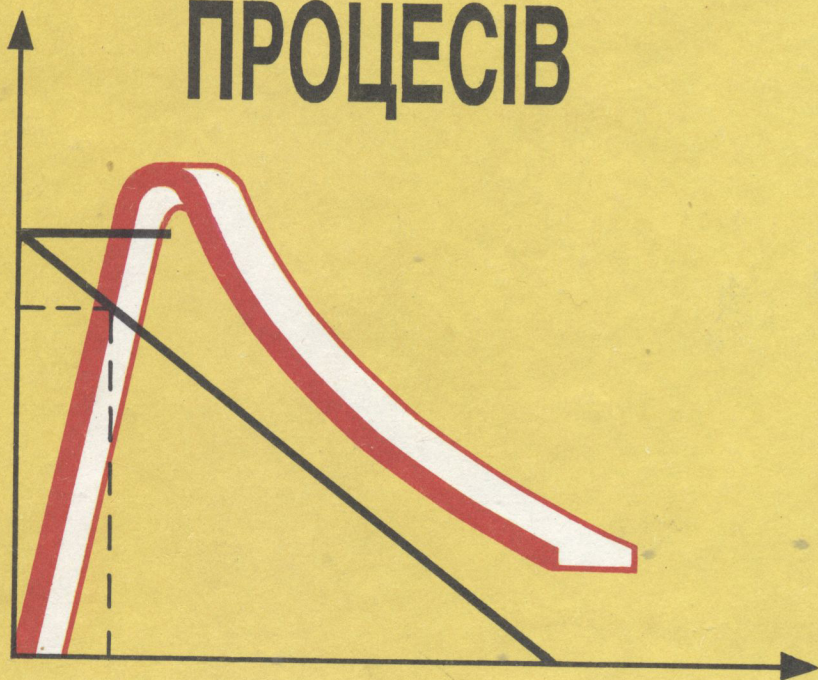


Д.Б.Головко  
К.Г.Рого  
Ю.О.Скрипник

---

# **А**ВТОМАТИКА і АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ



Д.Б.Головко  
К.Г.Рого  
Ю.О.Скрипник

# **А**ВТОМАТИКА **і АВТОМАТИЗАЦІЯ** **ТЕХНОЛОГІЧНИХ** **ПРОЦЕСІВ**

*Допущено Міністерством освіти України*

*Підручник для студентів вищих  
технічних закладів освіти*

КИЇВ  
«ЛИБІДЬ»  
1997

ББК 32.965я73

Г61

УДК 621

Розповсюдження та тиражування  
без офіційного дозволу видавництва  
заборонено

*Рецензенти:* чл.-кор. НАН України К. Г. Самофалов,  
чл.-кор. НАН України О. Г. Івахненко

*Редакція літератури з природничих та технічних наук*

*Зав. редакцією А. С. Мншченко*

*Редактор О. М. Миронець*

**Головко Д. Б. та ін.**

Г61 Автоматика і автоматизація технологічних процесів: Підручник / Д. Б. Головко, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник.— К.: Либідь, 1997.— 232 с.

ISBN 5-325-00843-0.

У підручнику викладено загальні принципи сучасної автоматки. Приділено увагу фізичним основам роботи елементів автоматки. Показано, як із цих елементів складаються системи автоматичного контролю, сигналізації, керування та регулювання. Розглянуто методи аналізу цих систем.

Вміщено завдання для практичної самостійної роботи студентів. Наведено за варіантами вихідні дані до всіх задач (тому можуть бути безпосередньо використані як завдання до контрольних робіт студентів-заочників), а також необхідні довідкові матеріали.

Для студентів вищих технічних навчальних закладів.

2103000000-021

Г \_\_\_\_\_ Без оголошення

ББК 32.965я73

224-97

ISBN 5-325-00843-0

© Д. Б. Головко, К. Г. Рего,  
Ю. О. Скрипник, 1997

## ПЕРЕДМОВА

Викладання основ автоматизації технологічних процесів, як і інших загальноінженерних дисциплін, у вищих технічних навчальних закладах, за традицією, починається із загальних теоретичних основ автоматизації і розгляду конкретних прикладів систем автоматизації у певній сфері виробництва. При цьому контроль засвоєння навчального матеріалу зводиться до перевірки вміння студента запам'ятати і пояснити принципи дії тих систем автоматизації, які він вивчав на лекціях чи на лабораторно-практичних заняттях, тобто перевіряється здатність студента запам'ятати певний обсяг інформації про роботу розглянутих схем. Уміння ж самостійно розумітися на нових схемах систем автоматизації подібна методика не формує.

На кафедрі автоматизації технологічних процесів і приладобудування Державної академії легкої промисловості України розроблено більш прогресивний метод викладання основ автоматизації: після короткого викладу теоретичних основ автоматизації — вивчення її елементів, ознайомлення студентів з принципами побудови систем автоматичного контролю, керування, регулювання на основі цих елементів, навчання самостійному аналізу конкретних систем автоматизації. При контролі перевіряється вміння студентів, користуючись будь-якою довідковою літературою, аналізувати роботу таких систем автоматизації, які на лекціях і лабораторних заняттях не розглядалися. Такий метод викладання автори вважають більш перспективним.

Навчальний матеріал з автоматизації пропонується вивчати у такий послідовності:

ознайомлення з фізичними основами роботи перетворювачів і формаций для локальних систем управління;

розгляд найпоширеніших технічних засобів для побудови локальних систем управління;

аналіз роботи найважливіших локальних систем управління (автоматизованого вимірювання та сигналізації, автоматизованого дискретного управління автоматичного регулювання);

ознайомлення з принципами побудови систем автоматизованого та автоматичного управління технологічними процесами.

Підручник побудований згідно із запропонованою стратегією навчального процесу. Складається він зі вступу і двох розділів. У вступі викладається коротка історія автоматичної та інформатичної, основи автоматизації технологічних процесів. У першому розділі подається будова елемента автоматичної (фізичні основи роботи перетворювачів інформації; технічні засоби систем автоматизації), а в другому — побудова систем автоматизації (автоматичної сигналізації, автоконтролю, дискретного керування, авторегулювання), приклади аналізу таких схем та завдання для практичної роботи студентів (кожне у десяти варіантах, що дає змогу використовувати їх як на практичних заняттях, так і для контрольних робіт). Наведено можливі приклади схем для контролю засвоєння матеріалу. У додатках наведено необхідний довідковий матеріал.

У підручнику вміщено багато оригінальних ілюстрацій. Оскільки матеріал підручника не обмежується розглядом якогось одного технологічного процесу, його можна використати при підготовці технологів-бакалаврів і механіків для будь-якої галузі виробництва.

## ВСТУП

**З історії автоматики й інформатики.** З давніх-давен людина створювала різні технічні знаряддя, що допомагали їй у трудових процесах, зокрема автоматичні пристрої. Історія автоматики налічує десятки тисяч років. Першими розробниками автоматичних пристроїв були мисливці, які створювали хитромудрі автоматичні конструкції для виловлювання птахів і звірів.

З розвитком цивілізації виникла потреба у вимірюванні відрізків часу. Першим приладом для визначення часу був сонячний годинник. Проте він не діяв уночі та в хмарну погоду. Набагато зручнішим став пісковий годинник.

Для підвищення точності подібних годинників замість піску в них стали використовувати воду (рис. В.1): скляна конічна посудина 2 з невеликим каліброваним отвором унизу заповнювалася водою з труби 1, після чого подавання води припинялося. Через калібрований отвір краплі витікали в нижню посудину 3, внаслідок чого рівень води у конічній посудині знижувався; чим більше часу минало, тим нижчим був рівень. Для зручності відліку часу на по-

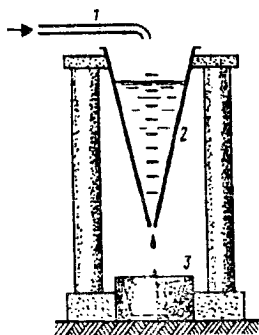


Рис. В.1

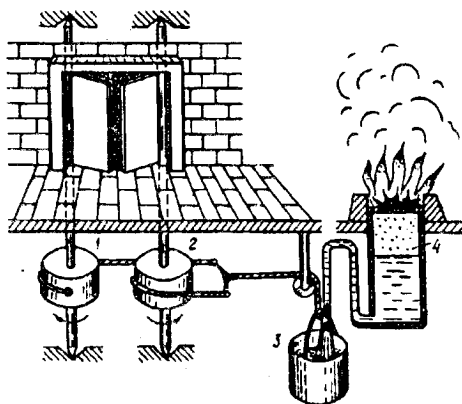


Рис. В.2

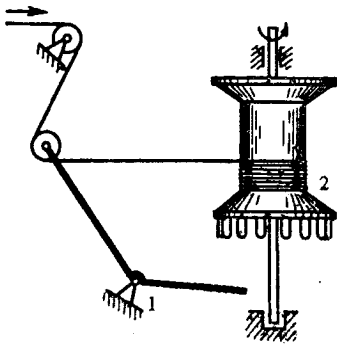


Рис. В.3

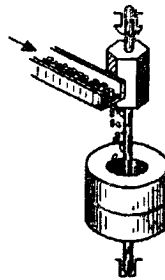


Рис. В.4

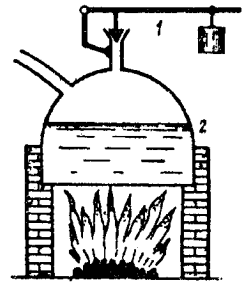


Рис. В.5

судині 2 робили позначки. Такий водяний годинник у Стародавній Греції дістав назву «клепсидра», що буквально означає «злідійка води» (бо вода з неї «непомітно» зникала).

Один з учнів старогрецького механіка Ктєзібія, Герон Старший Олександрійський, у книзі «Театр автоматів» описав різні пристрої прикладної механіки того часу. Конструкцію для відчинення дверей храму зображено на рис. В.2: при запалюванні священного вогнища повітря в посудині 4 нагрівається, тиск його підвищується, внаслідок чого вода з цієї посудини витісняється у відро 3; при певному значенні ваги відро повертає циліндри 1 та 2, і двері храму відчиняються (саме таке і походження слова «автоматика», по-грецьки *αὐτομάτος* означає «самодіючий»). Згодом з'явилися й промислові автоматичні пристрої.

Італійський живописець і винахідник Леонардо да Вінчі на початку XVI ст. побудував автоматичний зупинник при обриві нитки, яка намотується на котушку (рис. В.3): якщо нитка обривається, важіль 1 повертається проти годинникової стрілки, гальмуючи котушку 2.

До подібних промислових автоматів належить «потрясок» — автоматичний регулятор подавання зерна при розмелюванні (рис. В.4): чим швидше обертається вісь жорна, тим частіше ребра багатогранної призми, розташованої на цій осі, вдаряють по жолобу подавання зерна, і тим більше зерна надходить на розмелювання. Цей автоматичний пристрій у 1588 р. описаний в книзі італійського інженера й механіка Агостіно Рамеллі.

З появою парових машин промислова автоматика розвивається дедалі швидше.

Одну з перших спроб створити парову машину, яка мала б практичне значення, зробив французький фізик Дені Папін, який у 1680 р. запропонував свою конструкцію, що здобула назву «котла Папіна». Власне кажучи, це був просто паровий насос для видален-

ня рудничних вод; але величезною заслугою Папіна було те, що він винайшов для свого котла запобіжний клапан (рис. В.5): при збільшенні тиску в котлі 2 пара піднімає пробку 1, і надлишок її виходить назовні, чим і запобігається вибух котла.

Два англійці — Томас Ньюкомен і Джон Келлі — у 1705 р. одержали патент на парову машину, набагато досконалішу, ніж машина Папіна. Вона (рис. В.6) складалася з парового котла 1, з'єднаного короткою трубою з циліндром 4; на цій трубі був кран 2 для впуску в циліндр пари. Циліндр мав поршень, який за допомогою штока й ланцюжка з'єднувався з одним кінцем коромисла (балансира) 6. До другого кінця коромисла також ланцюжком прикріплялася штанга насоса 9 з противагою 7. У ємкості 5 знаходилася вода (наповнювалася ємкість при відкритому крані 8).

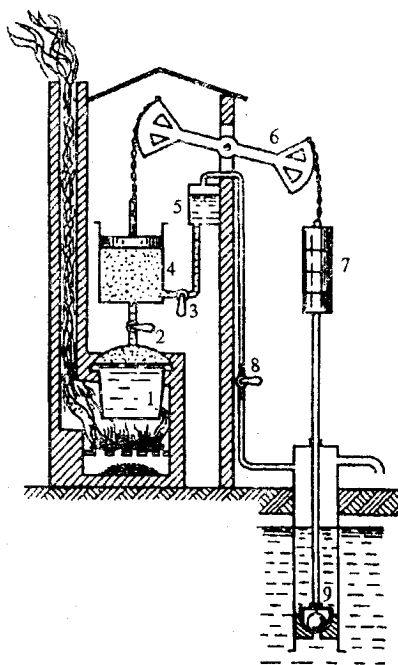


Рис. В.6

Працювала машина таким чином: якщо поршень циліндра 4 був унизу, поворотом крана 2 впускали пару в циліндр, поршень якого підіймався вгору (цьому допомагала й противага 7), поршень насоса опускався униз; шаровий клапан на поршні піднімався, і вода потрапляла у циліндр над поршнем; коли поршень циліндра 4 досягав верхнього положення, кран 2 перекривали і відкривали кран 3; у циліндр 4 потрапляла вода, пара конденсувалась і в циліндрі виникало розрідження, під дією атмосферного тиску поршень циліндра 4 опускався вниз, а поршень насоса 9 — йшов угору, піднімаючи воду (шаровий клапан при цьому прикривався).

Таким чином, для роботи парової машини треба було лише своєчасно відкривати й закривати крани 2 та 3 (високої кваліфікації для цього не потрібно було, тому обслуговували машини Ньюкомена здебільшого підлітки). Один з таких хлоп'ят Гемфрі Поттер, якому набридла монотонна робота, придумав удосконалення, яке дало йому змогу вивільнити час для ігор з однолітками: він прив'язав мотузками рукоятки кранів 2 та 3 до коромисла 6 таким чином, щоб ці крани відкривалися й закривалися у відповідні моменти, тобто здійснив автоматичний паророзподіл. Продуктивність машини від-



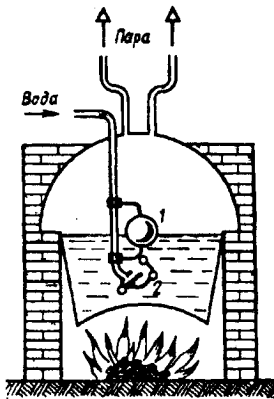


Рис. В.7

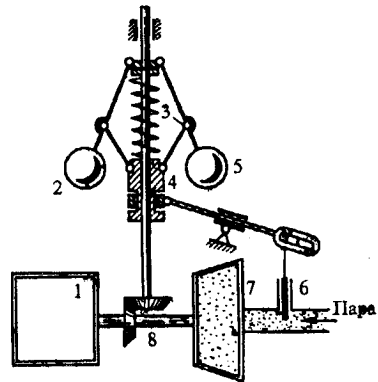


Рис. В.8

разу зроста від 6...8 до 15...18 ходів на хвилину. Пізніше мотузки замінили на залізні стержні, що було надійніше.

У середині 60-х років XVIII ст. на принципах Ньюкомена майстер Барнаульського заводу І. Ползунов побудував парову машину (як привод до ковальських міхів), в якій спорудив автоматичний регулятор подавання води у паровий котел (рис. В.7). Якщо рівень води підвищувався, поплавок 1 також переміщувався вгору, і клапан 2 зменшував надходження води у котел.

У 1785 р. шотландський винахідник Джеймс Уатт побудував досить досконалу парову машину подвійної дії, яка була встановлена на млині в Англії. У машині використано принципово нові рішення. Одним із винаходів Уатта був автоматичний регулятор швидкості машини (рис. В.8). Обертання головного вала за допомогою двох конічних шестерень 8 передається на відцентровий регулятор; при цьому тягарі 2 і 5, переборюючи опір пружини 3, переміщують втулку 4 угору, і заслінка 6 опускається, зменшуючи подачу пари у машину і перешкоджаючи надмірному підвищенню швидкості обертання її вала (7 — парова машина, 1 — технологічне обладнання).

3 XVIII ст. починається розвиток електротехніки.

У середині XVIII ст. російський фізик, академік Георг Вільгельм Ріхман, винайшов перший електровимірювальний прилад (рис. В.9: 1 — шкала, 2 — шовкова нитка, 3 — старовинний конденсатор у вигляді скляної банки, обклеєної усередині та ззовні фольговими обкладинками (такий конденсатор був уперше створений у голландському м. Лейдені, тому його називають «лейденською банкою»), 4 — залізний стояк). Під впливом електричного заряду, накопиченого у лейденській банці, нитка 2 відхиляється від стояка 4; кут відхилення буде тим більшим, чим більший заряд вимірюється.

У 1781 р. італійський учений Алессандро Вольта створив чутли-

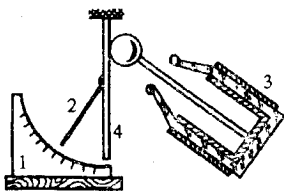


Рис. В.9

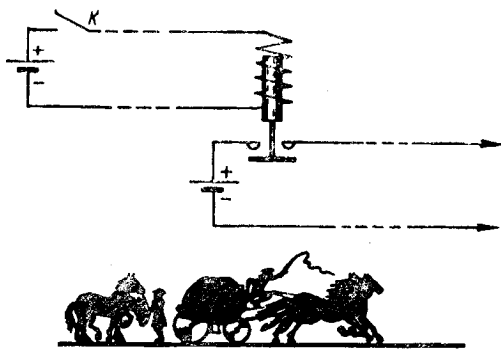


Рис. В.10

вий електроскоп з двома соломинками. У 1820 р. французький фізик Андре Марі Ампер демонстрував перший гальванометр: вимірюваний електричний струм проходив по проводу, й магнітне поле цього струму відхиляло магнітну стрілку. Через п'ять років італійський фізик Леопольдо Нобілі винайшов більш чутливий гальванометр.

На початку XIX ст. почалося створення електричного телеграфу. Чим далі треба було посилати електричні сигнали по проводах, тим більшої електрорушійної сили батареї доводилося використовувати, тому дальність зв'язку обмежувалася — працювати з дуже високими напругами було небезпечно. Вихід дала ідея переяржених коней, яка застосовувалася при організації поштового зв'язку: на черговій станції стомлених коней замінювали на свіжих, і поштова карета рухалася далі.

Для організації далекого електрозв'язку (рис. В.10) замикання ключа *K* примушувало спрацьовувати електромагніт, контакт якого підключав до наступної ділянки лінії нову гальванічну батарею, що забезпечувало передавання сигналу далі. Оскільки організація поштового зв'язку на переяржених конях називалася по-французьки «relais» (релé), так почали іменувати і зображений на рис. В.10 електромагнітний пристрій.

У 1839 р. російський електротехнік Б. С. Якобі в своєму електромагнітному телеграфі застосував «реєстратор імпульсів» — перший реєструвальний електровимірювальний прилад (рис. В.11). При замиканні ключа *SA* електромагніт *1* притягує якір *2* і шток *7* переміщує пишучий пристрій *4*; напір закріплено на візку *5*, який пересувається годинниковим приводом *3* (*6* — протывага).

Перший електровимірювальний прилад електромагнітної системи був створений у 1848 р. німецькими фізиками Рудольфом Германом Арнутом Кольраушем та Вільгельмом Едуардом Вебером (рис. В.12: *1* — котушка, *2* — феромагнітний циліндр, *3* — покажчик,

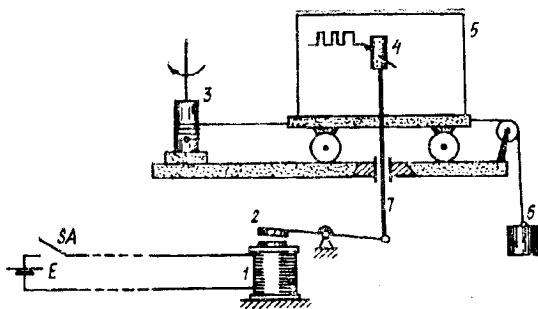


Рис. В.11

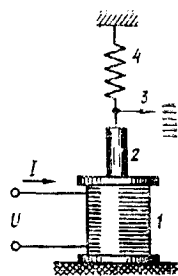


Рис. В.12

4 — пружина). Чим більший струм проходить по котушці, тим глибше феромагнітний циліндр втягується у неї.

Перший магнітоелектричний прилад з рухомою котушкою запропонував у 1867 р. англійський фізик Уільям Томсон (лорд Кельвін). У 1880—1881 рр. французькі фізики Марсель Дебре і Жак Арсен д'Арсенваль вдосконалили цей прилад, застосувавши замість електромагніта постійний магніт.

Розвиток техніки вимагав дедалі точнішого вимірювання часу. Водяний годинник вже не міг задовольнити цих потреб, і з'явилися механічні годинники — спочатку тільки з годинниковою стрілкою (XIII ст.). У 1657 р. голландський фізик Христіан Гюйгенс сконструював перший маятниковий годинник зі спусковим механізмом, що дозволило дещо підвищити точність вимірювання часу.

Поява точних механічних годинників прискорила розвиток автоматів. У XVIII ст. виготовлялися складні годинники з різними саморушними фігурами людей, тварин, птахів, які починали рухатися в певний час. Наприкінці XVIII ст. деякі годинникарі створювали чудові іграшки-автомати, джерелом руху яких були досить досконалі годинникові механізми з пружинним приводом. Особливо відомими стали автомати, виготовлені швейцарським годинникарем П'єром-Жаком Дро і його сином Анрі, на честь якого подібні автомати були названі «андроїдами».

Автомати на основі годинникових механізмів здатні були виконувати тільки такі дії, які передбачувалися при їх виготовленні; проте вони справляли дуже велике враження, — тоді вважалося, що саме подібні пристрої — це й є справжнє призначення автоматки.

На початку XX ст. подальшим розвитком андроїдів стали роботи — людиноподібні механізми (звичайно з електроприводом), здатні виконувати деякі дії, що нагадують людські (рис. В.13). Термін *робот* уперше був застосований у 1920 р. чеським письменником Карелом Чапеком у фантастичній драмі «RUR» — так він назвав

схожі на людей автомати, які випускала компанія інженера Россума («RUR» розшифровувалось як Россумські Універсальні Роботи, Rossum's Universal Robots; слово робот по-чеськи означає «чорнороб»).

Роботи першої половини ХХ ст. виконували корисні дії (ходили, сиділи, піднімали й опускали руки, рухали пальцями та ін.), але використовувалися здебільшого в рекламних цілях, з метою демонстрації великих можливостей автоматики.

У міру вдосконалення зовнішня схожість роботів з людиною зникала й збільшувалася схожість виконуваних ними функцій, які властиві людині. Один з сучасних роботів зображений на рис. В.14.

Величезну роль у розвитку сучасної автоматики відіграє кібернетика — наука про процеси управління й передавання сигналів у технічних системах, живих істотах і людському суспільстві, яка використовує математичні методи.

Термін *кібернетика* став досить поширеним з 1948 р. — після виходу книги американського математика, професора Масахусетського технологічного інституту Норберта Вінера «Кібернетика, або Управління і зв'язок у тварині і машині». Поява кібернетики була підготовлена працею багатьох видатних вчених різних країн — американського фізика Джозая Уілларда Гіббса, російського фізіолога І. П. Павлова, американського математика Клода Етвуда Шеннона, російського математика А. М. Колмогорова та ін. Термін *кібернетика* відомий із давніх часів — ще за 4 ст. до н. е. давньогрецький філософ Платон вживав його в розумінні науки про кораблеводіння (*κυβερνητική* — «вміння керувати кораблем»); звідси й англ. *governor* (управитель), а також українські слова «гувернер» та «губернатор». Вперше цей термін використаний у сучасному значенні французьким фізиком Андре Марі Ампером, який, намагаючися класифікувати всі людські пізнання, у «Нарисах з філософії наук» назвав кібернетикою майбутню науку про державне управління. Проте цей термін тоді поширення не дістав, і незабаром про нього забули. Праці Норберта Вінера і його послідовників дали змогу будувати дуже складні системи автоматичного керування — кібернетичні. На жаль, марксистсько-ленінські філософи колишнього СРСР виявилися нездатними зрозуміти важливість кібернетики, оголосили її, як і генетику, «буржуазною лженаукою». Це

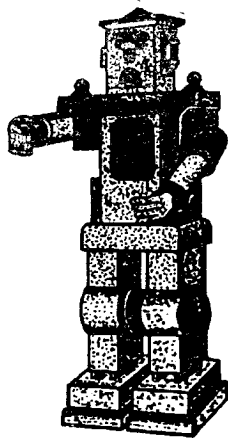


Рис. В.13

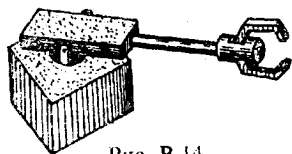


Рис. В.14

протикібернетичне мракобісся завдало автоматичі величезної шкоди, яка дається взнаки й досі.

Великі можливості відкриває для автоматики й біоніка — галузь техніки, що моделює елементи біосистем з метою створення досконалих засобів автоматики.

Людина довгий час не підозрювала, що, створюючи деякі прилади, вона повторювала те, що існує у живій природі. Наприклад, була винайдена локація для визначення відстані тих чи інших віддалених об'єктів; згодом з'ясувалося, що ультразвукова локація використовується кажанами для орієнтації у темряві й пошуку їжі. Інфрачервона фотографія (для фотозйомки у темряві) виявилася наслідкуванням термоскопічному зору восьминогів, ящірок та змій.

Як приклад досягнень біоніки, можна назвати розробку приладу для передбачення штормів. Давно відомо, що за добу до шторму медузи пливають далі в море, побоюючись бути викинутими хвилями на берег. Виявилось, що медузи вловлюють інфразвуки (частотою до 15 Гц, які людина не чує), що є провісниками шторму. Був сконструйований прилад для уловлювання інфразвуків — і одержано провісник штормів, що прогнозує їх наближення годин за п'ятнадцять.

Досконалість пристосувань, створених живою природою, вражає уяву. Відомо, що соняшник повертає свою квітку до сонця. Як це здійснюється? Метелики кропив'янки за кілька годин до грози ховаються у захищені місця, хоч на небі нема ані хмаринки. Як вони завбачають наближення грози?

На ці та деякі інші запитання поки що відповідей немає. Але розвиток науки дозволяє сподіватися, що подібні секрети будуть розкриті, і на їх основі буде винайдено багато корисних технічних пристроїв.

Технічною базою інформатики є, як відомо, обчислювальна техніка.

Потреба первісних людей обмежувалася незначною кількістю предметів споживання, тому вони й не мали уяви про число як сукупність однорідних предметів або явищ. Зі збільшенням кількості продуктів споживання виникла потреба рахувати їх. При лічбі застосовували різні дрібні предмети — камінці, черепашки, зернятка та ін. Для зручності користування ці предмети спершу стали нанизувати на нитку, пізніше (у V ст. до н. е.) у Єгипті, Фінікії та Греції набули поширення спеціальні пристосування, які називалися абак (по-грецьки  $\alpha\beta\alpha\xi$  — дошка). Це була спочатку просто дощечка, прикрушена піском; по піску гострою паличкою проводились борідки, і смужки між ними використовувалися для порозрядного викладання камінців або інших дрібних предметів (на рис. В.15 викладено число «125»). Якщо в якомусь розряді набиралося десять або більше камінців, тоді десяток їх знімали зі смуги, а один камінець клали в наступний, вищий розряд.

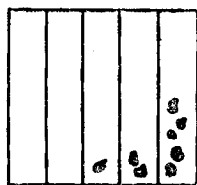


Рис. В.15

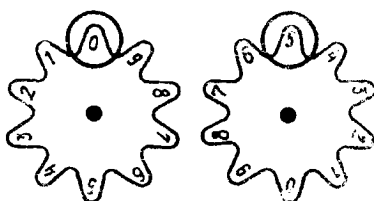


Рис. В.16

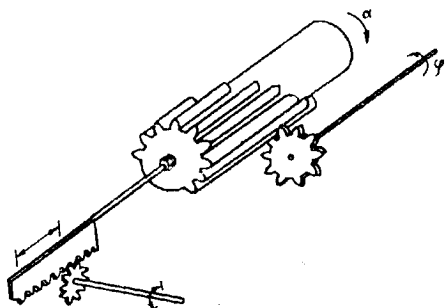


Рис. В.17

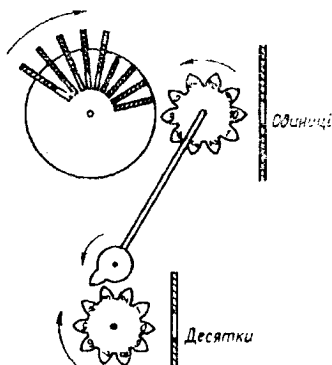


Рис. В.18

Подальший розвиток обчислювальної техніки протягом двох тисячоліть — це лише вдосконалення абак.

У стародавньому Римі абак робили з мармуру або міді, а замість камінців брали спеціальні кульки, які пересувалися у жолобках; називали такий пристрій *calculi* (звідси — від лат. *calculatore* — обчислювати).

Від абак походять китайська рахівниця «суан-пан». Видозміненим абак є й російська рахівниця, що з'явилась у XV ст.

Наприкінці XVI ст. шотландський математик Джон Непер винайшов логарифми, на основі яких згодом була сконструйована логарифмічна лінійка. Проте і абак, і рахівниця, і логарифмічна лінійка — це ще не обчислювальні машини, а лише механічні пристрої для деякого полегшення виконання обчислень.

