

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ АВТОМАТИЧНИХ ПОТЕНЦІОМЕТРІВ

*В статті розглянуто питання ефективності застосування автоматичних потенціометрів, які використовуються для вимірювання температури в комплекті зі стандартними термоелектричними перетворювачами та їх метрологічне забезпечення. Описано показники надійності, які доцільно враховувати при експлуатації автоматичних потенціометрів.*

**Ключові слова:** автоматичний потенціометр, повірка, надійність, клас точності, похибка.

*В статье рассмотрены вопросы эффективности применения автоматических потенциометров, которые используются для измерения температуры в комплекте со стандартными термоэлектрическими преобразователями и их метрологическое обеспечение. Описаны показатели надежности, которые целесообразно учитывать при эксплуатации автоматических потенциометров.*

**Ключевые слова:** автоматический потенциометр, поверка, надежность, класс точности, погрешность.

*In the article the question of the effectiveness of automatic potentiometers are used for temperature measurement complete with standard thermo-electric converters and their metrological support. Described reliability, which should be taken into account in the operation of automatic potentiometers.*

**Keywords:** automatic potentiometer, verification, reliability, accuracy, error.

Автоматизація виробництва різних галузей промисловості є важливим напрямком науково-технічного прогресу і головним завданням в підвищенні ефективності виробництва. Локально і комплексно автоматизація неможлива без розробки, засвоєння в серійному виробництві автоматичних, електронних, показуючих, реєструючих та регулюючих приладів, що є основними засобами автоматизації, які найбільш повно відображають сучасні вимоги для забезпечення високої якості та надійності продукції.

Дані прилади призначені для вимірювання одно- і багатоканальної реєстрації і регулювання різних параметрів, що характеризують технологічні процеси в різних галузях промисловості. До таких параметрів відноситься температура. Автоматичні потенціометри виключають участь людини в проведенні операції компенсації вхідного сигналу і тому знайшли широке розповсюдження для вимірювання, сигналізації і автоматичного регулювання температури.

Автоматичні електронні потенціометри призначені для промислового вимірювання температури і працюють в комплекті з термопарами. Вимірювання температури в комплекті з термопарами здійснюється компенсаційним методом, сутність якого полягає у автоматичному зрівноважуванні потенціометром невідомої термоЕРС термопари відомим падінням напруги на визначеній ділянці робочого ланцюга потенціометра. Автоматична компенсація здійснюється слідкуючою системою потенціометра, основною частиною якої є електронний підсилювач. Напряга небалансу, викликане порушенням рівноваги в ланцюзі термопара – потенціометр, після підсилення приводить в дію реверсивний двигун, що переміщає реохорд доти, поки не буде досягнута компенсація, тобто рівність падіння напруги в ланцюзі і вимірюваної термоЕРС. У цьому випадку струм розбалансу стане дорівнює нулю.

Принципова відмінність автоматичних електронних потенціометрів – нуль-прилад замінений на електронний нуль-індикатор (рис. 1). Вимірювальні схеми всіх автоматичних потенціометрів передбачають автоматичне введення поправки на температуру вільних кінців термопари. З цією метою у схему введено резистор  $R_k$ , виконаний з міді (або нікелю), який встановлюється у безпосередній близькості від клем підключення вільних кінців термопари або компенсаційних проводів. У промислових автоматичних вимірювальних потенціометрах (рис. 2) нормальний елемент не використовується.

У схему введено джерело стабілізованої напруги (ДПС), що забезпечує постійність струму у вимірювальній схемі.

У схемі (рис. 2)  $R_p$  – реохорд, паралельно якому, для забезпечення точного опору, включено шунт  $R_{ш}$ . Мідний резистор  $R_m$  служить для компенсації температури вільних кінців термопари  $T$ . Постійне значення робочого струму у компенсаційному колі встановлюється за величиною спаду напруги на резисторі  $R_k$ .

Для зміни меж діапазону вимірювання автоматичного потенціометра служать резистори ( $R_{н}$ ,

$r_n$ ), ( $R_k$ ,  $r_k$ ) та  $R_6$ .

