Г. Рего. – К. : Техніка, 1987. – 128 с.
- 13 Сотсков, Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б.С. Сотсков. – М. : Высшая школа, 1970. – 267 с.
- 14 Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике / Под ред. А.В. Калиниченко. – М. : Инфра-Инженерия, 2008. – 576 с.
- 15 Фабрикант, В. Л. Элементы автоматических устройств : Учебник для вузов / В.Л. Фабрикант, В.П. Глухов, Л.Б. Паперно, В.Я. Путниньш. – М. : Высш. школа, 1981. – 400 с.
- 16 Федоров, Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП : Проектирование и разработка : Учебно-практическое пособие / Ю.Н. Федоров. – М. : Инфра-Инженерия, 2008. – 928 стр.
- 17 Шеин, А. Методы проектирования электронных устройств / А. Шеин, Н. Лазарева. – М. : Litres, 2017. – 455 с.

ДОДАТОК А

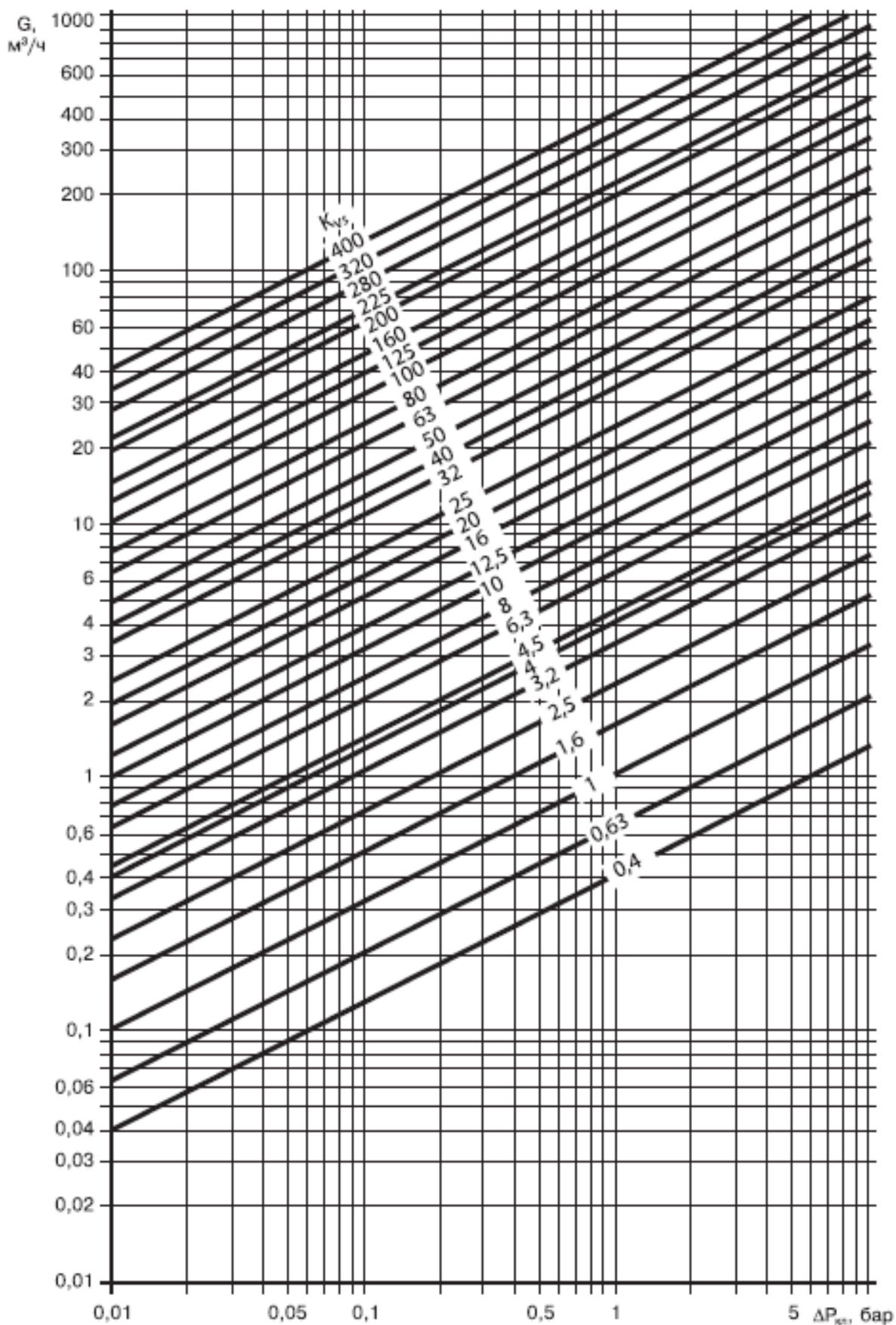


Рис. А.1 – Номограма для вибору пропускної спроможності регулюючих клапанів

ДОДАТОК Б

Табл. Б1 – Клапани регулюючі фірми Danfoss

Тип	Ду, мм	K_{vs} , м ³ /ГОД	Ход штоку, мм	Кодовий номер
VS2 – Клапан регулюючий латунний із зовнішнім різьбленням нерозвантажений $P_y = 16$ бар, $T_{\max} = 130$ °С, $\Delta P_{\max} = 10$ бар, $Z = 0,5$	15	0,25	4	065P2111