Історію обчислювальних машин прийнято вести від «арифметичної машини» французького математика, фізика й філософа Блеза Паскаля. Батько його працював інтендантом. Сімнадцятирічний Блез, який вивчав математику під керівництвом батька, допомагав йому в розрахунках податкових зборів, які вимагали громіздких обчислень. Тому й вирішив зробити арифметичну машину. В 1641 р. перша підсумовуюча машина вже діяла. У ній також ви-

користувалися десять предметів — це були зубці спеціальної шестерні, але розмішені по колу. Ці лічильні зубчасті колеса були зв'язані між собою так, що при повному повороті колеса нижчого розряду зв'язане з ним колесо вищого оберталося на 0,1 оберта. Така система являла собою лічильник, що виконував додавання й віднімання чисел механічним способом. Результати обчислень належало зчитувати з цифрових колес лічильника («0» та «5» на рис. В.16).

Лічильна машина, призначена для виконання всіх чотирьох арифметичних дій, запропонована в 1670 р. німецьким математиком, фізиком і філософом Готфрідом Вільгельмом Лейбніцем. Головною особливістю цієї машини був спеціальний ребристий циліндр, на якому кожне наступне з дев'яти ребер було коротшим від попереднього; при повному оберті циліндра ( $\alpha$  на рис. В.17) лічильна шестерня здійснювала поворот  $\varphi$  на ту чи іншу кількість зубців.

Одним із перших спробував автоматизувати обчислення англійський математик Чарльз Беббедж. У 1820 р. він запропонував математичну машину для табулювання функцій, а в 1834 р. задумав побудувати універсальну обчислювальну машину з програмним управлінням. Але завдання виявилось технічно занадто складним, і завершити машину Чарльз Беббедж не зміг (згодом її добував син винахідника).

У 1854 р. ірландський математик Джордж Буль опублікував систему математичної логіки, яка дістала згодом назву *булева алгебра*. Вона дуже проста, має тільки три логічні функції — операції НІ, АБО, І, а змінні можуть набувати тільки два значення — 1 («істинно») та 0 («хибно»). Удосконалив булеву алгебру шотландський математик Огастес де Морган. Згодом ця алгебра стала математичною основою теорії перемикальних схем для розробки цифрових обчислювальних машин.

У 1874 р. інженер Петербурзького Монетного двору Вільгодт Теофілович Однер сконструював обчислювальну машину нового типу — арифмометр, який донедавна надзвичайно широко застосовувався в усьому світі. У «колесі Однера» (рис. В.18) кількість зубців можна змінювати від 0 до 9; зайві зубці ховаються у пазах колеса. З колесом Однера зчіплюється цифрове колесо, яке має десять зубців — цифри від 0 до 9. Початково це колесо встановлюється так, що у віконці видно нуль. Розглянемо на прикладі. Виконаємо додавання  $5 + 7$ . Для цього встановимо на колесі Однера, що відповідає розряду одиниць, п'ять зубців. Якщо тепер повернути його на повний оберт, то зачеплене з ним цифрове колесо повернеться теж на п'ять зубців, і у віконці одиниць з'явиться цифра 5. Далі встановимо на тому ж колесі Однера сім зубців і знову зробимо повний оберт. Цифрове колесо повернеться до цифри 2, але при переході через нуль закріплений на цьому колесі поодинокий зубець поверне цифрове колесо десятків на  $1/10$  оберта. Таким чином, результат додавання буде 12.

Арифмометр Одера виконував усі чотири арифметичні дії: додавання, віднімання, множення та ділення.

У 1885 р. американські механіки Д. Фельт та В. Берроуз незалежно один від одного виготовили два варіанти механічних підсумовуючих машин з клавішним управлінням (першу — з візуальним відліком, другу — з друкуванням результату). Подальший розвиток клавішних машин привів у роки першої світової війни до появи більш досконалих пристроїв — електромеханічних клавішних обчислювальних машин для виконання всіх чотирьох арифметичних дій; їх стали називати *калькуляторами* (від англ. calculate — обчислювати) (рис. В.19).

Американець Герман Холлерит у 1887 р. винайшов електромеханічну обчислювальну машину, в якій для автоматизації обчислень була використана запозичена з текстильної промисловості ідея керування механізмом за допомогою паперової стрічки з отворами (перфострічки) (ткацький верстат з програмним управлінням за допомогою перфострічки побудував у 1801 р. французький винахідник Джозеф Жаккар — їх називають жаккаровими). У машині Холлерита замість перфострічки використано перфоровані карти з цупкого паперу (перфокарти); ці перфокарти здійснювали автоматичне керування введенням чисел у машину і процесами їх обробки. Машини Холлерита дістали назву лічильно-перфораційних (ЛПМ).

Поява ЛПМ стала початком виділення двох напрямів обчислювальної техніки; вони були першими з обчислювальних машин, які згодом одержали назву комп'ютери, — від англ. compute — обчислювати (див. рис. В.19).

Американський фізик Говард Айкен є винахідником електромеханічної обчислювальної машини «МАРК-1» (1944 р.) з використанням електромагнітних реле та деяких елементів ЛПМ. Керування послідовністю операцій здійснювалось автоматично; машина виконувала три операції додавання за 1 с, операцію множення — 6 с. Довжина машини більше 15 м, висота 2,5 м. Машина МАРК-1 вважається нульовим поколінням обчислювальних машин (0 на рис. В.19).

Наприкінці 1945 р. в Електротехнічній школі Мура при Пенсильванському університеті Джон Моучлі та Дж. Преспер Екерт сконструювали перший у світі електронний комп'ютер, де було використано 18000 електронних ламп, винайдених ще на початку сто-

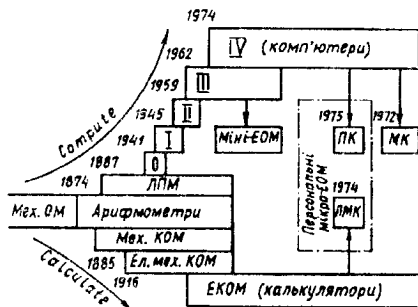


Рис. В.19



річчя (діод — у 1904 р. англійським фізиком Джон Амброз Флемінгом; тріод — 1906 р. американським фізиком Лі ді Форестом). Машина почала діяти в лютому 1946 р. й одержала назву ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Це була величезна споруда масою до 30 т, займала площу 180 м<sup>2</sup>, споживала 150 кВт електроенергії. Машина виконувала близько 1000 операцій за 1 с; введення й виведення даних здійснювалося за допомогою перфокарт; зміна програми — перемиканням проводів (на це потрібно було затратити кілька днів). ЕОМ на електронних лампах називають першим поколінням комп'ютерів (I на рис. В.19).

У 1946 р. американський математик Джон фон Нейман висунув важливу ідею, яка сприяла подальшому вдосконаленню ЕОМ: застосування двійкової системи числення.

Перша в СРСР електронна цифрова обчислювальна машина побудована в 1950 р. в Інституті Електротехніки АН УРСР (м. Київ) під керівництвом академіка С. О. Лебедева. Вона одержала назву МЭСМ (рос. «Малая Электронная Счетная Машина»). Машина стала до ладу 25 грудня 1951 р. У ній використано 6000 електронних ламп; споживала вона 25 кВт електроенергії, займала площу 50 м<sup>2</sup>; виконувала 50 операцій за 1 с над шестизначними числами. Оскільки кібернетика тоді переслідувалась як «буржуазна лженаука», вчений змушений був створювати машину таємно, долаючи величезні труднощі.

Через рік під керівництвом С. О. Лебедева виникла машина БЭСМ (рос. «Большая Электронная Счетная Машина») в Інституті точної механіки й обчислювальної техніки (Москва). Вона виконувала близько 3000 арифметичних дій за 1 с (на той час найшвидкодійча у світі). За допомогою БЭСМ було розв'язано багато задач, які вважалися нерозв'язними через величезний обсяг обчислень.

Наприкінці 50-х років на зміну ламповим ЕОМ прийшли напівпровідникові, виконані на транзисторах; це було вже друге покоління ЕОМ (II на рис. В.19). Габарити машин стали значно меншими.

Перша ЕЦОМ третього покоління з'явилася у 1962 р.

Третє покоління ЕОМ спочатку створювалося на мікромодулях — блоках, складених з комплексу квадратних плоских пластинок, на яких розміщувалися мініатюрні транзистори, резистори, конденсатори, трансформатори; на кожній стороні квадрата знаходилися металізовані пази, за допомогою яких окремий мікроелемент підключався в електричну схему.

Удосконалення мікромодулів привело до створення плівкових мікросхем: на ізоляційну підкладку за допомогою хімічного осадження або вакуумного напилення наносилися через трафарет необхідні деталі (з провідникових, резистивних, магнітних, напівпровідникових та ізоляційних плівок певної конфігурації), з'єднаних у загальну систему (наприклад, підсилювач, елемент ЕОМ тощо).

I, нарешті, з'явилися так звані *тверді схеми*, складені з електронних вузлів, одержаних шляхом створення в напівпровідниковій пластині ділянок, які за своїми властивостями еквівалентні елементам електроніки (транзисторам, резисторам, конденсаторам та ін.); такі схеми (згодом їх стали називати *інтегральними (ІС)*) також виконують функції невеликих електричних систем — підсилювачів, елементів ЕОМ та ін.

До третього покоління ЕЦОМ (*III* на рис. В.19) належать машини, виконані на мікромодулях, плівкових мікросхемах або твердих інтегральних схемах.

Подальша мікромініатюризація електроніки привела до великих інтегральних схем (ВІС), де у загальну схему зведено багато окремих електронних вузлів і невеликих схем. У напівпровідниковому кристалі з розмірами поверхні від кількох міліметрів до сантиметра й товщиною у десятки частки міліметра розміщуються тисячі і навіть сотні тисяч елементів (транзистори, діоди, конденсатори, резистори), з'єднаних між собою внутрішніми зв'язками, завдяки чому можна виконувати необхідні операції. Введення й виведення інформації і зовнішнього керування роботою ВІС здійснюють відводи (звичайно 20...40).

Поряд з великими універсальними ЕОМ на базі інтегральних схем випускаються й малі спеціалізовані машини (міні-ЕОМ на рис. В.19).

Винайдення інтегральних схем сприяло розвитку й іншої галузі обчислювальних машин, які, на відміну від комп'ютерів, називалися калькуляторами: з'явилися електронні клавішні обчислювальні машини (ЕКОМ на рис. В.19) — настільні й навіть кишенькові.

Мікромініатюризація електроніки (від електронних ламп до ВІС) досягла великих успіхів, габарити машин все зменшувалися, швидкодія їх підвищувалася, але залишався істотний недолік — жорстка логіка: система будувалася за певною логічною схемою і могла працювати тільки згідно з нею.

Так було до 1971 р., коли американський учений Марчіан Хофф винайшов принципово новий спосіб створення логічних обчислювальних систем на основі ВІС — з гнучкою логічною структурою, яку можна перебудувати (при необхідності) шляхом введення в ВІС іззовні відповідної нової програми. Такий пристрій одержав назву *мікропроцесора (МП)*; машини на основі МП називаються *мікропроцесорними ЕОМ* (скорочено: мікро-ЕОМ) і належать до четвертого покоління ЕОМ (*IV* на рис. В.19).

Перші «великі» машини на базі МП з'явилися у 1974 р.

Використання МП дало змогу створити малогабаритні мікро-ЕОМ, вартість яких знижувалася, а процес експлуатації спрощувався; при цьому відпала необхідність у професійних операторах та програмістах: кожен користувач міг обслуговувати машину само-

тужки. Тому такі мікро-ЕОМ дістали назву *персональних*. Майже одночасно з персональними комп'ютерами як спрощенням великих машин (ПК на рис. В.19) були створені програмовані мікрокалькулятори як удосконалення ЕКОМ (ПМК на рис. В.19).

Перший ПК було створено в 1976 р., коли два американські спеціалісти в галузі комп'ютерної техніки Стівен Джобс та Стів Уозняк у своєму гаражі сконструювали невелику ЕОМ, яку вони назвали «ЕППЛ» (англ. apple — яблуко).

Загальний вигляд сучасного ПК зображено на рис. В.20.

Перший ПМК було випущено американською фірмою Х'юлетт-Паккард у 1974 р. (прилад HP-65). В СРСР першим ПМК була мікро-ЕОМ «Електроника БЗ-21», згодом з'явилися БЗ-34, МК-54, МК-61 та МК-52. Загальний вигляд мікро-ЕОМ «Електроника БЗ-34» подано на рис. В.21.

Праця з ПК та ПМК примушує користувачів набувати навичок автоформалізації своїх професійних знань: програмування починає розглядатись як друга грамотність, оскільки ПК і ПМК стають таким самим атрибутом нашого побуту, як електрична лампа, телефон, телевізор, магнітофон та ін.

Вміння програмувати корисне не тільки тим, що воно полегшує використання ЕОМ для розв'язання різних задач: воно виробляє ще й певний стиль мислення, здатність чітко й лаконічно формувати свої думки, швидко орієнтуватись у величезних потоках інформації.

На базі МП з'явилися і мікроконтролери — спеціалізовані спрощені мікропроцесорні машини для керування технологічними об'єктами (МК на рис. В.19). МК настільки дешеві, що їх можна розміщувати на кожному об'єкті керування й використовувати тільки час від часу з необхідності — це дає змогу винаходити системи автоматизації технологічних процесів на принципово новій основі.

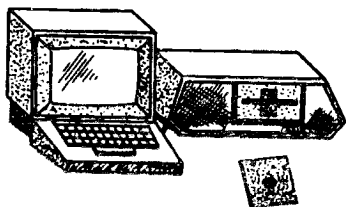


Рис. В.20



Рис. В.21

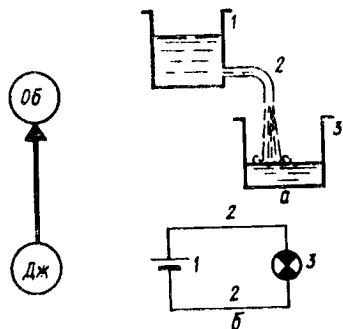


Рис. В.22

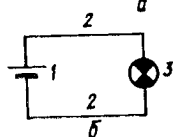


Рис. В.23

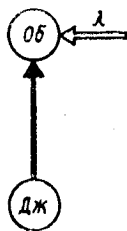


Рис. В.24

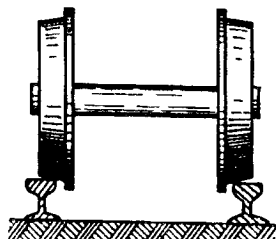


Рис. В.25

**Основи автоматизації технологічних процесів.** Будь-який складний технологічний процес можна розчленувати на прості, які зводяться до перенесення або перетворення енергії чи речовини. У загальному вигляді схему простого процесу зображено на рис. В.22 (Об — об'єкт технологічного процесу; Дж — джерело енергії або речовини, з'єднані лінією передачі).

Приклади простих процесів наведено на рис. В.23 (а — гідравлічний, б — електричний процеси, 1 — джерело, 2 — лінія передачі, 3 — об'єкт).

Для кожного процесу треба сформулювати точну вимогу щодо його виконання. Сукупність правил, що однозначно вказують, як і в якій послідовності слід виконувати окремі технологічні операції з метою вирішення загального завдання, має назву *алгоритму*. Цей термін походить від імені математика й астронома ал-Хорезмі Мухаммеда бен Муса, походженням із м. Хорезма, який у 825 р. сформулював основні правила виконання чотирьох арифметичних дій для багатозначних чисел; при цьому він запровадив позиційний запис цих чисел, використовуючи тільки десять символів (щоправда, записуючи їх справа наліво за арабською писемністю). Ці правила почали йменуватися *алгоритмами*, пізніше це поняття набуло ширшого смислу.

У сучасному житті ми повсякденно зустрічаємося з усілякими інструкціями, правилами поведінки, рецептами тощо — а це все алгоритми!

Розглянемо, наприклад, алгоритм користування домашнім телефоном:

1. Зняти трубку.
2. Почувши безперервний сигнал, набрати потрібний номер.
3. При протяжних гудках низького тону чекати відповіді абонента.
4. При коротких гудках високого тону покласти трубку, потім перейти до операції 1.

Кожний з цих простих процесів можна поділити на ще простіші, наприклад:

- 1.1. Зняти трубку.
- 1.2. Прикласти трубку до вуха.
- 1.3. Чекати звукового сигналу.

У технологічних процесах на об'єкт впливає навколишнє середовище. Цей вплив називають *збурювальним*, оскільки звичайно заважає реалізації заданого алгоритму ( $\lambda$  на рис. В.24). Наприклад, при розрядженні акумулятора  $I$  (рис. В.23) світловипромінювання лампи  $З$  погіршується.

Існують такі об'єкти, внутрішні властивості яких забезпечують заданий перебіг технологічного процесу навіть при збурювальних впливах. Прикладом такого об'єкта може бути колісна пара рейкового транспорту (рис. В.25): якщо, рухаючись, колісна пара під впливом раптового поштовху зміщується, припустимо, праворуч, то, завдяки конусності зовнішніх частин коліс, коло котіння правого колеса стане більшим, ніж лівого. Тому при кожному оберті колісної пари праве колесо пройде більший шлях, ніж ліве, і тоді колісна пара поверне ліворуч. Тепер довжина кола котіння лівого колеса може стати більшою, ніж правого, і колісна пара зверне праворуч. Такі поперечні переміщення відбуваються при русі колісної пари по рейках безперервно, що особливо помітно в причіпному вагоні трамвая та в останніх вагонах залізничного состава.

Наведемо ще один приклад — стабілізація електричного струму за допомогою баретера. Баретер являє собою залізний дріт, що міститься у скляному балоні з воднем. При підвищенні напруги починає зростати струм у колі, що збільшує підігрів залізного дроту в баретері, зростання опору. Це обмежує дальше зростання струму в колі. Таку стабілізацію струму баретер здійснює в певних межах напруги.

На жаль, таких об'єктів, внутрішні властивості яких гарантують реалізацію заданого алгоритму технологічного процесу при збурювальних впливах, дуже мало; в усіх же інших об'єктах, що позбавлені цього, збурювальні впливи порушують виконання заданого алгоритму, тому доводиться іззовні регулювати потік енергії або речовини, що надходить від джерела до об'єкта, тобто керувати процесом. Наведемо кілька прикладів такого керування (рис. В. 26:  $a$  — для керування надходженням рідини від джерела  $I$  до об'єкта  $4$  на лінії передачі  $З$  встановлюється вентиль  $2$  (літера  $H$  показує, що даний вентиль керується вручну);  $b$  — для вмикання й вимикання освітлювальної лампи слугує вимикач  $2$ ;  $v$  — для плавної зміни розжарення лампи використовується реостат  $2$ ).

Керування буває *розривним* (процес змінюється стрибкоподібно) (див. рис. В.26,  $b$ ) або *плавним* (див. рис. В.26,  $v$ ).

Розглянемо, як здійснюється керування при різних способах виробництва.

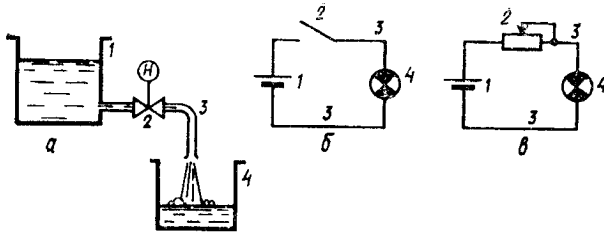


Рис. В.26

У всякому трудовому процесі можна розрізнити три основні складові:

- 1) знаряддя, за допомогою якого здійснюється необхідний вплив на предмет праці (*технологічна складова*);
- 2) джерело енергії для виконання роботи (*енергетична складова*);
- 3) систему керування робочим процесом, яка здійснює доцільну координацію використання знарядь виробництва і джерела енергії (*управлінська складова*).

На первісній стадії праця була ручна: своїми м'язами людина надавала рух спочатку ціпку і кам'яній сокирі, стрілі й спису, а потім і складнішим знаряддям. На жаль, багато важкої ручної праці збереглося на нашому виробництві й досі.

При ручній праці (рис. В.27) складові трудового процесу мають такий вигляд:

- 1) знаряддями виробництва служать більш або менш складні інструменти та пристрої;
- 2) джерелом енергії є м'язова сила людини;
- 3) керування трудовим процесом виконує, природно, сама людина.

Проте фізична сила людини занадто мала для виконання багатьох робіт, важливих для її існування. Тому людина почала пошук більш потужних джерел енергії для своєї трудової діяльності. Спочатку таким джерелом була м'язова сила приручених тварин, згодом люди навчилися використовувати й енергію сил природи — вітру й води, потім пари, електрики, а відтак і атомну, геотермічну та інші види енергії. Для того щоб енергію сил природи використати для приведення в дію якогось знаряддя виробництва, доводилося створювати цілі сукупності машин і механізмів, до яких входили як енергетичні машини (що перетворюють один вид енергії

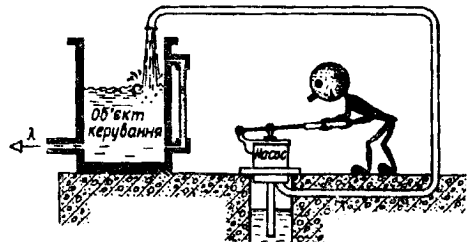


Рис. В.27

на інший), так і технологічні (які забезпечують необхідні зміни стану, форми, властивості або розташування у просторі об'єктів праці). Такий спосіб виробництва називається *машинним*.

На нижчій стадії машинного способу виробництва керування залишається за людиною — називається вона *механізацією* виробництва (рис. В.28); термін походить від грецького μηχανη — мистецтво побудови машин.

Вищою стадією машинного способу виробництва є *автоматизація*, при якій і керування здійснюється за допомогою машин, без прямої участі людини (рис. В.29); термін походить від грецького αὐτομάτος — самодіючий.

Реалізація складових трудового процесу (*T* — технологічної, *E* — енергетичної, *У* — управлінської) ілюструється рис. В.30.

Таким чином, автоматика — це галузь науки й техніки, яка охоплює сукупність керуючих пристроїв, що дають змогу здійснювати трудові процеси без прямої і безперервної участі людини. Автоматизація ж являє собою практичне застосування автоматики для вирішення конкретних завдань управління технологічними процесами.

Слід зазначити, що перші два терміни (ручна праця, механізація) не зовсім коректні: зміст їх фактично ширший, ніж це впливає з буквального тлумачення термінів. Так, до ручної праці слід віднести всі трудові процеси, де джерелом енергії є м'язова сила людини, хоч не завжди це саме сила рук. Та й сучасна механізація здійснюється не тільки механічними засобами, застосовуються також гідравлічні, пневматичні, електричні та інші системи.

У наш час термін *автоматика*, навпаки, трактується іноді занадто широко; автоматичним називають не тільки те, що працює без прямої керуючої участі людини, а й такі пристрої, які тільки здаються самодіючими. Наприклад, вважається, що в електротранспорті двері зачиняються автоматично; насправді автоматики тут нема, це механізація — водій тисне на кнопку, вмикається пневмопривод, і двері зачиняються; але оскільки для пасажирів дії водія непомітні, їм здається, що двері відчиняються й зачиняються самі собою. Також і автомобіль (машина, якою керує людина, тобто механізований транспортний засіб) називається так тому, що він теж здається самодіючим: коли німецький винахідник Готліб Даймлер побудував свій візок, який їхав по дорозі без коня попереду, — звичайно такий візок назвали автоматичним.

Можна навести й інші приклади занадто довільного тлумачення терміна автоматичний (наприклад, автомат Калашнікова, телефон АТС та ін.).

Системи, які керують потоком енергії або речовини, що надходить від джерела до об'єкта керування (так звані локальні системи управління), можна відобразити узагальненою структурою, яка

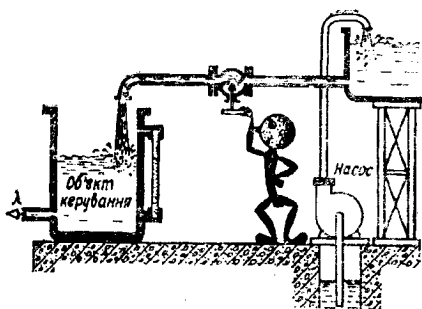


Рис. В.28

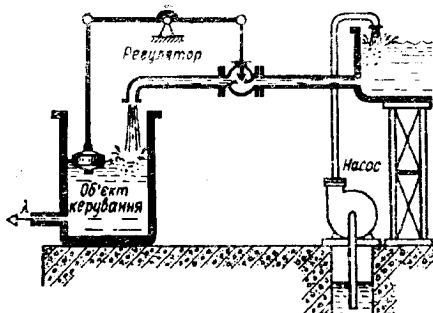


Рис. В.29

		Спосіб виробництва		
		Ручна праця	Машинний	
			мех.	авт.
Складові	Т			
	Е			
	У			

Рис. В.30

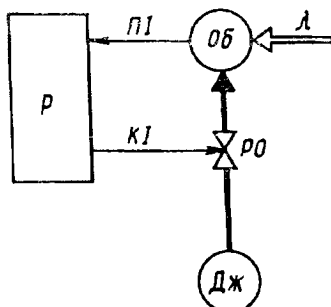


Рис. В.31

показана на рис.В.31 (Р — розпорядча ланка; ПІ — повідмча інформація про стан об'єкта (за зворотним зв'язком); Об — об'єкт керування;  $\lambda$  — збудувальний вплив; КІ — керуюча інформація, що має на меті забезпечити заданий перебіг технологічного процесу (за прямим зв'язком); РО — регулюючий орган; Дж — джерело).

Інформація — це зміст будь-якого повідомлення про факти, події. Матеріальним носієм інформації є сигнал — фізичне явище, зв'язане з певним фактом або подією, тобто воно несе інформацію про них. Сигнали передаються по каналах зв'язку в тому чи іншому вигляді. Прикладами їх є наявність або відсутність струму в електричному колі, відхилення частоти змінного струму, зміна тиску повітря в трубопроводі, механічне переміщення фізичного тіла, зміна відносного розташування темних і світлих плям (візуальне сприйняття літер, цифр, рисунків), зміна частоти й гучності звуку (слухове сприйняття мовлення, музики, акустичних сигналів) та ін.

Структурна схема на рис. В.31 дає підставу для висновку, що фізичні явища можуть розглядатися з двох точок зору: матеріально-енергетичної (перенесення енергії або речовини) та інформаційної (передача сигналів).



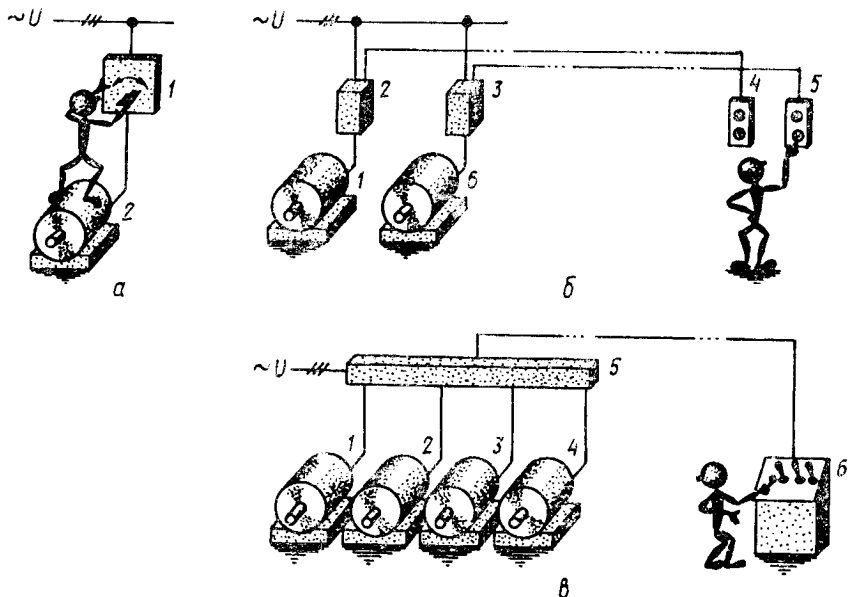


Рис. В.32

Напрямок передавання інформації не завжди збігається з напрямком перенесення енергії або речовини.

Залежно від відносного розташування розпорядчої ланки та об'єкта керування зв'язок між ними може здійснюватися трьома способами: місцевим, дистанційним та телемеханічним (рис. В.32).

Якщо розпорядча ланка розташована безпосередньо поряд з об'єктом керування, то використовується місцевий спосіб зв'язку (див. рис. В.32, а). Характерним при цьому є суміщення енергетичного та інформаційного каналів зв'язку (керування електродвигуном 2 здійснюється поворотом рукоятки вимикача на щитку 1).

Якщо розпорядча ланка віддалена від об'єкта керування на деяку відстань, застосовується дистанційний спосіб зв'язку (див. рис. В.32, б). При цьому енергетичний та інформаційний канали зв'язку відокремлені один від одного, але для кожного об'єкта потрібен окремий інформаційний канал зв'язку (1 та 6 — електродвигуни, 2, 3 — вимикачі з електромагнітним приводом, 4, 5 — кнопки керування).

При значній кількості об'єктів керування, до того ж віддалених від розпорядчої ланки на велику відстань, не вигідно використовувати багато інформаційних каналів зв'язку. У цьому разі можна застосувати телемеханічний зв'язок, при якому керуючі сигнали формуються таким чином, щоб по одному й тому ж каналу мож-

на було б передавати інформацію будь-якому з множини об'єктів. Наприклад, у системі АТС кожний телефон зв'язаний зі станцією одним каналом зв'язку, але якщо по ньому посилати ту чи іншу кількість електричних імпульсів, можна здійснити зв'язок з будь-яким іншим абонентом цієї телефонної мережі (на рис. В.32, *в* з пульта *б* керуючі сигнали передаються на так званий дешифратор *5*, який забезпечує передачу команди певному електродвигуну *1—4*).