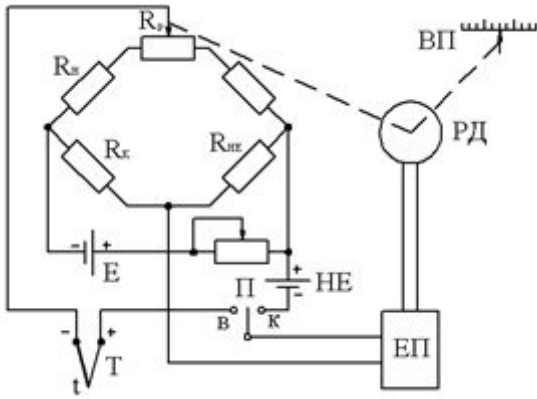


Рис. 1. Принципова схема електронного автоматичного потенціометра:  
РД – реверсивний двигун;  
ЕП – електронний підсилювач;  
ВП – відліковий пристрій

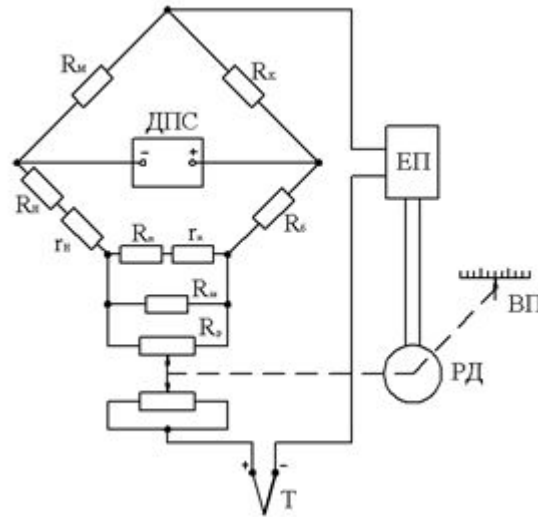


Рис. 2. Вимірювальна схема автоматичного електронного потенціометра зі стабілізованим джерелом живлення

Джерело постійного струму ДПС включене у діагональ вимірювальної схеми. Призначення решти елементів таке ж, як і у попередній схемі.

Автоматичні потенціометри є промисловими приладами високого класу точності і бувають стрілочними з візуальним відліком та самописними з записом на круговій або стрічковій діаграмі.

Структурна схема автоматичного потенціометра наведена на рис. 3, а на рис. 4 – повна вимірювальна схема автоматичного потенціометра. На вимірювальній схемі прийняті наступні позначення:

$R_{ш}$  – шунт реохорда, призначений для підгонки паралельно з'єднаних опорів реохорда  $R_p$  і шунта реохорда  $R_{ш}$  до стандартного значення;

$R_n$  – резистор для підгонки нижньої межі вимірювань приладу;

$R_в$  – резистор для підгонки верхньої межі вимірювань приладу;

$R_1$  – резистор для встановлення номінального значення струму в робочій гілці вимірювальної схеми;

$R_2$  – резистор для встановлення номінального значення струму у допоміжній гілці вимірювальної схеми;

$R_m$  – резистор для введення поправки на температуру вільних кінців ТЕП;

$R_0$  – резистор, який використовується при повірці приладу;

$R_n$  – резистор для обмеження струму джерела живлення ДЖ.