	15	0,4	4	065P2112
	15	0,63	4	065P2113
	15	1	4	065P2114
	15	1,6	4	065P2115
	20	2,5	5	065P2120
	25	4	5	065P2125
VB2 – Клапан регулюючий чавунний фланцевий розвантажений $P_y = 25$ бар, $T_{\max} = 150$ °С, $\Delta P_{\max} = 16$ бар, $Z = 0,5$	15	0,25	5	065B2050
	15	0,4	5	065B2051
	15	0,63	5	065B2052
	15	1	5	065B2053
	15	1,6	5	065B2054
	15	2,5	5	065B2055
	15	4	5	065B2056
	20	6,3	5	065B2057
	25	10	7	065B2058
	32	16	10	065B2059
	40	25	10	065B2060
	50	40	10	065B2061
VF2 – Клапан регулюючий чавунний фланцевий нерозвантажений Ду = 65–100 мм, $P_y = 16$ бар при $T_{\max} = 130$ °С	65	63	20	065B3170
	80	100	30	065B3185
	100	145	30	065B3205
	125	220	40	065B3230
	150	320	40	065B3255
VFS2 – Універсальний регулюючий клапан чавунний фланцевий розвантажений $P_y = 16$ бар при $T_{\max} = 200$ °С	15	4		065B2388
	20	6,3		065B2389
	25	8		065B2390
	32	16		065B2391
	40	20		065B2392
	50	32		065B2393
	65	50		065B2394
	80	80		065B2395
	100	125		065B2396
	125	160		065B2397
	150	280		065B2424
	200	320		065B2425
250	400		065B2426	