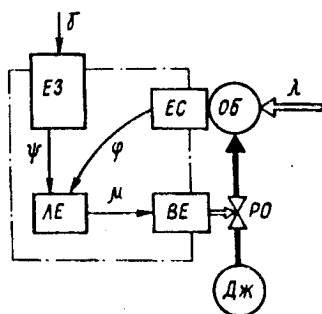


Рис. В.33

Розпорядча ланка локальної системи управління складається з чотирьох елементів, у кожному з яких здійснюється перетворення інформації за допомогою тих чи інших пристроїв, названих *інформаційними перетворювачами* (рис. В.33):

ЕС — елемент, який сприймає інформацію про стан об'єкта і перетворює її у сигнал  $\varphi$  форми, найдоцільнішої у даній системі керування (в системах з ручним керуванням — для візуального сприймання людиною, в автоматичних системах — найчастіше електричний або пневматичний сигнал);

ЕЗ — елемент, що задає інформацію  $\Psi$  про те, яким має бути стан об'єкта;

ЛЕ — логічний елемент, що порівнює сигнали  $\varphi$  та  $\Psi$  і виробляє розпорядчий сигнал  $\mu$ , який вказує, як треба вплинути на об'єкт для забезпечення заданого алгоритму його роботи (в основі ЛЕ лежить логічний принцип: ЯКЩО..., ТО..., ІНАКШЕ...);

ВЕ — виконавчий елемент, який на основі сигналу  $\mu$  безпосередньо впливає на регулюючий орган, встановлюючи за його допомогою необхідний потік енергії або речовини, що надходить від джерела до об'єкта.

Необхідне завдання в ЕЗ вводиться за допомогою уставки  $\gamma$ .

Зв'язки між елементами розпорядчої ланки можуть здійснюватись або з участю людини, або автоматично. Існують системи керування, у яких частина зв'язків автоматична, решта — з участю людини.

Розглянемо приклад такої локальної системи керування для технологічного об'єкта — сушильної камери з паровим обігрівом; ця система повинна забезпечити підтримання деякого заданого рівня температури в сушильній камері (рис. В.34).

Для вимірювання температури об'єкта використано термопару, різниця потенціалів  $\varphi$  на виході якої залежить від температури в камері (цей термоелектричний перетворювач відіграє роль ЕС розпорядчої ланки).

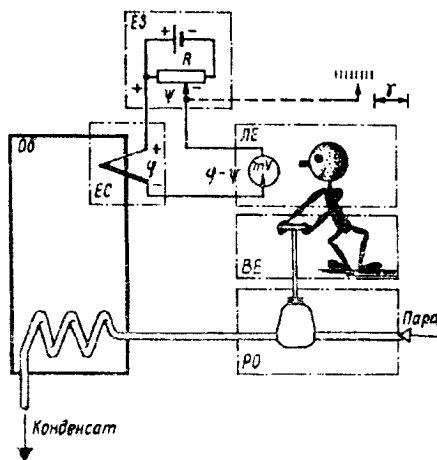


Рис. В.34

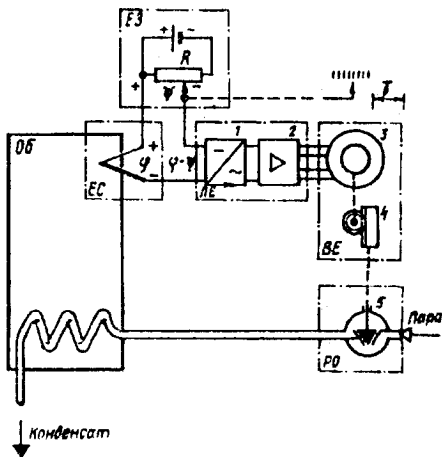


Рис. В.35

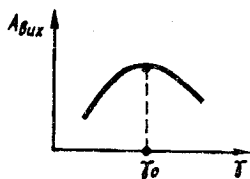


Рис. В.36

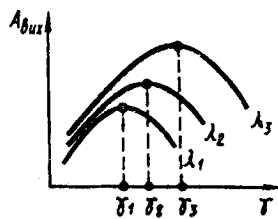


Рис. В.37

Сигнал  $\varphi$  порівнюється з напругою  $\Psi$ , яка знімається з подільника  $R$ ; величина  $\Psi$  встановлюється залежно від значення температури, яку з точки зору технологічної доцільності потрібно підтримувати в сушильній камері (подільник напруги  $R$  для даної системи керування є елементом ЕЗ; показник положення повзуна подільника — це уставка  $\gamma$ ).

Логічним елементом ЛЕ, що здійснює порівняння  $\varphi$  та  $\Psi$  у цій системі керування, є мілівольтметр  $mV$  з нулем посередині шкали, який вимірює різницю  $\varphi - \Psi$ . Якщо  $\varphi = \Psi$ , то мілівольтметр показує нуль; при  $\varphi \neq \Psi$  стрілка приладу відхиляється у той чи інший бік від нуля. Положення стрілки мілівольтметра допомагає оператору правильно виробити розпорядчий сигнал  $\mu$  — збільшити чи зменшити подавання пари у змійовик з метою підвищення чи зниження температури в технологічному об'єкті (елемент ВЕ та регулюючий орган РО).

Звичайно, ефективнішими є системи керування, всі зв'язки у яких здійснюються автоматично — локальні системи автоматичного

управління (САУ). Так можна, наприклад, здійснити автоматичне регулювання температури в сушильній камері (рис. В.35).

Як і в попередній системі, вимірювання температури здійснює термопара; напруга  $\varphi$  на виході термопари порівнюється з напругою  $\Psi$ , що знімається з подільника  $R$ . Різниця  $\varphi - \Psi$  подається на вхід перетворювача сигналів постійного струму у сигнали змінного  $I$ , підсилюється за допомогою електронного підсилювача 2 і потрапляє в обмотку статора електродвигуна 3, який через зубчасту рейкову передачу 4 керує вентилем 5, що регулює подавання пари в змійовик: якщо  $\varphi > \Psi$ , то обертання ротора електродвигуна приводить до зменшення подачі пари; якщо ж  $\varphi < \Psi$ , то, навпаки, подавання пари збільшується; при  $\varphi = \Psi$  температура в камері нормальна, й подача пари залишається незмінною.

Як було сказано, завдання в елемент ЕЗ, що задає інформацію  $\Psi$ , вводиться за допомогою уставки  $\gamma$ . Значення  $\gamma$  встановлюється таким чином, щоб забезпечити оптимальне значення деяких важливих вихідних показників керованого технологічного процесу (наприклад, найвищу якість продукції, максимальний коефіцієнт корисної дії, мінімум витрат та ін). Якщо залежність такого показника  $A_{\text{вих}}$  від значення уставки  $\gamma$  однозначна й не залежить від збурювальних впливів  $\lambda$ , то вибір значення уставки  $\gamma = \gamma_0$  здійснюється просто (рис. В.36). Якщо ж при різних  $\lambda$  залежності  $A_{\text{вих}} = f(\gamma)$  неоднакові (наприклад, як на рис. В.37), то при зміні  $\lambda$  треба змінювати й значення уставки (при  $\lambda_1$  вона повинна бути  $\gamma = \gamma_1$ , при  $\lambda_2$  відповідно  $\gamma = \gamma_2$  і т. д.), а з цим людині справитися важко. Замість людини потрібна електронна обчислювальна машина для аналізу значення  $\lambda$  і  $A_{\text{вих}}$  й визначення величини уставки  $\gamma$  і введення її в ЕЗ. Такі САУ називаються *кібернетичними*.

У машинах або апаратах звичайно поєднуються деякі локальні системи керування — як автоматичні, так і такі, що функціонують з участю людини. Ступінь автоматизації машини чи апарата визначається зайнятістю в її роботі людини.

За ступенем автоматизації машини та апарати можна поділити на три групи:

1) машина або апарат з елементами автоматизму — якщо більшість систем керування, що входять до її складу, вимагають участі людини, і тільки окремі системи — автоматичні (наприклад, автомобіль, швацька машина та ін.);

2) напівавтомат — машина або апарат, що в основному діють автоматично, але періодично вимагають участі людини, найчастіше — на початку технологічного процесу (наприклад, ліфт із кнопковим керуванням, торговельні автомати та ін.);

3) автомат — машина або апарат, що працює без прямої участі людини (наприклад, автомат для виготовлення болтів або гайок; автомат для складання шарикопідшипників; автомат для пришивання гудзиків та ін.).

З метою здійснення технологічного процесу автоматизовані машини або апарати поєднуються у більш-менш складні технологічні комплекси.

Як відомо, технологічні процеси бувають *безперервні* (наприклад, виробництво електроенергії) та *дискретні* (складання електронних приладів). Безперервні технологічні процеси автоматизувати легше, ніж дискретні, де продукція складається з множини деталей та вузлів.

Деякі технологічні процеси легкої промисловості належать до безперервних (наприклад, ткацьке виробництво, вироблення трикотажного полотна та ін.). При автоматизації цих процесів на всіх їх етапах впроваджуються локальні САУ, які відтак поєднуються в єдину систему.

Проте більшість технологічних процесів легкої промисловості мають дискретний характер (наприклад, пошиття швацьких виробів, виготовлення взуття та інші процеси, де продукція складається з деталей). Автоматизація цих процесів вимагає ритмічної роботи з почерговим обробленням виробу; на кожній операції слід використовувати машини-автомати, а також автоматизувати допоміжні операції, транспортування та встановлення деталей (тобто створювати автоматичну лінію).

Основним напрямом розвитку автоматизації сьогодні як для безперервних, так і для дискретних процесів є автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ, ТП), що становлять людино-машинні системи, які поєднують усі локальні САУ в загальну систему (а іноді й замінюють усі локальні САУ) з метою оптимального керування складними технологічними процесами, а також для забезпечення суміжних і вищих за ієрархією систем керування необхідною інформацією. У такій автоматизованій системі людина (оператор) бере участь у координації роботи окремих САУ та у виробленні найважливіших керівних рішень (зниження собівартості продукції, зменшення втрат сировини та енергії, підвищення продуктивності праці та якості продукції, поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу, дотримання вимог екології тощо).

Центральну роль в АСУ ТП відіграють мікропроцесорні пристрої; фактичне підтримування режиму технологічного процесу в більшості АСУ ТП здійснюють локальні САУ окремих параметрів, де все частіше поряд із технічними засобами традиційної автоматички використовуються як логічний елемент також мікропроцесорні пристрої, зокрема мікроконтролери.

Широке впровадження мікропроцесорних пристроїв у локальних САУ привело до якісних змін у структурі АСУ ТП. З'явилася можливість з метою керування різними технологічними операціями пристосувати недорогі універсальні пристрої, які досить просто переналагоджуються програмним способом. У розвитку сучасної

автоматики це відіграє таку ж роль, яку в машинобудуванні відіграло впровадження електродвигунів замість механічної трансмісії.

Сучасні АСУ ТП бувають трьох рівнів:

1) організація централізованого контролю технологічних параметрів основних процесів у системі, але оптимальний вибір уставок для всіх локальних САУ оператор здійснює самостійно;

2) організація роботи системи як порадника оператору щодо оптимального вибору управлінських впливів для локальних САУ; оператор приймає управлінські рішення з врахуванням цих порад або самостійно, на основі власного досвіду;

3) організація супервізорного управління, яке забезпечує вибір і безпосередню реалізацію оптимального керування (необхідну зміну уставок локальних САУ); оператор наглядає за роботою системи, його втручання потрібне лише при виникненні непередбачених ситуацій.

Подальшим кроком у розвитку автоматизації технологічних процесів є безпосереднє цифрове керування, при якому локальні САУ окремих параметрів взагалі виключаються із системи, а управлінські сигнали на всі виконавчі елементи надходять безпосередньо від центрального мікропроцесорного пристрою. У цих системах потреба у втручанні оператора може виникнути лише в аварійних ситуаціях, тому такі системи можна віднести не до автоматизованих (АСУ ТП), а до автоматичних, що діють без втручання оператора.

Ефективність автоматизації залежить від технології виробництва.

Конструкція виробу і технологія його виготовлення, як правило, залежать від способу виробництва — для ручного способу виробництва потрібна одна технологія, для машинного найкращі результати може дати інша.

Загальними принципами зміни технології при переході від ручного способу виробництва до машинного є:

а) перехід від нижчих методів обробки до вищих (обробка «точкою» → «лінією» → «поверхнею» → «об'ємом»), наприклад, від ниткового способу з'єднання швацьких деталей (обробка «точкою») до клейового (обробка «лінією»);

б) перехід від механічних процесів до фізико-технічних перетворень матеріалів у поєднанні з тиском; наприклад, розчинення натуральної шкіри і формування суцільних взуттєвих виробів видавлюванням (обробка «об'ємом») та ін.

Таку зміну технології належало здійснити ще при переході від ручної праці до нижчої стадії машинного способу виробництва — механізації; проте консервативність конструкторської думки призводила до того, що в більшості випадків створювалися машини, які імітували робочі рухи, характерні для ручної праці. Це стосується технології у швацькому виробництві (рис. В.38: а — стародав-

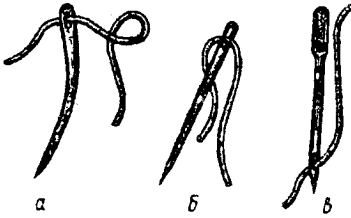


Рис. В.38

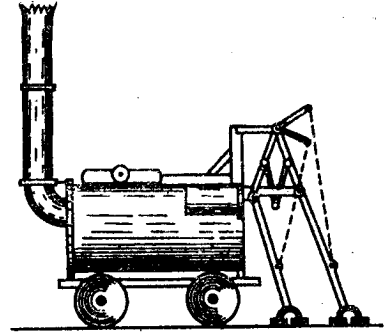


Рис. В.39

ня голка, виготовлена з риб'ячої кістки; б — сучасна голка для ручного шиття; в — машинна голка); технологія у сучасному ткацтві принципово не відрізняється від технології, що існувала у Стародавньому Єгипті.

Яскравий приклад подібної данини традиціям відомий і з історії транспорту: у 1813 р. Брунтон (Англія) побудував один із перших паровозів і згідно з «кінською технологією», що існувала тоді, винахідник прибудував до машини механічні «ноги», які по чергово упирались у шляхове полотно й штовхали цю недоладну споруду вперед (рис. В.39). Такий паровоз проіснував недовго (вибухнув котел), проте у 1824 р. Гордон (теж в Англії) здійснив ще одну спробу побудувати паровоз — і знову з «ногами». З цього приводу Герберт Уелс сказав, що перед кожним паровозом біжить тинь коня. Створення нової технології означає визволення від тіні коня.

Перші автомобілі теж не були вільні від «кінської технології»: за своїм загальним виглядом вони мало чим відрізнялися від прольоток, у які запрягали коня. «Кінська технологія», на жаль, ще досить поширена в легкій промисловості, що перешкоджає досягненню високої ефективності автоматизації.

Процес автоматизації породжує багато проблем, а все ж дійсність випереджає мрію. М. Г. Чернишевський так описував життя людей майбутнього: «Майже все роблять за них машини — і жнуть, і в'яжуть снопи, і відвозять їх, а люди тільки керують машинами...» У своїх мріях, як бачимо, він не йшов далі механізації виробництва.

Сучасна автоматика — це багатогалузева складна наука, і одній людині глибоко вивчити усі її напрями практично неможливо. Але перспективи застосування автоматики в усіх сферах народного господарства (особливо з використанням мікропроцесорної техніки) настільки грандіозні, що можна повірити мудрості давньогрецького філософа Сократа: «Те, що я зрозумів, прекрасне, з чого я роблю висновок, що решта, чого я не зрозумів, теж прекрасне»!.

## Глава 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
ІНФОРМАЦІЇ§ 1.1. Класифікація і характеристики перетворювачів  
інформації

У кожному з елементів розпорядчої ланки локальної системи керування (ЕС, ЕЗ, ЛЕ або ВЕ на рис. В.33) здійснюється перетворення інформації за допомогою тих чи інших перетворювачів.

У перетворювачах інформації фізичний сигнал одного виду — вхідний параметр  $x$  (рис. 1.1, *a*) — перетворюється на фізичний сигнал іншого виду — вихідний параметр  $y$ , причому вихідний сигнал функціонально пов'язаний із вхідним.

Прикладом перетворювача інформації може бути термоелектроперетворювач (термопара) (рис. 1.2, *a*), який перетворює температуру (вхідний сигнал  $x = t^\circ$ ) на термоелектрорушійну силу (вихідний параметр  $y = e_t$ ); як відомо,  $e_t$  залежить від  $t^\circ$ .

За характером роботи перетворювачі бувають *розривної дії*, або *дискретні* (наприклад, контакт 4 на рис. В.26, *b*), та *плавної дії* (наприклад, реостат 2 на рис. В.26, *в*).

За структурою перетворювачі поділяються на прості та диференціальні.

У *простому перетворювачі* (див. рис. 1.1, *a*) є один вхідний  $x$  і один вихідний  $y$  параметр; приклад термоелектроперетворювання наведено на рис. 1.2, *a*.

Більш складний *диференціальний перетворювач*: одному вхідному параметру  $x$  у ньому відповідають два однорідних вихідних параметри  $y_1$  та  $y_2$  (див. рис. 1.1, *b*). Диференціальний перетворювач немов складається з двох однотипних простих, з'єднаних між собою таким чином, що будь-яка зміна вхідного параметра спричиняє, як правило, однакові за величиною, але різні за знаком прирости вихідних параметрів: якщо один із них збільшується, то інший відповідно зменшується. Прикладом диференціального перетворювача може бути реостат (див. рис. 1.2, *b*): вхідним параметром є лінійне переміщення  $l$  рухомого контакту, вихідними — дві напруги  $U_1$  та  $U_2$ ; якщо повзун переміщується, припустимо, вгору, то напруга  $U_1$  при цьому зменшується, а  $U_2$  відповідно збільшується.

За видом вихідної величини перетворювачі інформації поділяються на: 1) перетворювачі з *механічним переміщенням на виході*;



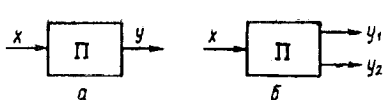


Рис. 1.1

2) на виході яких — тиск газу або рідини; 3) з термічною величиною на виході; 4) з електричною величиною.

Залежно від виду вхідної величини бувають такі перетворювачі: зусилля; механічного переміщення; рівня рідини; швидкості обертання; тиску рідини або газу; витрати рідини або газу; температури; вологості тощо.

Робота перетворювача описується двома основними характеристиками: статичною та динамічною.

Статичною характеристикою перетворювача називається залежність вихідної величини від вхідної ( $y=f(x)$ ), якщо вхідна величина змінюється настільки повільно, що в кожний момент часу її можна вважати незмінною.

Статична характеристика перетворювача плавної дії часто має певний гістерезис: зміни вихідної величини  $y$  при збільшенні вхідного параметра  $x$  не збігаються зі змінами  $y$  при зменшенні  $x$ . Приблизний вигляд висхідної та низхідної віток статичної характеристики (штрихові криві) деякого перетворювача плавної дії показано на рис. 1.3. Великий гістерезис у перетворювачах інформації неприпустимий. Невеликим гістерезисом можна знехтувати, вважаючи статичною характеристикою певну усереднену криву (рис. 1.4). Крутість статичної характеристики називається чутливістю  $S$  перетворювача. Для ділянки  $AB$  статичної характеристики чутливість

$$S = \Delta y / \Delta x. \quad (1.1)$$

Статична характеристика перетворювача розривної дії має інший вигляд, наприклад, як на рис. 1.5: при певному значенні вхідної величини  $x=x_{\text{спр}}$  стрибкоподібно збільшується вихідна величина (спрацьовування), а при  $x=x_{\text{відп}}$  відбувається зворотний процес (відпускання).

До статичних характеристик перетворювачів інформації ставляться певні вимоги: однозначність (мінімальний гістерезис); стабільність у часі; ідентичність для однотипних перетворювачів; для перетворювачів плавної дії — по можливості лінійність при високій чутливості.

Зміна величини  $y$  на виході перетворювача залежно від змін вхідної величини  $x$  відбувається, як правило, не миттєво, а з деяким запізненням, яке зу-

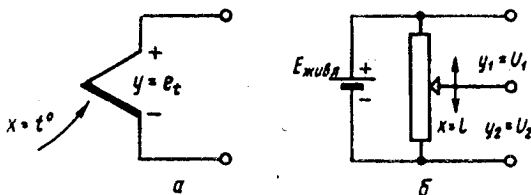


Рис. 1.2

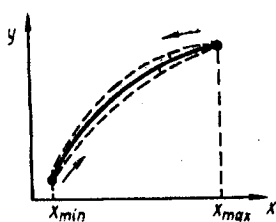


Рис. 1.3

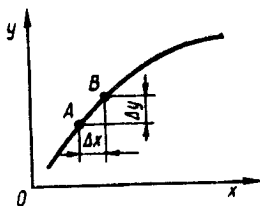


Рис. 1.4

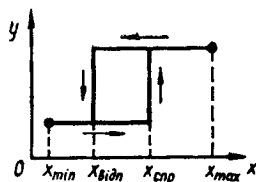


Рис. 1.5

мовлюється часом перебігу фізичних процесів у самому перетворювачі. Ця залежність  $y=f(t)$  становить *динамічну характеристику* перетворювача. Один із способів вираження динамічної характеристики перетворювача плавної дії полягає в тому, що аналізується зміна вихідної величини  $y$  у часі після того, як у деякий момент часу вхідна величина  $x$  зазнає стрибкоподібної зміни від початкового значення  $x_p$  до кінцевого  $x_k$ .

Диференціальне рівняння, що описує динамічні властивості перетворювачів інформації, має вигляд

$$a_2 \frac{d^2}{dt^2} y(t) + a_1 \frac{d}{dt} y(t) + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (1.2)$$

де  $y(t)$  та  $x(t)$  означають, що величини  $y$  та  $x$  змінюються у часі  $t$ . Усі члени цього рівняння слід поділити на  $a_0$ , і тоді, позначивши

$$\frac{a_2}{a_0} = T_2^2; \quad \frac{a_1}{a_0} = T_1; \quad \frac{b_0}{a_0} = K,$$

дістанемо

$$T_2^2 \frac{d^2}{dt^2} y(t) + T_1 \frac{d}{dt} y(t) + y(t) = Kx(t) \quad (1.3)$$

( $T_2$  і  $T_1$  — сталі часу;  $K$  — коефіцієнт передачі).

Якщо для деякого перетворювача  $T_2=T_1=0$ , то вихідна величина змінюється згідно з законом

$$y(t) = Kx(t). \quad (1.4)$$

Такий перетворювач становить просту безінерційну (ідеальну) ланку: при стрибкоподібних змінах  $x(t)$  вихідна величина  $y(t)$  теж змінюється стрибкоподібно.

Стрибкоподібну зміну  $x(t)$  в момент  $\theta$  від початкового значення  $x_p$  до кінцевого  $x_k$  показано на рис. 1.6, а, статичну характеристику деякого перетворювача — на рис. 1.6, б; зміну величини  $y(t)$  на виході цього перетворювача, якщо він становить просту ідеальну ланку, — на рис. 1.6, в.

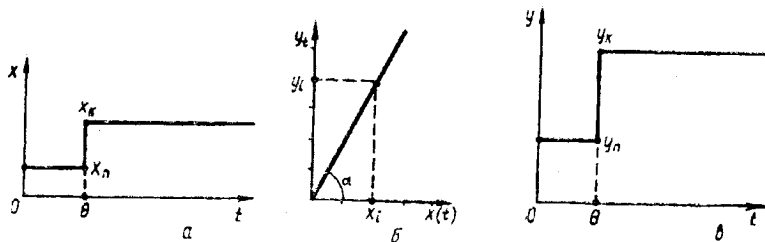


Рис. 1.6

Якщо  $T_2=0$ , але  $T_1 \neq 0$ , то розв'язок диференціального рівняння за умови стрибкоподібної зміни  $x(t)$  від  $x_n$  до  $x_k$  у момент часу  $\theta$  буде таким:

$$y = y_n + (y_k - y_n) (1 - e^{-(t-\theta)/T_1}), \quad (1.5)$$

де  $y_n = Kx_n$  — початкове значення  $y(t)$ ;  $y_k = Kx_k$  — кінцеве значення  $y(t)$ ;  $e$  — основа натуральних логарифмів;  $t$  — час.

Цей перетворювач є простою аперіодичною ланкою першого порядку (рис. 1.7, а).

Якщо в рівнянні (1.3) жоден коефіцієнт не дорівнює нулю, то такий перетворювач є ланкою другого порядку; проте розв'язок цього рівняння залежить від співвідношення між  $T_2$  та  $T_1$ .

При  $T_1/T_2 \geq 2$

$$y = y_n + (y_k - y_n) \left[ 1 - \frac{1}{T' - T''} (T' e^{-(t-\theta)/T'} - T'' e^{-(t-\theta)/T''}) \right], \quad (1.6)$$

де

$$T' = \frac{2T_2^2}{T_1 - \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}};$$

$$T'' = \frac{2T_2^2}{T_1 + \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}.$$

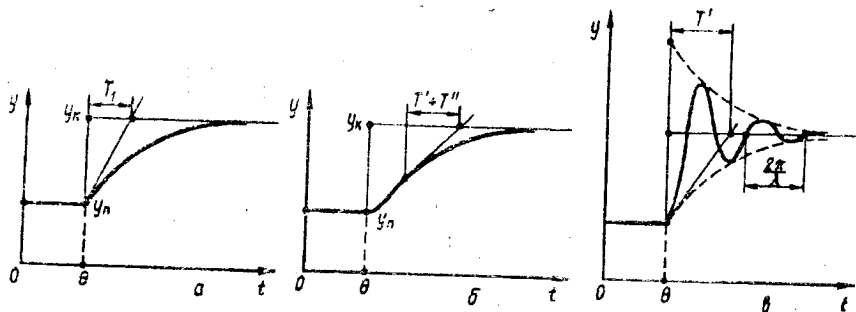


Рис. 1.7

Такий перетворювач становить просту аперіодичну ланку другого порядку (рис. 1.7, б).

Якщо ж  $T_1/T_2 < 2$ , то

$$y = y_n + (y_k - y_n) \{ 1 - e^{-(t-\theta)/T'} [\cos \lambda(t - \theta) + \frac{1}{T'\lambda} \sin \lambda(t - \theta)] \}, \quad (1.7)$$

де  $\lambda$  — кутова частота коливань,

$$\lambda = (\sqrt{4T_2^2 - T_1^2}) / 2T_2^2;$$

$T'$  — стала часу обвідної експоненти,

$$T' = 2T_2^2 / T_1.$$

Цей перетворювач — проста коливальна ланка другого порядку із затухаючим перехідним процесом (рис. 1.7, в).

Основна вимога до динамічних характеристик перетворювачів — досягнення якомога меншої тривалості перехідного процесу.

## § 1.2. Перетворювачі, в яких вихідним сигналом є механічне переміщення (лінійне, обертальне)

Перетворювачі з механічним переміщенням на виході — це найдавніші пристрої, створені для вимірювання фізичних величин, що недоступні для безпосереднього сприйняття органами почуттів людини, наприклад, сонячний годинник, пісковий годинник, клецидра (див. рис. В.1), електровимірювальний прилад Ріхмана (див. рис. В.9), електромагнітний прилад (див. рис. В.12) тощо.

*Відцентровий перетворювач* (рис. 1.8) використовується для одержання лінійного переміщення  $y=l$  залежно від частоти обертання  $x=n$  вала. При обертанні вала 1 тягарі 3 під дією відцентрових сил, прикладених до важелів 2, розходяться врізнобіч, і кільце 4, долаючи опір пружини 5, переміщується вгору, і це переміщення  $l$  буде тим більшим, чим більша частота обертання  $n$  вала, тобто  $l=f(n)$ .

Подібний перетворювач було створено відомим шотландським винахідником Джеймсом Уаттом для своєї парової машини подвійної дії.

*Індукційно-механічний перетворювач* зображено на рис. 1.9. Постійний магніт 3 при обертанні індуктує в мідному або алюмінієвому диску 2 вихрові струми, взаємодія яких з обертовим магнітним полем створює обертальний момент, прикладений до цього диска:

$$M_{об} = k_1 n, \quad (1.8)$$

де  $k_1$  — коефіцієнт, що залежить від матеріалу та розмірів диска,  $n$  — швидкість обертання магніту.

