

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Конспект лекцій

з дисципліни «Системи автоматизованого керування в
зварювальному виробництві» для студентів спеціальності G9
«Прикладна механіка» усіх форм навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Системи автоматизованого керування в зварювальному виробництві» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» усіх форм навчання / Укл.: О.Є. Капустян, Ю.М. Савонов. - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026 – 78 с.

Укладачі: О.Є. Капустян, канд. техн. наук, доцент
Ю.М. Савонов, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент

Редактор: І.П. Аверченко

Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЗ та МК
Протокол № 5 від 26.11.2025

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 4 від 17.12.2025

ЗМІСТ

с.

1 Автоматичний контроль. Управління і регулювання	5
1.1 Об'єкт управління та регулювання.....	5
1.2 Система автоматики	6
1.3 Автоматичне регулювання	8
1.3.1 Аналіз впливів, що збуджують при зварюванні	12
1.4 Регулювання за відхиленням і за збудженням змінюваної величини	14
1.5 Пряме і непряме регулювання.....	18
1.6 Безперервне, релейне та імпульсне регулювання.....	22
2 Датчики систем автоматичного управління і схеми їх включення...	27
2.1 Поняття про датчики та їх загальні властивості.....	27
2.2 Вимоги, що пред'являються до датчиків	28
2.3 Контактні датчики	28
2.4 Реостатні і потенціометричні датчики.....	29
2.5 Вугільні датчики	31
2.6 Тензоопір (тензорезистор)	32
2.7 Фотоелектричні датчики	35
2.8 Терморезистори	38
2.9 Індуктивні датчики	42
2.10 Ємнісні датчики	44
2.11 Датчики електромагнітних полів	45
2.12 Схеми підключення датчиків	52
2.12.1 Потенціометрична схема.....	52
2.12.2 Мостова схема.....	53
2.12.3 Диференціальна схема.....	55
3 Системи автоматичного регулювання в дуговому і електрошлаковому зварюванні	57
3.1 Системи автоматичного регулювання дуги саморегулюванням. АРДС	57
3.1.1 Система автоматичного регулювання вильоту електроду (АРВ).....	64
3.1.2 Система автоматичного регулювання струму і напруги дуги з дією на живлячу систему	67
3.2 Система автоматичного стеження за стиком	70

3.3 Система автоматичного стеження за рівнем металеві ванни при електрошлаковому зварюванні	72
Перелік джерел посилання.....	78

1 АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ. УПРАВЛІННЯ І РЕГУЛЮВАННЯ

1.1 Об'єкт управління та регулювання

Будь-який об'єкт характеризується кількістю енергії і кількістю речовини, що проходить через нього. Режим роботи, стан об'єкта характеризуються сукупністю фізичних показників (параметрів) і визначаються поточними внутрішніми процесами, на характер яких впливають зовнішні та внутрішні впливи. Їх називають вхідними змінними (функціями, сигналами), а точки їх застосування — входами (рис. 1.1). В автоматичній системі частина вхідних впливів (за умови, що вони не містять помилок) дає їй інформацію про завдання управління. Їх називають тому корисними вхідними або задають (керуючими) впливами $g_i(t)$. Вони або виробляються керуючим пристроєм, або задаються людиною [1-4].

Інші впливи на об'єкт, не пов'язані із завданнями і результатами управління, називають збудженнями $f_n(t)$. Збуджуючі впливи можуть бути прикладені в різних точках об'єкта. Власне через існування збуджень і виникає необхідність регулювання. Характер збуджень завжди випадковий, природа ж їх залежить від природи об'єкта. Це можуть бути наступні зміни: швидкості електричного двигуна із-за зміни навантаження або напруги живильної мережі, температури у нагрівальній печі через падіння тиску газу в підвідному трубопроводі, напруги у зварювальній дузі заради зміни її довжини, внаслідок овальності обичайки або зазору в стику і т. п.

З усіх можливих збурень збудження по навантаженню вважають основним. До збуджень можна віднести і перешкоди — непотрібні, шкідливі складові інформації, що містяться в задаючому впливі і виникають унаслідок суб'єктивних помилок людини при управлінні об'єктом, або через похибку задаючого пристрою.

Вхідний (керуючий) вплив чи будь-які обурення викликають зміну всіх або частини вихідних або регульованих величин (вихідних або керованих змінних або координат) $V_r(t)$. Відбувається це внаслідок зміни стану об'єкта, яке може характеризуватися сукупністю ряду параметрів (змінних або координат) стану $x_m(t)$.

У процесі роботи об'єкта (або системи управління) ряд впливів і збуджень контролюється — їх називають контрольованими, на

відміну від інших, неконтрольованих [2, 3].

Отже, об'єкт управління (регулювання) — це пристрій або сукупність пристроїв), необхідний режим роботи якого повинен підтримуватися зовні спеціально організованими керуючими або регульовальними впливами, які формуються керуючим пристроєм або регулятором.

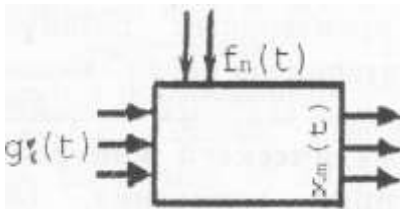


Рисунок 1.1 – Об'єкт управління [3]

1.2 Система автоматики

Найпростіші автоматичні системи — системи автоматичного захисту призначені для захисту устаткування від аварій. Прикладами можуть служити плавкий запобіжник в ланцюзі робочого струму об'єкта, клапан максимального тиску в пневматичних або гідравлічних пристроях; пристрій захисту тиристорних контакторів від перевантажень по струму і напрузі в машинах для контактного зварювання; автомат повторного включення, який не тільки відключає об'єкт від джерела живлення при різкому підвищенні сили струму понад допустимий, але і робить потім два-три пробних підключення і тільки після цього відключає його остаточно [1, 2, 3].

Системи автоматичного блокування мають два призначення: захист обладнання від неправильних дій обслуговуючого персоналу та забезпечення заданої послідовності дії обладнання або включення резервного устаткування при виході з ладу основного. Прикладами відповідно можуть служити система блокування в схемі реверсування трифазного двигуна, яка не дозволяє включити двигун на обертання в зворотному напрямку, якщо не вимкнено обертання в прямому напрямку, і схема забезпечення суворої черговості запалювання ігнітронів за допомогою схеми управління в джерелах зварювального струму машин електроконтактного зварювання [2, 3].

У зварювальному виробництві розрізняють три фази контролю:

вихідних матеріалів перед зварюванням, параметрів у процесі зварювання та якості зварних з'єднань.

Системи автоматичного контролю (рис. 1.2 а) ділять на три групи: вимірювання, сигналізації та реєстрації. Системи автоматичного вимірювання контролюють параметри об'єкта, процесу і видають результати в абсолютних значеннях у всьому діапазоні зміни [3, 4]. Наприклад, при дуговому зварюванні контролюють струм і напругу дуги, швидкість зварювання, при контактному зварюванні — струм, зусилля стиснення електродів, час зварювання і т. д. Вимірювальним пристроєм (індикатором), зазвичай, є стрілочний прилад. При контактному зварюванні використовують і спеціальні прилади типу АСТ, АСД, СМ для вимірювання середнього діючого струму його амплітуди і тривалості протікання.

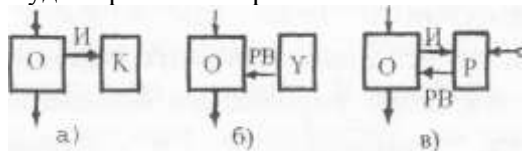


Рисунок 1.2 - Системи автоматичного контролю (а), управління (б) і регулювання (в) [3]

Контроль якості зварних з'єднань неруйнівними методами можна проілюструвати прикладами таких пристроїв контролю як установки рентгенівського контролю РУН-120-5, «Лилипут», «Медикор» та ін., гамма-дефектоскопи типів УЗД і ДУГ.

Системи автоматичної сигналізації застосовують в тих випадках, коли потрібно визначати не конкретний параметр процесу, а лише отримувати інформацію про те, чи змінюється він в допустимих межах. Про досягнення граничного значення така система оповіщає світловим або звуковим сигналом.

Системи сигналізації використовують і при необхідності встановити факт існування або досягнення контролюючим об'єктом певного стану. У машині МШРП-1-3 для роликового зварювання пластмасових деталей система сигналізації, що складається з гідравлічного реле і сигнальної лампи, служить для контролю наявності води в каналі охолодження електрода. У високочастотній установці ЛД1-2 для зварювання пластмас світлова сигналізація дає

знати зварнику, що підготовка генератора (первинний прогрів) закінчився і можна починати зварювання [3, 4].

Системи автоматичної реєстрації контрольованих параметрів складаються з відповідних датчиків і самописних приладів чи осцилографів, записуючих зміни параметрів об'єкта на будь-якому носії (найчастіше на паперовій стрічці). Для прикладу можна назвати прилад ИСТ-4АМ, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона для вимірювання і реєстрації амплітудних значень струму при контактному зварюванні, прилади з потенціометричними і індуктивними датчиками для реєстрації зусилля стиснення зварюваних деталей.

Відомі в машинобудуванні і системи активного контролю. Прикладом такої системи в зварювальному виробництві є прилад УВС, що складається з магнітопружного датчика, підсилювача, індикатора і пристрою, що вимикає. Він дозволяє контролювати тривалість зварювального імпульсу і припиняти подачу зварювального струму як тільки міцність зварного з'єднання досягає максимального значення.

Системи автоматичного управління призначені для автоматичного пуску, гальмування і реверсування електродвигунів, для управління приводами і зварювальним устаткуванням за допомогою будь-якого пристрою, що управляє (рис. 1.2 б), наприклад, електромеханічні, пневматичні і гідравлічні системи управління, які слугують для переміщення робочих органів точкових, шовних, рельєфних, стикових і інших електрозварювальних машин [1-4].

Часто процес зварювання необхідно виконувати в хімічно активних середовищах, поблизу з випромінюючими поверхнями, в розрідженій атмосфері або під великим тиском, всередині виробів малого обсягу і т. д. - коли зварювальник не може перебувати біля зварювального апарату. У цьому випадку доцільно використання дистанційно керованих установок або апаратів. Нерідко технологічне обладнання такого типу постачають ще й системою дистанційного візуального контролю, що містить дзеркально-лінзовий пристрій або телевізійну систему для спостереження за процесом.

1.3 Автоматичне регулювання

Система автоматичного регулювання (САР) - це замкнута автоматична система, заснована на принципі зворотного зв'язку - управлінні об'єктом з використанням інформації про результати управління [2]. Зворотний зв'язок повинен бути негативним, бо тільки в цьому випадку відбувається вимір і порівняння фактичного контрольованого параметра об'єкта $x(t)$ із заданим на даний момент часу $g(t)$, в результаті чого виявляється помилка (неузгодженість) $\Delta(t)$:

$$\Delta(t) = x(t) - g(t), \quad (1.1)$$

яка і служить стимулом процесу регулювання і на її основі формується регулюючий вплив $u(t)$.

У САР безперервно триває обмін інформацією між об'єктом і регулятором, вплив передається від одного елемента регулятора до іншого, послідовно змінюючи при цьому свою фізичну природу і рівень. В результаті регулюючий вплив за своєю природою може бути по-різному сформований. Якщо, наприклад, об'єкт - електродвигун приводу подачі електродного дроту, то регулюючий вплив має бути напругою, що подається на його якор. А для зварювального генератора регулюючим впливом є струм або напруга збудження [2, 3].

САР протидіє збудженням, компенсує, нейтралізує або послаблює їх зустрічними регулюючими впливами, що виробляє забезпечуючи заданий стан об'єкта на кожен момент часу. Регулювання триває до тих пір, поки помилка не стає менше порога чутливості системи [2, 3].

САР різноманітні, відрізняються одна від одної функціональними можливостями, принципами побудови і конструктивною реалізацією. За родом використовуваної енергії системи ділять на електромеханічні, електронні, пневматичні, гідравлічні, а також змішаного типу - електропневматичні, електрогідравлічні і ін [2, 3].

Все різноманіття, що входить в різні системи автоматики елементів за функціональним призначенням може бути зведене до декількох основних типів, причому можна уявити узагальнену функціональну схему системи автоматичного регулювання.

Функціональна схема складається із пристроїв, вузлів, елементів, кожен з яких виконує свою функцію в системі і графічно зображується прямокутниками, а також зв'язками між ними,

стрілками, що вказують напрямок проходження сигналів (інформації). Регулятор в таких схемах представляють у розгорнутому вигляді, а об'єкт часто взагалі опускають. Нижче розглянуті вузли (елементи) регулятора (системи регулювання).

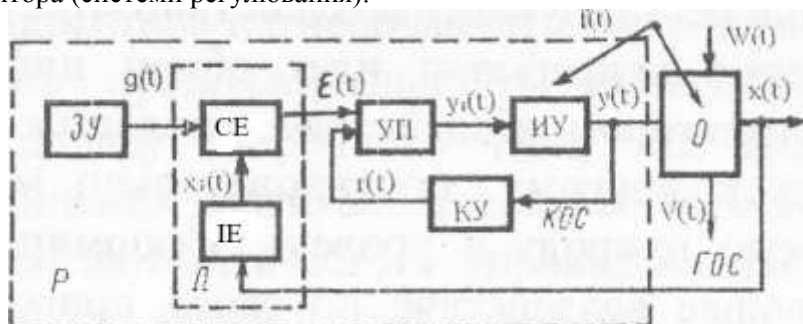


Рисунок 1.3 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання [3]

Датчик, або вимірювальний пристрій (елемент) ВП визначає дійсну регульовану величину $x(t)$ і перетворює її в сигнал $x_1(t)$, зручний для подальшого використання (найчастіше в струм або напругу).

Задатчик, або пристрій, що задає ЗП формує необхідний на кожен момент часу задаючий вплив $g(t)$ в зручному для порівняння з $x_1(t)$ вигляді, що імітує задане значення регульованої величини $x(t)$.

Пристрій (елемент), що порівнює ПЩП виявляє і вимірює різницю $x_1(t) - g(t)$ і дає на виході сигнал помилки $\Delta(t)$, пропорційний відхиленню дійсної регульованої величини $\Delta x(t)$ від заданого на даний момент значення.

Часто пристрій, що порівнює конструктивно об'єднують з вимірювальним елементом в одне ціле.

Підсилювач або підсилювач-перетворювач ПП підсилює і перетворює сигнал помилки до $u_1(t)$, достатньої і придатної для управління виконавчим пристроєм, перетворює вхідний сигнал кількісно або (і) якісно, узгодить вхід виконавчого пристрою з виходом порівнюючого елемента за родом використаної енергії.

Виконавчий пристрій ВП під впливом $u_1(t)$ виробляє регулюючий вплив $u(t)$, який надходить на регулюючий орган об'єкта

управління.

Коригувальні пристрої КУ вмикають послідовно або паралельно названим вище елементам (на схемі показаний останній варіант). Їх призначення - поліпшити якість регулювання об'єкта за допомогою формуючих в них додаткових впливів $g(t)$.

Якщо обраний контрольованою системою параметр досить повно характеризує об'єкт, то можна вважати, що завданням регулювання є підтримання регульованої величини на заданому рівні. Це дозволяє при подальшому розгляді САР об'єкт на функціональних схемах не зображати [2, 3].

Деякі елементи САР в окремих випадках можуть бути відсутніми, але головний зворотний зв'язок (ГЗЗ) повинен функціонувати завжди, бо з його допомогою виявляється відповідність дійсного стану об'єкта регулювання, заданому на даний момент часу. Наявність головного зворотного зв'язку - основна ознака САР [2, 3].

Автоматичне регулювання - це автоматична підтримка заданої регульованої величини (змінної стану) об'єкта шляхом постійного контролю його стану і діючих на нього збурень, а також регулюючого впливу (при необхідності) на його регулюючий орган.

Керуючий вплив може бути незмінним (в системах автоматичної стабілізації), в цьому випадку його називають уставкою. Прикладами можуть служити: система автоматичної підтримки напруги дуги шляхом зміни її довжини в установках аргонодугового зварювання неплавким електродом, система підтримки напруги дуги шляхом зміни швидкості подачі електродного дроту в апаратах для дугового зварювання типу АДС-1000-4, система підтримання сталості частоти обертання обичайки, в якій фактична швидкість вимірюється тахогенератором.

У системах програмного регулювання керуючий вплив змінюється програмним пристроєм по заздалегідь призначеній програмі в функції часу або шляху (переміщення, положення). Наприклад, такі системи використовують для регулювання параметрів режиму зварювання (струму, швидкості зварювання, швидкості подачі дроту, амплітуди або частоти поперечних коливань електроду) в залежності від просторового положення електрода в установках для зварювання неповоротних стиків труб, в електрогазорізальній машині «Кристал» з програмним управлінням, призначеної для газового або

газоелектричного різання листової сталі або кольорових сплавів, програма роботи якої записується на перфострічку. Якщо САР замість функціональної залежності відтворює на виході зміни вхідного впливу, причому частіше на більш високому рівні потужності (реалізують просту пропорційну залежність), а керуючий вплив заздалегідь невідомий, довільно, то її називають системою, що стежить. Такі системи застосовують при електронно-променевому, а особливо при дуговому зварюванні стиків великої протяжності (або криволінійних) для автоматичної орієнтації електрода відносно виробу, коли відхід стику через викривлення і дефекти складання заздалегідь невідомий. Використовують ці системи в зварювальних маніпуляторах і роботах [2, 3].

Відомі також системи регулювання, що забезпечують зміну регульованої величини по похідній, інтегралу або більш складної функції від задаючого впливу та ін.

1.3.1 Аналіз впливів, що збуджують при зварюванні

Процес зварювання, як і будь-який інший процес, протікає в тісному взаємозв'язку з навколишнім середовищем. Зміни в ньому викликають зміни в характері процесу зварювання. В автоматичі такий процес називають збудженням. Збудження можуть призвести до відхилення властивостей зварного з'єднання від необхідних, тобто до появи неприпустимих дефектів у зварному шві [2, 3, 4].

Відмінні по фізичній природі збудження прикладені в різних точках зварювального контуру джерело-дуга-виріб, тому вплив одних збуджень на процес зварювання може бути ослаблений або, відносно легко, усунутий шляхом їх вимірювання і компенсації, відсторонення інших - пов'язано з певними труднощами [4, 5].

Наприклад, вплив збуджень, які діють на ланцюг джерело-зварювальна дуга (коливання напруги мережі живлення, зміна довжини дуги і т. д.) порівняно просто усунути за допомогою систем автоматичної стабілізації параметрів режиму зварювання: струму, напруги на дузі, швидкості зварювання, швидкості подачі електрода, що плавиться (присадного дроту) і т. д. Подібні системи в різних виконаннях впроваджені в промисловості. Застосування їх стабілізує енергетичні параметри зварювальної дуги і, отже, її теплову потужність.

Значно складніше компенсувати вплив збуджень, прикладених до ланцюга електрод-деталь; вплив їх не послаблюється за допомогою систем автоматичної стабілізації параметрів режиму зварювання. Ці збудження важко контролювати в процесі зварювання - для вимірювання їх потрібні спеціальні датчики, що працюють за різними фізичними принципами. З деякими припущеннями ці збудження умовно можна розділити на дві групи: конструктивні та технологічні.