ДОДАТОК В

Табл. В.1 – Інтенсивність відмов елементів електронної апаратури

Тип	$\lambda_{0j} \cdot 10^{-6}$, 1/год	Тип	$\lambda_{0j} \cdot 10^{-6}$, 1/год
<u>Мікросхеми</u>		<u>Резистори</u>	
цифрові біполярні	0,1	плівкові	0,008
цифрові інші	0,3	об'ємні	0,005
аналогові	0,8	дротові	0,02
<u>Оптопари</u>		дротові регульовані	
тріодні	0,1	змінні недротові	0,02
діодні	0,5	змінні дротові	0,04
<u>Діоди</u>		терморезистори	
випрямні малої потужності	0,05	фоторезистори	0,05
випрямні великої потужності	0,1	варістори	0,1
імпульсні	0,03		
високочастотні	0,1	<u>Конденсатори</u>	
стабілізатори малопотужні	0,03	керамічні	0,1
стабілізатори потужні	0,08	керамічні високовольтні	0,5
тунельні	0,1	склокерамічні	0,04
тиристори	0,5	сльодяні	0,3
світлодіоди	0,5	металопаперові	0,05
варікапи	0,03	плівкові	0,04
надвисокочастотні (НВЧ)	1,0	електролітичні	0,3
лазерні	4,0	танталові	0,6
<u>Транзистори</u>		оксидні	
малопотужні низькочастотні	0,3		
малопотужні високочастотні	0,5	<u>Комутаційні елементи</u>	
малопотужні НВЧ	1,2	перемикачі	0,05
середньої потужності	0,6	тумблери	0,4
потужні низькочастотні	1,0	кнопки	0,2
потужні високочастотні і НВЧ	1,2	конектори приладні	0,003
польові	0,3	те ж для друкованих плат	0,005
МОП низькочастотні	0,012		
МОП високочастотні	0,06	Контакти реле	0,5
<u>Індикатори</u>		Геркони	
тліючого розряду	4,0	Кварцеві резонатори	0,2
вакуумні люмінісцентні	8,5	Запобіжники	0,1
рідкокристалічні	1,5	Тримачі запобіжників	0,05
світлодіодні	2,0	Лінії затримки	0,6
газорозрядні панелі	6,0	Двигуни постійного струму	15,0
осцилографічні	8,0	Двигуни змінного струму	1,5
лампи розжарювання	0,5		

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Поправочні коефіцієнти для врахування вібрації та ударів

Умови	Вібрація (b_1)		Удари (b_2)	
	аморти- зована	не амор- тизована	аморти- зовані	не амор- тизовані
Приладобудівні підприємства, лабораторії	1	1	1	1
Поле	1,05	1	1	1
Суда	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 Г.2 – Поправочний коефіцієнт b_3 для врахування впливу клімату

Клімат	Кондиціонер	Опалювальне приміщення		Неопалювальне приміщення	
		відкрите	пилобриз- козахищене	відкрите	пилобриз- козахищене
Холодний	1	1,2	1	2	1,3
Помірний, середня полоса	1	1,1	1	1,5	1,1
Степовий	1	1,2	1,3	1	1,05
Субтропічний	1	1,7	1,2	2,5	1,5
Морський холодний	1,1	1,7	1,2	3	1,5
Морський жаркий	1,2	2,2	1,2	3,2	2

Таблиця Г.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

Продовження табл. Д.1

Тип елемента	a_2					a_3	a_4			a_5	a_6	a_8	a_{11}			a_{12}						
	Температура, °С						$K_{\text{н}}$	Струм, А					Потужність		Опір, кОм							
	20	30	40	50	60			70	<0,3				0,3... 0,8	>0,8	<0,05	0,05	...1	1...2	0,125 Вт	0,5 Вт	2 Вт	<1
<u>Комутаційні елементи</u> конектори приладні для друкованих плат	1,0	1,1	1,3	1,5	1,8	2,2	10^{-2}	0,1	0,1	0,11												
	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6																
	0,9	0,95	1,05	0,15	1,3																	
Електровакуумні, газорозрядні і фотопроменеві						2×10^{-3}	0,33	0,33	0,33													
	1,0					10^{-3}	-	-	0,1													
Лампи розжарювання	2,0					10^{-3}	-	-	-													
						10^{-3}	-	-	-													
Кварцеві резонатори						10^{-2}	-	-	0,25													
	0,56	0,56	0,56	0,87	2,0	9,08																
<u>Електровакуумні</u> коллекторні безколлекторні	1,0					10^{-2}	1,0		0,5													
						10^{-2}	0,11		0,25	0,5												
Контакти реле	6,0					10^{-2}																
Геркони	3,0					10^{-2}				1,0												