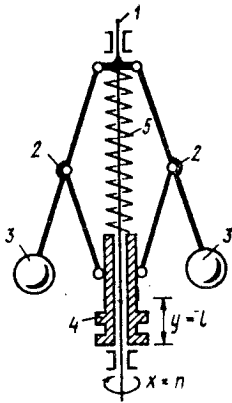


Рис. 1.8

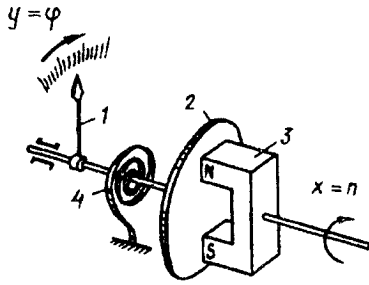


Рис. 1.9

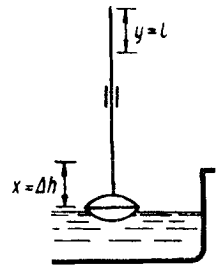


Рис. 1.10

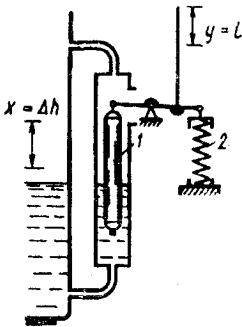


Рис. 1.11

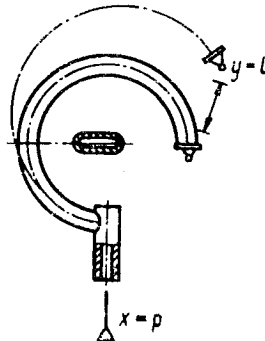


Рис. 1.12

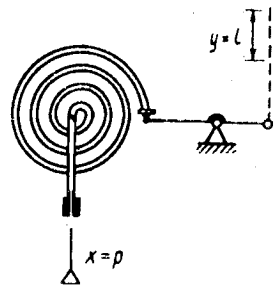


Рис. 1.13

Поворот диска 2 закручує спіральну пружину 4, що створює протидіючий момент

$$M_{\text{пр}} = k_2 \varphi \quad (1.9)$$

( $k_2$  — жорсткість пружини;  $\varphi$  — кут повороту диска).

Усталене відхилення стрілки 1 буде при  $M_{\text{пр}} = M_{\text{об}}$ , звідки

$$\varphi = (k_1/k_2) n, \quad (1.10)$$

тобто кут повороту  $\varphi$  диска лінійно залежить від частоти обертання вала.

Цей перетворювач оснований на використанні так званого «дослідку Араго» (його уперше здійснив французький фізик Домінік Франсуа Араго).

Поплавковий перетворювач (рис. 1.10) забезпечує переміщення штока  $y = l$  при зміні рівня рідини  $x = \Delta h$ . Поплавок виготовляється з матеріалу, густина якого менша, ніж густина рідини. У цьому перетворювачі вихідне переміщення  $l = \Delta h$ .

Буйковий перетворювач (рис. 1.11) відрізняється від поплавкового наявністю пружини 2, яка обмежує вихідне переміщення, тому в цьому перетворювачі  $l$  пропорційне  $\Delta h$ , але  $l \ll \Delta h$ . Буйкові перетворювачі використовуються при значних коливаннях рівня рідини.

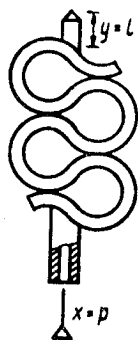


Рис. 1.14

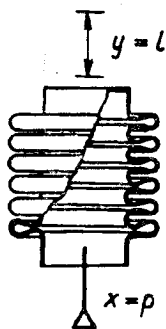


Рис. 1.15

Манометричний трубчастий перетворювач (рис. 1.12) становить зігнуту порожнисту трубку з пружного матеріалу, наприклад фосфористої бронзи. Коли тиск  $x = p$  зростає, трубка частково розгинається, і рух її вільного кінця є вихідним параметром  $y = l$ . Якщо тиск зменшується, то трубка завдяки своїй пружності повертається у початкове положення. При тому самому тиску  $x = p$  переміщення  $y = l$  буде більшим, якщо трубка матиме кілька витків.

На рис. 1.13 показано *спіральний перетворювач*; так званий S-подібний перетворювач, який різниться тим, що вихідне переміщення його прямолінійне — на рис. 1.14.

*Сильфонний перетворювач* (рис. 1.15) — це гофрований металевий стаканчик; переміщення його дна  $y = l$  залежить від тиску газу або рідини  $x = p$  усередині стаканчика.

*Мембранний перетворювач* (рис. 1.16) становить закріплену по периметру еластичну пластинку. Він призначений для перетворення розподіленого зусилля на лінійне переміщення. Якщо тиск  $x = p$  газу або рідини зростає, то мембрана прогинається, і шток переміщується ( $y = l$ ). Найменшу жорсткість мають м'які мембрани, виготовлені з гуми, еластичних пластмас, прогумованої тканини. М'які мембрани, як правило, оснащуються твердим центром (рис. 1.16, а). Металеві мембрани мають дуже велику жорсткість; для її зменшення на мембрані роблять кільцеві гофри (рис. 1.16, б). Мембранний перетворювач можна приєднати до двох різних джерел тиску  $p_1$  і  $p_2$ , тоді прогин мембрани залежатиме від різниці тисків  $p_1 - p_2$ . Такий мембранний перетворювач (рис. 1.17) дістав назву *диференціального* («дифманометр»).

Принцип дії рідинних термометрів (рис. 1.18) базується на зміні об'єму рідини залежно від температури. Рідинний термометр складається з трьох основних частин: балона з термометричною рідиною, капілярної трубки та шкали. Є дві основні конструкції термометрів: паличні та з вкладеною шкалою.

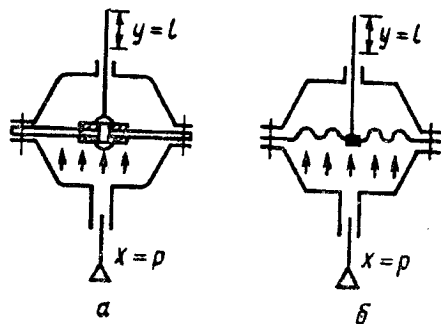


Рис. 1.16

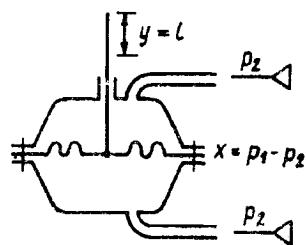


Рис. 1.17

*Паличний термометр* (рис. 1.18, а) складається з термобалона 1, з'єданого з товстостінним капіляром 2. Шкала наноситься на зовнішню поверхню капіляра.

*Термометр з вкладеною шкалою* (рис. 1.18, б) також має термобалон 1, але капіляр 2 в ньому тонкостінний; шкалу 4 нанесено на пластинку з молочного скла, яку встановлено всередині скляного корпуса 3 позаду капіляра. Термометри з вкладеною шкалою менш точні, ніж паличні.

Як термометричну рідину найчастіше використовують ртуть: вона не змочує скло, а її термічний коефіцієнт розширення практично незмінний, тому шкала ртутного термометра рівномірна. Проте ртуть замерзає при температурі  $-38^{\circ}\text{C}$ , тому ртутні термометри застосовуються для вимірювання температур, не нижчих ніж  $-30^{\circ}\text{C}$ . Верхня границя вимірювання температур визначається температурою кипіння ртуті ( $+357^{\circ}\text{C}$  при нормальному атмосферному тиску), але якщо капіляр над ртутью заповнити азотом під тиском кілька десятків атмосфер, то таким термометром можна вимірювати температури до  $+500^{\circ}\text{C}$ .

При необхідності вимірювання температур нижчих  $-30^{\circ}\text{C}$  використовуються органічні термометричні рідини: підфарбований етиловий спирт (до  $-130^{\circ}\text{C}$ ), пентан (до  $-190^{\circ}\text{C}$ ) та ін. Такі термометри менш точні, оскільки спирт або пентан змочує скло, а термічний коефіцієнт їх розширення залежить від температури, тому характеристика спиртових та пентанових термометрів нелінійна. Підфарбований спирт використовується також у дешевих побутових термометрах.

Загальні недоліки всіх рідинних термометрів — їхня крихкість, а також порівняно велика інерційність. З метою запобігання механічним пошкодженням скляні рідинні термометри можна розміщувати у спеціальних захисних оправах (рис. 1.18, в).

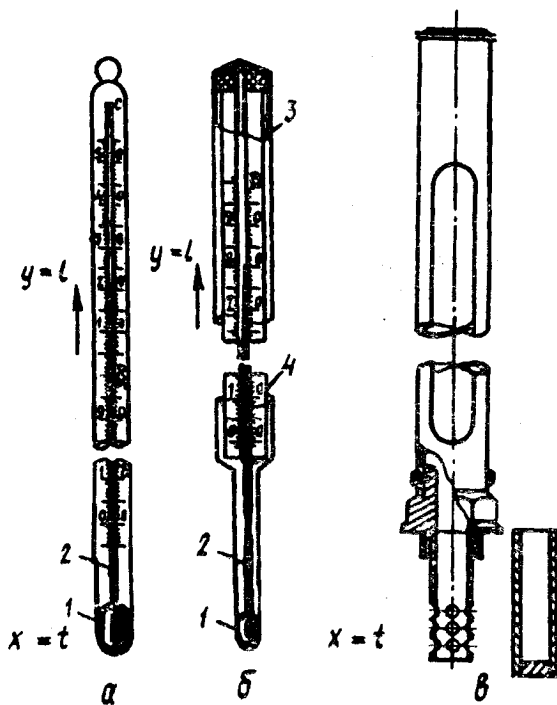


Рис. 1.18

*Біметалевий перетворювач* (рис. 1.19) виготовляється з двох металевих, з'єднаних між собою штабок, причому їхні температурні коефіцієнти лінійного розширення неоднакові: один більший ( $\alpha_б$ ), інший — менший ( $\alpha_м$ ). Метал з великим температурним коефіцієнтом лінійного розширення називають *термоактивним* (латунь, хромонікелева або молібденонікелева сталь), а метал з меншим коефіцієнтом — *термопасивним* (сплав заліза (64 %) з 36 % нікелю, який має назву «інвар» від лат. *invariabilis* — незмінний). При підвищенні температури  $x=t$  вільний кінець цього перетворювача згинається ( $y=l$ ).

Для зменшення габаритних розмірів і збільшення чутливості біметалевим елементам можна надавати спіральної (рис. 1.20) або гвинтової форми.

*Дилатометричний перетворювач* (рис. 1.21) теж виготовляється з термоактивного і термопасивного металів; при підвищенні температури  $x=t$  термоактивний стакан видовжується, а внутрішній термопасивний стержень залишається незмінним, тому верхній кі-



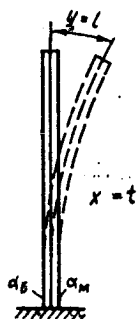


Рис. 1.19

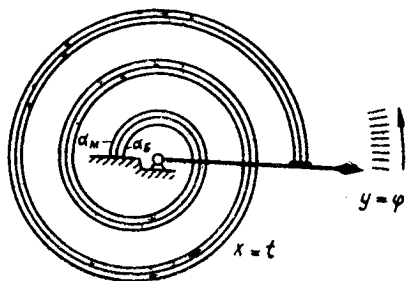


Рис. 1.20

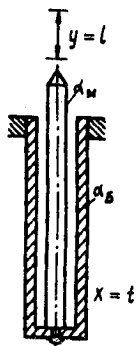


Рис. 1.21

нець його переміщується вниз ( $y=l$ ). Термоактивним матеріалом у дилатометрах може бути латунь, алюміній, немагнітна сталь (75 % заліза і 25 % нікелю); термочувливим — інвар, плавлений кварц. На виході дилатометра — велике зусилля. Дилатометри використовуються для вимірювання температур до  $+550^\circ\text{C}$ .

Основним елементом швидкісних перетворювачів витрати рідини (рис. 1.22, 1.23) є крильчатка або вертушка-турбінка, занурена у потік рідини. Частота обертання такої крильчатки (вертушки) пропорційна об'ємній витраті рідини за одиницю часу; тому повний кут  $\varphi$  повороту рухомої частини перетворювача (число її обертів протягом певного часу) є лінійною функцією кількості рідини, яка протікає через перетворювач за цей самий час.

Швидкісні перетворювачі з крильчаткою встановлюються лише на горизонтальних ділянках трубопроводу так, щоб вісь крильчатки була вертикальною (на рис. 1.22 — вид зверху). Перетворювачі з вертушкою можна встановлювати будь-яким способом: на горизонтальних, вертикальних або похилих ділянках трубопроводів.

Істотним недоліком швидкісних перетворювачів витрати рідини є залежність частоти обертання від в'язкості рідини, що протікає через перетворювач; тому вони застосовуються, як правило, лише для вимірювання витрати води. Для низьких температур води (до  $+30^\circ\text{C}$ ) крильчатки і вертушки виготовляються з пластмас, для високих (до  $+90^\circ\text{C}$ ) — з латуні.

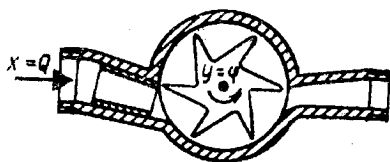


Рис. 1.22

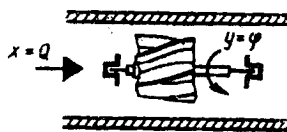


Рис. 1.23

Ротаметр (рис. 1.24) складається з трубки 1, що розширюється догори, й поплавка 2, який має особливу форму: знизу — конус, угорі — невеликий обідок з косими пазами. Густина матеріалу поплавка повинна трохи перевищувати густину середовища (газ, рідина), що проходить через перетворювач. Потік газу або рідини піднімає поплавок на певну висоту. У місці розташування поплавка прохідний переріз трубки зменшується на площу поперечного перерізу поплавка  $S_{\text{п}}$ . Згідно з рівнянням стаціонарного руху ідеальної рідини (сформульовано відомим швейцарським математиком і фізиком, Почесним членом Петербурзької Академії наук Д. Бернуллі), при зменшенні перерізу трубки швидкість газу або рідини в цьому місці зростає, а тиск зменшується. Тому тиск  $p_2$  середовища над поплавком стає меншим, ніж тиск  $p_1$  під ним (див. рис. 1.24).

На поплавок знизу діє зусилля

$$F_1 = p_1 S_{\text{п}}, \quad (1.11)$$

яке зрівноважується зусиллям, що діє на нього згорі

$$F_2 = p_2 S_{\text{п}}, \quad (1.12)$$

і вагою самого поплавка у вимірюваному середовищі

$$G = V_{\text{п}}(\gamma_{\text{п}} - \gamma), \quad (1.13)$$

де  $V_{\text{п}}$  — об'єм поплавка;  $\gamma_{\text{п}}$  — густина матеріалу поплавка;  $\gamma$  — густина середовища.

При рівновазі сил, що діють на поплавок (нехтуючи тертям між поплавком і середовищем), дістанемо

$$F_1 = F_2 + G. \quad (1.14)$$

Якщо підставити значення  $F_1$  та  $F_2$ , то

$$p_1 S_{\text{п}} = p_2 S_{\text{п}} + G, \quad (1.15)$$

звідки

$$p_1 - p_2 = G/S_{\text{п}} = \text{const}. \quad (1.16)$$

При незмінності витрати перепад тиску  $p_1 - p_2$  в ротаметрі постійний. Якщо витрата змінюється, наприклад зростає, то збільшується й перепад тиску  $p_1 - p_2$ . Починається підйом поплавка, розширюється кільцеподібний зазор між ним і стінками трубки,

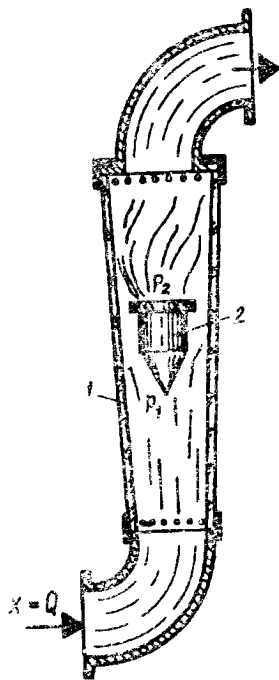
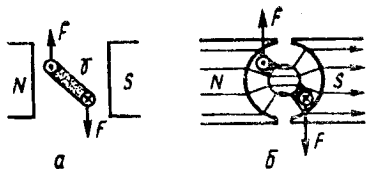


Рис. 1.24



внаслідок чого перепад тиску зменшується. Як тільки рівновага (1.16) відновиться, дальше піднімання поплавка припиниться. Отже, кожному значенню витрати  $Q$  відповідатиме певна висота підйому поплавок  $y=l$ . Скісні пази на поплавку роблять для того, щоб поплавок обертався при проходженні речовини по трубці і не торкався стінок.

Магнітоелектричний перетворювач зображено на рис. 1.25. Між полюсами постійного магніту 1 (рис. 1.25, в) розміщено легку котушку 2, струм до якої підводиться через спіральні пружинки 3. Взаємодія струму котушки з магнітним полем постійного магніту створює обертовий момент, внаслідок чого котушка повертається за годинниковою стрілкою, долаючи протидію пружинкою. Якби котушка перебувала у рівномірному магнітному полі (див. рис. 1.25, а), кут повороту котушки  $y=\alpha$

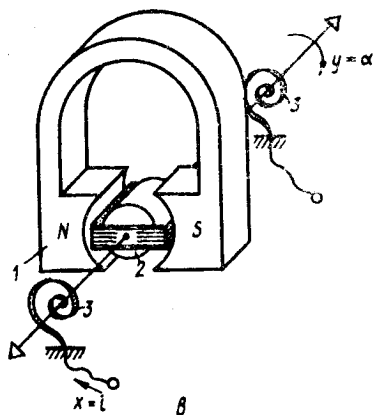


Рис. 1.25

був би нелінійно пов'язаний із силою струму в котушці  $x=i$ . Для усунення цього недоліку слід застосувати радіальне поле (рис. 1.25, б); тоді статична характеристика цього перетворювача  $\alpha=f(i)$  буде лінійною: кут повороту котушки  $y=\alpha$  стане пропорційним силі струму  $x=i$  в ній. Перетворювач функціонує тільки на постійному струмі або на випрямленому (рис. 1.26).

Різновид магнітоелектричного перетворювача показано на рис. 1.27. У ньому немає протидіючих пружинок, але є дві котушки: одна створює обертальний момент, інша — протидіючий. Магнітне поле радіальне, нерівномірне. Кут повороту рухомої системи визначається відношенням струмів у котушках, тому цей вимірювальний перетворювач називається *логометром* (від грец. *логос* — відношення).

Магнітоелектричний перетворювач з лінійним переміщенням котушки показано на рис. 1.28. Залежно від напрямку протікання струму по котушці вона притягується до постійного магніту (рис. 1.28, а) або відштовхується від нього.

Принцип дії *електромагнітних перетворювачів* ґрунтується на використанні магнітного поля струму.

Електромагнітний перетворювач для вимірювання електричного струму зображено на рис. 1.29: при проходженні струму по котушці 1 феромагнітний якор 3 утягується всередину котушки, долаючи

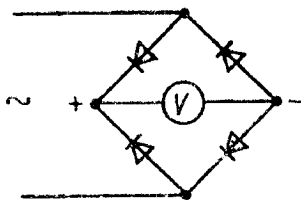


Рис. 1.26

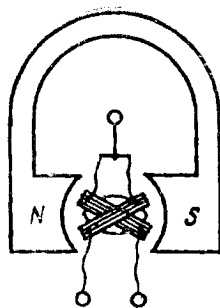
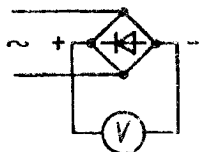


Рис. 1.27

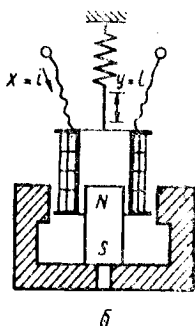
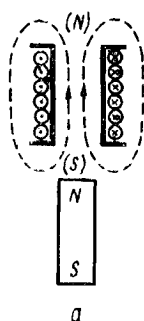


Рис. 1.28

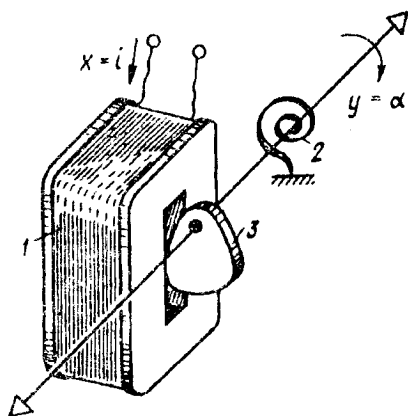


Рис. 1.29

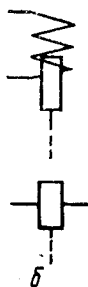
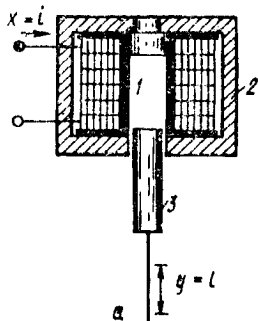


Рис. 1.30

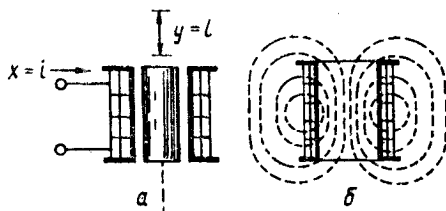


Рис. 1.31

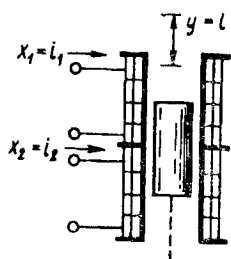


Рис. 1.32

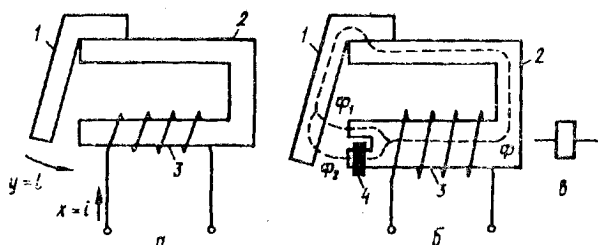


Рис. 1.33

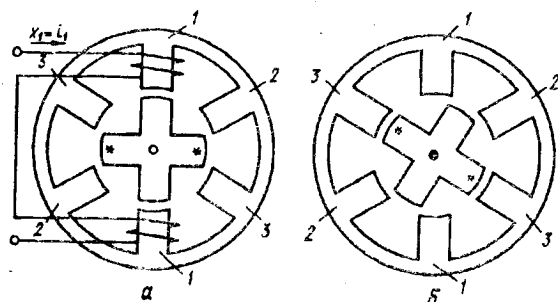


Рис. 1.34

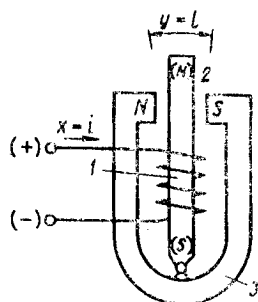


Рис. 1.35

протидію спіральної пружинки 2. Кут повороту  $y = \alpha$  залежить від сили струму  $x = i$ . Перетворювач може працювати як на постійному струмі, так і на змінному.

Електромагнітний перетворювач соленоїдного типу показано на рис. 1.30, *a*: струм  $x = i$  (у цьому разі постійний) проходить по котушці 1, створюючи у феромагнітному магнітопроводі 2 магнітний потік, що втягує якір 3 усередину котушки, долаючи його вагу (а іноді й протидію пружини). На рис. 1.30, *б* наведено можливі зображення соленоїдного перетворювача на схемах; штриховими лініями показано передачу механічного зусилля до регулюючого органу.

Соленоїдні електромагнітні перетворювачі можуть використовуватись і без зовнішнього феромагнітного осердя (на рис. 1.31, *a* — простий, на рис. 1.32 — диференціальний). Конфігурація магнітного поля котушки простого соленоїдного електромагнітного перетворювача показана на рис. 1.31, *б*.

Електромагнітний перетворювач з поворотним якорем показано на рис. 1.33. Струм  $x = i$ , проходячи по котушці 3, створює у магнітопроводі магнітний потік, що притягує нижній кінець якоря 1 до осердя 2. Перетворювач, зображений на рис. 1.33, *a*, може працювати тільки на постійному струмі; якщо по його котушці про-

пускати змінний струм, то в момент проходження магнітного потоку через нуль електромагнітне зусилля зникає, і якор починає вібрувати. Варіант електромагнітного перетворювача з поворотним якорем, придатного для роботи при змінному струмі, зображено на рис. 1.33, б. Поліос осердя розщеплюється, і на одну його частину нанизується мідне кільце 4. Частина  $\Phi_2$  загального магнітного потоку  $\Phi$ , яка проходить через кільце, за законом Ленца відставатиме від іншої частини  $\Phi_1$ , що минає кільце, тому потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  проходять через нуль неодноразом, і вібрації якоря не буде. Умовне зображення електромагнітних перетворювачів на схемах наведено на рис. 1.33, в.

Ще один варіант електромагнітного перетворювача для постійного струму — так званий кроковий електродвигун — показано на рис. 1.34. Статор цього двигуна шестиполісний, ротор — чотириполісний. На кожній парі полісів статора є обмотки (на рис. 1.34, а показано тільки першу котушку 1, яка складається з двох половин; аналогічну будову мають друга й третя котушки, не зображені на рисунку). Якщо пропустити струм по першій котушці, то пара полісів ротора зорієнтується по осі цієї котушки (як на рис. 1.34, а). Тепер, якщо відключити першу котушку і ввімкнути другу 3, ротор повернеться на  $30^\circ$  за годинниковою стрілкою і займе таке положення, як на рис. 1.34, б. Відмикання другої котушки і вмикання третьої 2 примусить ротор зробити ще один крок на  $30^\circ$  у тому самому напрямі і т. д. Вмикання котушок у порядку 1—2—3—1... забезпечить крокове обертання ротора у протилежному напрямі.

Усі електромагнітні перетворювачі, робота яких залежить тільки від наявності струму і не залежить від його напрямку, називають *нейтральними*. Електромагнітні перетворювачі, робота яких залежить як від значення сили струму, так і від напрямку його в котушці, називають *поляризованими*.

Можливий варіант будови *поляризованого електромагнітного перетворювача* показано на рис. 1.35. Струм  $x = I$ , проходячи по котушці 1, створює в якорі 2 магнітний потік; якор намагнічується, і верхній його кінець відштовхується від одностороннього полюса осердя 3 і притягується до протилежного. Так, якщо на верхній затискач котушки подати «плюс», то верхній кінець якоря стане полюсом  $N$  і переміститься праворуч; при подаванні «мінуса» на верхній затискач верхній кінець якоря переміститься ліворуч.

### § 1.3. Перетворювачі, де вихідним сигналом є тиск газу або рідини

*Дросельні перетворювачі* використовуються для вимірювання витрати газу або рідини, що транспортується трубопроводом. Принцип дії таких перетворювачів ґрунтується на різниці станів

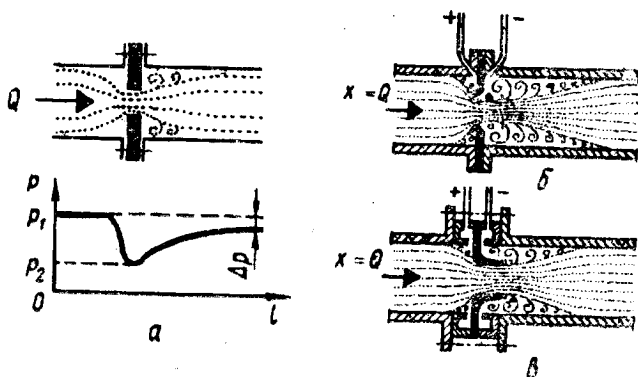


Рис. 1.36

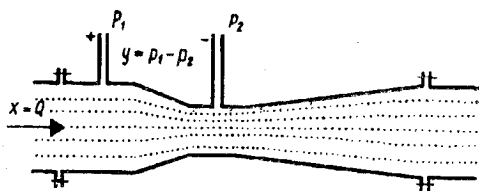


Рис. 1.37

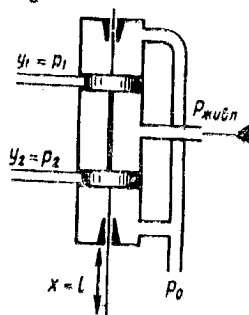


Рис. 1.38

ного руху ідеальної рідини, сформульованому Д. Бернуллі: якщо зменшити переріз труби, то швидкість газу або рідини в цьому місці зростає, а тиск зменшується (рис. 1.36, а), причому різниця тисків до звуження  $p_1$  і після нього  $p_2$  може бути показником витрати  $Q$  речовини в трубопроводі, оскільки чим більша витрата, тим більша і різниця  $p_1 - p_2$ . Після звуження потік речовини знову розширюється, швидкість його зменшується, а тиск поновлюється, але внаслідок втрат на тертя — не до попередньої величини (це явище називається *необоротною втратою тиску*  $\Delta p$  (див. рис. 1.36, а)).

Будову найпростішого дросельного перетворювача витрати нормальної діафрагми показано на рис. 1.36, б, а так зване нормальне сопло — 1.36, в, в якому необоротні втрати тиску дещо менші, ніж у нормальній діаграмі. Ще досконалішим перетворювачем є труба Вентурі (рис. 1.37), де необоротні втрати тиску значно менші, ніж у перетворювачах, розглянутих вище.

*Золотниковий перетворювач* зображено на рис. 1.38. Якщо його поршень переміщується вгору, то робоче тіло під тиском потрапляє у верхню вихідну трубку, а нижня вихідна трубка з'єднується з

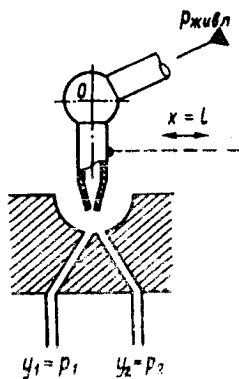


Рис. 1.39

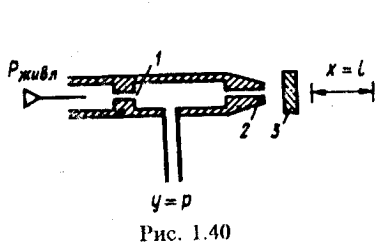


Рис. 1.40

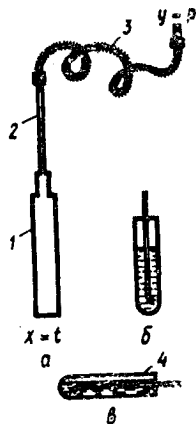


Рис. 1.41

атмосферним тиском ( $p_1 = p_{\text{живл}}$ ;  $p_2 = p_0$ ); якщо ж поршень золотника переміщується вниз, то все відбувається навпаки:  $p_2 = p_{\text{живл}}$ ;  $p_1 = p_0$ . Золотникові перетворювачі бувають гідравлічні (робоче тіло — рідина під тиском) і пневматичні (робоче тіло — стиснене повітря).