Конструктивні обумовлені конструктивними особливостями зварного з'єднання. Вони виникають при розташуванні отворів або приливів в безпосередній близькості стику, зміні товщини зварюваного металу, різнотовщинності деталі і т.д. Вплив конструктивних збуджень виражається в зміні умов теплопередачі і перерозподілі теплової потужності зварювальної дуги між деталлю і навколишнім середовищем [2-5].

Технологічні збудження виникають в основному при неточності при складанні стику, що призводять до зміни зазору між зварювальними кромками, форми і розмірів оброблення крайок, зміщення кромок, зміни ступеня прилягання формуючої підкладки по довжині стику. Крім того, до цих збуджень можна віднести ерозію електроду, зміну структурної та хімічної однорідності зварюваного матеріалу, зміну якості захисного середовища, наявність технологічних прихваток по довжині стику. Технологічні збудження в основному мають випадковий характер і найчастіше з'являються через недосконалість складальних пристосувань і технологічної оснастки.

При відпрацюванні за допомогою САР конструктивних і технологічних збуджень необхідно враховувати їх симетрію щодо зварюваного стику. Вплив симетричних збуджень (наявність в зварювальному виробі отворів, симетрично розташованих відносно стику) можна усунути за допомогою САР з одним регулюючим впливом. Таким впливом може бути, наприклад, зварювальний струм, зміною якого забезпечується стабілізація ізотерми температурного поля в зоні стику [2, 3].

При впливі несиметричних збуджень (зміщення кромок стику) змінюються розміри і форма ізотерм температурного поля. В цьому випадку для стабілізації температурного поля потрібно не менше двох впливів на об'єкт, наприклад, зміна зварювального струму і зміщення електроду з лінії стику. Структура САР при цьому дещо ускладнюється [2, 3].

Методи теорії автоматичного регулювання дозволяють виключити вплив конструктивних і технологічних збуджень на вихідні параметри об'єкта. При цьому необов'язково безпосередньо вимірювати збудження, а досить побудувати САР таким чином, щоб точка докладання збудження виявилася всередині замкнутого контуру системи регулювання. Якщо збурення легко виміряти, то його дію легко послабити побудовою системи регулювання з керуванням за збудженням або побудовою комбінованої системи регулювання, що поєднує в своїй роботі управління по відхиленню вихідної величини і управління по збудженню (п. 1.4) [2-4].

При побудові САР враховують тільки домінуючі технологічні збудження, тобто такі, вплив яких істотно позначається на основних властивостях зварного з'єднання і до того ж не може бути ослаблений дією систем стабілізації енергії джерела нагріву. Домінуючі збудження і їх загальне число визначають, зазвичай, експериментально для кожного конкретного випадку зварювання. Вимірюють їх за допомогою контактних або безконтактних датчиків з різними принципами дії (потенціометричних, ємнісних, пневматичних, телевізійних, електромагнітних, фотоелектричних і ін.) [2-4].

Класифікація основних збуджень, що діють у зварювальному контурі, наведена на рис. 1.4. У ній врахована точка докладання збуджень у зварювальному контурі, фізична природа збудження. Класифікація спрощує вибір у кожному конкретному випадку необхідної системи управління процесом зварювання [3-5].

1.4 Регулювання за відхиленням і за збудженням змінюваної величини

Всі системи регулювання можна розділити на дві групи в залежності від того, як пов'язані в них контрольована і регульована величини, тобто в залежності від місця докладання регулюючого впливу. Воно може бути спрямоване або на компенсацію відхилення регульованої величини, або на ліквідацію збудження, яке викликало те відхилення [1, 2, 3].

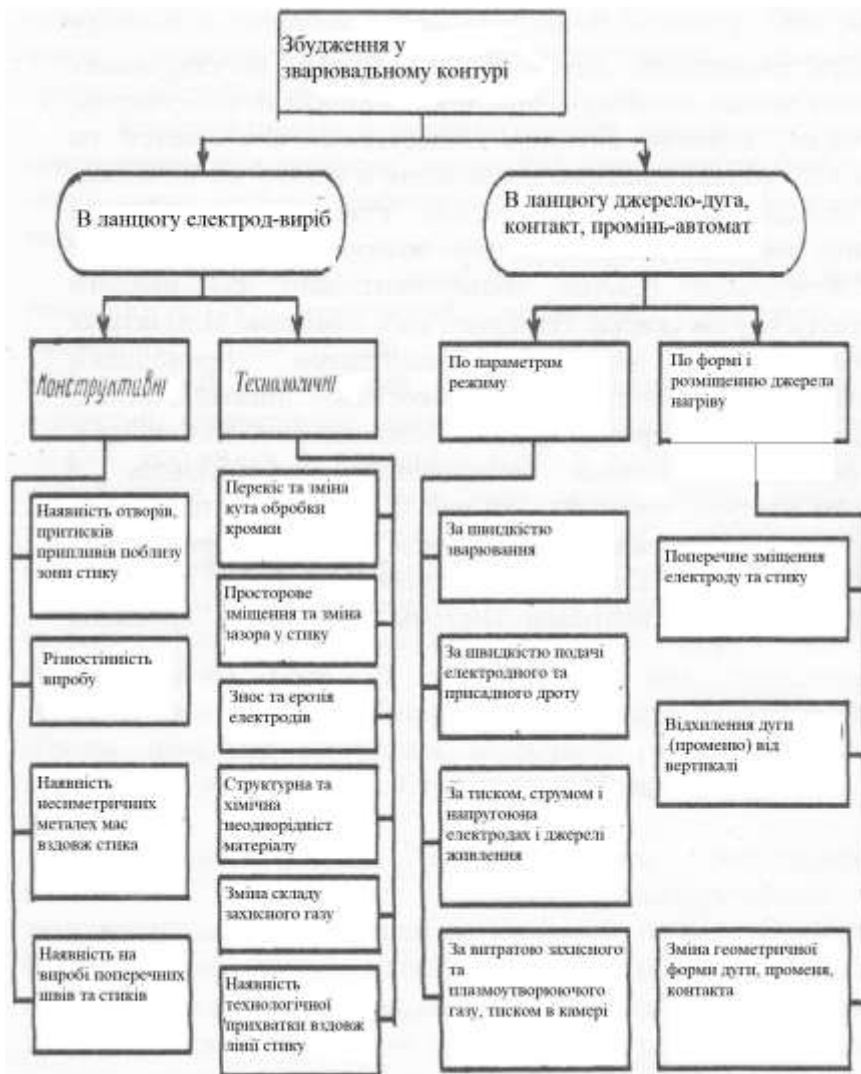
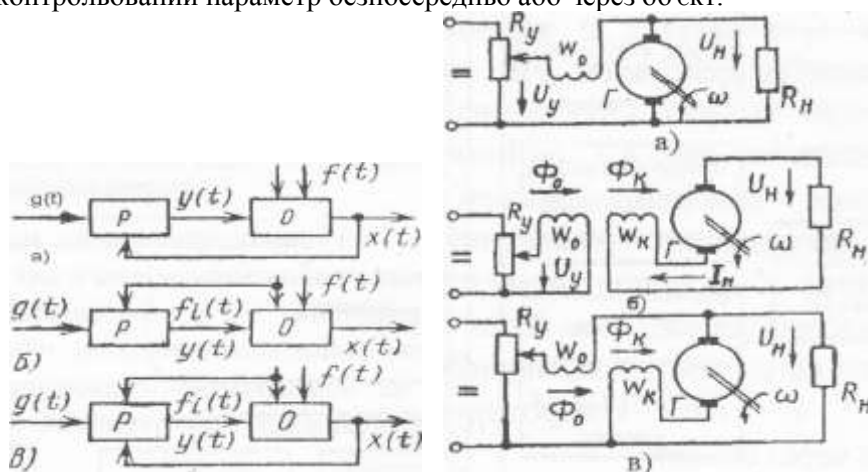


Рисунок 1.4 – Класифікація збуджень у зварювальному контурі

Велика частина систем автоматичного регулювання збудована з контролю відхилення регульованої величини від заданої (компенсаційний принцип Ползунова-Уатта). У таких системах

контролюється (вимірюється) регульована величина $x(t)$; вона порівнюється із заданим для даного моменту керуючим впливом $g(t)$, в результаті чого виявляється помилка $\varepsilon(t) = x(t) - g(t)$. Узагальнена функціональна схема системи показана на рис. 1.5 а. Реакцією системи на зміну стану, який виник, є дія, спрямована на ліквідацію відхилення $\varepsilon(t)$. Система контролює стан об'єкта по одному з параметрів і при його зміні впливає не на саме збудження $f(t)$, що оказує вплив на систему і є першопричиною цієї зміни, а на контрольований параметр безпосередньо або через об'єкт.



Функціональні схеми

Схеми генератора

Рисунок 1.5 - Схеми систем автоматичного регулювання по відхиленню (а), збудженню (б), комбінована (в) [3]

Розглянемо, як приклад, систему регулювання напруги зварювального генератора (рис. 1.5). Завдання її - підтримувати на постійному рівні напругу U_H на навантаженні R_H . Відомо, що ця напруга залежить від частоти обертання якоря генератора ω і від напруги на обмотці збудження ω_0 . Схема складена так, що напруга збудження утворюється, як різниця між напругою уставки U_y , що знімається з потенціометра-здатчика R_y , і напругою на навантаженні U_H тобто:

$$U_B = U_y - U_H, \quad (1.2)$$

При заданому навантаженні R_y , переміщаючи повзунок потенціометра-здатчика R_y , можна знайти таке його положення, при якому в сталому стані напруга на навантаженні має необхідне значення $U_{н0}$. Поки ця напруга відповідає заданому, стан системи залишається незмінним, вона нерухома. Якщо під дією якихось причин (зміна навантаження, частоти обертання якоря генератора і ін.) напруга на навантаженні змінилася, то система стане рухатись, почнеться перехід від її старого стійкого стану в новий.

Припустимо, що зовнішнє збудження виразилося в збільшенні навантаження, тобто в зменшенні його опору U_H . У перший момент це викликає зниження напруги на навантаженні до деякого значення U_H через зростання сили струму навантаження, а значить, і падіння напруги на внутрішньому опорі якоря генератора. Цей параметр, як ми знаємо, система контролює, так як безперервно порівнює його з уставкой U_y . Тому відхилення регульованої величини від заданої відразу ж виявляється системою. Проявляється це в різкому збільшенні [відповідно до рівняння (1.1)] напруги U_B . Починається регулювання, яке полягає в тому, що під дією збільшеного потоку збудження напруга на навантаженні відновлюється.

Аналогічно система діє в разі, якщо зміна вихідної напруги викликана зміною частоти обертання якоря генератора. Зменшення швидкості веде спочатку до зниження U_H , потім при регулюванні воно відновлюється внаслідок підвищеного потоку збудження, відповідно до (1.2). Так само система діє і в тому випадку, якщо одночасно змінюються сила струму і напруга.

Описана система і подібні їй з компенсацією відхилення підтримують на виході з певною точністю заданий регульований параметр незалежно від того, які збудження діють, де вони включені і скільки їх діє одночасно.

При регулюванні по збудженню з усіх можливих, що можуть діяти на систему і викликати відхилення регульованої величини, вибирається одне, основне $f_i(t)$, яке чинить вирішальний вплив на стан об'єкта в даних умовах. Воно і контролюється (рис. 1.5 б). Як було відзначено, основним, зазвичай, є збудження по навантаженню, тому часто реалізують систему регулювання по навантаженню.

Принцип регулювання по збудженню розглянемо на прикладі зварювального генератора з двома обмотками збудження. Одна з них ω_0 незалежна, а інша ω_k включена узгоджено з ω_0 і послідовно з

якорем генератора, і по ній, отже, тече струм навантаження I_H (рис. 1.5 б). Напруга U_H на навантаженні R_H залежить від сумарного потоку збудження $\Phi_B = \Phi_0 + \Phi_k$, частина якого Φ_k визначається струмом навантаження в обмотці ω_k , а інший Φ_0 вибирають за допомогою потенціометра R_y такий, щоб при заданому навантаженні R_{H0} на ньому була бажана напруга.

При зростанні навантаження збільшується струм навантаження I_H , а напруга на ньому U_H падає. Струм навантаження бере участь в створенні сумарного потоку Φ_B , тобто регулюючого впливу, і сам же сприяє відновленню напруги на навантаженні, бо сумарний потік Φ_B став більше. Так що в першому наближенні напруга на навантаженні не залежить від її опору [1-4].

Як бачимо, в цій системі повна або часткова незалежність її від впливу чинного збудження досягається компенсацією самого збудження. Принцип регулювання по збудженню отримав назву інваріантності, тобто незалежності від зовнішнього збудження, і відомий ще, як принцип Понселе-Чиколева. Однак не слід вважати, що метод цей дуже хороший. Система працездатна тільки при одному контрольованому збудженні по навантаженню.

Якщо розглянути роботу цієї ж системи при дії іншого збудження, то вона виявляється взагалі непрацездатною. При збудженні, наприклад, по частоті обертання валу генератора, внаслідок падіння напруги в мережі, яка живить приводний двигун, напруга на навантаженні також падає, але зменшується при цьому і струм навантаження. Виходить так, що замість необхідного збільшення сумарного потоку збудження він зменшується і напруга U_H падає ще більше.

1.5 Пряме і непряме регулювання

Системи автоматичного регулювання можна класифікувати за способом впливу чутливого елемента системи на регулюючий орган.

Чутливий елемент, або датчик системи регулювання, сприймає і вимірює безпосередньо контрольований параметр об'єкта, передаючи інформацію про його стан в систему. Регулюючий орган (РО), пов'язаний безпосередньо з об'єктом і досить часто є його складовою частиною. Завдання РО в системі практично протилежні - формування відповідного регулюючого впливу і подача його на об'єкт. Для

виконання цього регулюючий орган в системі повинен забезпечуватися необхідною енергією.

У системах прямого регулювання чутливий елемент (датчик) безпосередньо впливає на регулюючий орган, поставляючи йому необхідну енергію. Пряме регулювання можливо лише тоді, коли датчик сам досить потужний [1-4].

Приклад системи прямого регулювання - регулятор напруги генератора (рис. 1.6 а). Тут додаткове зовнішнє джерело енергії не потрібно, бо енергія, необхідна для приведення в дію регулюючого органу (реостата R_p), відбирається від об'єкта регулювання через датчик при відхиленні контрольованого (регульованого) параметра.

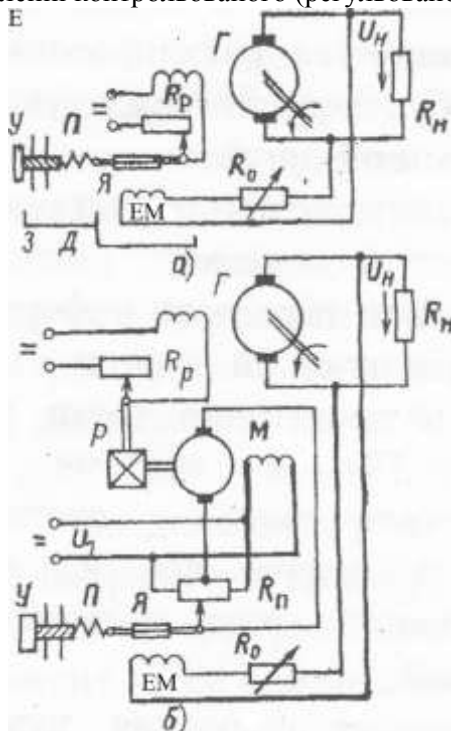


Рисунок 1.6 - Схеми прямого (а) і непрямого (б) регулювання

Падіння напруги U_H на навантаженні R_H визначається напругою збудження U_B , яке залежить від R_p . Повзун реостата займає завжди

такий стан, при якому зусилля пружини П врівноважується силою тяги електромагніту ЕМ, підключеного до генератора паралельно навантаженню. Електромагніт виконує і функцію чутливого елемента, безперервно контролюючи (вимірюючи) регульовану напругу U_n , і створює певну електромагнітну силу, діючу на якір Я і, отже, на повзун реостата R_p . Бажана напруга на навантаженні встановлюється задатчиком З шляхом зміни зусилля пружини за допомогою гвинта уставки У. При цьому струм збудження визначається чинною ділянкою реостата, який регулює.

Працює система таким чином. Якщо, наприклад, навантаження збільшиться, то в перший момент напруга на ній впаде. Це буде зафіксовано електромагнітом і почнеться регулювання. Якір електромагніту під дією пружини П переміститься вліво. При цьому струм збудження зростає в порівнянні з вихідним, що призведе до відновлення напруги на навантаженні. Рух повзуна припиниться тоді, коли зусилля пружини і електромагніту урівноважаться. Після закінчення перехідного процесу, тобто у сталому стані, напруга на навантаженні матиме приблизно початкове значення [2, 3].

Функціональна схема розглянутої системи показана на рис. 1.7а. Функції пристрою, що спрацьовує СЕ в розглянутій системі виконують спільно датчик (обмотка ЕМ, як чутливий елемент і якір) і задатчик (пружина і натяжний гвинт). Регулюючим органом РО в системі є реостат R_p .

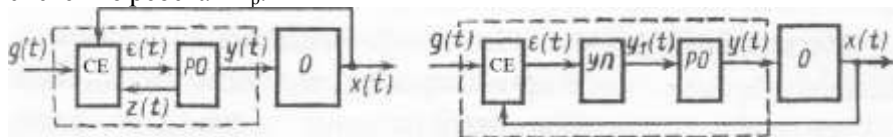


Рисунок 1.7 - Функціональні схеми систем прямого (а) і непрямого (б) регулювання [2]

Переваги систем прямого регулювання - в їх конструктивній простоті. Вони надійні в роботі, їх легко обслуговувати. Однак застосування їх обмежене через недостатню вихідну потужність і знижену чутливість. Чутливий елемент повинен бути в змозі розвивати потужність, необхідну для перестановки регулюючого органу. Потужність його можна підвищити збільшенням розмірів, проте при цьому, як правило, погіршується чутливість. Недоліком

системи прямого регулювання є також і те, що завжди наявна тут зворотна реакція $z(t)$ елемента який реагує на чутливий елемент (штрихова лінія, див. рис. 1.7 а) також знижує чутливість останнього, що погіршує якість і точність регулювання [2, 3].

У тих випадках, коли потужність, що розвивається чутливим елементом, недостатня для безпосереднього впливу на регулюючий орган, використовують системи непрямого регулювання. В цій системі енергія, необхідна для переміщення регулюючого елемента, надходить від допоміжного джерела. Чутливий елемент тільки виявляє відхилення регульованої величини (неузгодженості). Тому його чутливість і точність вимірювання параметра можуть бути істотно поліпшені. Датчик діє вже не на регулюючий орган, а на підсилювач або перетворювач, який впливає на регулюючий орган з необхідною для цього потужністю.

Керувати вихідним сигналом підсилювача-перетворювача порівняно просто, для чого необхідно подати на його вхід сигнал невеликої потужності з датчика. Таким чином, датчик управляє енергією N , що надходить від джерела живлення до регулюючого органу через проміжний допоміжний елемент (підсилювач, перетворювач або механізм типу сервомотора).

Отже, в системі непрямого регулювання крім вихідного регулюючого впливу $y(t)$ є первинно регулюючий вплив $y_1(t)$, необхідне для управління проміжним елементом (див. рис. 1.6, б).

На відміну від попередньої, в цій системі повзун досить потужного регулюючого реостата R_p переміщує не саме датчик, а виконавчий двигун M , який отримує живлення від джерела живлення U_1 . Датчик істотно розвантажений - він переміщує повзун відносно легкого проміжного керуючого потенціометра R_{Π} .