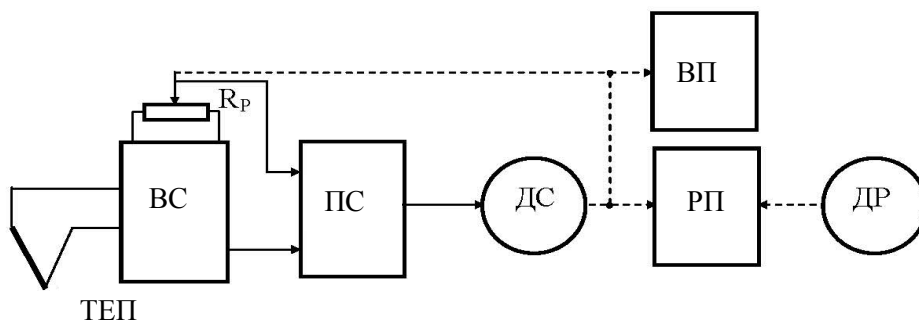


Рис. 3. Структурна схема автоматичного потенціометра:  
ВС – вимірювальна схема; ПС – підсилювач слідкуючої системи; ДС – двигун слідкуючої системи; ВП – відліковий пристрій; РП – реєструючий пристрій; ДР – двигун реєструючого пристрою

Робоча гілка вимірювальної схеми містить резистори  $R_1$ ,  $R_n$ ,  $R_в$ ,  $R_{ш}$  і опір реохорда  $R_p$ . Допоміжна гілка вимірювальної схеми містить резистор  $R_2$  і, залежно від положення перемикача П, резистор  $R_m$  або резистор  $R_0$ .

Резистор  $R_m$  являє собою котушку, намотану мідним дротом і розміщену в безпосередній близькості від місця підключення у вимірювальну схему вільних кінців термоелектричного перетворювача ТЕП.

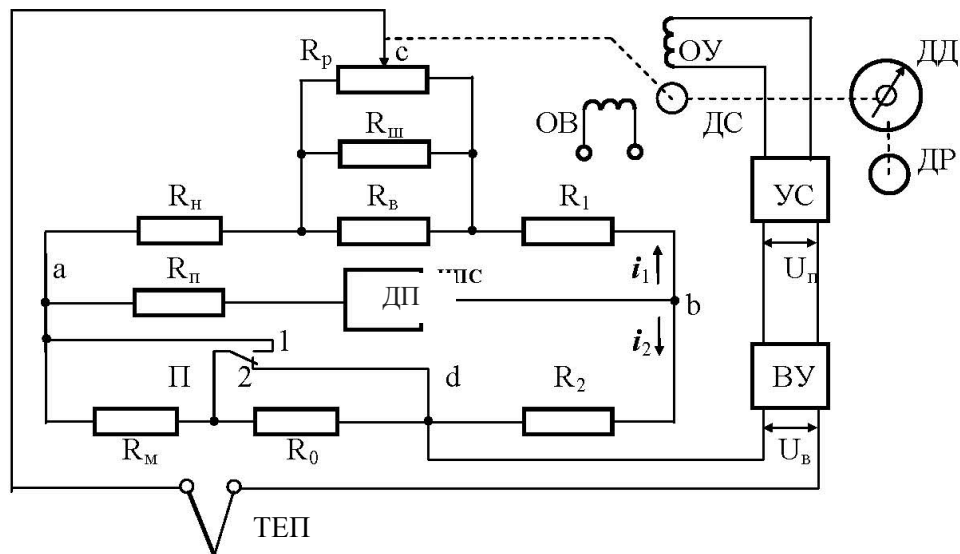


Рис. 4. Вимірювальна схема автоматичного потенціометра

Слідкуюча система автоматичного потенціометра складається з підсилювача УС та електродвигуна ДС, механічно зв'язаного з движком реохорда  $R_p$ . Реєструючий пристрій включає пишучий вузол і стрічкопротяжний механізм або пристрій переміщення діаграмного диска ДД, зв'язані з електродвигуном ДР. На схемі (рис. 4) механічні зв'язки показані пунктирними лініями.

Напряга  $U_e$  на вході вхідного пристрою ВУ дорівнює різниці вимірювання термоЕРС  $E_T$  термоелектричного перетворювача ТЕП і падіння напруги при проходженні струму  $i_1$  по частині  $m$  еквівалентного опору  $R_e$  реохорда, що складається з трьох паралельно включених опорів  $R_p$ ,  $R_{II}$ ,  $R_B$ , опору  $R_n$ , а також падіння напруги при проходженні струму  $i_2$  за резистором  $R_m$  чи (при контролі робоздатності приладу) за резистором  $R_0$ :

$$U_e = E_m - i_1(m \cdot R_e + R_n) - i_2 R_m. \quad (1)$$

Якщо

$$E_m = i_1(m \cdot R_e + R_n) - i_2 R_m, \quad (2)$$

то напруга  $U_e = 0$ , напруга на обмотці управління ОУ електродвигуна ДС відсутня і движок реохорда нерухомий. Стрілка приладу показує вимірюване значення температури.