Струминний перетворювач показано на рис. 1.39. Якщо струминна трубка розташована вертикально, то робоче тіло під тиском розподіляється рівномірно між лівою та правою вихідними трубками, тому  $p_1 = p_2$ . Якщо ж струминну трубку трохи повернути навколо точки  $O$  за годинниковою стрілкою, то тиск  $p_1$  стане більшим, ніж  $p_2$ ; при обертанні струминної трубки проти годинникової стрілки буде  $p_2 > p_1$ . Різниця між  $p_1$  та  $p_2$  стає відчутною при дуже малих переміщеннях  $x=l$  вільного кінця струминної трубки. Струминні перетворювачі бувають гідравлічні й пневматичні.

Перетворювач «сопло-заслінка» (рис. 1.40) складається з двох звужувальних пристроїв: одного 1 з постійним перерізом, другого — зі змінним. Чим ближче заслінка 3 до сопла 2, тим переріз цього звужувального пристрою менший, і тим тиск  $y=p$  на виході більший (якщо заслінка закрити сопло повністю, тиск становитиме  $y = p_{\text{живл}}$ ; якщо вона переміститься досить далеко від сопла, то тиск майже зрівняється з атмосферним  $y \approx p_0$ ). Ці перетворювачі бувають пневматичні (найчастіше) і гідравлічні.

Термоманетричні перетворювачі зображено на рис. 1.41. У газовому термоманетричному перетворювачі (рис. 1.41, а, де 1 — балон, 2, 3 — капіляр) порожнина заповнена азотом або гелієм; при підвищенні температури  $x=t$  тиск газу  $y=p$  також збільшується (відповідно до закону, що відкрив французький фізик Жак Александр Цезар Шарль).

У парових термоманетричних перетворювачах робочим тілом є рідина, що має низьку температуру кипіння (ацетон, бензол).



При роботі цього перетворювача частина рідини випаровується, причому тиск пари  $y = p$  при збільшенні температури  $x = t$  зростає значно швидше, ніж у газових перетворювачах (тобто чутливості парових перетворювачів вища, ніж газових). Проте для правильної роботи парового перетворювача необхідно, щоб пара робочої рідини була тільки в балоні, а у вихідному капілярі — рідина (оскільки тиск на виході перетворювача залежить від мінімальної температури пари в системі, й якби у капілярі теж була насичена пара, вихідний тиск відповідав би не вимірюваній температурі, а температурі повітря навколо капіляра). Аби уникнути цього, вихідний капіляр закінчується всередині балона трубкою, яку слід занурити в робочу рідину (рис. 1.41, б, в). Термобалон парового перетворювача заповнюється робочою рідиною приблизно на 2/3 об'єма; кількість рідини повинна бути такою, щоб при найбільшій робочій температурі вона випаровувалася не вся, а при найменшій температурі робочого діапазону в термобалоні залишалася б деяка кількість насиченої пари.

Газові термоманометричні перетворювачі мають відносно велику інерційність, у парових вона значно менша.

#### § 1.4. Перетворювачі з термічною величиною на виході

Принцип дії *електротермічних перетворювачів* дуже простий: струм проходить через відрізок дроту (або металеву пластинку) і нагріває його:

$$Q = kI^2rt, \quad (1.17)$$

де  $Q$  — кількість теплоти, що виділяється при проходженні струму  $I$  (абсолютне значення постійного струму або ефективне значення змінного) за час  $t$ , якщо опір перетворювача дорівнює  $r$ ;  $k$  — коефіцієнт пропорційності,  $k = 0,24$ .

Цей закон теплової дії електричного струму відкрили незалежно один від одного англійський фізик Джеймс Прескотт Джоуль у 1841 р. та російський фізик Е. Х. Ленц у 1842 р. (закон Джоуля—Ленца).

Електротермічні перетворювачі можуть бути плавної або релейної дії (рис. 1.42, а, б відповідно).

У перетворювачах плавної дії вхідна величина оцінюється за ступенем нагрівання термоелемента, для визначення якого використовується відповідний вторинний перетворювач (найчастіше — біметалевий).

В електротермічних перетворювачах релейної дії перевищення допустимого значення сили струму спричиняє настільки інтенсивне розігрівання термоелемента, що матеріал, з якого його виготовлено, розплавляється, і електричне коло розривається. Так побудовано плавкі запобіжники (рис. 1.43, а, де  $I$  — плавка вставка,

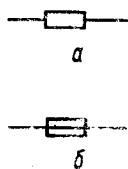


Рис. 1.42

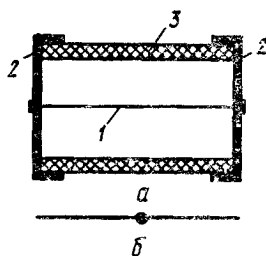


Рис. 1.43

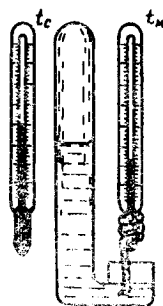


Рис. 1.44

2 — контактні пристрої для вмикання запобіжника в електричне коло, 3 — корпус). Для виготовлення плавких вставок здебільшого використовується мідний дріт (температура плавлення  $+1083^{\circ}\text{C}$ ). З метою полегшення розплавлення мідного дроту в деяких запобіжниках на середині відрізка дроту напаяють невелику олов'яну кульку (рис. 1.43, б): при нагріванні термоелемента до температури, при якій плавиться олово ( $+232^{\circ}\text{C}$ ), останнє дифундує в мідь, суттєво знижуючи температуру плавлення вставки.

Психрометричний перетворювач застосовується для визначення відносної вологості газу  $\varphi$ , %:

$$\varphi = (\gamma/\gamma_n)100, \quad (1.18)$$

де  $\gamma$  — фактична маса водяної пари, що міститься в  $1\text{ м}^3$  газового середовища;  $\gamma_n$  — максимально можлива (що насичує) маса водяної пари у цьому об'ємі середовища при даній температурі.

Принцип дії психрометричного перетворювача (психрометра Августа) оснований на використанні так званого психрометричного ефекту, відкритого німецьким фізиком Ернстом Фердинандом Августом у 1825 р.: порівняння температури двох тіл; одного — сухого, іншого — зволоженого (рис. 1.44). Випаровування з поверхні зволоженого тіла, а отже, й ступінь охолодження його тим інтенсивніші, чим менша відносна вологість оточуючого газового середовища. Різниця температур сухого  $t_c$  і зволоженого («мокрого»)  $t_m$  тіла, яка називається психрометричною різницею,  $e$ , як бачимо, функцією від значення відносної вологості газового середовища (рис. 1.45):

$$t_c - t_m = f(\varphi). \quad (1.19)$$

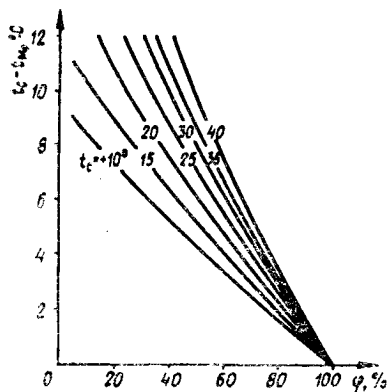


Рис. 1.45

Зволоження «мокрого» тіла здійснюється за допомогою спеціального гноту з тонкої бавовняної тканини, кінець якого занурюється в посудину з водою (краще — дистильованою).

### § 1.5. Перетворювачі, де вихідним сигналом є електрична величина

Контактний перетворювач здійснює перетворення механічного переміщення у замикання або розмикання електричного кола. Електричний контакт, як правило, складається з двох провідникових тіл, які в процесі роботи або приводяться тим чи іншим способом у стикання (тоді опір контакту  $r_k$  падає до порівняно невеликого значення), або розводяться на деяку відстань один від одного (при цьому опір  $r_k$  стрибком зростає до нескінченності), внаслідок чого електричне коло відповідно або замикається, або розмикається.

Різновиди плоскoprужинних контактів і їх умовні графічні зображення на принципових схемах показані на рис. 1.46: *a* — замикаючий контакт, *б* — розмикаючий, *в* — перемикаючий контакт, відомий під назвою «трійник» (тут спочатку розмикається розмикаючий контакт, а потім замикається замикаючий, тому перемикавання відбувається з розривом кола); *г* — «перехідний трійник» (тут, навпаки, спочатку замикається замикаючий контакт, потім розмикається розмикаючий, тому це перемикавання відбувається без розриву кола).

Конструкція плоскoprужинного контакта наведена на рис. 1.47, *a* (1 та 4 — контактні тіла; 2 та 3 — пружини, на яких закріплені контактні тіла). Для підвищення надійності такі контакти можна робити здвоєними (рис. 1.47, *б*). Матеріалом для пружини може бути фосфориста або олов'яно-цинкова бронза. Для виготовлення контактних тіл найчастіше використовують срібло, іноді — платину, вольфрам. Срібло порівняно недороге; поверхня срібного контактного тіла може окислюватися, але оксидна плівка срібла

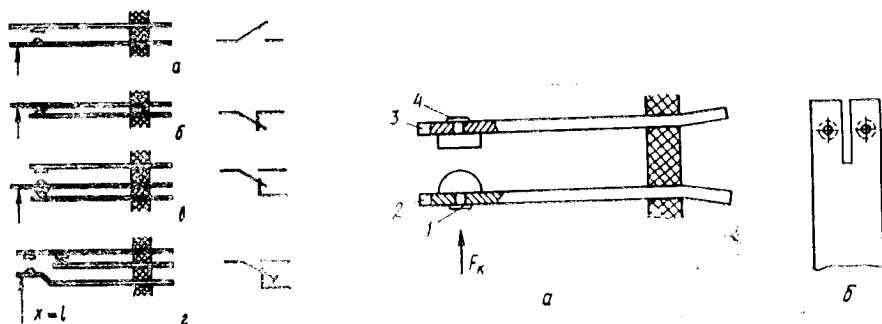


Рис. 1.46

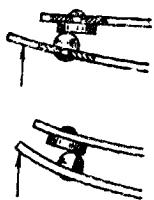


Рис. 1.48

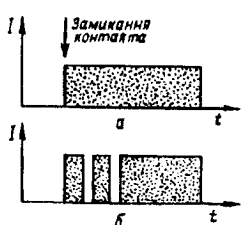


Рис. 1.49

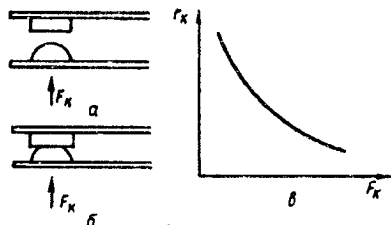


Рис. 1.50

має невеликий опір і не порушує роботу контактів. Крім того, при роботі плоскопружинних контактів відбувається їх самоочищення (рис. 1.48). Платина практично не окислюється, але вона дуже дорога й застосовується лише у важливих випадках. Для великих струмів використовують тугоплавкі метали й сплави (вольфрам, сплав платини з іридієм тощо).

У роботі контактів розрізняють чотири етапи: замикання; замкнений стан; розмикання; розімкнений стан.

При замиканні контактні тіла зближуються; коли відстань між ними досягає кількох мікрометрів, напруженість електричного поля  $E$  між ними значно зростає (оскільки вона прямо пропорційна напрузі  $U$  і обернено пропорційна відстані  $l$  між тілами, тобто  $E \approx U/l$ ). Під впливом цього сильного електричного поля з того контактного тіла, що має від'ємну полярність, вириваються електрони (автоелектронна емісія). Ці електрони іонізують повітряний проміжок між контактними тілами, внаслідок чого він починає проводити електричний струм — виникає газовий розряд у вигляді іскри. Проте суттєво пошкодити контактні поверхні ця іскра не встигає — контакт невдовзі замикається, й іскра зникає. По колу починає проходити електричний струм (рис. 1.49, а).

Якщо зусилля, що приводить контактні тіла у стикання, занадто мале, то внаслідок пружності контактних пластин у деяких контактних перетворювачах після першого замикання іноді виникає так званий «брязкіт»: рухомий контакт вібрує із затухаючою амплітудою, що спричиняє кілька послідовних розмикань та замикань електричного кола. Це явище порушує нормальну роботу керованого електричного кола (на рис. 1.49, б видно, що замість одного імпульсу струму в цьому випадку по колу пройшло три імпульси). Подрібнення імпульсу може виникати й при дуже повільному замиканні контактних тіл, оскільки в цьому разі газовий розряд затягується, і до стикання контактних тіл між ними встигає проскочити ціла серія іскор. Для уникнення подрібнень імпульсу слід забезпечувати прискорення замикання контактів і достатнє контактне зусилля.

У замкненому стані поверхні контактних тіл притискаються одна до одної з певним зусиллям  $F_k$ . Під його дією в місці стикання

контактних тіл відбувається змицання матеріалу (рис. 1.50, а, б) внаслідок чого зростає площа стикання  $S_k$ . Чим більше  $F_k$ , тим більша площа  $S_k$  і тим менший контактний опір  $r_k$  (рис. 1.50, в).

Розмикання контактів — це найбільш складний етап їх роботи. На початку розмикання зменшується зусилля контакта, тому збільшується опір контактів, збільшується електрична потужність  $P_k$ , що виділяється в них,

$$P_k = I^2 r_k, \quad (1.20)$$

де  $I$  — сила струму в електричному колі.

При збільшенні  $P_k$  зростає й температура контактів. Дальше зменшення  $F_k$  може призвести до такого зростання температури, що в точці стикання розплавиться матеріал (рис. 1.51, а). При розходженні контактних тіл між ними спочатку утворюється рідкий місток з розплавленого металу; розжарена поверхня цього містка імітує термоелектрони, які іонізують навколишнє повітря (рис. 1.51, б). У момент розриву містка в іонізованому повітряному середовищі під впливом електричного поля виникає газовий розряд у вигляді електричної дуги або іскри (рис. 1.51, в). Проте місток руйнується не посередині, а ближче до контактного тіла, що має додатний заряд (анода), оскільки розплавлений метал внаслідок термоелектронної емісії набирає додатного заряду й зміщується в бік контактного тіла, що має від'ємний заряд (катода). Внаслідок цього при кожному дуговому або іскровому розряді частина матеріалу анода переходить на катод (ерозія анода); при цьому руйнуються обидві поверхні контакту (рис. 1.51, в).

Щоб уникнути руйнування поверхонь контакту, слід застосовувати спеціальні методи іскро- та дугогасіння, наприклад: прискорення процесу розмикання за допомогою пружинних пристроїв (рис. 1.52); застосування роговидних контактних тіл (рис. 1.53; при розмиканні дуга виникає, але завдяки конвекції швидко зміщується з робочих поверхонь угору); використання деіонізаційної решітки, винайдені російським електротехніком М. Й. Доліво-Добровольським (рис. 1.54; вертикально встановлені сталеві пластини, які для поліпшення тепловіддачі покрито міддю; піднімання дуги вгору прискорюється за рахунок взаємодії магнітного поля дуги і феромагнітного матеріалу решітки, і дуга швидше згасає); розмикання контактів у герметичній камері, заповненій воднем, який має хороші деіонізуючі властивості і, крім того, добре відводить теплоту від контактів (рис. 1.55).

Для малопотужних контактів особливо несприятливі умови виникають при розмиканні електричного кола, що містить індуктивні опори, внаслідок виникнення електрорушійної сили самоіндукції, яка при цьому додається до напруги джерела живлення й суттєво збільшує різницю напруги між контактними тілами.

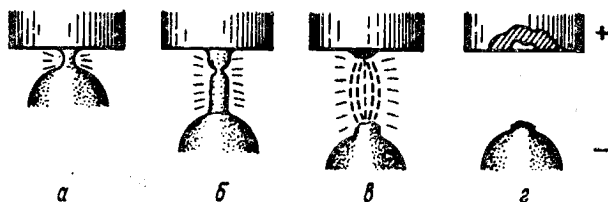


Рис. 1.51

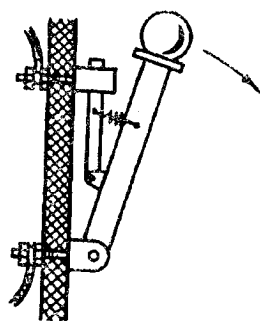


Рис. 1.52

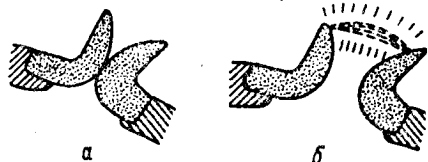


Рис. 1.53

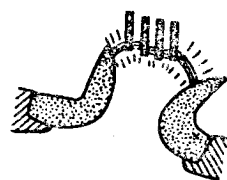


Рис. 1.54

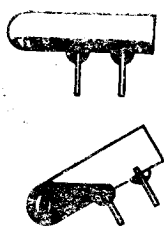


Рис. 1.55

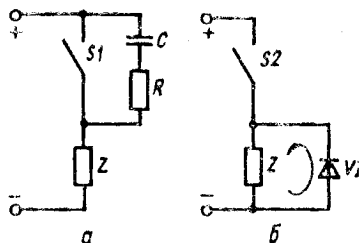


Рис. 1.56

На рис. 1.56 зображено дві схеми, за допомогою яких можна полегшити іскрогасіння на контактах. Призначення подібних схем полягає в тому, щоб магнітна енергія, яка нагромаджена в індуктивному опорі, при розмиканні електричного кола витрачалася не в повітряному проміжку між контактними тілами, а в певному активному опорі. У схемі рис. 1.56, а при розмиканні контакта  $S1$  відбувається зарядження конденсатора  $C$ , який згодом, при новому замиканні  $S1$ , розряджається на активний опір  $R$ . У схемі рис. 1.56, б струм самоіндукції, що виникає в навантаженні  $Z$  при розмиканні  $S2$ , замикається через діод  $VD$ , де й гаситься.

Контактні перетворювачі можуть застосовуватися як пристрої для вимірювання лінійних розмірів чи переміщень або як вихідні перетворювачі в деяких складних пристроях розривного керування.

Реостатний перетворювач становить регульований дрововий резистор з рухомих контактом, що змінює своє положення залежно від змін вхідної величини  $x$  (лінійного  $l$  або кутового  $\varphi$  переміщення). Будь-який реостат, власне, є перетворювачем переміщень; але до вимірювальних перетворювачів ставляться спеціальні вимоги (мінімальний гістерезис, стабільність у часі тощо).

Реостатний перетворювач можна увімкнути в електричну схему або послідовно як звичайний реостат (рис. 1.57, а), або паралельно як подільник напруги (рис. 1.57, б; називати таку схему потенціометром, як це іноді буває, неправильно). Залежно від цього статичні характеристики реостатного перетворювача  $y=f(x)$  виражаються відповідно такими рівняннями:

$$r_{\text{вих}} = f_1(x); \quad (1.21)$$

$$U_{\text{вих}} = f_2(x). \quad (1.22)$$

У вимірювальних пристроях застосовується здебільшого паралельний спосіб вмикання реостатних перетворювачів.

Залежно від конструкції реостатного перетворювача його статична характеристика може бути плавною (рис. 1.58, пряма 2) або східчастою (крива 1).

Плавну статичну характеристику мають реостатні перетворювачі струнного типу у вигляді одиночного провода, по якому переміщується рухомий контакт (рис. 1.59, а).

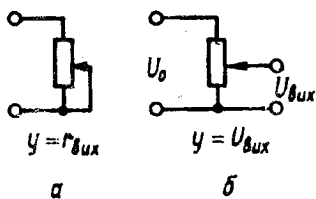


Рис. 1.57

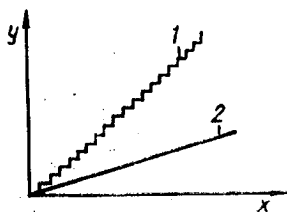


Рис. 1.58

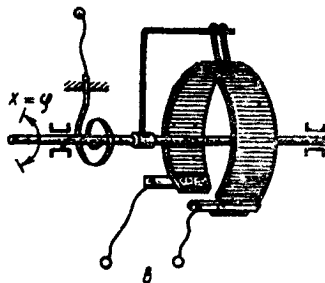
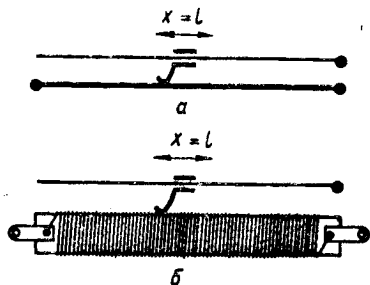


Рис. 1.59

Східча характеристика властива для реостатних перетворювачів каркасного типу. В них тонкий ізолюваний дріт намотується в один ряд на ізоляційному каркасі; рухомий контакт переміщується по оголеній від ізоляції поверхні дроту (рис. 1.59, б, в). При переміщенні рухомого контакту з одного витка на інший відбувається східча зміна вихідної величини  $y$ . Ширина східця  $\Delta x$  на характеристиці дорівнює кроку намотки, його висота  $\Delta y$  визначається опором одного витка. Каркас такого перетворювача виготовляється з ізоляційних матеріалів (гетинакс, текстоліт, ебоніт, кераміка тощо) або металів, покритих ізолюючим шаром (оксидований алюміній, емальована мідь). Переріз каркаса може бути круглим або прямокутним. Намотка відбувається тонким дротом (0,03...0,3 мм) з манганіну, константану, ніхрому та інших високоомних сплавів; у важливих випадках застосовуються благородні метали та їх сплави (золото, платина, сплав платини з іридієм тощо).

Іноді виникає потреба в реостатних перетворювачах з нелінійною характеристикою; вони мають спеціально профільовані каркаси (наприклад, як на рис. 1.60).

Принцип дії *тензометричних перетворювачів* ґрунтується на зміні їх активного опору при пружних деформаціях. Тензометричні перетворювачі поділяються на два основних види: провідникові та напівпровідникові.

Провідникові тензоперетворювачі використовують у двох варіантах.

Перший варіант — застосування тензоефекту провідника, який перебуває у стані об'ємного стиснення: котушка манганінового дроту (рис. 1.61) розміщується в зоні вимірюваного тиску (газу або рідини); під впливом цього тиску змінюється питомий опір  $\rho$  матеріалу, а отже, й активний опір котушки

$$r = \rho(l/s), \quad (1.23)$$

де  $l$  — довжина дроту;  $s$  — площа його перерізу.

Такі тензоперетворювачі застосовуються для вимірювання високого та надвисокого тиску газу або рідини.

Другий, більш поширений варіант — використання тензоефекту розтягнутого дроту або стрічки з тензочутливого матеріалу. Такі тензоперетворювачі призначаються для вимірювання невеликих переміщень, деформацій, а також інших механічних величин, функціонально пов'язаних з деформаціями.

«Вільний» дротяний тензоперетворювач (рис. 1.62) виконується у вигляді константанової дротинки, закріпленої між нерухомою та рухомою деталями. При її розтягуванні збільшується  $l$ , зменшується  $s$ , крім того, зростає  $\rho$ , і все це призводить до збільшення  $r$ ; функція  $\Delta r = f(\Delta l)$  приблизно лінійна.





Рис. 1.60



Рис. 1.61

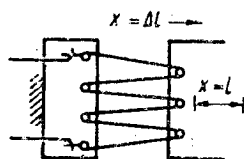


Рис. 1.62

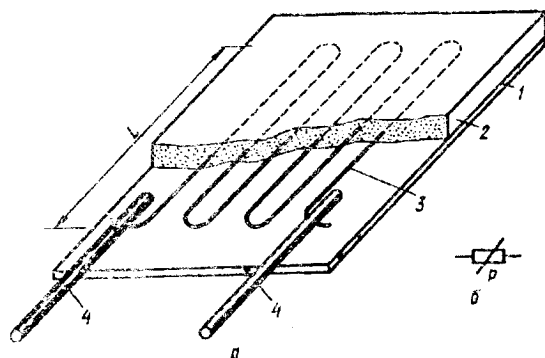


Рис. 1.63

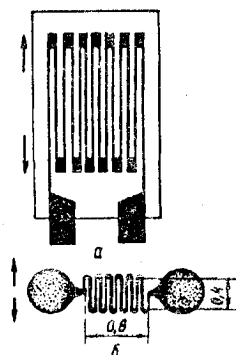


Рис. 1.64

Найбільш поширений дротяний тензорезистор, що призначений для наклеювання на деталь, деформацію якої вимірюють, показано на рис. 1.63, а (1 — смужка тонкого паперу; 2 — шар лаку; 3 — зигзагоподібно викладена тонка дротинка (найчастіше — константанова діаметром 0,02...0,05 мм); 4 — мідні провідники, з'єднані з дротинкою зварюванням (для вмикання у вимірювальну схему)). Якщо такий перетворювач наклеїти на деталь, то він сприйматиме її деформації, які за напрямом збігаються з прямолінійними ділянками тензочутливої дротинки; в результаті змінюватиметься активний опір тензорезистора. Умовне графічне позначення дротяного тензоперетворювача наведено на рис. 1.63, б. Дротяні наклеєні тензоперетворювачі дають змогу вимірювати як розтягання, так і стискання в межах відносної деформації до  $\pm 1,5\%$ .

Поряд з дротяними існують фольгові тензорезистори (рис. 1.64, а). Вони становлять тонку стрічку (найчастіше константанову завтовшки приблизно 10 мкм), на якій частину металу вибрано травленням таким чином, що залишилася решітка потрібної конфігурації. Перед травленням фольгу покривають світлочутливою емульсією, на емульсію з негатива наносять фотовідбиток решітки, проявляють і роблять зображення стійким до травильної кислоти. Потім зворотний бік покривають лаком і полімеризують його. Після

ля цього фольгу травлять, дістаючи решітку, закріплену на плівці з лаку. Таким способом можна виготовити тензоперетворювачі будь-якої потрібної конфігурації заданих розмірів (навіть з дуже невеликою базою). Як приклад, такий тензорезистор зображений на рис. 1.64, б, що має базу 0,4 мм.

Фольгові тензорезистори завдяки своїм конструктивним особливостям (ширина стрічок, з яких вони складаються, в багато разів більша, ніж товщина) краще сприймають деформації поверхні, на яку їх наклеєно, ніж дротяні тензорезистори з круглим перерізом дринок (рис. 1.65).

Ще один спосіб виготовлення тензорезисторів полягає в тому, що відбувається вакуумна возгонка тензочутливого матеріалу з наступною конденсацією його на підкладку. Такі тензорезистори (рис. 1.66) дістали назву *плівкових*.

Різновид провідникового тензорезистора — еластичний ртутний тензоперетворювач — зображено на рис. 1.67. Це гумовий капіляр діаметром 0,1...0,5 мм, заповнений ртуттю й обладнаний дротяними виводами для вмикання у вимірювальну схему; при розтягуванні його опір зростає. Такі перетворювачі дають змогу вимірювати досить великі деформації (до 50 %).

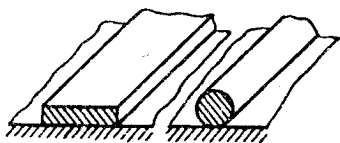


Рис. 1.65

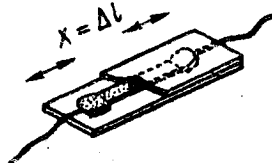


Рис. 1.66

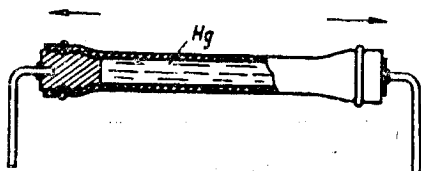


Рис. 1.67

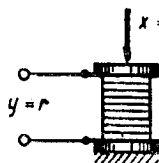


Рис. 1.68

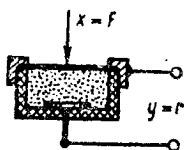


Рис. 1.69

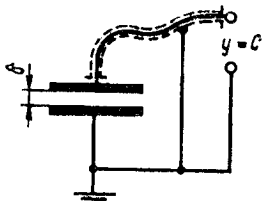


Рис. 1.70

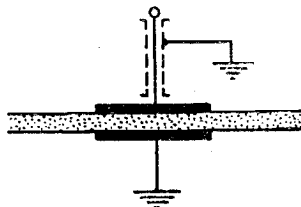


Рис. 1.71

Певного поширення набули й напівпровідникові тензоперетворювачі. Зображений на рис. 1.68 тензоперетворювач становить стовпчик вугільних дисків. Вимірюване зусилля  $x = F$  стискає стовпчик, внаслідок чого його активний опір зменшується (в основному завдяки зменшенню перехідного контактного опору між окремими дисками).

Різновидом напівпровідникового тензоперетворювача є вугільний мікрофон (рис. 1.69), винайдений у 1878 р. англійським фізиком Девідом Едуардом Юзом. Такий мікрофон здійснює перетворення акустичних коливань у зміни активного електричного опору. Коливання мембрани створюють змінний тиск на вугільний порошок, і активний опір мікрофона відповідно змінюється (підвищення тиску спричинює зменшення опору).