При збігу напруги на навантаженні із заданим повзунок потенціометра R_{Π} в середньому положенні, струм у ланцюзі якоря двигуна відсутній, і повзун регулюючого реостата займає певне положення. У разі, коли стрибком змінюється, наприклад, навантаження, а отже, напруга на ній U_H , змінюється сила тяги електромагніту EM , повзунок потенціометра зміщується вліво або вправо (в залежності від знака збільшення U_H). Це викликає появу струму в ланцюзі двигуна і він переміщує (і тим з більшою швидкістю, ніж далі змістився повзунок R_{Π} від середнього положення, тобто чим більше ΔU_H) повзун реостата R_p . Одночасно з відновленням

напруги на навантаженні, внаслідок збільшення сили тяги електромагніту, повзунок R_p буде повертатися до середнього положення. Регулювання припиниться, коли повзунок R_{II} виявиться в середньому положенні. Якірний ланцюг двигуна знеструмиться, він зупиниться, повзун реостата R_p займе нове положення, а напруга на навантаженні відновиться [2, 3].

Таким чином, зв'язок регулюючого органу R_p з вимірювальним (порівнює) пристроєм здійснюється через підсилювач і двигун (сервопривід).

Системи непрямого регулювання складніше систем прямого, регулювання, проте кращі. Так як чутливий елемент (датчик) в них вже не обов'язково повинен давати сигнал великої потужності, а коефіцієнт посилення підсилювача може бути взятий практично будь-якого значення, чутливість цих систем і точність регулювання з їх допомогою значно вище.

1.6 Безперервне, релейне та імпульсне регулювання

Залежно від принципу формування регулюючого впливу САР ділять на системи безперервної і переривчастої (дискретної) дії.

У безперервній системі необхідна для управління інформація є в будь-який момент часу, сигнали (впливу) в ній безперервні в часі і за рівнем. Зв'язки між елементами зберігаються завжди, тобто будь-яка безперервна зміна вхідного сигналу в часі викликає також безперервну зміну вхідних і вихідних сигналів у всіх наступних елементів її. Статичні характеристики всіх елементів безперервні, вплив, що регулює є безперервною функцією вхідного сигналу. Якщо, наприклад, вхідний сигнал $x(t)$ в системі змінюється так, як показано на рис. 1.8 а, то і регулюючий вплив на її виході $y(t)$, має такий же (рис. 1.8 б) характер зміни (за умови, що жоден з елементів системи не увійшов у зону насичення). Прикладами систем безперервної дії є системи автоматичного регулювання, показані на рис. 1.5, 1.7.

Систему автоматичного регулювання, всі елементи якої описуються лінійними диференціальними або різницевиими рівняннями, називають лінійною. На відміну від системи лінійної, в системі нелінійній безперервний зв'язок між вхідними в неї елементами також зберігається, але немає пропорційності між регулюючим впливом на її виході і поточним значенням вхідного

сигналу (штрихова лінія, рис. 1.8, б).

Велику групу становлять системи, в яких зв'язки між елементами зберігаються не завжди. Такі системи містять елемент, який при неперервній зміні сигналу на вході передає його далі переривчасто. Їх називають системами переривчастого регулювання, або дискретними. Залежно від принципу перетворення (квантування) сигналу з безперервного в дискретний - за рівнем, за часом або за рівнем і часом одночасно - їх ділять на системи релейного, імпульсного і цифрового регулювання [1-4].

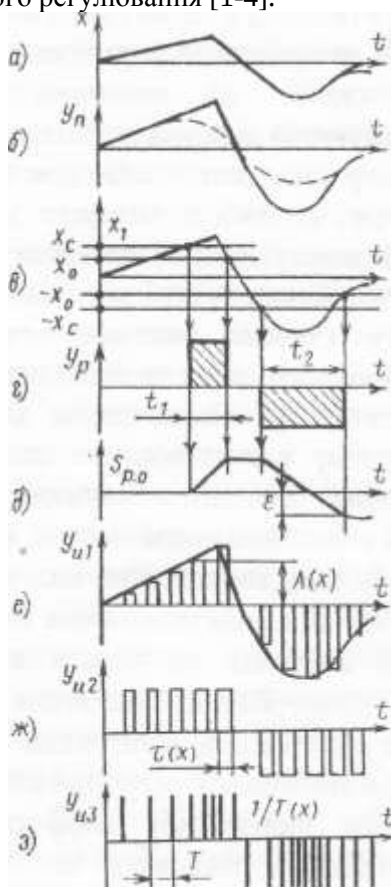


Рисунок 1.8 - Види регулюючих впливів в системах неперервного, релейного і імпульсного регулювання [3]

В систему релейного регулювання входить релейний елемент (реле), що має розривну (релейну) статичну характеристику [3].

При наявності реле в системі регулюючий вплив y на її виході в залежності від вхідної величини може приймати всього два або три постійних значення: $y_{\max} - y_{\min}$ або $(+y_{\max}) - 0 - (y_{\min})$.

Моменти включення і виключення виконавчого елемента і релейній системі залежать від вхідного впливу. Якщо, наприклад, воно змінюється так, як показано на рис. 1.8 в, то (за умови, що ланцюг керування двигуном розірван і отже, відпрацювання помилки не відбувається) регулюючий вплив, що подається на двигун змінюється по розривній ступінчастій функції $y_p(t)$ (рис. 1.8 г). Розривність пояснюється зоною нечутливості релейного елемента, яка поширюється від $+x_0$ до $-x_c$.

На рис. 1.8 д показаний характер переміщення регулюючого органу $S_{p,0}(t)$ в припущенні, що при включеному виконавчому елементі (електродвигуні, наприклад) він переміщається з постійною швидкістю, а в зоні нечутливості, коли виконавчий елемент вимкнений, залишається нерухомим. При цьому, якщо час включення виконавчого елемента в зворотному напрямку більше, ніж в прямому, тобто $t_2 > t_1$, то після закінчення процесу регулювання регулюючий орган займає нове положення, яке відрізняється на величину e від початкового [3].

Релейні системи розрізняють на двохпозиційні і трипозиційні в залежності від числа можливих положень регулюючого органу.

Перевагою релейних систем є простота їх конструкції і легкість отримання великого коефіцієнта посилення [3].

Прикладом релейної системи може служити схема (рис. 1.9), призначена для регулювання напруги на дузі при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом шляхом зміни її довжини (відомо, що ця напруга пропорційна довжині дуги). В системі використовується включене на виході підсилювача поляризоване реле Р, яке реагує на зміну полярності вхідного впливу зміною знака вихідного сигналу. Після досягнення відхилення регульованої величини від заданого на даний момент часу $\Delta U_d = U_d - U_z$, рівного напрузі спрацьовування реле $\Delta U_d \cdot k_y \geq U_{cp}$ (де k_y - коефіцієнт посилення підсилювача), реле спрацьовує в одному або іншому напрямку (в залежності від знака неузгодженості) і замикає в ланцюзі якоря двигуна М контакт **в** (вгору) або **н** (вниз). Залежно від того,

який з контактів виявився замкненим, двигун збуджується від обмотки OB1 або OB2. В результаті, двигун через понижуючий редуктор піднімає або опускає зварювальну головку з постійною номінальною швидкістю, так як $U_B = \text{const}$ (або $y_p = \text{const}$, див. рис. 1.8, г), незважаючи на те, що відхилення ΔU_d не залишається незмінним.

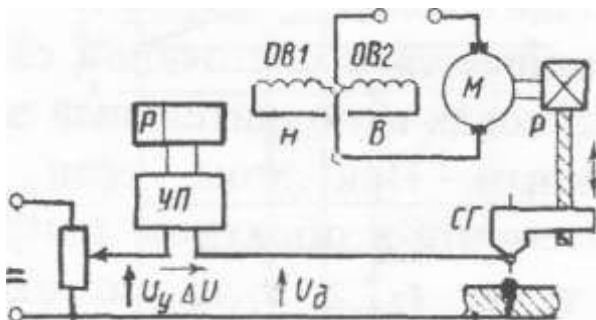


Рисунок 1.9 - Схема релейного регулювання зварювальної дуги

При відпрацюванні помилки настає момент, коли, $\Delta U_d \cdot k_y \leq U_{отп}$ реле відключає двигун, але рух триває. Положення рівноваги система за інерцією може проскочити настільки, що виникне помилка зворотного знака, достатня для включення двигуна на зворотний хід, причому і далі процес проскакування може повторюватися. Тому, хоча релейні системи і мають достатню швидкодію (виконавчий елемент їх завжди працює тільки на максимальній швидкості) і відносно прості конструктивно, вони мають і суттєві недоліки - знижену точність регулювання і наявність автоколивань (незатухаючих коливань біля положення рівноваги). Для придушення їх використовують різні методи (див. нижче).

При квантуванні сигналу за часом вплив на виконавчий елемент відбувається в певні фіксовані моменти і відсутній в проміжках між ними. Такий сигнал називають дискретним за часом. Керуючий вплив на виконавчий елемент в системі з квантуванням за часом є ланцюжком імпульсів, що формуються імпульсним перетворювачем, а таку систему називають імпульсною [1, 2, 3].

Тільки один з параметрів імпульсу - амплітуда A , тривалість τ або частота (період T) їх повторення f - є функцією вхідного сигналу,

а інші два залишаються постійними. Відповідно з цим розрізняють методи регулювання (див. рис. 1.8 е-з):

- амплітудо-імпульсний (коли $A = \text{var}$, $\tau = \text{const}$, $f = \text{const}$);
- широтно-імпульсний (коли $\tau = \text{var}$, $A = \text{const}$, $f = \text{const}$);
- частотно-імпульсний (коли $1/T = f(x) = \text{var}$, $A = \text{const}$, $\tau = \text{const}$).

Набувають поширення комбіновані системи регулювання, що представляють поєднання регуляторів безперервної і дискретної дії. [2-4]. У дискретних системах не тільки вхідні сигнали вводяться дискретно, а й вихідні змінні також можуть мати дискретний характер. У системах зі складною програмою реалізованих математичних і логічних операцій зазвичай застосовують цифрові пристрої та цифрові обчислювальні машини, а також перетворювачі безперервних напружень в код і код в напругу (НК і КН). В інших випадках дискретне управління застосовують спеціально для підвищення перешкодозахищеності систем.

2 ДАТЧИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ І СХЕМИ ЇХ ВКЛЮЧЕННЯ

Датчики є чутливими елементами дозволяють здійснювати вимірювання і контроль параметрів механізованих промислових систем. Вони замінюють органи чуття людини і дозволяють механізму працювати в автоматичному режимі.

Відповідно до теорії розв'язання винахідницьких завдань (ТРВЗ) ідеальним датчиком є той, який не споживає енергії, не займає місця, не має ваги, але функції його виконуються. Прикладом такого датчика в зварювальному виробництві може служити електрична дуга при зварюванні кутового або таврового шва. Палаюча зварювальна дуга може давати інформацію про зсуви електрода в 2^x напрямках: вздовж осі електрода (довжина дуги) і поперек шва. Ця властивість зварювальної дуги використовується в системах геометричної адаптації зварювальних робіт [3, 5, 6].

2.1 Поняття про датчики та їх загальні властивості

Чутливі елементи і датчики є одним з елементів автоматичного регулятора.

Вимірювальними (чутливими) елементами є пристрої, які сприймають безпосередньо від об'єкта будь-які фізичні або хімічні величини та перетворюють їх при необхідності в інші величини, більш зручні для використання в автоматичних системах [2, 3, 5].

Вимірювальний елемент - вимірює дійсне значення регульованої величини або основного впливу, що обурює в залежності від принципу регулювання. Вимірювальний елемент - визначає дійсне значення регульованої величини або основного впливу, що збуджує в залежності від принципу регулювання [3, 6].

Вимірювальні елементи з такими перетворювачами називають датчиками. Всі датчики можна розділити на 2 групи:

- активні або генераторні;
- пасивні або параметричні.

Генераторним - називається датчик, що перетворює контрольовану величину в е.р.с.

Параметричним - називається датчик, що перетворює зміну контрольованої величини в зміну параметра електричного кола [2, 3].

2.2 Вимоги, що пред'являються до датчиків

- а) висока точність і чутливість;
- б) надійність, довговічність і висока стабільність;
- в) невеликі розміри і вага;
- г) мале вимірювальне зусилля і його сталість в межах робочого ходу вимірювального наконечника;

д) мала чутливість до вібрацій і прискорень;

е) великі межі вимірювань;

ж) мала інерційність.

Вихідною величиною в параметричному датчику може служити:

а) активний опір (датчики реостатні, дровові, термоопору, фото опору);

б) індуктивний опір (індуктивні датчики різних типів);

в) опір місткості (ємнісні).

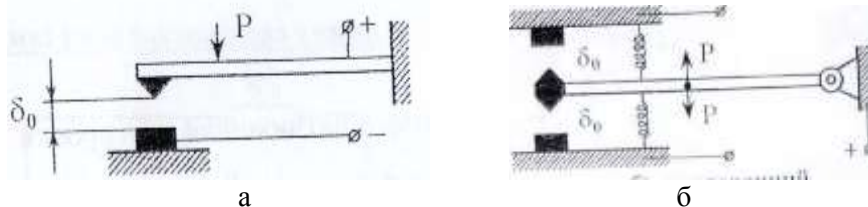
Вихідною величиною в генераторних датчиках є е.р.с.:

- постійного струму (термопари, п'єзоелементи, фотоелементи із замикаючим шаром, тахогенератори постійного струму, датчики магнітних полів);

- змінного струму (тахогенератори змінного струму, датчики Холла) [3, 5, 6].

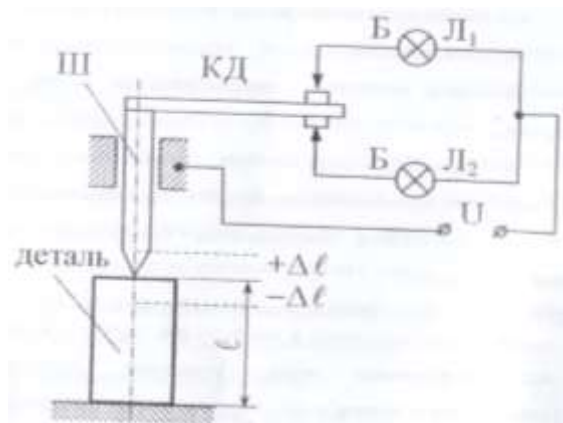
2.3 Контактні датчики

Контактні датчики бувають: односторонніми і двосторонніми (рис. 2.1). Вони перетворюють лінійне переміщення ЧЕ в електричний імпульс. Цей імпульс використовується для приведення в рух виконавчого механізму або його виконуючого органу (рис. 2.2).



а – односторонній; б – двосторонній

Рисунок 2.1 – Контактні датчики [3]



Ш – вимірювальний штифт; Д - деталь; Л1, Л2 - лампочки;
КД - контактний датчик

Рисунок 2.2 - Використання контактний датчика для сортування деталей [3]

Нечутливість контактний датчик визначається величиною початкового зазору δ_0 між контактами. Поки вхідна величина ЧЕ не подолає зазор δ_0 , між контактами, датчик буде діяти.

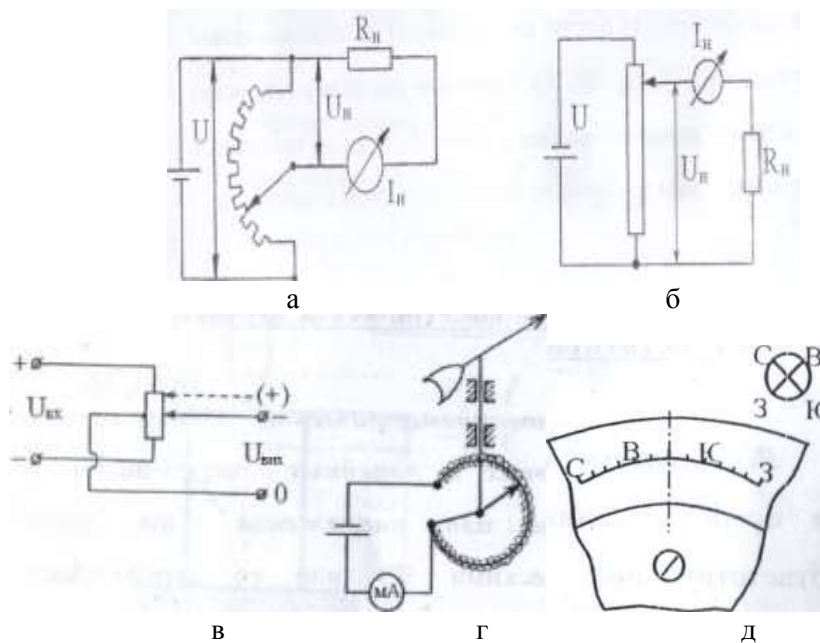
2.4 Реостатні і потенціометричні датчики

Реостатні (рис. 2.3) або потенціометричні датчики служать для перетворення кутових і лінійних переміщень у відповідні струми або напруги. Вони часто поєднуються з механічними ЧЕ або зі стрілочними вимірювальними приладами.

Реостатний датчик являє собою звичайний реостат, в якому переміщення рухомого контакту змінює введений в ланцюг опір.

Вхідною величиною реостатного датчика може бути зусилля, тиск, прискорення, вихідною величиною - активний опір.

Якщо у реостатного датчика зробити відвід від середини, то такий датчик буде характеризувати не тільки величину переміщення движка, а й напрям [2, 3].



а, б – кутові; в, г, д – лінійні

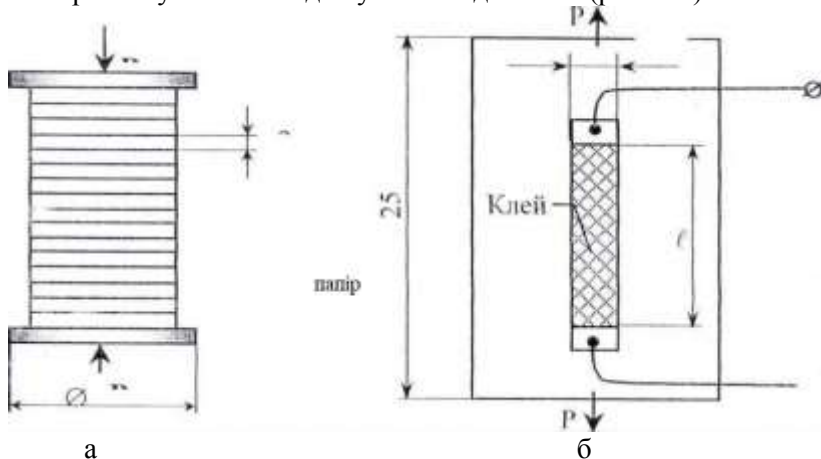
Рисунок 2.3 - Схеми реостатних датчиків [2]

Конструктивне виконання датчика залежить від величини моменту на осі приладу, з яким пов'язаний движок датчика. Якщо датчик застосовується для передачі показань приладів з великим моментом, що встановлюється (манометри, засувки, клапани, шасі літака), то реостат виготовляється з константового дроту (60 % Cu, 40 % Ni). Контактний тиск щітки може складати кілька грамів і більше. Якщо ж датчик пов'язаний з чутливим приладом, наприклад з магнітним компасом, то необхідно мати малий момент тертя. В цьому випадку реостатний датчик виготовляється з платино-іридієвого, платино-паладієвого або платино-рутенієвого дроту $\varnothing 0,03$ мм із загальним опором ≤ 5 кОм, що має добрі антикорозійні властивості, забезпечує надійний контакт при тиску рівному десяткам міліграмів. Датчики, що працюють при високих температурах виготовляються з фехральових дротів [3, 5, 6].