Якщо значення вимірюваної температури рівне нижній межі вимірювань автоматичного потенціометра, то його вимірювальна схема з підключеним термоелектричним перетворювачем перебувають у стані рівноваги і на вході вхідного пристрою ВУ напруга  $U_e$  відсутня. Движок реохорда  $R_p$  знаходиться в крайньому положенні, а стрілка приладу – на позначці шкали, що відповідає нижній межі вимірювань автоматичного потенціометра.

Якщо вимірювана температура збільшується, то значення термоЕРС ТЕП збільшується і рівновага вимірювальної схеми з підключеним ТЕП порушується. На вході вхідного пристрою ВУ з'являється напруга  $U_e$ . Напруга з виходу підсилювача УС надходить на обмотку управління ОУ реверсивного електродвигуна ДС. Коли напруга на обмотці управління ОУ досягає значення напруги рушання, реверсивний електродвигун ДС починає працювати. За допомогою механічного зв'язку електродвигун ДС переміщає движок реохорда  $R_p$  в напрямку рівноваги вимірювальної схеми з підключеним ТЕП. У момент рівноваги  $U_e=0$  і електродвигун ДС відключається. Стрілка приладу встановлюється на позначці шкали, що відповідає вимірюваній температурі.

Якщо вимірювана температура зменшується, то значення термоЕРС ТЕП зменшується і рівновага вимірювальної схеми з підключеним ТЕП знову порушується. На вході вхідного пристрою ВУ з'являється напруга  $U_n$ , полярність якої протилежна полярності напруги  $U_n$  при збільшенні вимірюваної температури. Реверсивний електродвигун ДС переміщає движок реохорда  $R_p$  в напрямку, протилежному напрямку переміщення движка реохорда при збільшенні вимірюваної температури. Движок реохорда  $R_p$  зупиняється в положенні, що відповідає новому стану рівноваги вимірювальної схеми з підключеним ТЕП. Стрілка автоматичного потенціометра знову встановлюється на позначці шкали, що відповідає вимірюваній температурі.

При зміні вимірюваної температури змінюється значення термоЕРС  $E_T$  і рівність (2) порушується. На виході вимірювальної схеми з'являється напруга  $U_e$ , яка подається на вхід вхідного пристрою ВУ. Вхідний пристрій ВУ перетворює напругу  $U_e$  постійного струму в напругу  $U_n$  змінного струму. Напруга  $U_n$  підсилюється до значення напруги рушення електродвигуна ДС, достатнього для приведення його в дію. Вал електродвигуна ДС за допомогою механічного зв'язку переміщає движок реохорда, встановлюючи новий стан рівноваги вимірювальної схеми, при якому  $U_e=0$ . Одночасно стрілка і записуючий пристрій приладу переміщуються в нове положення, що відповідає значенню вимірюваної температури.

Схема підключень для перевірки автоматичного потенціометра представлена на рис. 5 включає автоматичний потенціометр АП, робочий еталон – лабораторний потенціометр ЛП постійного струму, нульовий термостат НТ, ртутний термометр Т, магазин опорів МО і панель перемикачів В. Вихідний сигнал лабораторного потенціометра постійного струму типу ПП-63 класу точності 0,05 є мірою вхідного сигналу автоматичного потенціометра, тобто мірою термоЕРС. Нульовий термостат призначений для підтримки температури з'єднань мідних дротів з компенсаційними дротами в діапазоні від 0<sup>0</sup>С до 4<sup>0</sup>С. Ціна поділки ртутного термометра становить 0,1<sup>0</sup>С.