Ємнісний перетворювач становить конденсатор (як правило, плоский, рідше — циліндричний), ємність якого змінюється залежно від змін вимірювальної величини. Як відомо, ємність плоского конденсатора виражається формулою

$$C = (\epsilon s) / \delta, \quad (1.24)$$

де  $\epsilon$  — діелектрична проникність середовища, що заповнює простір між обкладками конденсатора;  $s$  — робоча площа обкладки;  $\delta$  — віддаль між ними.

Отже, зміна ємності такого перетворювача може бути наслідком змін  $\epsilon$ ,  $s$  або  $\delta$ .

Найбільшого поширення дістали плоскі ємнісні перетворювачі, вхідною величиною яких є переміщення — зміна проміжку  $\delta$  між електродами (рис. 1.70). Верхній електрод підключено до вимірювальної схеми екранованим проводом для того, щоб зміни ємності цього проводу не впливали на результат вимірювання.

Ємнісний перетворювач, робота якого базується на зміні діелектричної проникності середовища, зображено на рис. 1.71. Між його обкладками проходить стрічка деякого діелектрика, діелектрична проникність якої змінюється (наприклад, під впливом вологості).

Ємнісні перетворювачі можуть бути виконані з циліндричними електродами. Застосування циліндричного ємнісного перетворювача для вимірювання рівня рідини показано на рис. 1.72 (передбачається, що рідина неелектропровідна, інакше електроди слід електрично ізолювати від рідини, як на рис. 1.73).

У *п'єзоелектричному перетворювачі* використовується ефект, відкритий у 1880 р. французьким фізиком П'єром Кюрі разом зі своїм братом мінералогом Жакком Кюрі: на гранях деяких кристалів при їх механічному деформуванні виникають електричні заряди (рис. 1.74) (кристал 2 знаходиться між двома металевими дисками 1 та 3; якщо стиснути цей кристал з силою  $F$ , між металевими дисками виникне електрорушійна сила  $e$ ). П'єзоелектричний

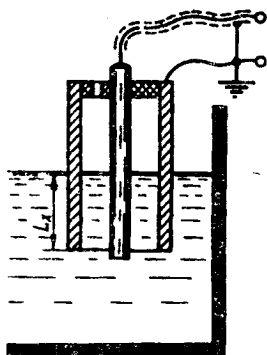


Рис. 1.72

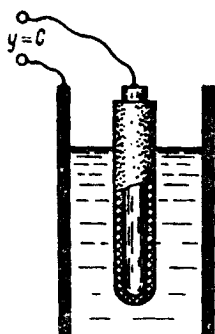


Рис. 1.73

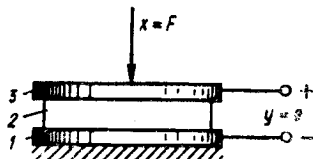


Рис. 1.74

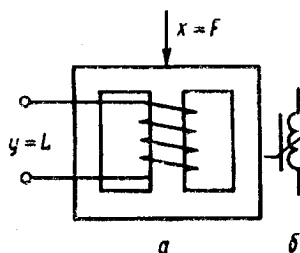


Рис. 1.75

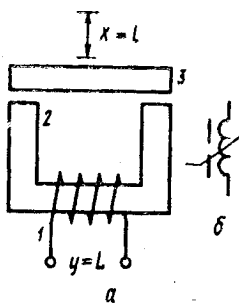


Рис. 1.76

ефект виявлено в таких кристалах, як кварц, турмалін, сегнетова сіль, цукор та ін.

*Індуктивні перетворювачі* змінюють коефіцієнт самоіндукції  $L$  залежно від зміни тієї чи іншої вимірюваної величини. Як відомо, індуктивність  $L$  котушки з феромагнітним магнітопроводом

$$L = \omega^2 / R_m, \quad (1.25)$$

де  $\omega$  — число витків котушки;  $R_m$  — магнітний опір магнітопроводу.

При деформуванні магнітопроводу (розтяганні, стисканні) змінюється магнітна проникність  $\mu$  його матеріалу (так званий «ефект Віллари» — магнітопружний ефект, відкритий у 1865 р. італійським фізиком Еміліо Віллари), що впливає на магнітний опір  $R_m$ , а отже, й на індуктивність  $L$  котушки. Такий індуктивний перетворювач дістав назву магнітопружного (рис. 1.75). Магнітопружний ефект вважають позитивним, якщо при розтяганні зростає  $\mu$  (аналогічно до того, як, наприклад, збільшується питомий опір  $\rho$  дрютяного константанового тензоперетворювача). З усіх феромагнітних ма-

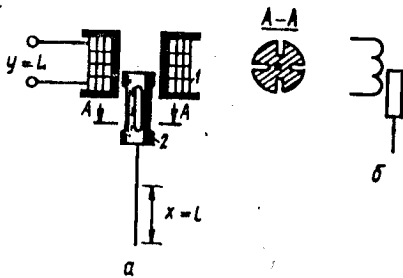


Рис. 1.77

нюючи повітряний проміжок; це збільшує або зменшує магнітний опір  $R_m$  (збільшення повітряного проміжку спричинює збільшення  $R_m$ , і навпаки); відповідно змінюється індуктивність  $L$  котушки 1.

Індуктивний перетворювач соленоїдного типу показано на рис. 1.77 (1 — котушка, 2 — феромагнітний ярі). Чим більше ярі заходить усередину котушки, тим більше зростає магнітний потік даного соленоїда (це явище вперше виявив у 1822 р. французький фізик Андре Марі Ампер), тим більшою стає й індуктивність  $L$  котушки. Оскільки котушка живиться змінним струмом, у ярі індукуються вихрові струми (їх інколи називають *струмами Фуко* за ім'ям французького фізика Жака Бернара Леона Фуко, який у 1855 р. вперше відкрив це явище). Для зменшення вихрових струмів у ярі прорізають поздовжні щілини.

Диференціальні індуктивні перетворювачі показано на рис. 1.78 (а — на Ш-подібному осерді; б — соленоїдного типу). Якщо ярі міститься посередині між двома котушками, їх індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  однакові. При переміщенні ярі вгору індуктивність  $L_1$  збільшується,  $L_2$  зменшується; при переміщенні ярі вниз — навпаки:  $L_2$  стає більше, ніж  $L_1$ .

У вимірювальних системах поширені *трансформаторні перетворювачі*. Як відомо, вторинна напруга  $U$  трансформатора залежить від напруги живлення  $U_{\text{живл}}$  первинної котушки, кількості витків первинної  $\omega_1$  і вторинної  $\omega_2$  котушок, магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує котушки, й електричного опору  $R$ , на який замкнена вторинна обмотка. Якщо  $U_{\text{живл}}$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  та  $R$  незмінні, то можна вважати, що  $U$  однозначно залежить тільки від магнітного потоку  $\Phi$ , який для котушки з феромагнітним магнітопроводом обернено пропорційний магнітному опору  $R_m$ .

У магнітопружному трансформаторному перетворювачі (рис. 1.79) деформація магнітопроводу приводить до зміни магнітної проникності  $\mu$  його матеріалу, зміни магнітного потоку  $\Phi$ , а отже, й до зміни вторинної напруги  $y = U$ .

Трансформаторний перетворювач, показаний на рис. 1.80, скла-

теріалів найбільшу чутливість до механічних деформацій має заліззонікелевий сплав пермалой з 65 % нікелю (ефект позитивний); якщо кількість нікелю зростає до 82%, магнітопружний ефект дорівнює нулю (якщо кількість нікелю більше 82%, ефект стає негативним).

В індуктивному перетворювачі (рис. 1.76) осердя 2 нерухоме,

а ярі 3 може пересуватися, змі-

нає індуктивність котушки 1.

Збільшення або зменшення магнітної індуктивності котушки 1 спричинює збільшення або зменшення напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

Зміна магнітної індуктивності котушки 1 спричинює зміну напруги  $U$  на її виході.

дається з нерухомого феромагнітного магнітопроводу з двома обмотками  $\omega_1$  і  $\omega_2$  та феромагнітного якоря. Магнітний потік  $\Phi$  у такому перетворювачі залежить від повітряного проміжку між магнітопроводом і якорем: чим менший проміжок, тим магнітний потік більший, і навпаки. Переміщення якоря  $x=l$  у цьому перетворювачі спричинює зміну вихідної напруги  $y=U$ : так, якщо якорь переміщується вниз, проміжок між магнітопроводом і якорем зменшується, магнітний потік  $\Phi$  збільшується, і  $U$  зростає.

У диференціальному трансформаторному перетворювачі (рис. 1.81) переміщення якоря вгору збільшує  $U_1$  і зменшує  $U_2$ ; при переміщенні якоря вниз — навпаки, зростає  $U_2$  і зменшується  $U_1$ .

Трансформаторний перетворювач соленоїдного типу зображено на рис. 1.82. Якщо якорь займає показане положення, магнітний потік  $\Phi$  між обмотками найбільший і значення  $y=U$  також максимальне. Переміщення якоря вгору чи вниз призведе до зменшення вихідної напруги, причому кожному значенню  $x=l$  відповідатиме певне значення  $y=U$ .

У диференціальному трансформаторному перетворювачі соленоїдного типу (рис. 1. 83) при переміщенні якоря від середнього по-

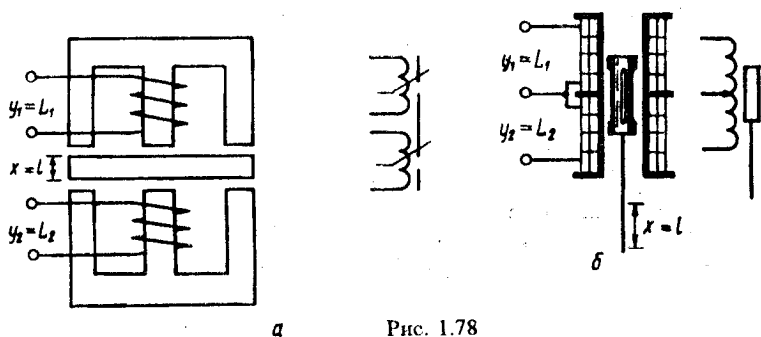


Рис. 1.78

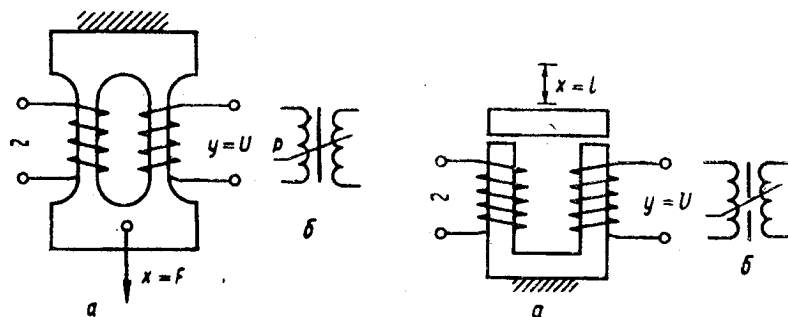


Рис. 1.79

Рис. 1.80

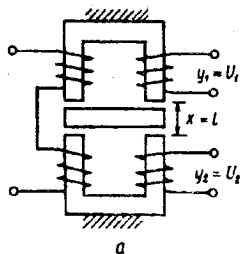


Рис. 1.81

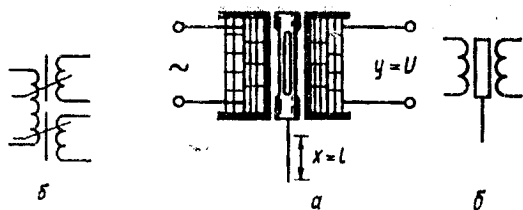


Рис. 1.82

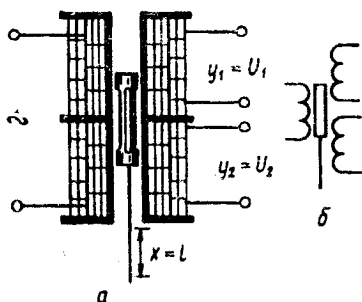


Рис. 1.83

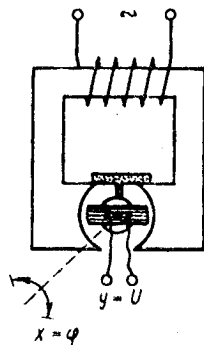


Рис. 1.84

ложення вгору збільшується  $U_1$  і зменшується  $U_2$ , при переміщенні якоря вниз — навпаки.

У трансформаторному перетворювачі з поворотною котушкою (рис. 1.84) вихідна напруга  $y = U$  залежить від положення вторинної котушки  $x = \varphi$ : чим більший магнітний потік пронизує вторинну котушку, тим більше значення  $U$ . Якщо розташувати площину котушки горизонтально (як на рисунку), то магнітний потік зовсім не пронизуватиме котушку, тому  $U = 0$ . Значення  $U$  тим більше, чим більше площина вторинної котушки наближається до вертикального положення. Кожному значенню  $x = \varphi$  відповідає цілком певне значення  $y = U$ .

Трансформаторний перетворювач, показаний на рис. 1.85, відрізняється від попереднього наявністю трьох котушок, площини яких розташовані під кутом  $120^\circ$  одна до одної. У кожній із цих котушок виникають відповідні вторинні напруги залежно від кута повороту якоря  $x = \varphi$ . Цей перетворювач застосовується у так званих системах синхронізації, тому він має назву *сельсин* (від англ. self- — само- та synchronous — синхронний).

Індукційний перетворювач (рис. 1.86, а) може застосовуватися для вимірювання швидкості обертання. Складається він із магніто-

проводу з обмоткою і якора, насадженого на вал ексцентрично. При кожному оберті вала проміжок між магнітопроводом і якором змінюється від мінімального до максимального, тому змінюється відповідно від максимуму до мінімуму й магнітний потік, збуджуючи при цьому в обмотці електро рушійну силу електромагнітної індукції. Частота вихідної напруги  $y=U$  дорівнює частоті обертання вала; форма характеристики напруги в такому перетворювачі близька до синусоїдальної. Якщо якір виконати так, як показано на рис. 1.86, б, то зміни магнітного потоку будуть різкішими, і характеристика напруги матиме відповідний вигляд.

Індукційний генератор, оснований на принципі дії генератора постійного струму, показано на рис 1.87 (1 — статор, 2 — обмотка ротора, 3 — каркас котушки ротора, 4 — нерухоме осердя котушки ротора, 5 — щітки для зняття напруги з колектора). При обертанні ротора в його обмотці індукуються постійна напруга  $y=U$ ; вона тим більша, чим швидше обертається ротор ( $x=n$ ). Такий перетворювач називають *тахогенератором постійного струму*.

Для вимірювання частоти обертання можна використати й індукційні перетворювачі змінного струму.

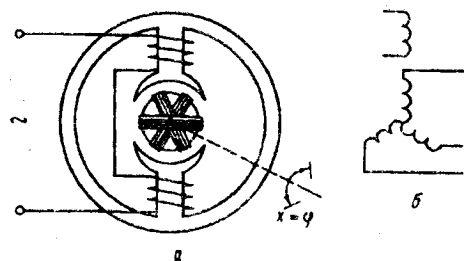


Рис. 1.85

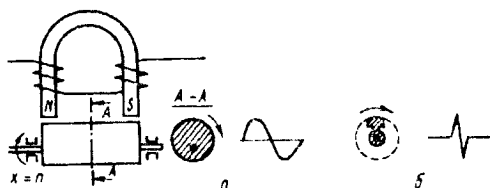


Рис. 1.86

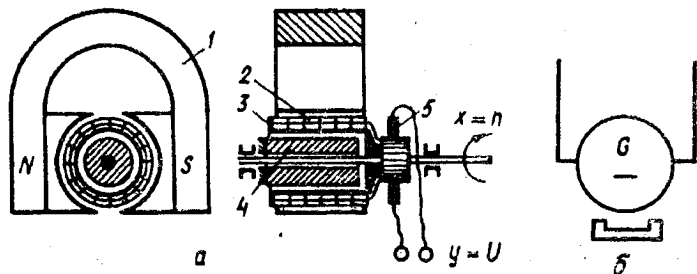


Рис. 1.87



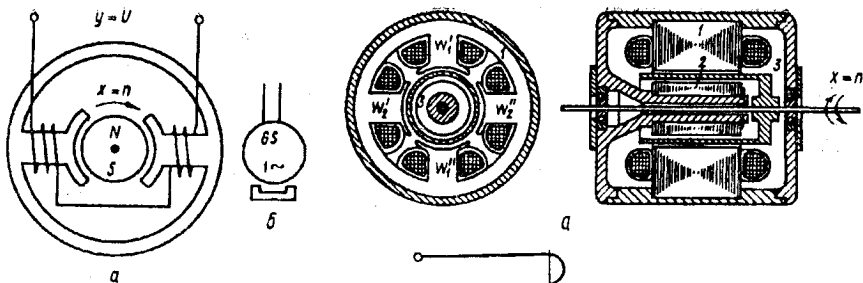


Рис. 1.88

Синхронний тахогенератор змінного струму показано на рис. 1.88: кожний оберт якогось індукуює в обмотці статора синусоїду напруги.

Асинхронний тахогенератор змінного струму зображено на рис. 1.89 (1 — феромагнітний магнітопровід статора, 2 — нерухомий магнітопровід ротора, 3 — порожнистий алюмінієвий ротор,  $\omega_1$  — обмотка живлення,  $\omega_2$  — вихідна обмотка). Обмотка  $\omega_1$ , підключена до джерела живлення  $U_{живл}$ , створює пульсуючий магнітний потік  $\Phi_1$ . Якщо ротор нерухомий, то пульсуючий магнітний потік  $\Phi_1$  індукуює у ньому тільки вихрові струми, магнітне поле яких, згідно із законом Ленца, спрямоване проти  $\Phi_1$  і на вихідну обмотку  $\omega_2$  не впливає. Але при обертанні ротора в ньому, крім того, виникає додаткова електрорушійна сила, напрям якої збігається з твірною циліндричного ротора; вона створює струм  $I_2$ , магнітне поле  $\Phi_2$  якого пронизує вихідну котушку  $\omega_2$  й індукуює в ній напругу  $y = U_{вих}$  — тим більшу, чим швидше обертається ротор  $x = n$ .

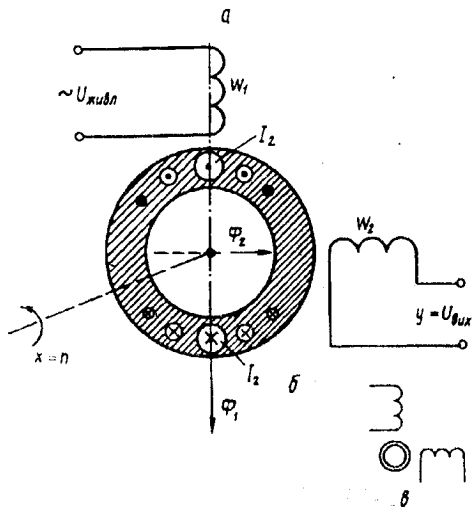


Рис. 1.89

Терморезистори — це перетворювачі, в яких зміна температури  $x = t$  приводить до зміни електричного опору  $y = r$ ; терморезистори бувають провідникові (рис. 1.90) і напівпровідникові (рис. 1.91).

Зростання опору металів при збільшенні температури спостерігав ще в 1821 р. англійський фізик Гемфрі Деві; інший англійський фізик Майкл Фарадей у 1833 р. виявив, що в напівпровідниках, навпаки, при зростанні температури опір зменшується.

Провідникові терморезистори (термометри опору) виготовля-

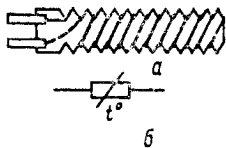


Рис. 1.90

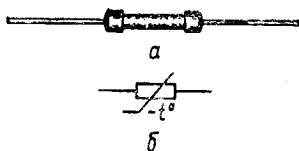


Рис. 1.91

ються з мідного чи платинового дроту, який намотується на слюдяний каркас; при збільшенні температури опір провідникового терморезистора зростає.

У напівпровідникових терморезисторах (термісторах) зміни опору значно інтенсивніші, але протилежні за знаком: збільшення температури спричинює зменшення опору термістора.

У *термоелектричних перетворювачах* використовується термоелектричний ефект, відкритий у 1821 р. німецьким фізиком Томасом Іоганном Зеебеком (ефект Зеебека), який уперше створив термопару і застосував її для вимірювання температури.

Відомо, що при зіткненні двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів  $e_k$ , значення якої залежить від природи металів та від температури у точці зіткнення (рис. 1.92, а). Проте, якщо з двох різнорідних металів утворити замкнене електричне коло (рис. 1.92, б), то при рівності температур  $t_1$  та  $t_2$  в обох точках зіткнення струм у цьому колі не виникне, оскільки обидві різниці потенціалів  $e_{k1}$  та  $e_{k2}$  взаємно зрівноважаться, тому результуюча електрорушійна сила дорівнюватиме нулю. Якщо ж температури  $t_1$  і  $t_2$  неоднакові, то  $e_{k1} \neq e_{k2}$ , і в електричному колі виникає певна різницева електрорушійна сила, так звана термоелектрорушійна сила  $e_t$  (при  $t_1 > t_2$   $e_t = e_{k1} - e_{k2}$ ). На цьому базується робота термоелектричного перетворювача, який називають також термопарою: дві дротини, виготовлені з різних металів або їх сплавів, зварені між собою з одного кінця (рис. 1.92, в). Якщо місце їх з'єднання нагріти, то між вільними кінцями дротинок виникне термоелектрорушійна сила  $e_t$ . При незмінності температури  $t_2$  величина  $e_t$  буде однозначною функцією від температури  $t_1$  робочого кінця термопар.

Для виготовлення позитивних полюсів використовують мідь та сплави хромель (Сг+Ni) або платинородій (Pt+Rh); для виготовлення негативних полюсів — сплави константан (Cu+Ni+Mn), копель (Cu+Ni), алюмель (Al+Si+Mg+Ni). З цих матеріалів виготовляють термопар: мідь — константан (М, до +350 °С), хромель — копель (ХК, від -50° до +600 °С); хромель — алюмель (ХА, від -50° до +1000 °С); платинородій — платина (ПП, від -20° до +1300 °С).

У *фоторезисторах* використовується явище внутрішнього фотоелектру, вперше відкритого в 1873 р., потім детально дослідженого

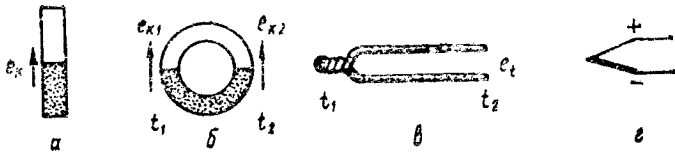


Рис. 1.92

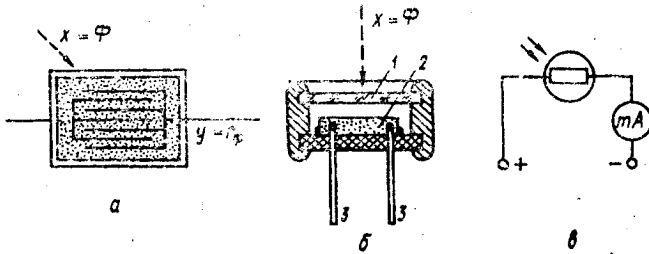


Рис. 1.93

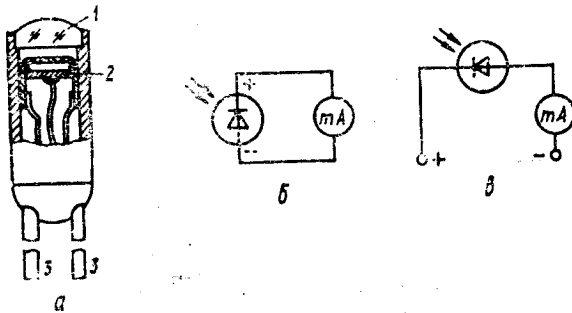


Рис. 1.94

російським фізиком В. О. Ульяніним у 1888 р. При освітленні  $x = \Phi$  опір  $y = r_{\Phi}$  напівпровідникового шару між двома гребінчастими електрдами (рис. 1.93, а) зменшується. Варіант конструкції показаний на рис. 1.93, б (1 — віконце в корпусі, 2 — світлочутлива напівпровідникова пластинка, 3 — контактні виводи).

**Фотодіоди** — це високочутливі елементи для перетворення світлових сигналів на електричні. Конструкцію одного з видів фотодіодів показано на рис. 1.94, а (1 — скляна лінза, 2 — пластинка германію, 3 — контактні виводи).

Можливі два режими роботи фотодіодів. У першому з них (рис. 1.94, б) зовнішнього джерела живлення немає, фотодіод працює як вентиляльний фотоелемент. Під впливом світла в пластинці напівпровідника вивільнюються фотоелектрони;  $p$  —  $n$ -перехід дає їм змогу проходити лише в напрямі від  $p$  до  $n$ . Внаслідок цього звіль-

нені світлом фотоелектрони можуть переміщуватися лише в одному напрямі, створюючи в електричному колі струм, значення якого залежить від освітленості. Найбільші прирости фотоструму досягаються при невеликих освітленостях.

Другий режим (рис. 1.94, в) характеризується наявністю зовнішнього джерела напруги. У темряві через фотодіод протікає зворотний струм, який залежить від напруги джерела живлення. При освітленні фотодіода до цього зворотного струму додається фотострум, що зростає приблизно пропорційно освітленості.

## § 1.6. Комбіновані перетворювачі

Можливе об'єднання розглянутих вище простих перетворювачів інформації у складніші пристрої — комбіновані перетворювачі. Особливо це стосується перетворювачів, у яких вихідним сигналом є механічне переміщення: до таких первинних перетворювачів підключаються вторинні, що перетворюють механічне переміщення на електричний сигнал (для цього найчастіше використовуються перетворювачі контактні, реостатні, індуктивні або трансформаторні).

Комбіновані вимірювальні перетворювачі називаються *датчиками*.

Об'єднання вимірювального поплавкового перетворювача з контактним показано на рис. 1.95 (1 — поплавок, 2 — важіль, 3 — противага, SQ1 та SQ2 — контакти). Якщо рівень рідини низький, то замкнута SQ1; у разі підвищення рівня замикається SQ2.

Контактний манометр, що поєднує мембранний перетворювач з контактним, зображено на рис. 1.96 (1 — мембрана, 2 — пружина, 3 — шток, 4 — важіль, 5 — рухомий контакт, 6 — нерухомий контакт). При певному значенні тиску прогин мембрани призводить до замикання контактних пластин 5 та 6.

Контактний термометр, що поєднує рідинний ртутний термометр з контактним перетворювачем, показано на рис. 1.97: при температурі  $t'$  стовпчик ртуті видовжується так, що замикає коло між А та В.

Дилатометричне реле зображено на рис. 1.98: при підвищенні температури термоактивний стакан 5 подовжується, термочасинні пластини 4 та 3 витягуються, і контакти 1 та 2 розмикаються.

На рис. 1.99 показано електромагнітне реле постійного струму, яке є сполученням електромагнітного перетворювача (з поворотним якорем) і контактної пристрою. При проходженні струму по котушці 7 у магнітопроводі, що складається з осердя 6 та якоря 1, виникає магнітний потік, якір притягується до осердя, контактна група 4, 5 розмикається (розмикаючий контакт), а контактна група 2, 3 замикається (замикаючий контакт). На принципових електричних схемах механічний зв'язок між електромагнітним приводом та контактами не вказується.

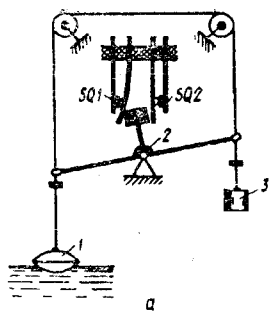


Рис. 1.95

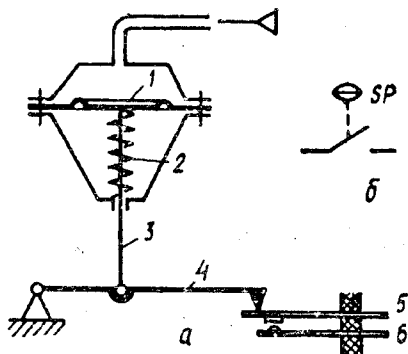


Рис. 1.96



Рис. 1.97

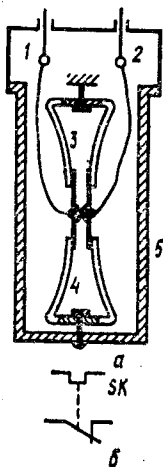


Рис. 1.98

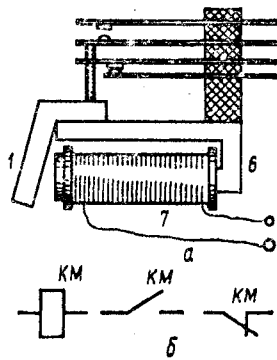


Рис. 1.99

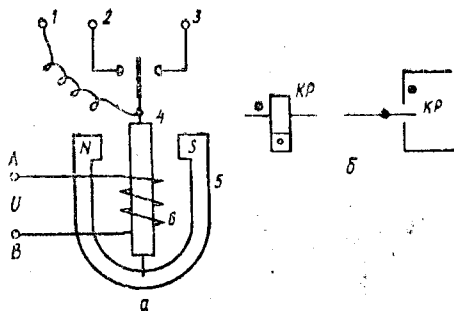


Рис. 1.100

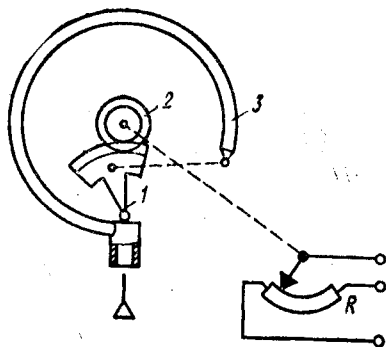


Рис. 1.101

На рис. 1.100 показано електромагнітне реле поляризоване (1 — рухомий контакт, 2 та 3 — нерухомі контакти, 4 — якір, 5 — осередя). Якщо на затискач *A* підключити «плюс», на *B* — «мінус», то верхній кінець якоря намагнічується як *N* і тому переміщується праворуч; при цьому замикаються контакти 1 та 3. При протилежному напрямі струму в котушці контакт 1 замикається з контактом 2. (Чорні точки на рис. 1.100, б означають, що при подаванні «плюса» на той кінець обмотки, який позначений чорною точкою, рухомий контакт замкнеться з тим нерухомим, який теж відмічено чорною точкою.)