2.5 Вугільні датчики

Вугільні датчики відносяться до групи реостатних датчиків. Ці датчики дозволяють перетворювати передане на них зусилля у зміну електричного опору [5]. Принцип дії заснований на зміні контактного опору між частинками вугілля (подібно мікрофонам) при зміні тиску.

Використовуються 2 види вугільних датчиків (рис. 2.4):



а - стовпчик із вугільних шайб; б - вугільний тензометр (тензоліт)

Рисунок 2.4 - Вугільні датчики [3]

а) у вигляді стовпчиків з вугільних шайб: кількість шайб з електродного графіту - 10 - 15 шт, початковий тиск 20 кг/см; максимальний тиск 50 - 60 кГ/см; зменшення опору $\Delta R = 20 - 30 \%$;

б) датчики з тензолітів - малогабаритні датчики, виготовлені з порошку вугілля, графіту або сажі, змішані з бакелітовим лаком. Маса - називається тензолітом. $R = 1 - 10 \text{ кОм}$; деформації 0,1 - 0,8 %.

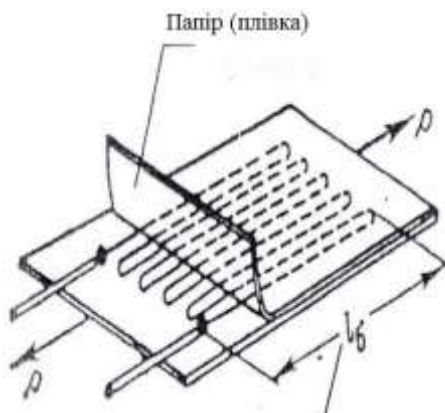
При розтягуванні контакт між частинками графіту в бакеліті погіршується і опір датчика зростає, при стисненні - опір зменшується [3].

Недолік вугільних датчиків - велика залежність їх опору від температури. Це обмежує їх застосування.

2.6 Тензоопір (тензорезистор)

Тензо- (лат.) - розтягую, п'єзо- (лат.) – стискаю [3, 5, 6].

В теперішній час на практиці широко використовуються дровотві, фольгові і напівпровідникові тензорезистори (рис. 2.5).



Клей БФ-2 (- 40... + 70° С); Бакелитовий лак (до 200° С); Цемент Б-56 (до 400 °С); $R = 50 \dots 400 \text{ Ом}$; Довжина бази $l_0 = 5 \dots 30 \text{ мм}$; $K = 2 \pm 0,2$; $\varepsilon < 0.3 \text{ \%}$.

Рисунок 2.5 – Тензорезистор [3]

Тензорезистори або дровотві датчики застосовують для тих же умов, що й тензоліти: для вимірювання вібрацій, малих переміщень, деформацій.

Дровотві тензорезистори виготовляються з константового (60 % Cu, 40 % Ni), ніхромового (20 % Ni, 80 % Cr), інвар (65 % Fe, 35 % Ni) або елінварового (38 % Ni, 8 % Cu, 0,4 % C , 0,6 % Mn, Fe - інше) дровотві $\varnothing 30\text{-}50 \text{ мкм}$.

Електричний опір цих дровотві змінюється при додаванні навантаження. Причиною цього є зміна площі поперечного перерізу і довжини дровотві, а також зміна питомої опору матеріалу:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

де R – опір (50, 100, 200, 400 Ом);

ρ – питомий опір, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перерізу дроту, мм^2 .

$$K = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon}, \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.3)$$

де K – коефіцієнт тензочутливості;

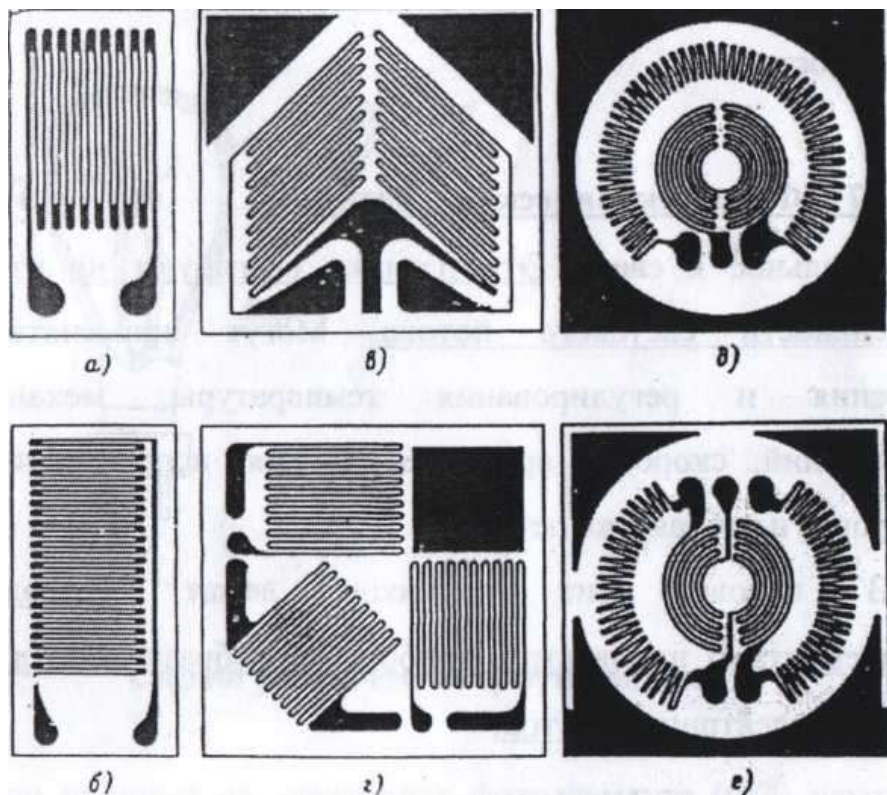
ε – відносна деформація перетворювача.

Деформація датчика в напрямку перпендикулярному довжині дроту викликає надзвичайно малу зміну опору. Завдяки цьому такі датчики дають можливість визначити нормальну і тангенціальну складову механічного навантаження.

Переваги. Дротяні датчики досить стабільні, мають малу температурну залежність і низьку вартість. Тому тензорезистори використовуються з підсилювачами та необхідної подальшої апаратури.

Фольгові тензорезистори виготовляють (рис. 2.6) з константової фольги $\delta = 4 \dots 12$ мкм, нанесена на лакову основу. Розміри такі ж як і у дротяних.

Переваги: через більш хороший контакт з металом об'єкту струм, що протікає через резистор може бути збільшений до 0,5 А і тим самим підвищується чутливість перетворювача ($K = 50; 100; 200$ Ом). Можливість виготовлення решіток будь-якого профілю [3, 4].



а і б - прямокутникові; в і г - резеточні; д і е - мембрани.

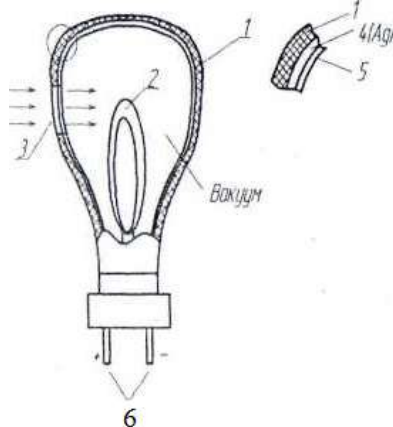
Рисунок 2.6 - Конструкція фольгових тензорезисторів [3]

Напівпровідникові тензорезистори являють собою кристали - германію (Ge) і кремнію (Si), арсеніду галію (GaAs), антимоніда індію (In). Переваги: малі габарити, висока чутливість (50 - 60 разів) хімічно інертні, витримують нагрівання до 500 - 540° С, широкий діапазон опорів від 100 Ом до 50 кОм. Недолік: мала механічна міцність і гнучкість, нелінійність. р-тип – КТД; $K = 120 \pm 20$ (от - 100 до + 200 °С). п-тип – КТЕ; $I = 15$ мА, (от - 160 до + 300 °С) [3, 4, 7].

2.7 Фотоелектричні датчики

Фотоелектричний датчик - це пристрій, чутливий до світла. Ці датчики реагують на зміну інтенсивності світлового потоку. Можуть застосовуватися для вимірювання і регулювання температури, механічних переміщень, швидкості обертання, рівня, використовуватися при сортуванні та відбракуванні деталей [5, 6, 7].

В основі цих датчиків лежать фотоелементи (рис. 2.7). Фотоелементами (ФЕ) називаються прилади, що перетворюють променисту енергію в електричний струм [3, 4].



1 – скляна колба; 2 – анод; 3 – вікно; 4 – шар срібла; 5 – катод;
6 – вивід

Рисунок 2.7 - Фотоелементи із зовнішнім фотоелементом [3]

Переваги фотоелементів: простота, малі розміри, велика чутливість, відсутність втрат на тертя, мала інерційність.

Недоліки: мала величина фотоструму, що вимагає застосування підсилювачів.

При наявності на електродах ФЕ деякої напруги, між анодом і катодом утворюється електричне поле. Якщо через вікно ФЕ висвітлити внутрішню поверхню, то енергія променів світла передається атомам лужних металів, і за рахунок цієї енергії електрони отримують можливість покинути межі провідника. Під

впливом поля електрони рухаються від катода до анода, і в ланцюзі виникає струм. Він триває протягом усього періоду освітлення ФЕ.

Фотоелектричний ефект спостерігається у багатьох металів. Мідь, залізо і платина - чутливі до ультрафіолетових променів. До видимих променів чутливі тільки лужні метали [6].

Щоб уберегти фотоелемент від самостійного запалювання і руйнування, його зазвичай включають послідовно з додатковим опором, що обмежує струм в ланцюзі і перешкоджає виникненню самостійного розряду (рис. 2.8).

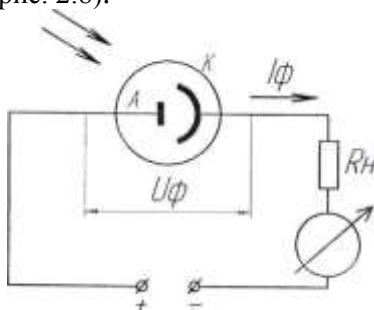


Рисунок 2.8 - Схема включення фотоелемента [2]

ФЕ з внутрішнім фотоелементом або фотоспротивом.

Фоторезистором називають напівпровідниковий прилад, який під дією потоку променевої енергії змінює свій опір.

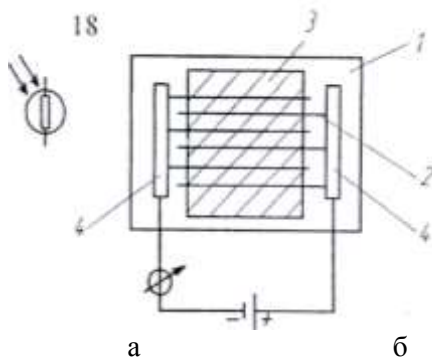
Для виготовлення фоторезистору застосовують: Si, Fe, Se селен, сірчастий талій TIS, CdS-сірчастий кадмій, AsGa-арсенистий галій і т.д. Для видимої частини спектра застосовують: сірчастий кадмій, сірчастий талій. В інфрачервоній області - селенистий і теллурістий свинець (AsPb, TePb).

Фоторезистор проводить струм в обох напрямках однаково. При висвітленні напівпровідника збільшується його провідність, а отже, і струм в електричному ланцюзі. Опір зменшується пропорційно величині світлового потоку.

Фоторезистори монтуються в пластмасовий корпус зі штирями для включення в панель або схему.

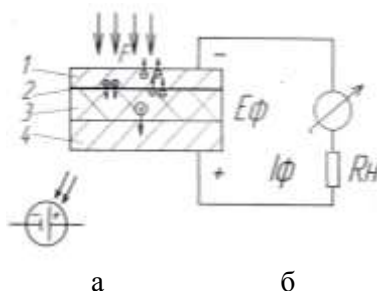
Фотоелементом із замикаючим шаром називають напівпровідниковий прилад, в якому під дією світла виникає е.р.с., що створює в зовнішньому колі електричний струм.

Найбільше застосування знаходять селенові і міднозакісні ФЕ.



1 – скляна пластинка; 2 - канавки у склі (графіт, золото, платина); 3 – тонкий шар селену; 4 – виводи

Рисунок 2.9 - Умовне зображення (а) та устрій фото резистору (б)



1 – тонка плівка золота; 2 – замикаючий шар $\delta = 10^{-5}$ см;
3 – шар напівпровідника (Se, CuO); 4 – стальна підкладка.

Рисунок 2.10 - Умовне зображення (а) та устрій фотоелементу з замикаючим шаром (б) [3]

Замикаючий шар утворюється на кордоні дотику селену з плівкою золота. Цей шар має детекторну властивість і не дозволяє електронам, вибитим світловим потоком, повертатися назад. Світловий потік проходить через плівку золота і створює вентильний фотоефект.

Фотодіоди.

Дірки та e^- , що виникають під дією світла в р-п переході або поблизу його будуть його полем розділятися: дірки витягуються в р-область напівпровідника, а електрони в n - область напівпровідника. Внаслідок цього в складових частинах напівпровідника виникає фото е.р.с.: у Se і Si $E = 0,5 \dots 0,6$ В; у GaAs (арсенід галію) $E = 0,87$ В.

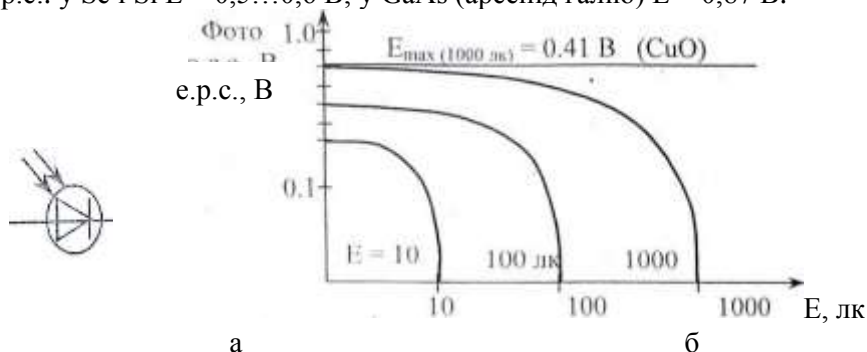


Рисунок 2.11 – Умовне зображення фотодіоду (а) та залежність фото е.р.с. від освітленості (б) [3]

2.8 Терморезистори

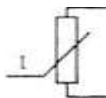


Рисунок 2.12 - Умовне зображення термоелектричного датчика

Терморезисторами називаються спротиви або резистори, властивості яких залежать від температури [3, 5, 6].

Розрізняють: металеві та напівпровідникові терморезистори.

Металеві. У цих терморезисторів опір з підвищенням температури збільшується. Вони виготовляються з чистих металів: міді, заліза, нікелю і платини. Зміна опору чистих металів становить від 3,7 % до 6,5 % на 10°C . Залежність опору від температури відрізняється високою стабільністю. При додаванні домішок у метали монотонність і стабільність характеристики порушується і температурний коефіцієнт електроопору зменшується [2, 3, 5].

Тому сплави не застосовуються. Металеві опори

використовуються для вимірювання температури від -120°C до $+500^{\circ}\text{C}$.

Напівпровідникові терморезистори. Називаються термісторами. Виготовляються з оксидів (міді, нікелю, марганцю, кобальту, магнію, титану, урану), а також з сульфідів, нітридів і карбідів цих металів. Оксиди в порошкоподібному вигляді опресовуються і спікаються.

$$\frac{\rho_{II}}{\rho_I} = 10^{10} \div 10^{12}$$

Питомий опір завжди більше опору металів в ρ_{μ} разів.

Опір напівпровідників на відміну від металів при збільшенні температури зменшується, тобто вони мають негативний температурний коефіцієнт електроопору. Виняток - позистори, це нові терморезистори з позитивним коефіцієнтом термоопору. Виготовляються з напівпровідникових сегнетоелектричних твердих розчинів на основі титаніту барію (BaTiO_3). Ст.5 і Ст.6 використовують в якості датчиків пожежної сигналізації, теплового захисту, для стабілізації струмів і температурою компенсації в п / п апаратурі. Чутливість напівпровідникових терморезисторів до зміни температури в $6 \div 10$ разів вище, ніж металевих. Наприклад: Cu і опір Pt при нагріванні від 0 до 100°C зростає $\approx$ на 40% , а опір напівпровідника зменшується в $20 \div 25$ разів [3, 6].

Напівпровідникові терморезистори працюють при температурі від -100°C до $+400^{\circ}\text{C}$. Їх стабільність набагато нижче, ніж у металевих (у перші місяці після виготовлення - терморезистор змінює параметри, а потім стабілізується і залишається постійними з точністю до 1%).

Напівпровідникові опори оформляються у виді стерженьків ($\varnothing 2$ мм, $l = 10$ мм), пластинок або бусинок. Іноді вони поміщаються всередину скляного балона, наповненого інертним газом.

$$R_T = A e^{B/T}, \quad (2.4)$$

де A – коефіцієнт залежить від питомого опору напівпровідника і розмірів робочого тіла, Ом;

B – коефіцієнт температурної чутливості визначається властивостями напівпровідника, К;

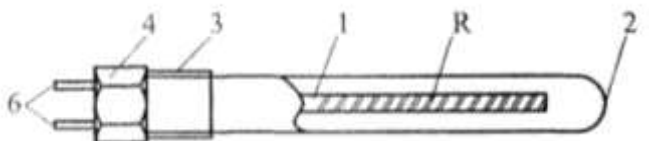
T – температура, К.

Існують два види використання терморезисторів як датчиків:

- температура терморезистору визначається температурою навколишнього середовища, а тепло виділяється струмом, що протікає через терморезистор мізерно мало.

2 - терморезистори нагріваються струмом, що проходить по ньому, а його температура в процесі вимірювання змінюється в залежності від умов тепловіддачі.

У першому випадку в датчиках температури використовуються як металеві, так і напівпровідникові опори (рис. 2.13).



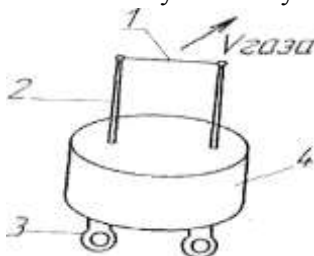
R - термочутлива біфілярна обмотка
1 - каркас (з ізолятором); 2 - металева трубка; 3 - різьблення; 4 - головка; 5 - контактні ніжки.

Рисунок 2.13 - Термометр опору [3]

У іншому випадку - датчиком служить металева нитка.

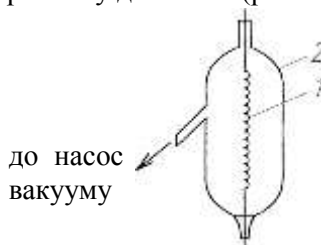
Прикладом другого випадку є анемометр і вакуумметр.

Анемометр - пристрій для вимірювання швидкості потоку газу. Він являє собою тонку металеву нитку, припаяну до стійок (рис. 2.14).