Нульовий термостат необхідно заповнити сумішшю води з льодом. В отвори на кришці нульового термостата потрібно встановити ртутний термометр і пробірки з трансформаторним маслом. Всередину пробірок поміщають з'єднання МП з КП.

Метою перевірки автоматичних потенціометрів є встановлення відповідності його метрологічних характеристик паспортним даним. Встановлення цієї відповідності проводиться шляхом порівняння максимальних значень основної абсолютної похибки і варіації автоматичного потенціометра, який повіряється з границями допустимої основної абсолютної похибки і варіації показів автоматичного потенціометра.

Основну похибку автоматичного потенціометра, який повіряється визначають для всіх оцифрованих відміток шкали. Основну похибку автоматичного потенціометра обчислюють як різницю значення термоЕРС, відповідного оцифрованої відмітки шкали і визначеної за номінальною статичною характеристикою ТЕП, і значення напруги на виході лабораторного потенціометра, що відповідає розташуванню стрілки на тій же оцифрованій позначці шкали. Номінальні статичні характеристики перетворення, тобто залежність термоЕРС термопар від температури робочих спаїв при нульовій температурі вільних кінців термопар наводяться в таблицях.

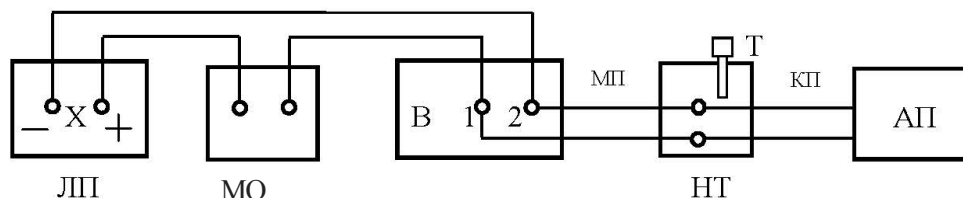


Рис. 5. Схема підключень для перевірки автоматичних потенціометрів:

ЛП – лабораторний потенціометр; МО – магазин опорів; НТ – нульовий термостат; В – панель перемикачів; МП – мідні дроти; Т – термометр; КП – компенсаційні дроти; АП – автоматичний потенціометр

Автоматичні потенціометри повинні виконувати свої задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу, тобто забезпечувати надійність. Проблема підвищення надійності пристроїв автоматики стає все більш важливою у зв'язку з комплексною механізацією і автоматизацією виробничих процесів. Важливість цієї проблеми визначається тим, що недостатня надійність пристроїв автоматики призводить до великих витрат на їх технічне обслуговування, на ремонти, на запасні частини тощо. Бувають випадки, коли витрати на експлуатацію виробів протягом 1-2 років перевершують їх первинну вартість. Трапляється, що через недостатню надійність автоматичного обладнання воно виявляється менш рентабельним, ніж неавтоматичне.

Основним поняттям теорії надійності є відмова. Відмова – це подія, що полягає в порушенні робоздатності пристрою. В результаті відмови параметри пристрою перестають задовольняти пропонованим вимогам. Відмова може бути раптовою і поступовою, повною і частковою. Наприклад, в автоматичному самопишучому потенціометрі внаслідок виходу з ладу напівпровідникового підсилювача можлива повна втрата чутливості приладу або повна раптова відмова; збільшення похибки внаслідок зменшення коефіцієнта підсилення при зниженні емісії (повна поступова відмова); збільшення часу проходження шкали при зміні параметрів транзистора фазочутливого каскаду (часткова відмова) тощо. Факт настання відмови, а також його характер і наслідки завжди носять

випадковий, ймовірнісний характер. Ймовірність відмов, як і ймовірність їх наслідків, визначаються на основі статистичних даних.

Залежно від того, чи будуть пристрої та елементи працювати до першої відмови або можуть бути відновлені після відмови, вибирають і характеристики надійності. Більшість неподільних елементів, таких, як транзистори, резистори, конденсатори, працюють тільки до першої відмови і не можуть бути відновлені. У таких виробів перша відмова є одночасно і останньою. Показником надійності виробів, які неремонтуються буде середнє напрацювання до відмови – середнє значення напрацювання виробів в партії до відмови.