ДОДАТОК Е

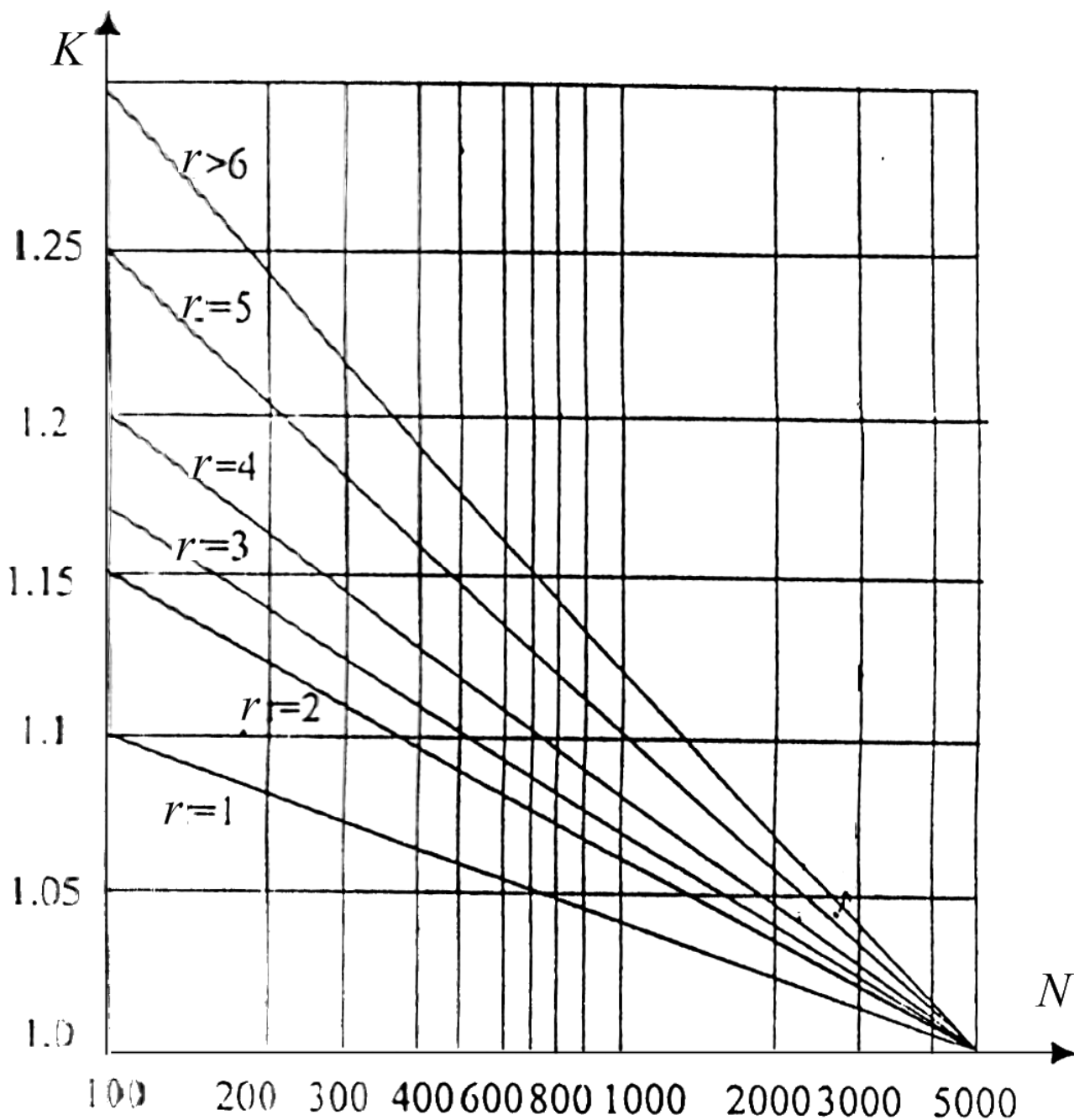


Рис. Е.1 – Номограма для визначення коефіцієнта K з урахуванням загальної кількості N складових елементів ЗВ і кількості r механіко-кінематичних ланок