1 – платинова нитка; 2 - стійка;
3 - контакти; 4 – корпус

Рисунок 2.14 - Анемометр



1 - платинова нить;
2 - скляний балон.

Рисунок 2.15 - Вакуумметр

Нитка нагрівається робочим струмом, що проходить через неї і

розташовується на шляху руху газового потоку. Залежно від зміни швидкості потоку змінюється тепловіддача і струм в датчику. Наприклад: при збільшенні швидкості потоку температура нитки зменшується опір її падає, і отже, величина струму зростає. Збільшення V м / с від 5 до 20 м / с викликає зменшення опору на 1,5 Ом (з 5 до 3,5).

Вакуумметр (рис. 2.15) - служить для вимірювання глибокого вакууму. Принцип дії заснований на зміні теплопровідності газу в залежності від його тиску. При зниженні тиску нижче 0,1 мм. рт. ст. теплопровідність газу починає значно зменшуватися. Температура нитки зростає, її опір також зростає, і струм, що протікає через неї падає.

До генераторного типу датчиків відносяться термоелектричні датчики або термопари (рис. 2.16). Вони засновані на термоелектричному ефекті. Якщо з'єднати два різнорідних провідників і нагріти місце з'єднання, то на вільних холодних кінцях провідників з'являється е.р.с. Чим більше різниця температур між холодними і гарячими кінцями, тим більше е.р.с.

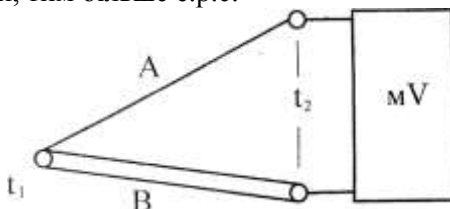


Рисунок 2.16 – Схема термопари [2]

Для вимірювання температури до 1000°C застосовуються термопари з металів і сплавів (хромель-алюмель, хромель-копель). Для вимірювання температури до 1000°C використовуються термопари з благородних металів (платина - платинородій). Для вимірювання ще більших температур до 2000°C застосовуються спеціальні жароміцні термопари (вугілля-карбід = 1800°C ; вольфрам-молібден - 2000°C). При використанні термопари в якості датчика її тарують і градуують. Температура холодного кінця дорівнює $+20^{\circ}\text{C}$.

Діаметр дроту для платино - платинородієвих термопар 0,5 мм; для інших 0,5 ÷ 5 мм.

Робочі кінці з'єднують зварюванням або паянням: а) зварювання

елементів між собою; б) приварювання елементів до захисного чохла.

Хімічний склад деяких термопар:

- хромель (89 % Ni; 10 % Cr; 1 % Fe; 0,2 % Mn);
- алюмель (94 % Ni; 2,5 % Mn; 2 % Al; 1 % Si; 0,5 % Fe);
- капель (55 % Cu; 45 % Ni);
- константан (60 % Cu; 40 % Ni);
- платиновий (90 % Pt; 10 % Rh);
- інвар (65 % Fe; 35 % Ni).

2.9 Індуктивні датчики

Робота індуктивного датчика заснована на зміні індуктивного опору котушки з сердечником при пересуванні рухомого якоря

$$L = \frac{\omega^2}{R_{\text{ж}} + R_0} = \frac{\omega^2}{\frac{L_{\text{ж}}}{\mu F} + \frac{2\delta}{\mu_0 F_0}} \quad (2.5)$$

де ω - число витків обмотки;

$R_{\text{ж}} + R_0$ - магнітні опори сердечника і повітряного зазору, 1/Гн;

$L_{\text{ж}}$ - середня довжина магнітної силової лінії в ярмі і якорі, м;

F_0, F - площі перерізів повітряного зазору і сердечника, м²;

μ, μ_0 - магнітна проникність матеріалу сердечника і повітряного зазору;

δ - величина повітряного зазору, м.

З огляду, що: $R \gg R_{\text{ж}}$ формула L спрощується

$$L = \frac{\omega^2 \mu_0 F_0}{2\delta} \quad (2.6)$$

Ця залежність лінійна, більш лінійна при $\Delta\delta \ll \delta$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (2.7)$$

де Z - повний опір, Ом;

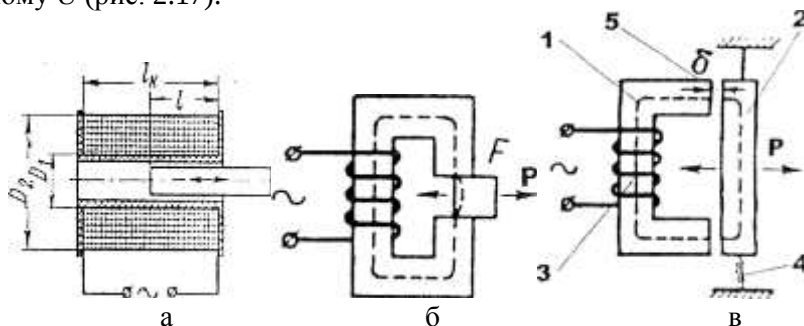
R - активна складова, Ом;

ω - кругова частота струму, с⁻¹.

L - індуктивність котушки, Гн.

Індуктивні датчики застосовуються для вимірювання або контролю різних механічних переміщень в межах 0,01...50 мм [2].

Датчик зі змінним зазором: діапазон виміру переміщень від 0,01 до 2 мм; вхідна величина повітряний зазор – δ ; вихідна величина I при заданому U (рис. 2.17).



1 – сердечник; 2 – ярмір; 3 – соленоїд; 4 – пружина; 5 – зазор

Рисунок 2.17 - Датчик зі змінним зазором (а), зі змінною площею (б), соленоїдного типу (в) [3]

Датчик зі змінною площею: діапазон виміру переміщень від 0,5 до 8 мм; вхідна величина – F ; вихідна величина I . $F = \text{var}$.

Датчик соленоїдного типу діапазон виміру переміщень від 1 до 60 мм; вхідна величина – F ; вихідна величина I . $\mu = \text{var}$.

$$L = \mu_{\text{ж}} \varpi^2 (D_2 - D_1) \frac{l}{l_k} \quad (2.8)$$

Переваги індуктивних датчиків:

- 1) простота, надійність і відсутність контактів, що ковзають;
- 2) віддається велика величина електричної потужності;
- 3) можливість роботи на змінному струмі промислової частоти.

Недолік: сильна залежність струму від частоти джерела живлення. Основна область застосування - вимір малих кутових і лінійних механічних переміщень, а також управління пристроями, що стежать. Зварювання поздовжніх швів циліндричних виробів, труб,

резервуарів [3; 5-7].

2.10 Ємнісні датчики

Знайшли обмежене застосування внаслідок необхідності використання складної апаратури і труднощів налагодження і регулювання відповідних схем (рис. 2.18).

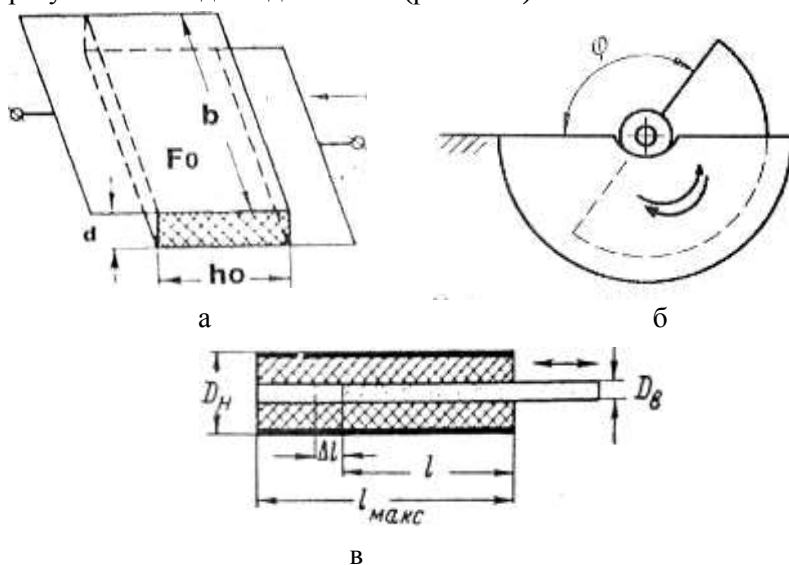


Рисунок 2.18 - Датчик плоский (зі змінною площею) $F \sim var$ (а) обертаючий – звичайний конденсатор змінної ємності для кутових переміщень (б), циліндричний (в) [3]

Перевагою ємнісних датчиків є:

- велика чутливість;
- мала вага;
- малі габарити;
- невелика величина електромеханічних сил тяжіння пластин датчика;
- мала інерційність.

Недоліки: висока чутливість до зовнішніх сторонніх полів і необхідність ретельного екранування, необхідність використання

джерела живлення високої частоти напруги, великий внутрішній опір. У ємнісних датчиків входною величиною є лінійне або кутове переміщення, а вихідною - електрична ємність або струм (рис. 2.19 і рис. 2.20).

$$C = 0,088 \frac{\varepsilon F}{d} [n\phi], \quad (2.9)$$

де ε - відносна діелектрична проникність, пФ/см;

F - площа обкладок, см²;

d - зазор, товщина діелектрика, см.

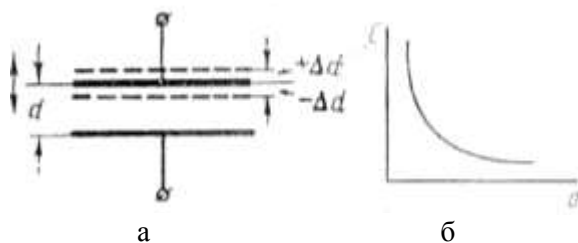
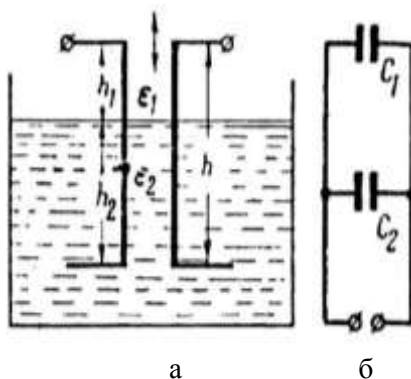


Рисунок 2.19 – Датчик зі змінним зазором [3]



а - конструкція; б - еквівалентна схема

Рисунок 2.20 – Датчик зі змінним діелектриком (для рідких діелектриків [3])

2.11 Датчики електромагнітних полів

Електромагнітні поля поділяються на змінні і постійні. Змінні електричні магнітні поля (ЕМП) виникають в електричних машинах, таких як трансформатори, дроселі, генератори і т.д. Їх вимірювання особливих труднощів не викликає і проводиться за допомогою мікروهберметра з датчиками у вигляді тарованих котушок. Маючи в своєму розпорядженні котушки в різних частинах зазору можна отримати картинку напруженості ЕМП в ньому [2, 3, 5, 6].

Для вимірювання постійних ЕМП використовувати такі прилади досить важко, тому що необхідно повідомляти котушці коливання із заданою частотою і амплітудою.

Якісну оцінку постійних магнітних полів можна отримати за допомогою дрібнодисперсних частинок залізного порошку, розташованого між пластин прозорого діелектрика (оргскло) або за допомогою індикаторних електронних ламп 6Е1П, в яких відбувається відхилення потоку електронів в магнітному полі, що добре видно на вкритому люмінофором аноді.

Кількісну оцінку постійних ЕМП виробляють за допомогою датчиків Холла, магнітодіодов, магніторезисторів і гальваномагніторекомбінаційних перетворювачів.

В основі роботи датчиків Холла лежить, так званий, ефект Холла в електропровідних тілах (рис. 2.21).

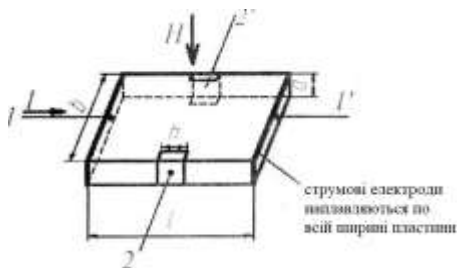


Рисунок 2.21 – Схема датчика Холла [2]

Якщо через провідне тіло протікає струм I , а тіло поміщено в магнітне поле, напруженістю H , перпендикулярно напрямку струму, то в напрямку перпендикулярно струму і полю, виникає е.р.с.,

пропорційна і струму, і напрузі магнітного поля $U_x \sim I_H$

$$U_x = k \frac{R_x \cdot I \cdot B}{a}, \quad (2.10)$$

де k – коефіцієнт, залежний від розмірів пластини b/a та h/l ;

R_x - постійна Холла, $m^3 / A \cdot c$;

I - струм керування;

B - індукція магнітного поля, Т.

a - товщина пластини, м;

Магнітне поле, пронизуючи поле та провідник, через який протікає електричний струм, «механічно» впливає на електрони (носії струму), прагнучи відхилити їх в сторону від напрямку руху струму. При цьому на бічних гранях 2-2' провідника з'являється різниця потенціалів U_x .

Датчики Холла виготовляються з Si, Ge, сурм'янистого і миш'яковистого індію (SbIn; AsIn).

Позначаються X_{101} ; X_{213} ; X_{511} ; ДХГ-2; ДХК-7.

Середня чутливість від 0,6 до 90 В/(А·Т).

Габарити 1,5x0,8x0,2 до 17x10x0,6.

Пластинки виготовляються:

а) напиленням у вакуумі;

б) механічної обробкою;

в) пресуванням порошків.

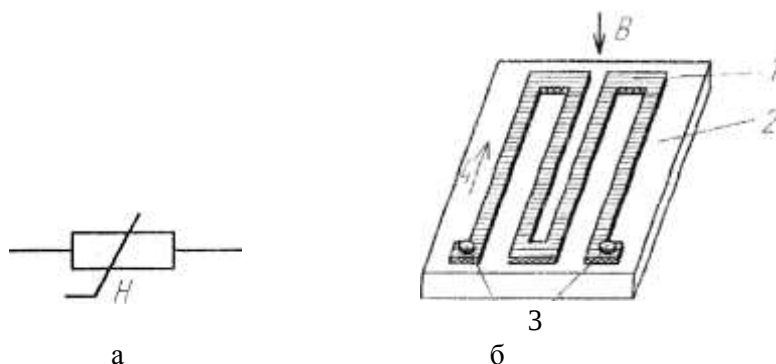
Для підвищення міцності датчики наклеюються на слюду. У зварювальній техніці датчики Холла застосовуються для визначення вторинних струмів контактних машин, дослідження магнітних потоків трансформаторів цих машин.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики перетворювача Холла типу ПХЭ602817 Б

Габарити, мм	3x3x0,8
Вхідний (вихідний) опір, Ом	5,2 (4,2)
Номинальний струм управління, мА	100
Магнітне чутливість мкВ/мкТл	100-130
Інтервал температур, К	1,5...375
Діапазон магнітної індукції, Тл	10

Магніторезистори.

Магніторезистивний ефект - зміна електричного опору напівпровідника, по якому тече електричний струм, під дією магнітного поля (ефект Гауса, вивчений в 1858 р. Томсоном). Збільшення R відбувається, коли вектор $\vec{H} \perp \vec{I}$ і коли $\vec{H} \parallel \vec{I}$, але слабкіше. Суть поперечного і поздовжнього ефекту - в викривленні траєкторії руху носіїв зарядів (Сила Лоренца) (рис. 2.22).



1 - меандрова п/п полоска; 2 - підложка; 3 - струмопідводи.

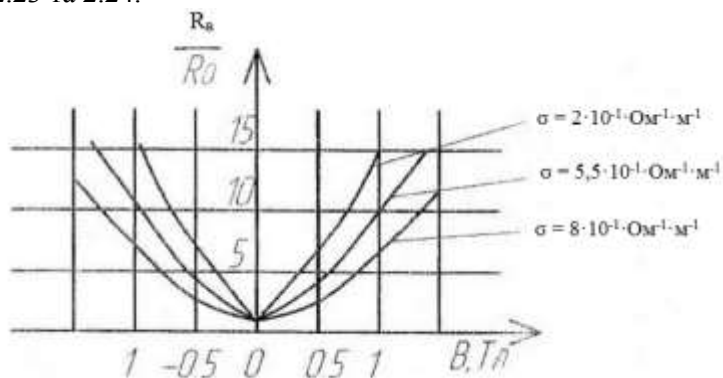
Рисунок 2.22 – Умовне зображення та схема магніторезистора

Виготовляють із заевтектичного сплаву антімоніда Ni і антімоніда In ($NiSb-InSb$), що має голчасту структуру. Голки $NiSb$: $1 \times 50 \mu m$, $\sigma_{и} = 7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot m^{-1}$; $InSb$: $\sigma_{осн} = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot m^{-1}$. Для регулювання рухливості електронів легують телуrom.

Магнитодіоди.

При підключенні зовнішнього джерела живлення у прямому напрямі відбувається інжекція дірок з р-області в п-область. Вслід цього в обох частинах р-п-переходу почне відповідно зростати концентрація електронів та дірок. Якщо рівень інжекції достатньо великий, то проводимість в п-області буде визначатися концентрацією нерівноважних носіїв. Інжектвані дірки дифундують від р—п—переходу у товщу п—напівпровідника на деяку відстань L , яка зветься дифузійною довжиною. На цій відстані концентрація нерівноважних носіїв зменшується в $e = 2,718$ разів. Схеми конструкції та

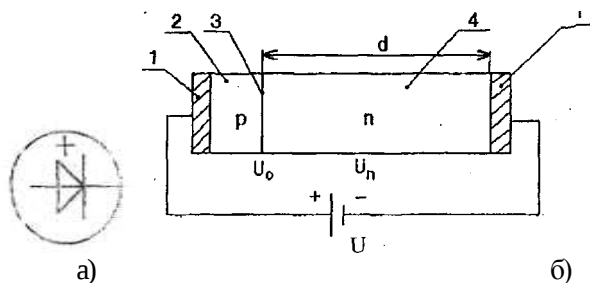
експлуатаційні характеристики розглянутих приладів наведено на рисунках 2.23 та 2.24.



Основні параметри: початковий опір R_0 при $B = 0$ $R = 25-100$ Ом;
магніторезистивне співвідношення R_B/R_0 : $\max \approx 15$;

$$\text{магнітна чутливість } \gamma_{\text{мр}} = \frac{\Delta R}{\Delta B}.$$

Рисунок 2.23 – Залежність магніторезистивного співвідношення від індукції для сплавів NiSb-InSb з різним ступенем легування Te [3]



1 - омічні контакти; 2 – напівпровідник р-типу з високою концентрацією рівноважних носіїв; 3 - р-п-перехід; 4 - товща напівпровідника з низькою концентрацією рівноважних носіїв.

Рисунок 2.24 - Умовне зображення (а) та конструкція магніодіоду (б) [3]

$$L = \sqrt{\frac{2bD_{ef}\tau}{b+1}} \quad (2.11)$$

де L - ефективна дифузійна довжина носіїв заряду, м;

$b = \mu_n/\mu_p$ - відношення рухомості електронів та дірок;

D_{ef} - коефіцієнт сумісної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ - час життя носіїв, с.

Якщо такий діод помістити у поперечне магнітне поле, то D_{ef} буде зменшуватися вслід скривлення траєкторії руху носіїв під впливом сили Лоренца. Вплив зменшення L на ріст опору p -області досягає максимуму при деяких значення d/L , де d - довжина p -області. Для германія, наприклад значення $d/L = 4 \div 6$. Іншими словами під впливом поперечного магнітного поля різко зростає опір діода, у прямому напрямі (рис. 2.25).