На рис. 1.101 реостатний перетворювач підключено на виході манометричного трубчастого перетворювача 3 (зростання тиску газу на вході трубчастого перетворювача повертає зубчастий сектор 1 за годинниковою стрілкою, зубчасте колесо 2 обертається проти годинникової стрілки, повзун подільника напруги *R* переміщується зліва направо).

На рис. 1.102 на виході сільфона 1 через важіль 2 підключено диференціальний соленоїдний індуктивний перетворювач 3. Збільшення тиску газу обертає важіль за годинниковою стрілкою, якір індуктивного перетворювача переміщується вниз, індуктивність його нижньої котушки зростає, верхньої — зменшується.

На рис. 1.103 трансформаторний перетворювач з поворотною котушкою підключено на виході поплавкового перетворювача. При певному рівні рідини, який можна вважати нормальним, вторинна котушка займає таке положення, як на рисунку: при такому положенні магнітний потік первинної котушки не пронизує площину вторинної котушки, і вторинна напруга дорівнює нулю. При відхиленні рівня рідини від норми вторинна котушка повертається у той чи інший бік (за годинниковою стрілкою — при підвищенні рівня рідини, у протилежному напрямі — при зниженні рівня), і на виході трансформаторного перетворювача з'являється вторинна напруга тієї самої чи протилежної фази.

На рис. 1.104 зображено поєднання ротаметра (2 — поплавок, 3 — конічна трубка) з диференціальним соленоїдним трансформаторним перетворювачем 1: збільшення витрати рідини примушує поплавок переміщуватися угору, якір трансформаторного перетворювача теж рухається угору, і різнищева напруга  $U = U_1 - U_2$  збільшується.

На рис. 1.105 зображено складний перетворювач ДСП (Державної системи приладів) для перетворення механічного сигналу на постійний електричний струм  $I_{\text{вих}}$ , який змінюється в межах 0...20 мА при зміні вхідного зусилля *F* від нуля до номінального значення.

Зусилля *F* через важіль 1 примушує якір 2 диференціального трансформаторного перетворювача відходити від середнього положення. Оскільки до цього значення обох вторинних напруг були

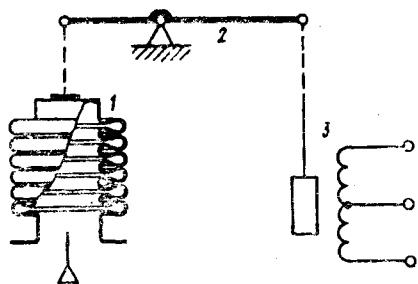


Рис. 1.102

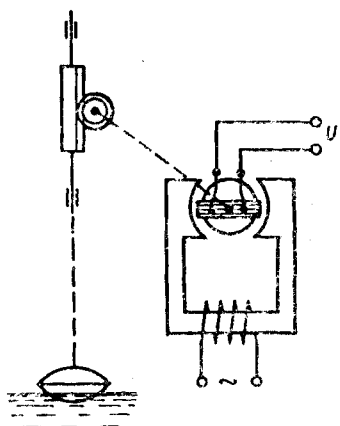


Рис. 1.103

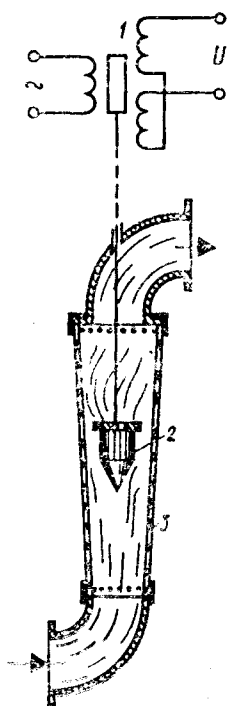


Рис. 1.104

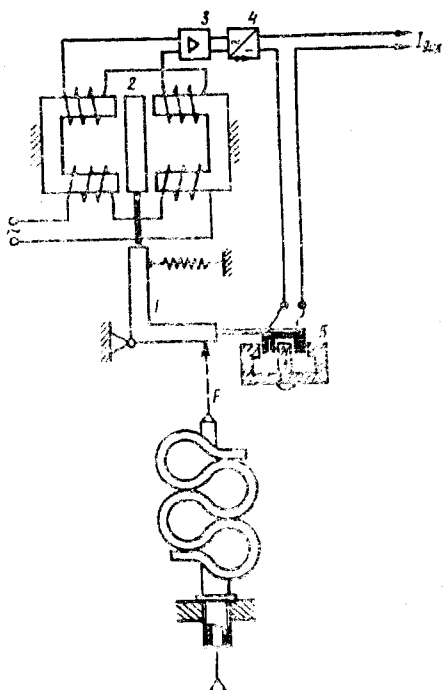


Рис. 1.105

однакові, на виході перетворювача напруга дорівнювала нулю; але при зміщенні якоря від середнього положення на виході котушок з'являється напруга нерівноваги, яка підсилюється за допомогою підсилювача 3 і випрямляється перетворювачем 4 змінного струму на постійний. Підсилений постійний струм проходить через обмотку магнітоелектричного перетворювача 5 з лінійним переміщенням котушки (див. рис. 1.28); взаємодія цього струму з магнітним полем постійного магніту створює зусилля, спрямоване назустріч зусиллю  $F$ , перешкоджаючи дальшому переміщенню важеля 1. При цьому чим більше значення  $F$ , тим більше буде і значення сили струму  $I_{\text{вих}}$ , тобто сила струму  $I_{\text{вих}}$  зростає пропорційно зусиллю  $F$ . Отже, цей пристрій забезпечує перетворення механічного зусилля  $F$  на постійний струм  $I_{\text{вих}}$ .



## Глава 2

# ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ

### § 2.1. Вторинні перетворювачі вимірювальної інформації

Якщо вихідним сигналом перетворювача є електрична величина, то таку вимірювальну інформацію, як правило, додатково перетворюють за допомогою вимірювальних схем.

*Вимірювальні схеми* бувають трьох видів: безпосереднього вмикання, диференціальні та порівняльні. Кожна з них може застосовуватися для активного первинного перетворювача (на виході якого — електрорушійна сила, напруга або струм) чи для пасивного (якщо на виході — електричний опір, індуктивність або ємність).

Приклад схеми безпосереднього вмикання для активного перетворювача наведено на рис. 2.1, *а*: за допомогою мілівольметра вимірюється електрорушійна сила  $e_t$  термопари. Проте показання приладу відрізняються від дійсного значення  $e_t$ . Справді, в цьому колі сила струму становить

$$I = e_t / (r_t + r_n), \quad (2.1)$$

де  $r_t$  — опір термопари;  $r_n$  — опір приладу (мілівольметра). Показання приладу — це падіння напруги на ньому, яке становить

$$I r_n = e_t - I r_t, \quad (2.2)$$

тобто відрізняється від шуканого значення на падіння напруги на самій термопарі; показання приладу дорівнювало б значенню  $e_t$  тільки тоді, коли б струм  $I$  дорівнював нулю. Ця особливість такої схеми є її недоліком.

Приклад схеми безпосереднього вмикання для пасивного перетворювача наведено на рис. 2.1, *б*. Якщо значення  $U$  незмінне, то значення сили струму, що його вимірює міліамперметр, залежить від значення вихідного опору  $r$  перетворювача. Недолік цієї схеми полягає в тому, що доводиться вимірювати повний струм у колі, тоді як корисною інформацією є тільки порівняно невеликі зміни струму.

Приклади диференціальних схем для активних перетворювачів наведено на рис. 2.2, де розглянуто два варіанти з'єднання вторинних котушок диференціальних трансформаторних перетворювачів: узгоджене (*а*) і зустрічне (*б*).

На рис. 2.2, а показано диференціальну схему для пасивних перетворювачів. Оскільки струми  $I_1$  та  $I_2$  проходять через прилад назустріч один одному, при  $U_1 = U_2$  і  $r_1 = r_2$  показання приладу дорівнює нулю. Якщо при зміні вимірюваної величини змінюються значення опорів  $r_1$  і  $r_2$  так, що одне зростає, інше — зменшується, то прилад вимірює різницевий струм  $I_1 - I_2$ , який і є корисною інформацією про значення вимірюваної величини, що впливає на перетворювачі  $r_1$  та  $r_2$ .

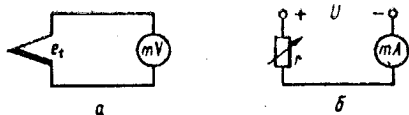


Рис. 2.1

Компенсаційна схема (рис. 2.3) — це приклад схеми порівняння для активних перетворювачів. Електрорушійна сила  $e_t$  термопарі порівнюється з відомою напругою  $\Delta U$ , знятою з подільника напруги, який з'єднаний з джерелом зі стабільною напругою  $U_{ст}$ . Змінюючи напругу  $\Delta U$ , треба зрівняти її зі значенням  $e_t$ ; тоді потенціали в точках А і В дорівнюватимуть один одному, і гальванометр покаже нуль. Значення  $\Delta U$ , що дорівнює  $e_t$  (саме  $e_t$ , оскільки в момент вимірювання струму немає), можна визначити за шкалою. Прилад, побудований на основі компенсаційної схеми, називається *потенціометром*.

Два варіанти схеми порівняння для пасивних перетворювачів, відомих під назвою «мостових», наведено на рис. 2.4: зрівноважена (а) і незрівноважена (б). Умовою рівноваги мостової схеми є рівняння

$$r_1 r_3 = r_2 r_4. \quad (2.3)$$

У цьому разі потенціали точок С і D однакові, тому у вимірювальній діагоналі CD показання гальванометра дорівнює нулю. При змінах значень  $r_1$  треба, відповідно змінюючи  $r_2$ , знову досягти рівноваги, після чого обчислити шукане значення  $r_1$  за формулою

$$r_1 = r_2 (r_4 / r_3). \quad (2.4)$$

Результат вимірювання  $r_1$  не залежить від коливань напруги живлення  $U$ , і це — істотна перевага такої схеми.

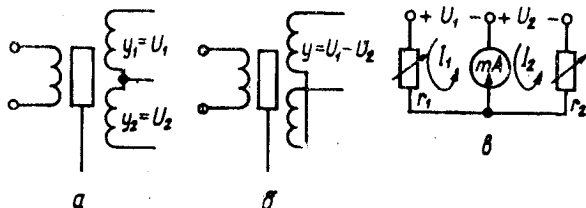


Рис. 2.2

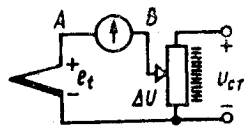


Рис. 2.3

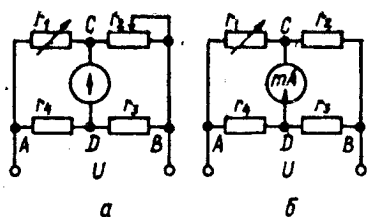


Рис. 2.4

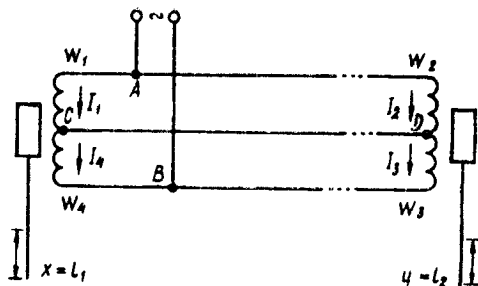


Рис. 2.5

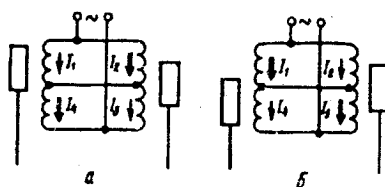


Рис. 2.6

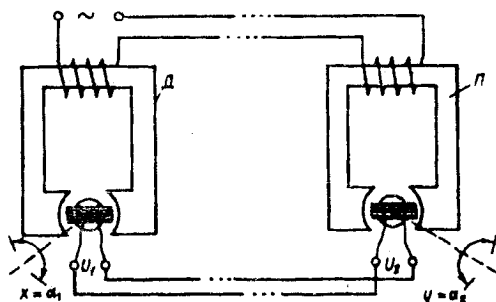


Рис. 2.7

Мостову схему можна використовувати й інакше: при змінах  $r_1$  не зрівноважувати схему, а вимірювати струм нерівноваги, який при незмінності  $r_2$ ,  $r_3$  і  $r_4$  залежить від  $r_1$  (а також від коливань  $U$ , що є недоліком такої незрівноваженої схеми).

Для дистанційного передавання механічних переміщень (лінійних, кутових) використовуються системи синхронного зв'язку та слідкуючі системи.

Система *синхронного зв'язку* забезпечує синхронізацію лінійних або кутових переміщень рухомих елементів двох електромеханічних пристроїв (механічно між собою не пов'язаних) за рахунок зусиль, що виникають безпосередньо у самих пристроях при розузгодженні положень їхніх рухомих елементів.

У *слідкуючих системах* при розузгодженні положень рухомих елементів двох електромеханічних пристроїв виникає електрична напруга розузгодження; вона підсилюється й приводить у дію допоміжний електричний привод (сервопривод), який усуває розузгодження, примушуючи рухомий елемент другого пристрою повторювати положення рухомого елемента першого, що змінюється за невідомим заздалегідь законом.

Систему синхронного зв'язку на двох диференціальних індуктивних перетворювачах показано на рис. 2.5. Якщо якорі обох пере-

творювачів перебувають у середньому положенні, то струми у всіх чотирьох котушках  $\omega_1 \dots \omega_4$  однакові. При переміщенні  $x = I_1$  якоря лівого перетворювача вгору струм  $I_4$  у котушці  $\omega_4$  зростає, а струм  $I_1$  у котушці  $\omega_1$  зменшується. Це впливає на струми  $I_2$  та  $I_3$ : перший з них (у котушці  $\omega_2$ ) теж зростає, а інший (у котушці  $\omega_3$ ) — зменшується (рис. 2.6, а). Оскільки  $I_2 > I_3$ , то й електромагнітне зусилля  $F_2$  стане більшим, ніж  $F_3$ , тому якір правого перетворювача переміститься вгору і досягне такого самого положення, як і якір лівого. При переміщенні якоря лівого перетворювача вниз (рис. 2.6, б), навпаки,  $I_1$  та  $I_3$  зростають,  $I_2$  та  $I_4$  зменшуються; як наслідок  $F_3 > F_2$ , тому якір правого перетворювача переміститься вниз. Отже, якір правого перетворювача синхронно повторюватиме всі переміщення якоря лівого перетворювача.

Інший різновид системи синхронного зв'язку наведемо на рис. 2.7: у ній використано два трансформаторних перетворювачі з поворотною котушкою. При повороті  $x = \alpha_1$  котушки лівого перетворювача  $D$  (датчика) від показаного на рисунку положення на її виході з'являється вторинна напруга  $U_1$ . Якщо на виході котушки правого перетворювача  $\Pi$  (приймача) вторинна напруга  $U_2$  відрізняється від  $U_1$ , то в замкненому колі вторинних котушок виникає струм, взаємодія якого з магнітним полем первинної котушки  $\Pi$  примусить його вторинну котушку повернутися на кут  $y = \alpha_2$ . Струм у колі вторинних котушок зникне тільки тоді, коли  $\alpha_2$  дорівнюватиме  $\alpha_1$ . Інакше кажучи, в цій схемі котушка приймача синхронно повторюватиме всі повороти котушки датчика.

Систему синхронного зв'язку на двох сельсинах зображено на рис. 2.8 ( $D$  — датчик,  $\Pi$  — приймач,  $\omega_0$  — первинна котушка трансформаторного перетворювача,  $\omega_1, \omega_2$  та  $\omega_3$  — вторинні). Якщо  $\alpha_2 = \alpha_1$ , то напруги в парах вторинних котушок  $\omega'_1$  та  $\omega''_1, \omega'_2$  та  $\omega''_2, \omega'_3$  та  $\omega''_3$  однакові, тому в з'єднувальних проводах струму не буде. Якщо ж  $\alpha_2 \neq \alpha_1$ , то відповідні вторинні напруги попарно не однакові, в колі вторинних котушок виникають струми нерівноваги: взаємодія цих струмів з магнітним полем первинної котушки приймача  $\omega''_0$  створює обертальний момент для оберту якоря прийма-

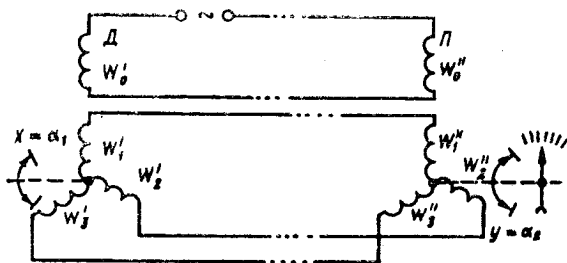


Рис. 2.8

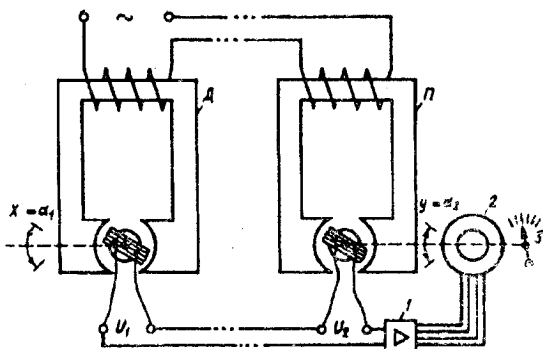


Рис. 2.9

на виході її індукується напруга  $U_1$ . Якщо котушка приймача повернута на кут  $y = \alpha_2$ , причому  $\alpha_2 \neq \alpha_1$ , то  $U_2 \neq U_1$ . Різниця  $U_2 - U_1$  підсилюється ( $I$  — підсилювач) і примушує серводвигун 2 обернути котушку приймача; якщо значення  $\alpha_2$  наближається до  $\alpha_1$ , то значення  $U_2 - U_1$  зменшується. Коли  $\alpha_2$  зрівняється з  $\alpha_1$ , серводвигун зупиниться. Отже, будь-яким поворотам котушки датчика відповідатимуть такі самі повороти котушки приймача, які забезпечує серводвигун.

Значення  $\alpha_2$  відтворюються показчиком 3.

Слідкуючі системи з диференціальними трансформаторними перетворювачами соленоїдного типу зображено на рис. 2.10.

У схемі рис. 2.10, а вторинні котушки трансформаторного перетворювача з'єднані між собою узгоджено. Припустимо, що спочатку якір перебуває в середньому положенні. Якщо повзун реостата  $R$  — також у середньому положенні, то різниці потенціалів у точках  $C$  та  $D$  немає. Переміщення якоря від середнього положення порушить рівність вторинних напруг  $U_{AC}$  і  $U_{CB}$ . Так, якщо якір переміститься вниз, напруга  $U_{CB}$  збільшиться, а  $U_{AC}$  зменшиться, внаслідок чого потенціал точки  $C$  відносно потенціалу точки  $B$  зросте. Оскільки потенціал точки  $D$  поки що не змінився відносно потенціалу точки  $B$ , виникає різниця потенціалів  $U_{CD}$ ; вона підсилюється ( $I$  — підсилювач) і надає руху серводвигуну 2, який відповідно переміщує повзун реостата  $R$  (у цьому разі вгору). Робота серводвигуна триває доти, доки  $U_{DB}$  відрізняється від  $U_{CB}$ . Коли потенціали точок  $D$  та  $C$  зрівнюються, серводвигун зупиниться. Кожному положенню якоря трансформаторного перетворювача відповідатиме певне усталене положення ротора серводвигуна, а також зв'язаного з ним показчика 3. Опори  $r_A$  і  $r_B$  визначають початок і кінець шкали приладу.

У системі (рис. 2.10, б) використовуються два диференціальних трансформаторних перетворювачі соленоїдного типу, вторинні ко-

ча. Цей момент зникне тоді, коли буде досягнуто умови  $\alpha_2 = \alpha_1$ . Отже, обертання  $\alpha_1$  якоря датчика приводить до синхронного обертання  $\alpha_2$  якоря приймача.

Слідкуючу систему на двох трансформаторних перетворювачах з поворотної котушкою показано на рис. 2.9. Припустимо, що котушка датчика повернута на кут  $x = \alpha_1$  і

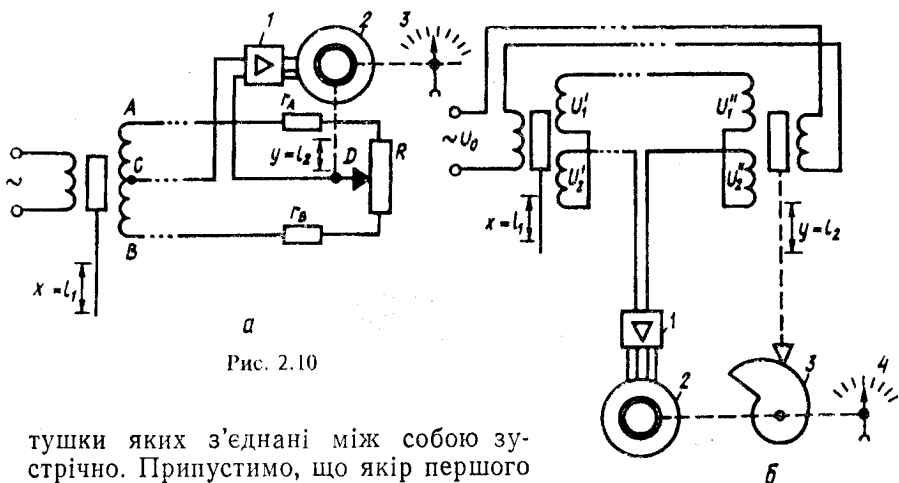


Рис. 2.10

тушки яких з'єднані між собою зустрічно. Припустимо, що яркір першого з трансформаторних перетворювачів перебуває у середньому положенні; тоді вторинні напруги  $U'_1 = U'_2$ . Якщо при цьому положення яркоя у другому трансформаторному перетворювачі таке саме, то  $U''_1 = U''_2$  і схема зрівноважена. Так само відбувається й тоді, коли обидва яркіри займають хоч і не середнє положення, але однакове для обох: тоді різниці  $U'_1 - U'_2 = U''_1 - U''_2$ , і схема також зрівноважена. Рівновага буде порушена у разі, якщо яркіри двох перетворювачів займуть неоднакові положення: тоді різниця напруг  $(U'_1 - U'_2) - (U''_1 - U''_2)$  після підсилення (1 — підсилювач) потрапляє до сервоелектродвигуна 2, який за допомогою ексцентрика 3 переміщує яркір другого перетворювача в таке положення, в якому перебуває яркір першого. Кожному положенню яркоя першого трансформаторного перетворювача відповідає певне усталене положення ротора серводвигуна і покажчика 4.

## § 2.2. Вихідні пристрої систем автоматизованого вимірювання і контролю

У показуючих аналогових електровимірювальних приладах вимірювальну інформацію звичайно одержують за допомогою рухомої стрілки по нерухомій шкалі (рис. 2.11, а). Іноді, з метою одержання подовженої шкали при невеликих габаритах, навпаки, застосовують нерухому стрілку й обертову шкалу (рис. 2.11, б).

У чутливих аналогових електровимірювальних приладах за покажчик повороту рухомої системи править невелике дзеркальце; відлік показів у таких приладах здійснюється світловим способом (на шкалу проектується світлова пляма з рискою посередині)

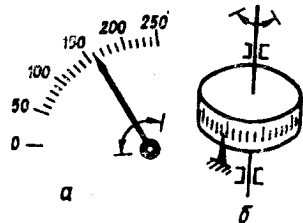


Рис. 2.11

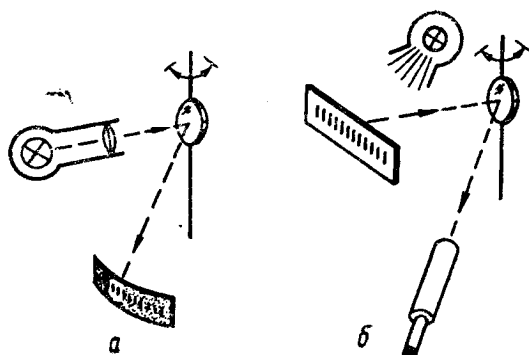


Рис. 2.12

(рис. 2.12, а) або оптичним (спостерігач бачить у зоровій трубці відображення тієї чи іншої ділянки шкали залежно від повороту дзеркала (рис. 2.12, б)).

У показуючих цифрових електровимірювальних приладах застосовуються газорозрядні лампи цифрової індикації (рис. 2.13) або люмінесцентні цифросинтезуючі індикатори (рис. 2.14).

У газорозрядних цифрових індикаторах анод має вигляд дрютяної сітки, а катоди виготовлено з тонкого дроту, вигнутого у формі цифр 0...9. Якщо подати напругу на один з катодів, навколо нього з'явиться яскраве світіння у вигляді відповідної цифри (див. рис. 2.13, 2).

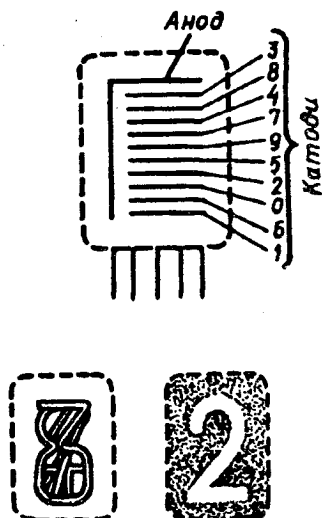


Рис. 2.13

Люмінесцентні цифросинтезуючі індикатори складаються з певної кількості сегментів (семи на рис. 2.14, а), які при подаванні напруги яскраво світяться. Конструкцію такого індикатора показано на рис. 2.14, б (1 — скло, 2 — прозорий електрод, 3 — люмінофор, 4 — металевий електрод од

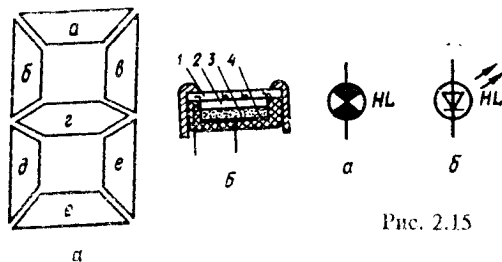


Рис. 2.14

Рис. 2.15

Цифра	Семисегментний код						
	а	б	в	г	д	е	е
0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	0	1	0	0	1	0
2	1	0	1	1	1	0	1
3	1	0	1	1	0	1	1
4	0	1	1	1	0	1	0
5	1	1	0	1	0	1	1
6	1	1	0	1	1	1	1
7	1	0	1	0	0	1	0
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	0	1	1

ного сегмента). Для синтезу цифр подається напруга на окремі сегменти певним чином (табл. 2.1).

До світлових сигнальних пристроїв для систем автоматичної сигналізації належать сигнальна лампа розжарювання (рис. 2.15, а) та світлодіод (рис. 2.15, б) — напівпровідниковий діод, в якому при проходженні прямого електричного струму через  $p-n$ -перехід випромінюється світло.

У реєструвальних аналогових електровимірювальних приладах запис може здійснюватися на дисковому діаграмному папері, що рівномірно обертається (рис. 2.16, а), або на рулонному, який рівномірно перемотується з одного рулону на інший (рис. 2.16, б).

Аналогова реєстрація змін вимірюваної величини (рис. 2.16, в) на рухомому світлочутливому матеріалі полягає в тому, що промінь світла фокусується циліндричною лінзою, потрапляє на світлочутливий матеріал (фотоплівка, фотопapір) і «накреслює» на ньому невидиме зображення кривої змін вимірюваної величини у

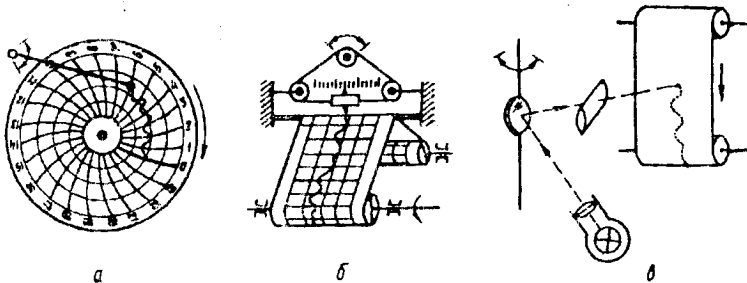


Рис. 2.16



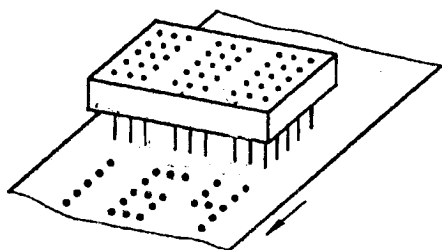


Рис. 2.17

Електроіскрові цифродрукувальні пристрої (ЦДП) працюють за принципом впливу електричного розряду на носії інформації — папір або спеціальну металізовану плівку. Для формування знака використовується набір іскрових електродів (рис. 2.17). За допомогою електронного комутатора набирається будь-яка цифра або знак, потім на вибрану групу електродів подається висока напруга. Виникають розряди, які залишають сліди на рухомій стрічці носія інформації. Такий ЦДП має високу швидкість; його недолік — необхідність використання високої напруги.