ДОДАТОК Ж

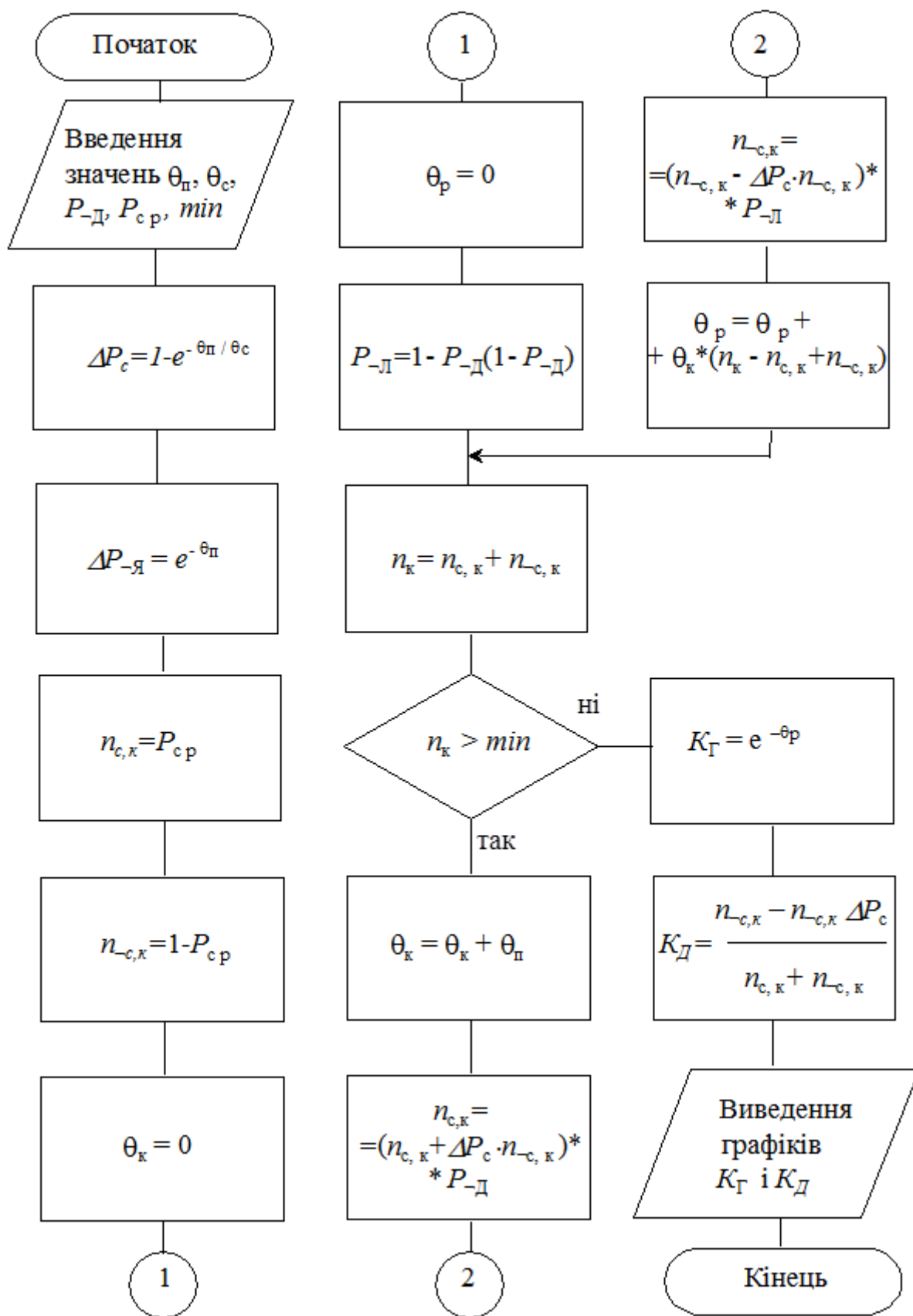


Рис. 6.2 – Схема алгоритму обчислення величин K_G і K_D (див. розшифровку умовних позначень у п. 3.4)