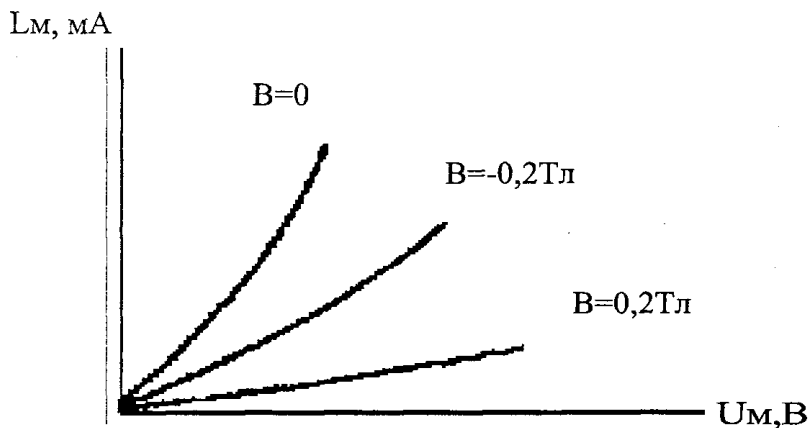


Рисунок 2.25 - Вольт-амперні характеристики магнітодіода КД 303 [3]

Гальваномангніторекомбінаційні перетворювачі. П/п резистор керуючий магнітними полями з використанням магнітоконцентраційного ефекту (ГМР) (рис. 2.26).

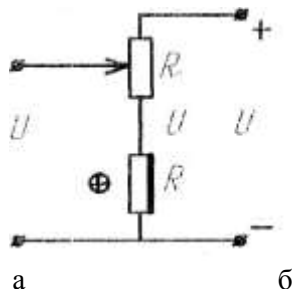


Рисунок 2.26 – Умовне зображення (а) та схема підключення (б) гальваномагніторекомбінаційного перетворювача [2, 3]



$$\gamma_{MG} = \frac{\Delta U_2}{\Delta B}, \text{ при } i = \text{const} \quad (2.12)$$

Основні параметри:

$\Delta U_2 = U_{2B} - U_{20}$ вихідного сигналу.

$$i = \frac{U}{R_H + R_\Gamma} \quad (2.13)$$

Робочий струм

$$R_H / R_\Gamma = 2,5 \quad (2.14)$$

Магнітна чутливість

$$\gamma_{MG} = \frac{\Delta U_2}{\Delta B} \quad (2.15)$$

Температурний коефіцієнт чутливості $K \pm \gamma, \%$

$$K_{TP} = \Delta \gamma \cdot 100 / \Delta t_{\gamma_{MG}} \quad (2.16)$$

2.12 Схеми підключення датчиків

Найбільше застосування на практиці знайшли наступні схеми:

1. Потенціометрична [2];
2. Мостова (рівноважна або нерівноважна) [3];
3. Диференціальна [3, 4, 6].

2.12.1 Потенціометрична схема

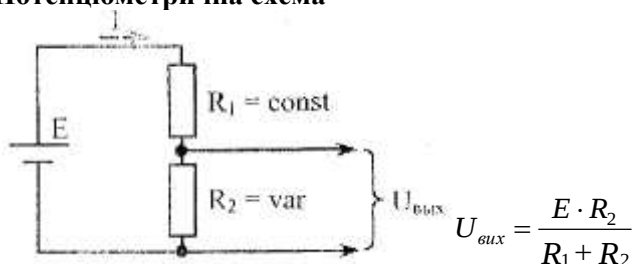
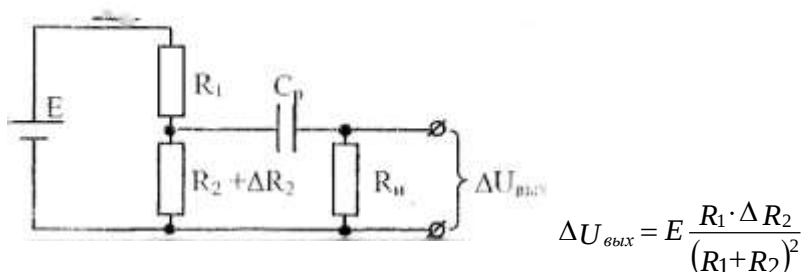


Рисунок 2.27 – Потенціометрична схема [3]

Схема має суттєвий недолік – як що $\Delta R_2 = 0$, то сигнал на вході регулятора поступає (рис. 2.27 і рис. 2.28). Тому у САР її використовують у вдосконаленому виді:



C_p – розділовий конденсатор, який пропускає на R_H тільки приріст вихідної напруги

Рисунок 2.28 – Удосконалена потенціометрична схема [3]

Для дослідження тензорезисторів перетворимо:

$$\Delta U = E \frac{R_1 \cdot \Delta R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \frac{R_2}{R_2} = E \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} K \cdot \varepsilon \quad (2.17)$$

2.12.2 Мостова схема

Працює як на постійному, так і на змінному струмі. Може бути нерівноважною (небалансною) і рівноважною (балансною) [5, 6].

У нерівноважній мостовій схемі для здійснення виміру або управління використовується безпосередньо струм або напруга діагоналі. Умова рівноваги моста:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.18)$$

Завдання: розбалансувати міст з метою отримання максимального струму в діагоналі.

У рівноважній мостовій схемі використовується нульовий метод виміру струму в діагоналі. Зміна опору одного плеча компенсується зміною опору іншого плеча до моменту зникнення струму в діагоналі. В цьому випадку визначальною величиною є цей компенсуючий опір.

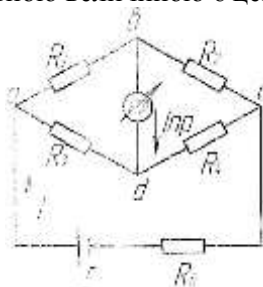


Рисунок 2.29 – Мостова схема [4]

При цьому струм діагоналі дорівнює 0 ($I_{np} = 0$).
Для одного датчика:

$$I_{np} = I \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{N},$$

$$N = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \cdot R_{np} + (R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4)$$

Припустимо, що $\Delta R \ll R$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

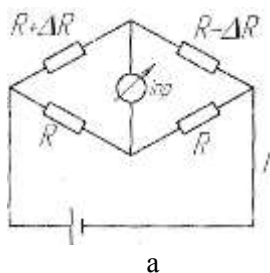
Отримуємо:

$$I_{np} = I \frac{R(R_1 - R_2)}{4R \cdot R_{np} + 2R \cdot 2R} = I \frac{R \cdot \Delta R}{4R(R_{np} + R)} = I \frac{\Delta R}{4(R + R_{np})}$$

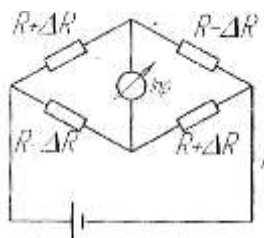
Для 2-х (а) та для 4-х датчиків по 1 (б)

$$I_{np} = I \frac{\Delta R}{(R_{np} + R)}$$

$$I_{np} = I \frac{\Delta R}{2(R_{np} + R)}$$

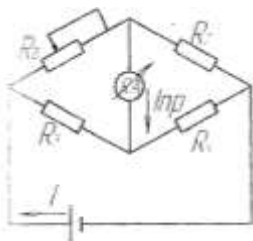


а

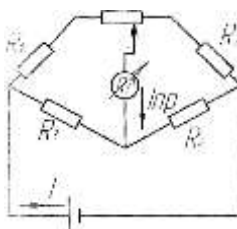


б

Рисунок 2.30 – Для 2-х (а) та для 4-х датчиків (б) [3]



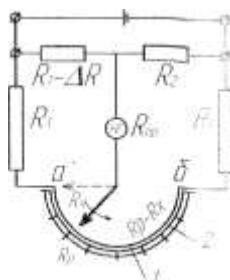
а



б

а) зміна опору в одному плечі; б) одночасна зміна опору 2-х плечей

Рисунок 2.31 – Схеми баласування мосту [3]



НГ - нульовий гальванометр; а - нульове положення моста.
1 - реостат; 2 - шкала опоры.

Рисунок 2.32 – Мостова рівноважна схема [3]

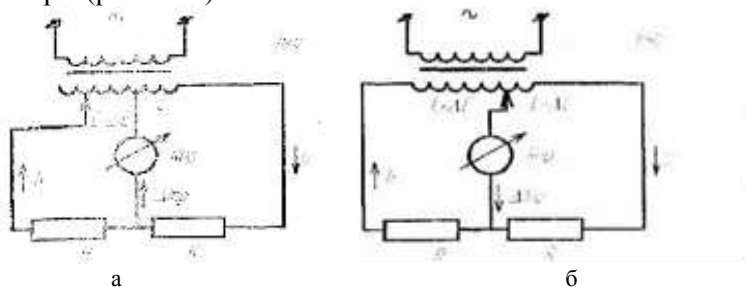
Умова рівноваги: $R_1(R_4 + R_p) = R_2 \cdot R_3$. Чим більше величина ΔR , тим на більший кут потрібно відхилити движок реостата, щоб в діагоналі струм дорівнював нулю ($I = 0$).

2.12.3 Диференціальна схема

Диференціальна схема являє собою електричний ланцюг, що складається з двох суміжних контурів, в кожному з яких діє окрема е.р.с. Вимірювальний прилад розміщується в галузі, загальної для обох контурів, і реагує на різницю контурних струмів [3-8].

Схеми включення

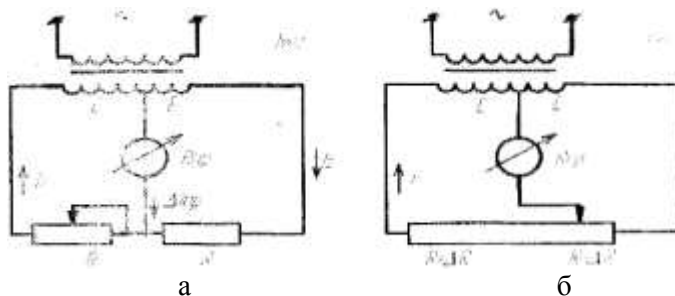
1. При незмінних опорах обох контурів, змінюється або одна, або обидві е.р.с (рис. 2.33).



а – зміна однієї е.р.с.; б - зміна обох е.р.с.

Рисунок 2.33 – Мостова рівноважна схема [3]

2. При незмінних е.р.с. контурів змінюється опір одного або обох контурів(рис. 2.34).



а – зміна опору одного контуру; б - зміна опору обох контурів.

Рисунок 2.34 – Мостова рівноважна схема [3]

Диференціальна схема отримала широке застосування при роботі на змінному струмі, наприклад, в вимірювальних пристроях з індуктивними датчиками, тому що вона значно міцніше і більш чутлива мостової схеми.

3 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ В ДУГОВОМУ І ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

3.1 Системи автоматичного регулювання дуги саморегулюванням. АРДС

Прості системи автоматичного регулювання енергетичних параметрів дуги (струму і напруги) складаються з механізму подання електродного дроту МП, дуги Д і живлячої системи ДЖ (рис. 3.1). У літературі [1–8] їх називають системами автоматичного регулювання дуги саморегулюванням (АРДС). На їх основі побудовані автомати і напівавтомати з постійною швидкістю подання електродного дроту (трактор ТС- 17 і його модифікації, автомати А- 384 МК, А-616М, А-688, АБС, А- 184 та ін., напівавтомати А537Р, ПДГ- 500-1, ПШП- 16 та ін.). У цих системах механізм подання електроду МП - задаючий орган, а постійна швидкість подання електроду V_n - задаючий параметр. З його допомогою встановлюється необхідна сила струму 13 в зварювальному контурі [1, 2, 3].

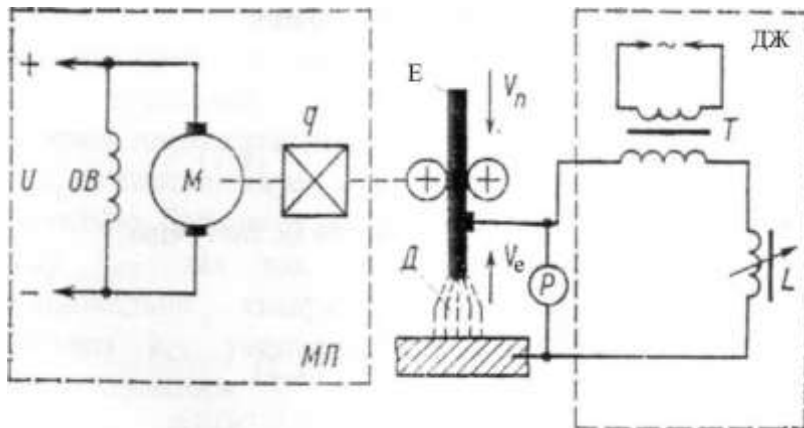


Рисунок 3.1 - Функціональна схема системи автоматичного керування дуги саморегулюванням [3]

В процесі зварювання задана швидкість подання електроду V_n порівнюється із швидкістю його плавлення V_e . Досягнувши рівності

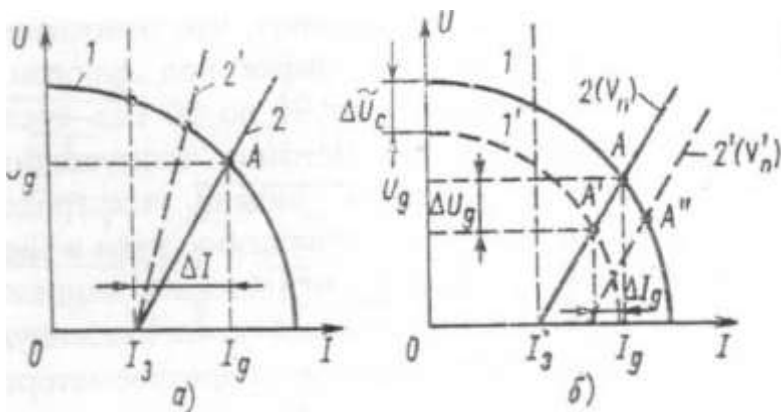
$V_n \sim V_e$ у зварювальному контурі встановлюється певна сила струму I_d , яка з потрібною точністю підтримується системою саморегулювання на рівні I_3 .

Точність роботи системи саморегулювання (самовирівнювання) залежить від співвідношення коефіцієнтів саморегулювання по струму k_{CT} і по напрузі k_{CH} . Ці коефіцієнти характеризуються відношенням приросту швидкості подання ΔV_n до приросту відповідно по струму дуги ΔI_d і по напрузі на дузі ΔU_d .

Статичні характеристики системи АРДС можна розглянути, якщо в координатах напруга - струм поєднати вольт-амперну характеристику живлячої системи 1 із статичною характеристикою стійкого горіння дуги 2 (рис. 3.2).

Рівняння статичної характеристики стійкого горіння дуги, як регульованого об'єкту, може бути визначено спільним рішенням рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} V_n &= V_e = \text{const} \\ V_e &= k_{CT} I_d - k_{CH} U_d \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$



I_3 - приведений задаючий параметр; ΔI - статична помилка в системі АРДС при налаштуванні регулюючого органу

Рисунок 3.2 - Поєднані характеристики вольт-амперної живлячої системи 1 та стійкого горіння дуги 2 у системі АРДС [3]

Вирішивши систему (3.1) відносно I_d , отримаємо:

$$I_d = \frac{V_{II}}{k_{CT}} + \frac{k_{CH}}{k_{CT}} U_d \quad (3.2)$$

$$k_{CT} = \frac{\Delta V_e}{\Delta I_d};$$

$$k_{CH} = \frac{\Delta V_e}{\Delta U_d}$$

$$I_3 = \frac{\Delta V_n}{k_{CT}}$$

$$\Delta I = \frac{k_{CH}}{k_{CT}} \Delta U_d$$

Очевидно, помилка ΔI виходить із-за впливу на процес плавлення електроду напруги дуги. Статична характеристика стійкого горіння дуги 2' (рис. 3.2 а) відповідає меншому діаметру електроду і отже, більшому коефіцієнту саморегулювання по струму k_{CT} ; оскільки величина останнього обернено пропорційна до квадрата діаметру електроду. Зі збільшенням k_{CT} зменшується статична помилка при налаштуванні регулятора.

Система АРДС стабілізує з певною статичною помилкою зварювальний струм при коливанні напруги мережі. Досліди показують, що відносна помилка по струму при дуговому зварюванні під флюсом при зміні напруги на дузі від 30 до 50 В у системах АРДС не перевищує 10 %. Вплив обурень по напрузі мережі і швидкості подання електроду на статичні помилки по струму і напрузі дуги в системі АРДС показан на рис. 3.2 б. Зі зменшенням напруги у мережі на U_c (характеристика 1'), приведену до напруги вторинної обмотки трансформатора, в системі АРДС після закінчення перехідного процесу встановлюються статичні помилки по напрузі дуги U_d та по струму I_d (робоча точка А'). При збільшенні швидкості подання

електроду ($V_{\pi} = V'_{\pi} - V_e > 0$) в системі в стані, що встановився, формується нова робоча точка A'' , визначальна відносно точки A зміни струму і напруги на дузі. На базі систем АРДС побудовані автомати загального призначення з примусовою швидкістю подання електродного дроту (автомати АДС-1000-2, АДБН-300 та ін.). Вони формують новий клас систем автоматичного регулювання - автоматичні регулятори напруги дуги з дією на швидкість подання електродного дроту (АРНД).

У схему системи АРНД (рис 3.3) на відміну від АРДС додатково входить спеціальний пристрій (регулятор), що стабілізує напругу дуги шляхом примусової зміни швидкості подання електроду V_{π} .

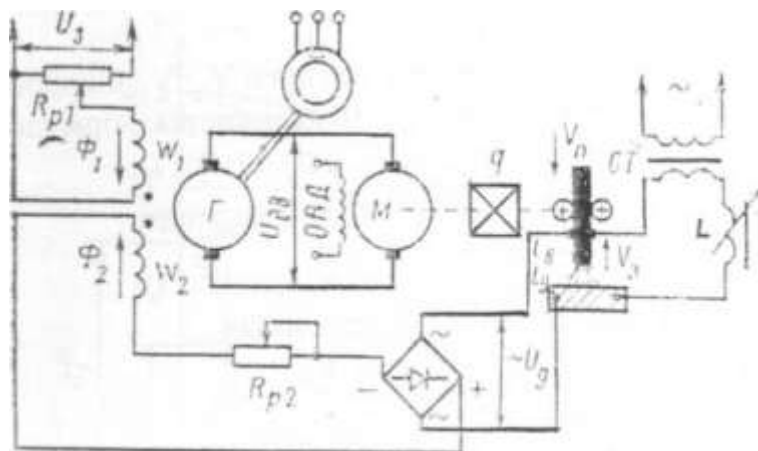


Рисунок 3.3 - Принципова схема системи АРНД [7]

Швидкість подання V_{π} визначається напругою на якорі двигуна $U_{дв}$, живленого від генератора Γ . Напруга на якорі генератора $U_{\Gamma} = U_{дв}$ залежить від різниці магнітних потоків $\Phi_2 - \Phi_3$, що наводяться в обмотках збудження ω_1 і ω_2 генератора струмами, що протікають по них. Потік Φ_2 пропорційний $\sim U_{д}$ при його збільшенні збільшуються U_{Γ} та V_{π} .