Прилади, як правило, після відмови можуть бути відновлені. За умови, що кожна відмова усувається яким-небудь способом, можна говорити про число відмов протягом деякого проміжку часу.

Однією з основних характеристик надійності ремонтіваних приладів є напрацювання на відмову – середній час між відмовами  $T_{cp}$ . Середній час безвідмовної роботи відповідає математичному очікуванню часу безвідмовної роботи. Ймовірністю безвідмовної роботи називається ймовірність того, що в заданому інтервалі часу  $t$  не виникає відмови приладу. Під параметром потоку відмов розуміють середню кількість відмов відновлюваного виробу за одиницю часу, взятого для розглянутого моменту часу.

Іншою характеристикою надійності приладів є параметр потоку відмов  $\lambda$  – середнє число відмов ремонтіваного виробу за одиницю часу (1 год). Параметр потоку відмов є величиною, зворотною напрацюванню на відмову:

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}. \quad (3)$$

Порушення роботоздатності приладу не залишається постійним протягом всього терміну служби (рис. 6). Перший період експлуатації (припрацювання) характерний різким зростанням відмов через вихід з ладу елементів, що мають приховані виробничі дефекти (припрацювання приладів проводиться на заводі-виробнику). Другий період (нормальна робота) характерний тим, що потік відмов протягом всього періоду залишається приблизно постійним. У третьому періоді роботи (зношення) потік відмов безперервно зростає, що пояснюється зносом або старінням елементів пристрою. Зі збільшенням числа елементів надійність приладу знижується. Параметр потоку відмов приладу визначається за наступною формулою:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – параметр потоку відмов приладу;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$  – параметри потоку відмов окремих елементів приладу.

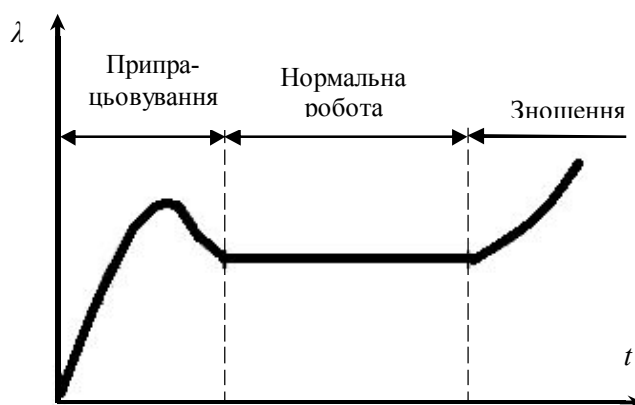


Рис. 6. Залежність параметрів потоку відмов від часу експлуатації

З формули (4) випливає, що зі збільшенням числа елементів параметр потоку відмов приладу збільшується. Надійність системи, що складається з  $n$  елементів, нижче надійності будь-якого елемента, що входить в цю систему. Це положення справедливо тільки для схем, в яких відмова будь-якого елемента приводить до відмови системи.

Теорія надійності дозволяє розробити системи, надійність яких вище надійності елементів, що складають схему. Основним засобом підвищення надійності схем є резервування. В автоматичному потенціометрі резервування може бути блоковим, при якому замість блоку, який відмовив автоматично включається резервний блок; схемним, при якому в схемі замість одного елемента

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

встановлено кілька резервних. Застосовуючи методи резервування, автоматичної перевірки і заміни блоків, які відмовили можна створити високонадійні системи будь-якої складності.

Автоматичні потенціометри володіють високою надійністю. Середній час безвідмовної роботи  $T_{cp}$  повинен бути не менше 10000 год. Ймовірність  $P$  безвідмовної роботи 1000 год рівна 0,9 (що відповідає експоненціальному закону розподілу часу безвідмовної роботи). Необхідна (мінімальна) надійність може бути досягнута правильною експлуатацією автоматичних потенціометрів.

1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.

2. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с., ил.

3. Фарзани Н.Г., Ильясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.

4. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. – Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.