ДОДАТОК И

Табл. И.1 – Динамічні характеристики компонентів вимірювальних каналів

Найменування засобу вимірювання	Передагтна функція	Параметри ПФ		Клас точності
		К	Т ₁ , с	
1 Термомари	$W(S) = \frac{K}{(T_1S+1)(T_2S+1)}$	0,96	30-70	5-20
ХА(К)		0,94	20-60	4-20
ХА(L), (E)		0,92	20-100	5-20
ПП(S), (R)		0,88	40-100	10-20
ЖК(I)		0,93	40-80	10-20
ПР(B)		0,86	60-120	10-40
ИР 60/0		0,88	60-180	20-60
ВР(A)-1				0,1
2 Термометри опору	$W(S) = \frac{K}{(T_1S+1)(T_2S+1)}$	1	10-20	4-10
ТСМ		1	2-5	2-10
ТСП				0,5
3 Манометричні термометри	$W(S) = \frac{K}{T_1S+1}$	0,85	60-120	1,5; 2,5; 4,0
газові		0,92	15-30	1,0; 1,5
рідинні конденсаційні		0,79	60-100	2,5; 4,0

Продовження табл. И.1

Найменування засобу вимірювання	Передагтна функція	Параметри ПФ			Клас точності
		K	T ₁ , с	T ₂ , с	
4 Вторинні прилади КСП1, КСМ1 КСУ1 А542, А543 КСП2, КСМ2 КСП4, КСМ4 КСП3, КСМ3, КСД3	$W(s) = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$	1 1 1 1 1 1	2,5; 5,0 2,5; 5,0 1; 2,5; 10 2,5; 10 2,5; 10 5; 10	4-20 10,4 5-20 10-20 10-20 10-40	1,0 1,0 0,5 0,5 0,5 0,5
5 Нормуючі перетворювачі Ш-71, Ш-72 Ш-703, Ш-709 П-234, П-236 Ш-72, Ш-72И Ш-708, Ш-705 П-221	$W(s) = K = \frac{1 - I_H / I_K}{1 - E_H / E_K}$	-	-	-	0,5 0,4 0,4 1,0 1,0 0,5
6 Перетворювачі термоопорів ТСМУ-0283 ТСПУ-0183	$W(s) = K = \frac{1 - I_H / I_K}{1 - R_H / R_K}$	-	-	-	0,5 0,5

Продовження табл. И.1

Найменування засобу вимірювання	Передатна функція	Параметри ПФ			Клас точності
		К	T ₁ , с	T ₂ , с	
7 Вимірювачі тиску: МП-4 Сапфир-22М Метран-100	$W(s) = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$	1	2,5-4	16	0,5; 1,0; 1,5 0,25; 0,5; 1,0
		1,08	0,5-2,5	8	
		0,8			
8 Вимірювачі рівня буйкові УБ-П	$W(s) = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$	18	2,5-4	0,8	1,5
9 Вимірювачі рівня ізотопні	$W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1}$	14	1,5-2	-	4,0
10 Вимірювачі витрати: звужуючі пристрої рогаметри РЭ	$W(s) = K$	0,4-0,9	-	-	0,2; 0,5; 1,0 2,5
	$W(s) = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$	0,4-0,7	1,5-3	0,96	
11 Вимірювачі густини: газів рідин	$W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1}$	0,9	3	-	1,5 1,0; 2,5
		1	2,5-4	-	

Продовження табл. И.1

Найменування засобу вимірювання	Передатна функція	Параметри ПФ			Клас точності
		К	T ₁ , с	T ₂ , с	
12 Газоаналізатори: терромагнітні фотоколориметричні електрохімічні полум'яно-іонізаційні оптичні	$W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} e^{-T_0 s}$ T ₀ = 5-10 с	1	5-10	-	4,0
		0,7	300	-	4,0
	$W(s) = K e^{-T_0 s}$ T ₀ = 5-20 с	0,5	3-5	-	4,0
		0,6	-	-	4,0
		0,9	-	-	2,5
13 рН-метри	W(s) = K	0,65	-	-	0,5; 1,0; 1,5
14 В'язкозіметри	$W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1}$	0,9	3	-	1,5
		1	2,5-4	-	1,0; 2,5