Потік Φ_1 визначається налаштуванням потенціометра R_{p1} і напругою установки U_3 . Напрямок потоку Φ_1 зустрічно напрямку потоку Φ_2 . У режимі, що встановився, коли $V_{\pi} = U_{д}$, потік $\Phi_2 > \Phi_1$ на

величину $\Delta\Phi_0$, достатню для подолання статичного моменту опору в усіх механічних вузлах автомата. З виникненням обурення по напрузі дуги $\Delta U_d > 0$ потік Φ_2 збільшиться, збільшиться і різниця $\Delta\Phi_0$, що, у свою чергу, підвищить швидкість подання електродного дроту на V_n . Торець електроду наблизатиметься до виробу, зменшуючи I_d і знижуючи U_d .

Статична характеристика системи АРНД і налаштування системи на задані режими роботи.

Рівняння статичної характеристики регулятора в системі АРНД має вид:

$$V_n = k_{per}(U_d - U_3) \quad (3.3)$$

де $k_{per} = \frac{\Delta V_n}{\Delta U_d}$ коефіцієнт передачі регулятора. У режимі горіння дуги $V_n = V_e$, що встановився. Швидкість плавлення електроду для $k_{CH} < 0$ виражається формулою:

$$V_e = k_{CT}I_d - k_{CH}U_d \quad (3.4)$$

Вирішивши спільно (3.3) і (3.4) за умови

$$V_n = V_e \quad (3.5)$$

визначимо регульований параметр U_d

$$U_d = \frac{k_{CT}}{k_{per} + k_{CH}}I_d + \frac{k_{per}}{k_{per} + k_{CH}}U_3 \quad (3.6)$$

або

$$U_d = U_3^0 + \frac{k_{CT}}{k_{per} + k_{CH}}I_d \quad (3.7)$$

де $U_3^0 = \frac{k_{CT}}{k_{per} + k_{CH}}U_3$ – задана напруга дуги;

$k_{ст}$ і $k_{сн}$ – коефіцієнти саморегулювання дуги по струму і напрузі.

Формула (3.7) є рівнянням статичної характеристики стійкого горіння дуги системи АРНД. Як і в системі АРДС, ця характеристика є геометричним місцем точок з коефіцієнтами U і I , що відповідають стійкому процесу горіння дуги ($V_{п} = V_{с}$) при зміні параметрів джерела живлення.

Спільне розташування вольт-амперної характеристики (ВАХ) живлячої системи (зварювальний трансформатор + дросель) і статичної характеристики системи АРНД_в, побудованою по (3.7), представлено на рис. 3.4.

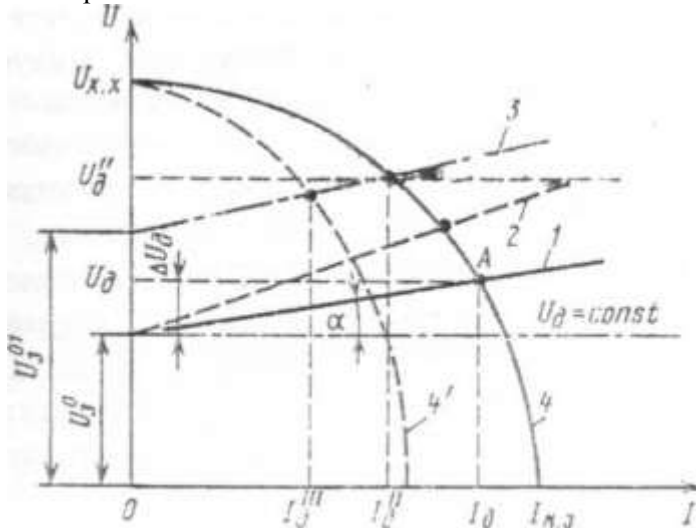


Рисунок 3.4 - Поеднані вольт-амперні характеристики живлячої системи (4,4') і стійкого горіння дуги (1, 2, 3) в системі АРНД_в [3]

$$\alpha = \arctg \frac{k_{ст}}{k_{рег} + k_{сн}}$$

кут нахилу статичної характеристики АРНД_в до лінії $U_d = \text{const}$, відповідною ідеальною статичною характеристикою системи при $k_{рег} \rightarrow \infty$.

При налаштуванні АРНД_в на заданий режим зварювання різниця напруги $\Delta U_d = U_d - U_0^3$ називають статичною помилкою по напрузі

дуги. Для налаштування системи АРНД_в на різні режими зварювання необхідно змінювати параметри як автоматичного регулятора, так і живлячої системи. Найбільш простий варіант, коли коефіцієнт $k_{\text{рег}}$ досить великий. У цьому випадку при завданні напруги дуги U_0^3 після виходу на стійкий режим зварювання напруга на дузі практично U_3^0 ($\alpha = 0$). Статична характеристика системи АРНД_в відповідає лінії $U_{\text{д}} = \text{const}$. При кінцевому значенні $k_{\text{рег}}$ налаштування системи на задану напругу дуги здійснюється зміною задаючого параметра U_3 , наприклад, до U_3^1 (характеристика 3), а налаштування на заданий струм дуги (наприклад, до характеристики 4') - зміною індуктивного опору X дроселя у зварювальному контурі (характеристика 4').

При постійних $k_{\text{ст}}$ і $k_{\text{сн}}$ кут α тим більше, чим менше $k_{\text{рег}}$. Так, характеристика 2 має значення $k_{\text{рег}}^{(2)} < k_{\text{рег}}^{(1)}$.

При малих коефіцієнтах посилення регулятора $k_{\text{рег}}$ налаштування системи АРНД_в дещо складніше. З (3.3) витікає, що для налаштування системи АРНД_в на одно і те ж напругу дуги при заданій $V_{\text{п}}$ і, отже, заданому струмі дуги задаючий параметр U_3 має бути тим менш, чим менше коефіцієнта передачі регулятора $k_{\text{рег}}$. Задаючий параметр можна зменшувати до певної межі. Мінімальний параметр U_3 повинен забезпечити реверс виконавчого двигуна або, в крайньому випадку припинення подання електроду при короткому замиканні електрода з деталлю. Отже:

$$V_{\text{п}} = k_{\text{рег}} U_{\text{д}}^{\text{кз}} - k_{\text{рег}} U_{\text{д}}^{\text{мін}} \leq 0 \quad (3.8)$$

Звідки

$$U_3^{\text{мін}} \geq U_{\text{д}}^{\text{кз}} \quad (3.9)$$

При зварюванні під флюсом напруга короткого замикання електроду на деталь складає 5-7 В, тому в (3.9) $U_3^{\text{мін}}$ слід вибирати не менше 7 В. Зміну струму дуги можна отримати зміною характеристик живлячої системи (наприклад, індуктивного опору зварювального ланцюга).

Зі збільшенням швидкості плавлення $V_{\text{е}}$ електроду, як впливає з (3.7), різниця між напругою дуги $V_{\text{д}}$ і напругою задаючого параметра U_3 зростає в результаті збільшення $k_{\text{ст}}$ при $d_{\text{е}} = \text{const}$. У АРНД_в з

невеликим $k_{\text{рег}}$ межі можливого налаштування на різні режими зварювання можуть бути обмежені із-за того, що при зварюванні з великою щільністю струму, коли швидкість V_e велика, при мінімальному задаючому параметрі $U_e^{\min}$ отримувана напруга на дузі вища за потрібне. Для того, щоб система АРНД забезпечувала налаштування на задані режими зварювання від $I_d^{\max}$, $U_d^{\max}$ до $I_d^{\min}$, $U_d^{\min}$, мінімальний коефіцієнт передачі регулятора слід визначати з умови:

$$k_{\text{рег}}^{\min} = \frac{U_d^{\text{кз}}}{U_d^{\min} - U_3^{\min}} \quad (3.10)$$

де $V_e^{\max}$ – максимальна швидкість плавлення електроду при заданих режимах зварювання і діаметрах електроду.

Порівняльна оцінка систем АРДС і АРНД_v показала, що автомати на основі системи АРДС значно простіші, дешевші і надійніші, чим і обумовлено їх широке поширення. Автомати на основі системи АРНД_v можна рекомендувати в тих випадках, коли пред'являються підвищені вимоги до точності стабілізації напруги дуги, наприклад при наплавленні легованого шару, при зварюванні і наплавленні під керамічним флюсом; недостатня швидкодія саморегулювання для нормального процесу (наприклад, процес при малій щільності струму і при малих коефіцієнтах $k_{\text{пс}}$ живлячої системи); вірогідні і технологічно неминучі великі коливання довжини вильоту (зварювання по ухилу); у системі АРДС не вдається забезпечити необхідної точності стабілізації швидкості обертання приводного двигуна (наприклад, при "м'якій" механічній характеристиці двигуна).

Розглянемо деякі інші системи автоматичного регулювання, побудовані на базі систем АРДС.

3.1.1 Система автоматичного регулювання вильоту електроду (АРВ)

Подібні системи є комбінацією системи АРДС і зовнішнього регулятора довжини вильоту електроду. Додаткове введення

регулятора дозволяє зменшити статичні помилки по струму і напрузі дуги при значних обуреннях в живлячій системі ($\Delta \tilde{U}_c$; $\Delta \tilde{I}$) довжині вильоту $\Delta \tilde{I}_b$. Зміна довжини вильоту електроду, особливо при великій щільності струму, може істотно впливати на режим зварювання. Дослідженнями встановлено, що при зварюванні на форсованих режимах зміна вильоту на 1 мм викликає зміну зварювального струму на 10-12 А [1-6].

Зміна довжини вильоту на струмах більше 400 А істотно впливає на глибину проплавлення і силу струму у зварювальному контурі через зміну опору навантаження джерела живлення (рис. 3.5).

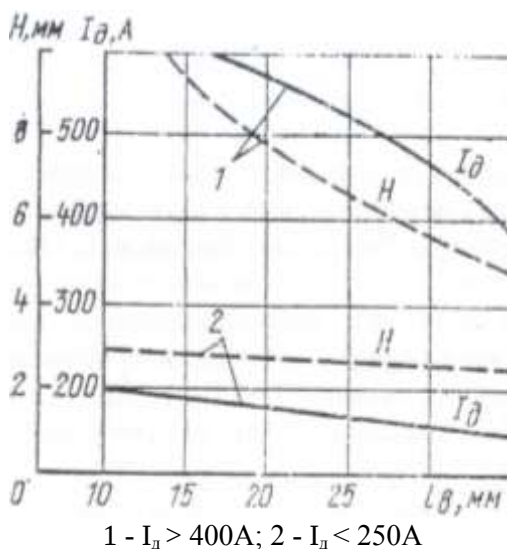


Рисунок 3.5 - Залежність глибини проплавлення H та сили струму дуги I_d від вильоту електроду I_b при зварюванні у CO_2 [3]

Звідси абсолютно ясна необхідність стабілізації відстані між струмопроводом і поверхнею деталі в процесі зварювання. За відсутності стабілізації цієї відстані збудження, що виникають в процесі зварювання, по довжині дуги відпрацьовуються системою АРДС астатично з досить великою швидкістю шляхом зміни швидкості плавлення електроду.

Очевидно, новий стан рівноваги настає в цьому випадку при

новій довжині вильоту. Якщо процес зварювання виконується на підвищеній щільності струму, досягнутої зміни вильоту вже виявляється досить для того, щоб виникли значні статичні помилки по струму і напрузі дуги.

Функціональна схема системи АРВ представлена на рис. 3.6. Сигнал, пропорційний струму дуги, знімається з шунта $R_{ш}$ і порівнюється в елементі порівняння ЕС з напругою уставки U_3 . Різниця ($U_y - U_e$) посилюється по напрузі і потужності підсилювачем-перетворювачем УП і поступає на двигун M_1 . Останній через редуктор q_1 змінює положення струмо-підводячого вузла ТП (виліт $l_{в}$) до тих пір, поки при діючих обуреннях напруга $U_y - kI$, пропорційне струму дуги, не порівняється з напругою уставки U_3 , за допомогою якого задається робочий струм дуги. Для переміщення електродного дроту із швидкістю V_n служить двигун M_2 з редуктором q_2 .

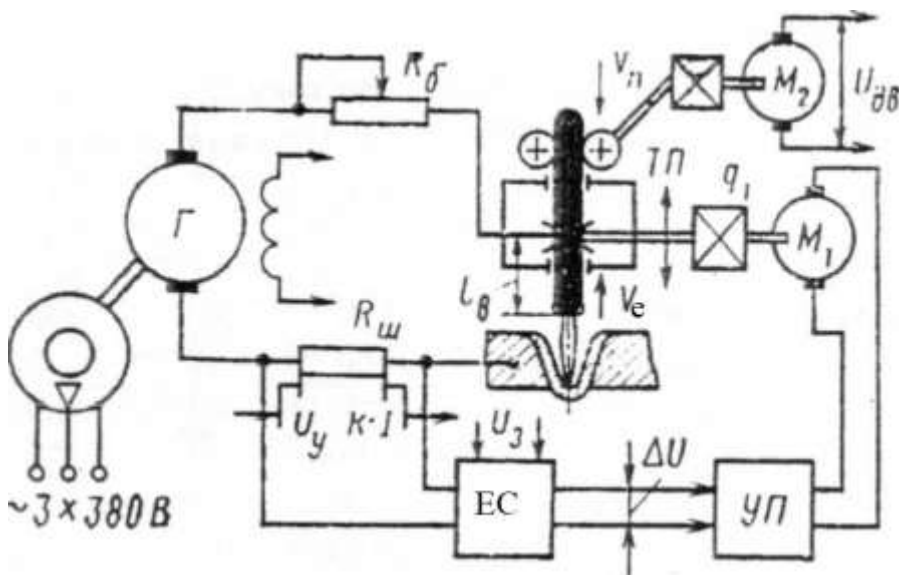
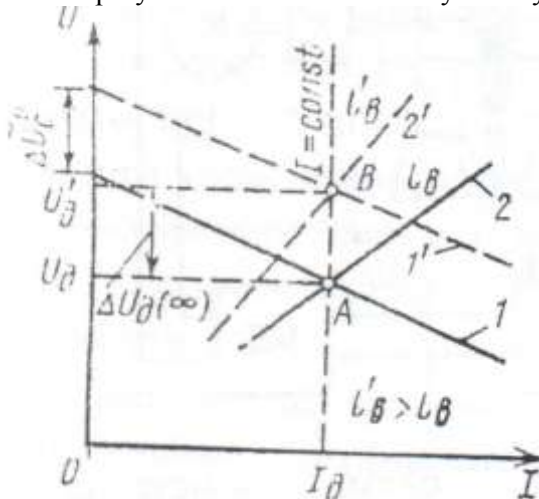


Рисунок 3.6 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання вильоту електроду (АРВ) [3]

Принцип стабілізації струму в системі АРВ при обуренні по напрузі мережі $\Delta \dot{U}_c$ на рис. 3.7 показаний за допомогою статичних

вольт-амперних характеристик. Статична помилка в системі АРВ по напрузі дуги $\Delta U_d(\infty)$ при ступінчастій зміні вильоту електроду Δl_b не дорівнює нулю. Статична помилка по струму $\Delta I_d(\infty) = 0$, оскільки цей параметр у системі АРВ регулюється по астатичному закону.



1 і 1' – відповідно незбуджена та збуджена ВАХ джерела живлення; 2 і 2' – статичні ВАХ системи АРДС відповідно до моменту накладання обурення і після відпрацювання обурення регулятором довжини вильоту.

Рисунок 3.7 - Принцип стабілізації струму у системі АРВ при обуренні по напрузі мережі [3]

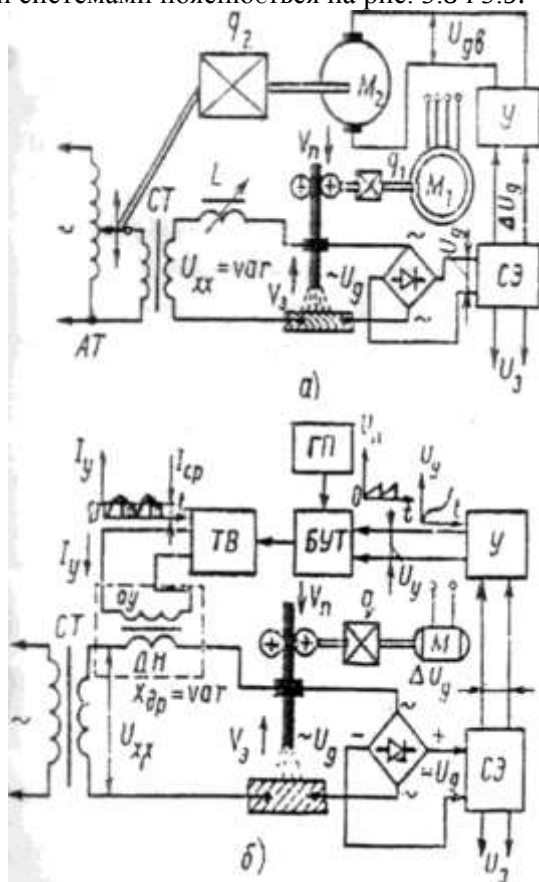
3.1.2 Система автоматичного регулювання струму і напруги дуги з дією на живлячу систему

Системи цього типу відпрацьовують обурення дією на параметри джерела живлення - напруга холостого ходу U_{xx} або опір зварювального контура Z_k .

Системи автоматичного регулювання живлячого ланцюга (АРЖ) застосовують для поліпшення якості регулювання основної системи АРДС, оскільки вона не відпрацьовує збуджень, що діють на живлячу систему (збудження по напрузі мережі $\Delta \tilde{U}_c$ зміні опору

зварювального ланцюга ΔU_c із-за нагріву) [2-6].

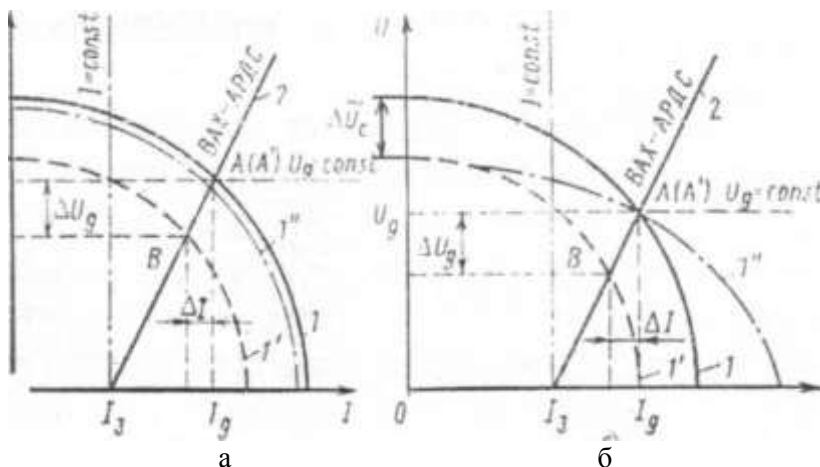
При розгляді особливостей систем АРЖ доцільно розділити їх на астатичні (з механічним приводом) і статичні (з дією на живлячу систему через електричні параметри). Принцип регулювання режиму зварювання цими системами пояснюється на рис. 3.8 і 3.9.



а – з механічним приводом в регуляторі;
б – з електричною дією регулятора на живлячу систему

Рисунок 3.8 - Функціональні схеми автоматичного регулювання напруги дуги з дією на живлячу систему (АРЖ) [3]

На рис. 3.8 а, б представлені відповідно функціональні схеми АРП: з механічним приводом в регуляторі, що впливає на напругу холостого ходу U_{xx} зварювального трансформатора ЗТ через виконавчий елемент - автотрансформатор АТ (управління автотрансформатором забезпечується двигуном M_2 і редуктором q_2); з електричною дією регулятора на живлячу систему, де в якості виконавчого елемента використаний дросель насичення ДН.



а - регулюванням напруги холостого ходу зварювального трансформатора;

б - регулюванням індуктивного опору дроселя насичення:

1 і 1' - ВАХ живлячої системи до і після додатка обурення $\Delta \tilde{U}_c$;

1'' - ВАХ живлячої системи після праці регулятора за схемами на рис. 3.9, а та рис. 3.9, б відповідно; 2 - статична ВАХ стійкого горіння дуги системи АРДС

Рисунок 3.9 - Схема відпрацювання системою АРЖ збудження по напрузі мережі [3]

Обмотка управління дроселя ДН заживлення від тиристорного випрямляча ТБ. Управління блоком ТБ виконується за вертикальним принципом. Як опорна напруга використовується пилкоподібна напруга U_n , що виробляється генератором пилки ГП [3].

Імпульси управління тиристорами блоку ТБ формуються блоком управління БУТ шляхом порівняння напруги управління U_y і опорної напруги U_n .

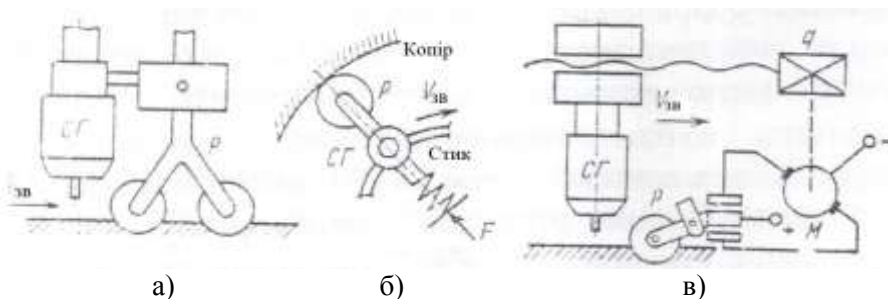
В обох схемах (див. рис. 3.8) реалізований зворотний зв'язок по напрузі дуги. У ланцюг зворотного зв'язку входять: випрямляч, елемент СЕ, що підсумовує, де випрямлена напруга дуги - U_d порівнюється з напругою уставки U_e , підсилювач П сигналу розузгодження $\Delta U_d = U_d - U_e$, перелічені вище виконавчі елементи.

Схема обробки системою АРЖ обурення по напрузі мережі ΔU_c показана на рис. 3.9 а, б.

Система АРЖ, в структуру яких включений регулятор з механічним приводом (з інтегруючою ланкою), є такими, що повільно діють із-за великої інерційності приводу, але мають астатичний закон регулювання. При цьому відхилення регульованої величини від заданого значення визначається тільки зоною нечутливості в механічній передачі приводу [3-8].

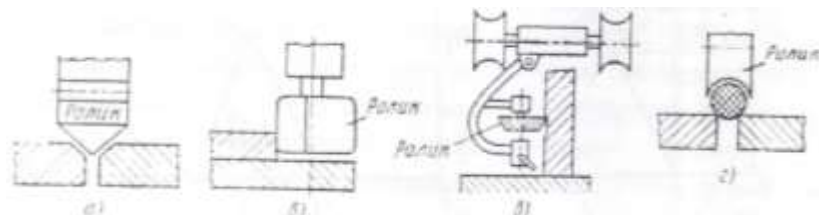
Регулятори без виконавчого двигуна (типу тиристора з дією на ДН) мають більшу швидкодію. Проте відрізок обурень в них відбувається із статичною помилкою, величина якої залежить від коефіцієнта передачі регулятора.

3.2 Система автоматичного стеження за стиком



а, б – жорсткі; в – гнукі

Рисунок 3.10 - Схеми з'єднань копірного ролика зі зварювальною горілкою [3]

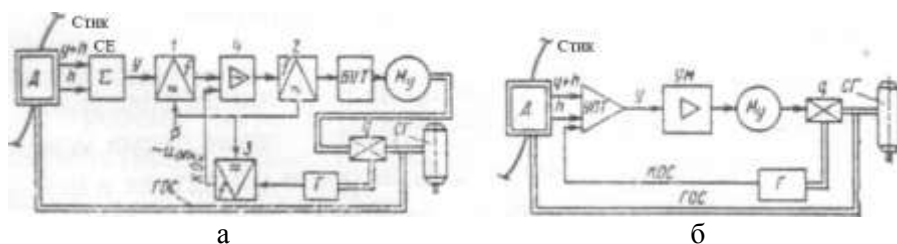


а - в оброблення; б - внапусток; в - кутових швів; г - по присадному дроту, укладеному в стикове з'єднання з проміжком

Рисунок 3.11 - Схеми зняття інформації про зміщення стику в системах самокопіювання при дуговому зварюванні різних стикових сполук [7]

Великий практичний інтерес при дуговому зварюванні представляють способи побудови автоматичних систем поперечної корекції електроду по стику з безконтактними електромагнітними, фотоелектричними і телевізійними датчиками, працюючими безпосередньо по лінії стику [5-7].

Стежачі системи з поперечною корекцією електроду можуть бути реалізовані на змінному і постійному струмі (рис. 3.12).



а - на змінному струмі; б - на постійному струмі

Рисунок 3.12 - Функціональні схеми систем, що стежать з поперечною корекцією електроду [7]

Система на змінному струмі (рис. 3.12, а) складається з датчика стику Д, що має основний, - вимірювальний канал ($y+h$) положення

стику і канал компенсації h впливу перекоосу кромок; суматора СЕ, що виділяє сигнал про кривизну стику; підсилювача-перетворювача, що включає модулятор 1, підсилювач змінного струму П і демодулятор; 2 підсилювачі потужності БУТ, реалізованого на диференційному перетворювачі тиристора; двигуна M_y і редуктора q , вихідний вал якого механічно сполучений з робочим органом - зварювальним пальником ЗП. Датчик Д встановлений на відстані l попереду ЗП і сполучений з нею жорстким механічним зв'язком ГОЗ.

Для поліпшення динамічних характеристик системи в ній передбачений зворотний зв'язок, що коригує КОЗ, складається з тахогенератора Г і модулятора 3. Змінний сигнал зворотного зв'язку, що коригує, передається на другий вхід підсилювача 4. Він зменшує коливальну систему, що стежить при відробітку нею вхідних дій.

Модулятори і демодулятор схеми живляться опорною напругою $\sim U_{оп}$ від автономного перетворювача (на схемі не показаний).

Принципова схема системи на постійному струмі (рис. 3.12 б) простіша. У ній відсутня складна схема підсилювача-перетворювача. Замість суматора і підсилювача в ній застосований підсилювач постійного струму ППС. При реалізації ППС до них пред'являються вимоги відсутності дрейфу вихідного сигналу при нульовому сигналі на вході.

Останніми роками при реалізації ППС широко застосовують інтегральні мікросхеми типу УТ401, УТ402. Вони забезпечують високу компактність конструкції підсилювача і стабільність його роботи при великому коефіцієнті посилення [6, 7, 8].

Точність роботи систем поперечної корекції електроду по стику складає 0,3...1 мм.

3.3 Система автоматичного стеження за рівнем металевої ванни при електрошлаковому зварюванні

При ЕШЗ з використанням рухливих формувальних пристроїв - повзунів необхідно, щоб рівень металевої ванни відносно повзунів зберігався незмінним. Це досяжно, якщо в кожен момент часу (окрім початкової стадії) дотримується умова

$$F_m \cdot V_{зв} = F_e V_{п}$$

де F_m - площа поперечного перерізу металу, необхідного для заповнення проміжку і створення посилення шва, мм^2 ;

$V_{зв}$ - швидкість переміщення апарату, м/год ;

F_e - площа поперечного перерізу електродного дроту, мм^2 ;

$V_{п}$ - швидкість подання електродного дроту, м/год .

Рівень металевої ванни можна регулювати, відповідно змінюючи швидкість подання електроду ($V_{п}$), швидкість зварювання ($V_{зв}$) або $V_{п}$ і $V_{зв}$ одночасно. Проте застосування регуляторів енергетичних параметрів, що впливають на швидкість $V_{п}$, а також вірогідність появи обурень по обробленню шва, для компенсації яких необхідно також змінювати $V_{п}$, не дозволяють повною мірою застосовувати схеми регулювання рівня ванни шляхом дії на цей параметр [2, 3].

Значно великі можливості має система регулювання рівня ванни шляхом дії на швидкість $V_{зв}$ переміщення апарату уздовж зварюваного шва. Непостійність $V_{зв}$ майже не відбивається на режимі плавлення електроду, в чому полягає основна перевага такого способу регулювання [3, 4, 7].

Визначення рівня металевої ванни відносно повзунів пов'язане зі значними труднощами, викликаними тим, що необхідно реєструвати і управляти неелектричною величиною, а також тим, що металева ванна покрита шаром розплавленого шлаку [5, 6, 8].

Тому основним елементом САР рівня металевої ванни є датчики, які повинні забезпечувати мінімальну погрішність виміру. Безпосереднє отримання інформації про рівень металевої і шлакової ванн робиться наступними способами: термодатчиками; контактними датчиками; радіоактивними датчиками; індукційними датчиками [2,3].

Термодатчики. Найбільше поширення отримав спосіб контролю рівня ванни із застосуванням диференціальних термопар. До мідного повзуна приварюються два константанові дроти, що утворюють дві зустрічовклучені термопари : константан - мідь і мідь - константан. Один спай розташовується дещо вищий необхідного рівня металу, інший - нижче. Результуюча е.р.с. термопар пропорційна різності температур у місцях спайв [2, 3, 4].

Дослідами встановлено, що результуюча е.р.с. термопар дорівнює нулю, коли рівень металевої ванни знаходиться приблизно

посередині між точками приварювання термопар. Різниця двох термо-е.р.с. в диференціальній схемі дуже мала за величиною і вимагає застосування підсилювачів з високим коефіцієнтом посилення. Результати вимірів в деякій мірі залежать також від товщини шлакового гарнісажу, амплітуди коливань електроду, витрати охолоджувальної рідини [4, 5].

Відомі подальші удосконалення цього методу: улаштування автономного чутливого термоелемента усередині повзуна, ізоляція його від розплавленої ванни і установка двох термоелементів на різній висоті [6, 7, 8].

Контактні датчики. Спосіб виміру рівня металеві ванни за допомогою контактного датчика, що є металевим щупом, являється найбільш простим. Охолоджуваний водою вертикальний щуп поміщається в проміжок між зварюваними виробами на заданій висоті. Замикання ланцюга щуп - виріб служить сигналом для управління процесом зварювання [1-3].

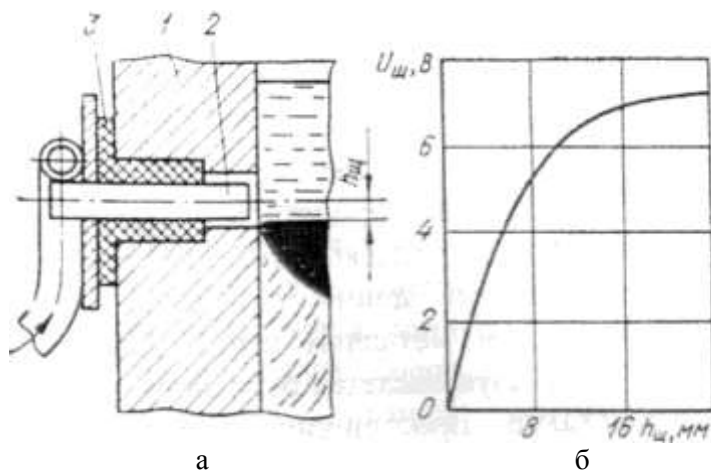
У іншому випадку щуп занурюється в шлакову ванну. Напруга на щупі пропорційна довжині шлакового проміжку між ним і рідким металом ванни. Вона стає рівним нулю, коли щуп торкається основного металу. Досвід показав, що такі прості щупи недостатньо надійні в експлуатації і мають велику погрішність.

Найраціональніше застосовувати горизонтальний мідний щуп, що ізолюється від накладки і вмонтований у повзун. Такий щуп не зашлаковує, не змочується розплавленим металом, має хорошу зносостійкість і дозволяє виділити достатній за величиною електричний сигнал.

Кінець щупа не виступає за площину формувального пристрою, в який він вмонтований, що дозволяє використати пристрій для зварювання кільцевих швів.

Живлення щупа здійснюється від вторинної обмотки зварювального трансформатора через дросель L . Напруга щупа після випрямлення подається на резистор R . Потенціометр RP живиться від незалежного джерела [3, 4].

У гілку порівняння вимірювального вузла, утвореного R і RP , включена обмотка L_A підсилювача потужності A , (наприклад ЕМУ), живильного двигуном M вертикального переміщення зварювального апарату [5-7].



1 - формувальний пристрій; 2 - щуп; 3 - ізолююча втулка.

Рисунок 3.13 - Горизонтальний мідний щуп (а) і залежність падіння напруги ($U_{\text{щ}}$) на ньому від відстані $h_{\text{щ}}$ між щупом і дзеркалом металеві ванни (б) [3]

Якщо падіння напруги на щупі дорівнює нулю, т. е. він закорочений на металеву ванну, то схема управління видає сигнал на переміщення зварювального апарату вгору зі швидкістю, що перевищує швидкість утворення шва [3].

Завдяки цьому щуп відривається від металеві ванни і напруга на ньому стає відмінною від нуля. Ця напруга порівнюється із заданою, такою, що знімається з RP , і у разі збігу їх схема управління видає сигнал на зупинку апарату.

Рівень металеві ванни відносно щупа починає підвищуватися аж до замикання щупа на ванну, після чого цикл повторюється. Вентиль VD9 (рис. 3.14) перешкоджає реверсуванню двигуна М. Практика показала, що розглянутий регулятор працює стійко при усіх можливих режимах зварювання. Його недолік — невисока ерозійна стійкість щупа [5, 6].

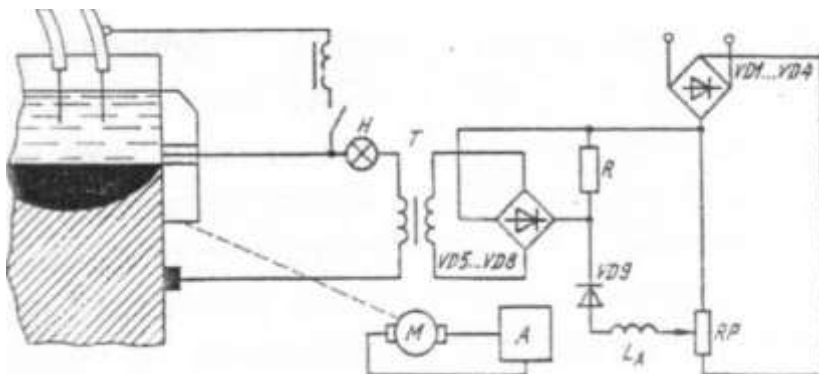


Рисунок 3.14 - Схема регулятора рівня металевої ванни з електричним шупом [7]

Надійніша у роботі система, в якій шуп вібрує за допомогою генератора ультразвукових коливань (УЗК) і створює на його робочій поверхні кавітацію рідкого металу або шлаку. При цьому забезпечується надійніший контакт з вимірюваним середовищем і зменшується ерозія робочої поверхні. Проте із-за складності конструкції вібратора УЗК система не знайшла широкого застосування в промисловості [1-5].

Радіоактивні датчики.

Застосування радіоактивних ізотопів значно полегшує вимір рівня металевої ванни, оскільки виключається безпосередній контакт вимірювального пристрою з шлаковою і металевою ваннами. Принцип роботи ґрунтований на різниці в коефіцієнтах поглинання гамма-випромінювання розплавленими шлаками і металом. Схема регулятора, що реалізовує цей принцип, приведена на рис. 3.15. Для виміру рівня ванни перед одним з формувальних пристроїв розташовується невеликий свинцевий контейнер Е, в якому розміщується певна кількість радіоактивного ізотопу ^{60}Co . У контейнері є щілина, що перекривається електромагнітним затвором, для виходу горизонтального пучка гамма-променів, спрямованого через плавильну зону на рахункову галогенну трубку В. Для захисту від нагріву її поміщають в охолоджуваній водою кожух. Свинцевий контейнер з товщиною стінок 30 мм дозволяє безпечно працювати на відстані 25-30 см від радіоактивного кобальту [6, 7, 8].

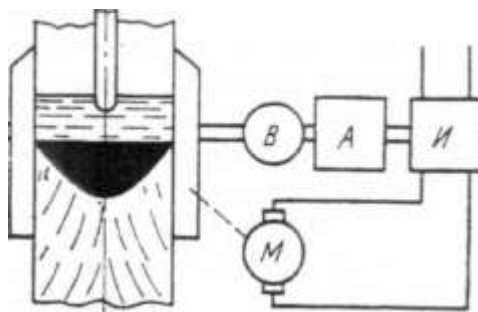


Рисунок 3.15 - Автоматичний регулятор рівня ванни з застосуванням радіоактивних ізотопів [3]

Імпульси напруги, що отримуються від рахункової трубки В при опроміненні її гамма-променями, посилюється, усереднюються за допомогою електронної схеми А і подаються на вхід виконавчого органу І, який впливає на швидкість переміщення апарату за допомогою двигуна М. Чим більше товщини зварюваного металу, тим великою має бути кількість радіоактивного кобальту.

Розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона регулятор показав цілком задовільні результати при електрошлаковому зварюванні металу завтовшки 120 мм. Рівень металевої ванни підтримувався з точністю ± 2 мм.

Перелік джерел посилання

1. Гуров А. П., Ольшевський С. І., Черно О. О., Бугрім Л. І. Навчальний посібник з дисципліни «Теорія автоматичного керування» : в 2 ч. Ч. 1. Миколаїв : НУК, 2018. 111 с.
2. Palani S. Automatic Control Systems: With MATLAB. Cham : Springer, 2022. XIX, 908 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-030-93445-3>
3. Лебедєв В. К., Черниш В. П. Автоматичне керування електрозварювальними процесами і установками: Навч. посібник / за ред. В. К. Лебедева, В. П. Черниша. Київ : Вища шк., 1994. 391 с.
4. Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Базіло К. В. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації : навчально-методичний посібник. Черкаси : ЧДТУ, 2020. 321 с.
5. Zhang G., Yun T.-J., Oh W.-B., Lee B.-R., Kim I.-S. A study on seam tracking in robotic GMA welding process. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 22, Part 4. P. 1771–1777. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.03.010](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.010)
6. Маршуба В. П., Сітніков Б. В. Автоматичне керування зварюванням [Електронний ресурс] : лаб. практикум. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2020. 142 с. [URI: http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI](http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI)
7. Маршуба В. П. Механізація, автоматизація та роботизація зварювальних процесів : конспект лекцій. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. 550 с.
8. Патон Б. Є. Автоматичне зварювання. Енциклопедія Сучасної України : електронний ресурс / редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. ; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001. URL: <https://esu.com.ua/article-42447> (дата звернення: 11.08.2026). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19859642>.