Дія електротермічних ЦДП базується на зміні кольору паперу під впливом температури 80...120 °С. Схему електротермічного ЦДП з точковим синтезом знаків наведено на рис. 2.18, а (1 — ролон термочутливого паперу, 2 — прижимний гумовий валик подачі паперу, 3 — термодрукуюча головка (ТДГ), 4 — радіатор для відведення теплоти). Нагрівальні елементи ТДГ розташовані на одній лінії; для друкування, наприклад, трьох символів 5×7 точок ТДГ містять 15 елементів; кожний із цих елементів може миттєво нагріватися незалежно від інших. За один такт друкується перший ряд рядка для всіх цифр (рис. 2.18, б (1)), потім здійснюється механічний зсув паперу на певну відстань і друкування другого ряду точок (рис. 2.18, б (2)) і т. д. Для друкування одного рядка

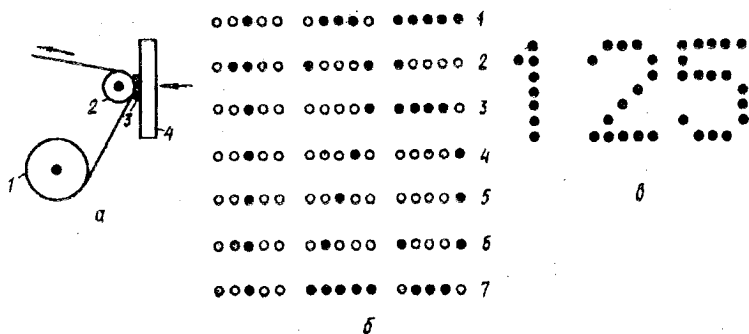


Рис. 2.18

при структурі літер  $5 \times 7$  треба здійснити сім послідовних зсувів паперу (рис. 2.18, в).

Переваги електротермічних ЦДП — невеликі габаритні розміри, невелика споживана потужність, можливість реалізації за допомогою засобів мікроелектроніки.

### § 2.3. Вимірювальні прилади безпосередньої оцінки й автоматизованого зрівноваження

Найпоширеніший електровимірювальний прилад постійного струму — *магнітоелектрична система* (рис. 2.19) — складається з постійного магніту 9, осердя з магнітом'якої сталі для створення радіального поля 7, немагнітної (наприклад, латунної) пластини для закріплення осердя 8, рамки, намотаної тонким ізольованим мідним дротом на легкому алюмінієвому каркасі 6, спіральних пружин для підведення струму до рамки та для створення протидіючого моменту 5, 10, покажчика 4, коректора для встановлення покажчика на нуль при відсутності струму (поворотом циліндра з ексцентрично розташованим пальцем за допомогою викрутки 1).

Переваги магнітоелектричних приладів — лінійність шкали, нечутливість до зовнішніх магнітних полів, основний недолік — неможливість використання при змінному струмі.

Рухому систему більшості магнітоелектричних приладів встановлюють на сталевих кернах 3, які впираються у під'ятники 2 з напівкоштовного каменя (агат, сапфір, рубін). (Конструкція такої опори показана на рис. 2.20, а.) У приладах підвищеної чутли-

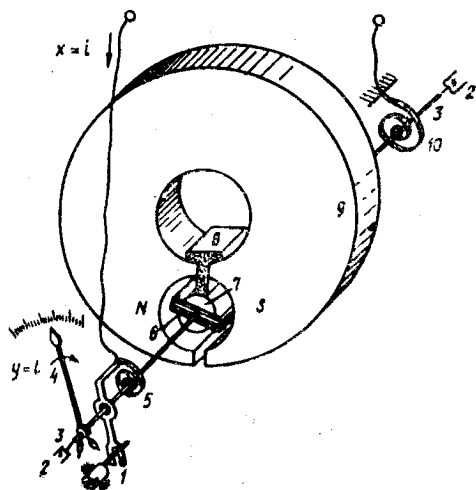


Рис. 2.19

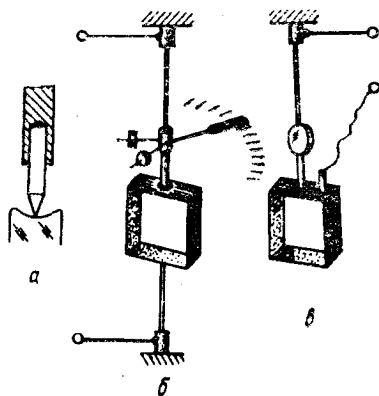


Рис. 2.20

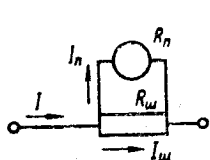


Рис. 2.21

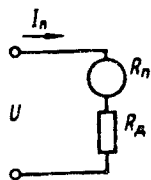


Рис. 2.22

вості рухому частину встановлюють на стрічкових розтяжках (рис. 2.20, б) або на стрічковому підвісі (рис. 2.20, в). У цих приладах протидія виникає при закручуванні стрічок.

Оскільки котушки магнітоелектричних приладів намотуються тонким проводом, ці прилади можна

безпосередньо використовувати для вимірювання дуже малих постійних струмів (не більше ніж 25 мА) або невеликих постійних напруг (до 1 В). Для розширення меж вимірювання використовують шунти (для амперметрів) та додаткові опори (для вольтметрів).

Схему підключення приладу до шунта подано на рис. 2.21; вимірюваний струм  $I$  обчислюється формулою

$$I = I_n \left( \frac{R_n}{R_{ш}} + 1 \right), \quad (2.5)$$

де  $I_n$  — показання приладу;  $R_n$  — власний опір приладу;  $R_{ш}$  — опір шунта.

Підмикання додаткового опору до приладу показано на рис. 2.22; вимірювана напруга

$$U = U_n \left( \frac{R_d}{R_n} + 1 \right), \quad (2.6)$$

де  $U_n$  — показання приладу;  $R_n$  — власний опір приладу;  $R_d$  — додатковий опір.

Для реєстрації швидкоплинних електричних процесів використовуються спеціальні аналогові електровимірювальні прилади — осцилографи. На рис. 2.23, а зображено будову електромеханічного осцилографа, де застосовано вимірювальний пристрій 4 магні-

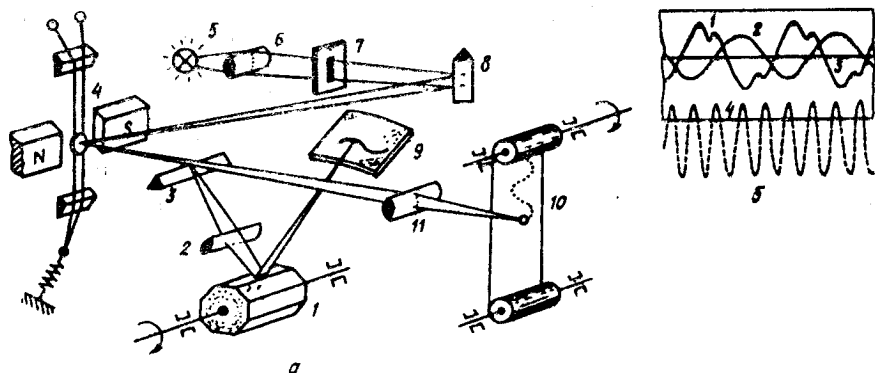


Рис. 2.23

тоелектричної системи: протікання електричного струму по  $V$ -подібному проводу, що міститься у магнітному полі постійного магніту, спричинює поворот площини  $V$ -подібного провода, причому кут повороту пропорційний миттєвому значенню струму.

Промінь світла від лампи 5 фокусується циліндричною лінзою 6, проходить через щілиноподібну діафрагму 7, відбивається призмою 8 і потрапляє на дзеркальце вимірювального пристрою 4. Відхилення дзеркальця є мірою повороту площини  $V$ -подібного провода, по якому проходить вимірюваний струм. Відбитий від дзеркальця промінь знову фокусується лінзою 11 і потрапляє на рулонний світлочутливий матеріал (фотоплівка, фотонапір 10). Після проявлення фотоматеріалу дістають осцилограму — графічне відображення зміни струму в часі.

Для періодичного процесу ці зміни можна побачити також на екрані. З цією метою використовується частина відбитого дзеркальцем променя, яка відхиляється призмою 3; вона фокусується лінзою 2 і потрапляє на дзеркальний барабан 1. При обертанні барабана кожна його грань відбиває промінь спочатку на лівий край екрана 9, пересуває його до правого краю, після чого нова грань миттєво повертає промінь знову на лівий край екрана, і процес повторюється. Якщо вимірюваний струм періодичний, то, досягши відповідної швидкості обертання барабана, можна забезпечити проходження променя на екрані по одній і тій самій траєкторії, провівши можливим візуальне спостереження періодичного процесу.

Приклад осцилограми подано на рис. 2.23, б, де 1 та 2 — відображення двох періодичних процесів; 3 — запис «нульової» лінії; 4 — запис періодичного процесу відомої стабільної частоти (для визначення масштабу на осі часу).

*Електровимірювальний прилад електромагнітної системи* (рис. 2.24: 1 — показчик, 2 — коректор, 3 — котушка, 4 — якір, 5 — протидіюча пружина) має принцип дії перетворювача, зображеного на рис. 1.29. Оскільки внутрішнє магнітне поле електромагнітного приладу відносно невелике, на роботу такого приладу можуть впливати зовнішні магнітні поля (тому показання приладу можуть залежати від розташування його у просторі). З метою виключення такої «статичної» похибки в приладі на рис. 2.24 встановлено здвоєну конструкцію, причому котушки 3 розміщені так, що зовнішнє магнітне поле  $\Phi$  не впливає на покази приладу; якщо в одній із котушок це зовнішнє поле послаблює обертальний момент, то в другій — відповідно підсилює. Такі прилади, позбавлені «статичної» похибки, називаються *астатичними*. Рухома система встановлена на кернях.

Електромагнітні прилади можуть працювати як на постійному струмі, так і на змінному (здебільшого на змінному, оскільки для постійного є магнітоелектричні). Для розширення меж вимірюван-

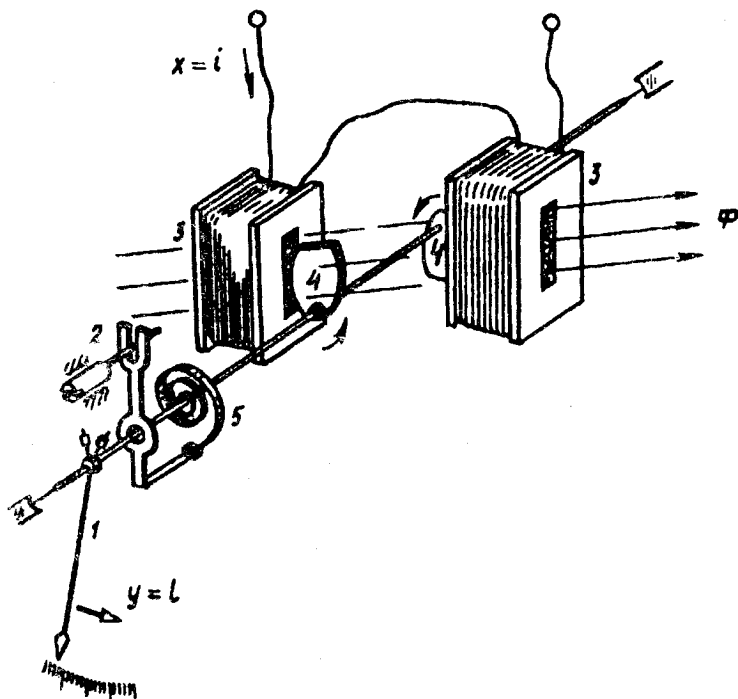


Рис. 2.24

ня шунти та додаткові опори не використовуються — просто виготовляють котушку з відповідного проводу.

Прилад для лічби кількості електричних імпульсів (електромагнітний лічильник імпульсів) зображено на рис. 2.25, де 1 — вал відлікового пристрою, 2 — редуктор, 3 — храпове колесо, 4 — храпова заскочка, 5 — поворотна пружина, 6 — котушка, 7 — осердя, 8 — якір, 9 — запобіжна заскочка, 10 — колесо відліку одиниць, 11 — колесо відліку десятків. У цьому лічильнику — електромагнітний привод має зворотню дію: при надходженні імпульсу до котушки якір 8 притягується до осердя 7, а храпова заскочка 4 захоплює черговий зуб храпового колеса 1, причому запобіжна заскочка 9 перешкоджає повороту храпового колеса за годинниковою стрілкою. В момент припинення імпульсу пружина 5 повертає якір у попереднє положення, при цьому храпова заскочка переміщує храпове колесо на один крок проти годинникової стрілки. Повертається на один крок і колесо 10 відліку одиниць. Спеціальний механізм забезпечує обертання колеса 11 на один крок після кожних десяти кроків обертання колеса 10. Не показане на рисунку

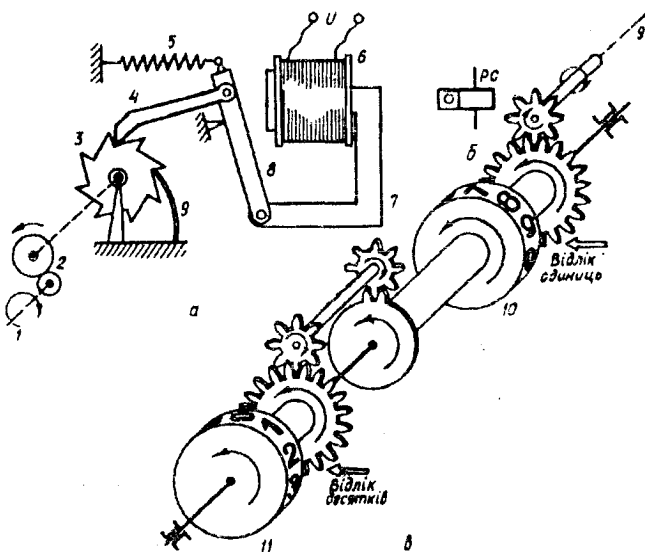


Рис. 2.25

коесо відліку сотень з'єднане з колесом відліку десятків так само і т. д.

Безперервна форма передачі інформації здійснюється в аналогових вимірювальних приладах. Поряд із цим у сучасних вимірювальних системах дедалі ширше використовується дискретна форма (звичайно — числа, тобто у вигляді цифр).

Будь-який неперервний за величиною і часом сигнал можна подавати у дискретній (зокрема, цифровій) формі, відобразивши його послідовністю точок, віддалених одна від одної на певне постійне значення. Цей процес називається *квантуванням*, а різниця між двома найближчими дискретними значеннями — *кроком квантування*.

Найбільш поширений спосіб — це квантування за значенням функції  $X$  ( $\Delta x = \text{const}$ ), або квантування за рівнем (рис. 2.26, а). Відображення того ж безперервного сигналу в цифровій формі подано на рис. 2.26, б.

Зменшуючи крок квантування, можна відобразити неперервний сигнал у дискретній формі з будь-якою заданою точністю.

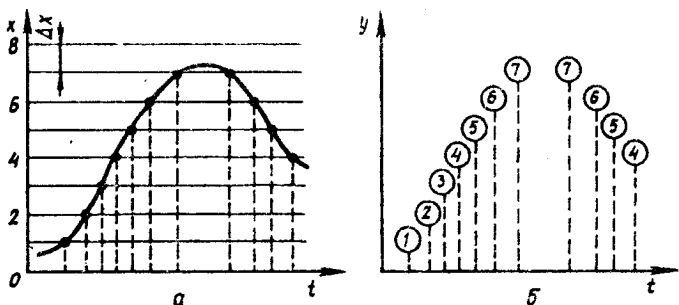


Рис. 2.26

Відомо багато варіантів побудови цифрових вимірювальних приладів (ЦВП).

Розглянемо досить поширений різновид ЦВП — прилади прямого перетворення з неперервною дією, в яких результат вимірювання потрапляє до відлікового пристрою при кожній зміні вимірюваної величини, що перевищує крок її квантування.

Дискретизація аналогової величини може здійснюватися за допомогою *аналого-цифрових* перетворювачів (АЦП), які перетворюють аналогову величину (найчастіше — лінійне або кутове переміщення) на дискретну. Якщо на кожному рівні квантування просторової величини розташований нерухомий чутливий елемент, то такий АЦП називається *квантувальним*; якщо ж ці чутливі елементи розташовані відповідно до розрядів деякого коду, то — *кодувальним*.

Контактний квантувальний АЦП переміщення зображено на рис. 2.27, а. Аналоговим сигналом є кут повороту вала 1 рухомої системи приладу для вимірювання рівня рідини (2 — аналоговий

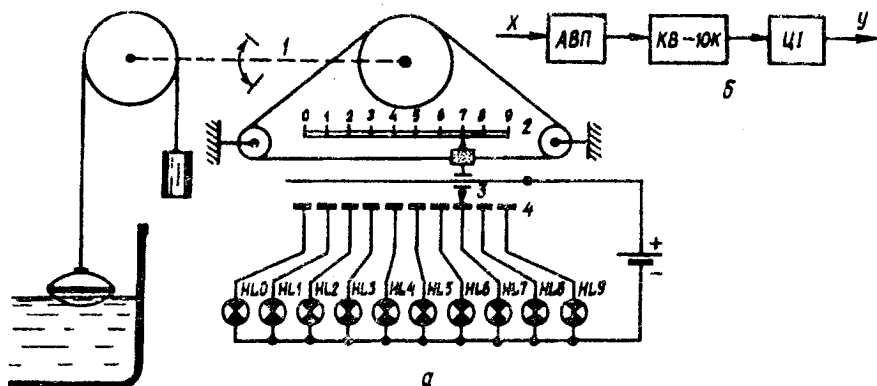
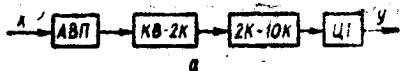


Рис. 2.27



відліковий пристрій, 3 — рухомий контакт, 4 — нерухомі контакти, розташовані на відповідних рівнях квантування; *HL* — сигнальні лампи (замість групи сигнальних ламп можна використати газорозрядну лампу цифрової індикації, рис. 2.13)). Структурна схема цього приладу (рис. 2.27, б): *X* — вимірювана величина; АВП — аналоговий вимірювальний прилад; (КВ—10К) — перетворювач «кут відхилення — десятковий код»; ЦІ — цифровий індикатор; *Y* — показ цифрового індикатора.

Структурна схема кодувального АЦП показана на рис. 2.28, а: *X* — вимірювана величина; АВП — аналоговий вимірювальний прилад; (КВ—2К) — перетворювач «кут відхилення — двійковий код»; (2К—10К) — перетворювач «двійковий код — десятковий код»; ЦІ — цифровий індикатор; *Y* — показ цифрового індикатора. Аналоговий вимірювальний прилад магнітоелектричної системи (рис. 2.28, б) перетворює вимірювану величину *X* (електричний струм) у кут відхилення. На осі рухомої системи приладу закріплений кодувальний АЦП у вигляді сектора з непрозорого матеріалу, вирізи на якому відповідають одиницям двійкового коду (кодувальний сектор):

- для 0 — 000;
- » 1 — 001;
- » 2 — 010;
- » 3 — 011;
- » 4 — 100;
- » 5 — 101;
- » 6 — 110;
- » 7 — 111.

Виконуючи функцію перетворювача «кут відхилення — двійковий код», цей сектор здійснює квантування аналогової величини (крок квантування визначають розміри вирізів на секторі) та кодування її у вигляді дискретних двійкових відміток.

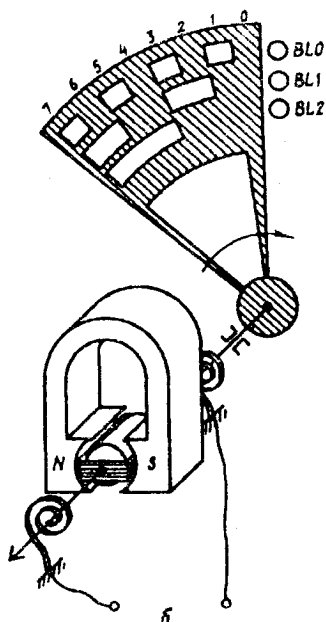


Рис. 2.28



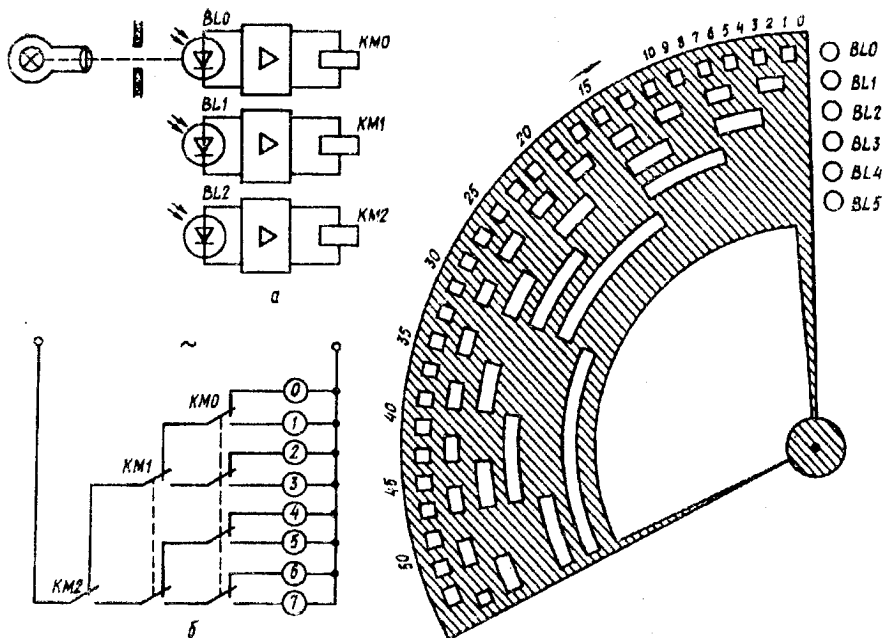


Рис. 2.29

Рис. 2.30

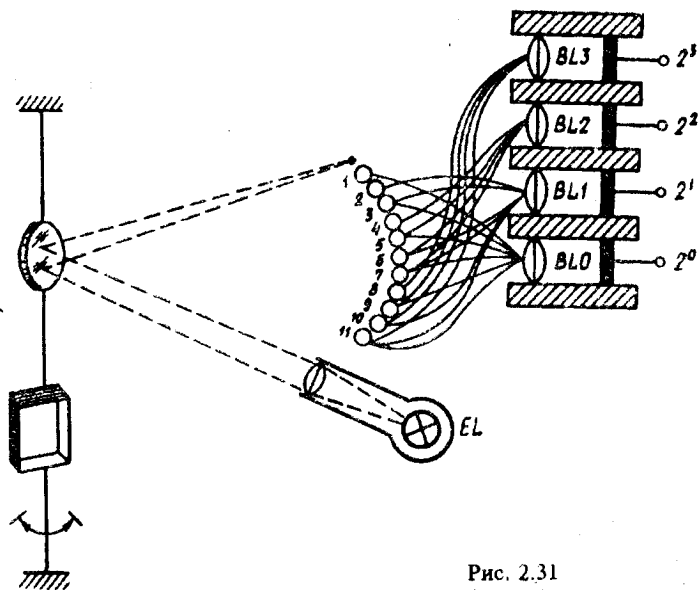


Рис. 2.31

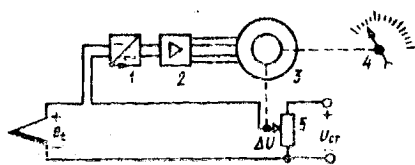


Рис. 2.32

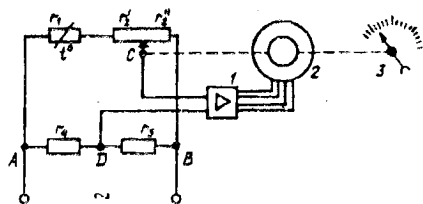


Рис. 2.33

Сканування одержаного кодового зображення (послідовний автоматичний огляд його, від англ. scan — перегляд) можна здійснити оптичним способом за допомогою фотодіодів  $BL_0$ ,  $BL_1$  та  $BL_2$  (рис. 2.28, б та 2.29, а), які контролюватимуть наявність чи відсутність кодових вирізів для кожної з доріжок зображення (відповідно для  $2^0=1$ ,  $2^1=2$  та  $2^2=4$ ). Освітлення фотодіода через виріз у кодувальному секторі примушує спрацювати відповідне реле (КМ0, КМ1, КМ2 на рис. 2.29, а); при цьому контакти реле перемикаються, вмикаючи ту чи іншу сигнальну лампу з написом відповідної цифри десяткової системи (рис. 2.29, б). Наприклад, при освітленні  $BL_0$  спрацьовує КМ0 і спалахує сигнальна лампа 1; при освітленні  $BL_1$  та  $BL_2$  спрацьовують КМ1 та КМ2 і спалахує сигнальна лампа 6 і т.д. Схема на рис. 2.29 відіграє роль перетворювача «двійковий код — десятковий код»; лампи з цифрами — цифровий індикатор.

Реальні цифрові прилади безперервної дії мають складнішу будову (двійковий код не менш, ніж семирозрядний; контактне або магнітне сканування і т. д.). На рис. 2.30 зображено сектор шестирозрядного АЦП.

Для кодування лінійних та кутових переміщень останнім часом все більше використовуються волоконнооптичні кодувальні пристрої (ВОКП). У ВОКП пов'язуються переваги квантувального та кодувального перетворювачів, а саме: наявність тільки однієї квантувальної доріжки та цифровий вихідний код.

Один з таких пристроїв зображено на рис. 2.31. Промінь світла від освітлювача  $EL$  відбивається дзеркальцем рухомої системи аналогового вимірювального приладу (наприклад, магнітоелектричного) і потрапляє на квантувальну доріжку, створену зі щільно розташованих торців оптичних волокон. Вихідні кінці цих волокон уведені у фотоприймачі  $BL$  відповідних розрядів коду: з комірки 1 у приймач  $2^0$ , з комірки 2 — у приймач  $2^1$ , з 3 — у приймачі  $2^0$  та  $2^1$  і т. д. У цих фотоприймачах промінь світла перетворюється на відповідний електричний кодовий сигнал.

Приклади автоматичних вимірювальних схем порівняння подано на рис. 2.32 та 2.33.

В автоматичному потенціометрі постійного струму (рис. 2.32) замість гальванометра ввімкнено перетворювач постійного струму в змінний 1, підсилювач 2 і допоміжний електродвигун (сервоелектродвигун) 3. Якщо  $\Delta U \neq e_t$ , різниця цих величин після підсилення вмикає сервоелектродвигун, який переміщує повзун подільника напруги 5 доти, доки не стане  $\Delta U = e_t$ . Кожному значенню  $e_t$  при рівновазі системи відповідає певне положення ротора сервоелектродвигуна й повзуна реостата, які можна визначити за допомогою відлічувального пристрою 4 (показувального, реєструвального).

Схема автоматичного моста показана на рис. 2.33. Рівновазі схеми відповідає умова

$$(r_1 + r'_2)r_3 = r''_2 r_4. \quad (2.7)$$

Якщо  $r_1$  змінюється, наприклад, зростає, то рівновага порушується, напруга нерівноваги  $U_{CD}$  підсилюється (1 — підсилювач) і вмикає сервоелектродвигун 2, який відповідно переміщує (у даному випадку — ліворуч) повзун реостата  $r_2$  доти, доки знову не буде рівноваги; при зменшенні  $r_1$  повзун реостата  $r_2$  переміщується праворуч. Кожному значенню  $r_1$  відповідає певне положення повзуна реостата  $r_2$ , при якому настає рівновага. Відлічувальний пристрій 3 градуєють у значеннях  $r_1$ .

## Глава 3

# ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ Й РЕГУЛЮВАННЯ

### § 3.1. Первинні пристрої систем автоматизованого дискретного керування

У системах автоматизованого дискретного керування первинними (вхідними) можуть бути пристрої, за допомогою яких у функціональну частину систем подаються іззовні певні сигнали. До таких пристроїв належать різноманітні вимикачі, що приводяться в дію вручну, а також реле захисту та реле контролю технологічних параметрів.

До найпоширеніших конструкцій малогабаритних ключів ручного керування належить тумблер (рис. 3.1). При повороті рукоятки 3 стискується пружина 4, внаслідок чого в кінці повороту рукоятки контактний ролик 5 перекидається у протилежне крайнє положення. Якщо спочатку замкненим було коло між нерухомими контактними пластинами 6, 7, то після перекидання ролика ліворуч замикається коло 1, 2. Цей тумблер становить двопозиційний перемикач з двома фіксованими положеннями. Якщо є тільки одна пара нерухомих контактних пластин (наприклад, 6, 7), то тумблер — простий однополюсний вимикач. Деякі тумблери-перемикачі можуть мати три фіксованих положення: два крайніх робочих і одне нейтральне середнє.

Для подавання команд вручну використовуються різноманітні *кнопкові станції*, що складаються з кнопкових елементів (рис. 3.2, а). При натисканні на головку штифта 3 стискається пружина 4 і відбувається переміщення рухомого контакту 5 місткового типу; при цьому спочатку розмикається коло нерухомих контактних пластин 2—2, потім замикається коло пластин 1—1. Завдяки пружині 4 рухома система відразу після припинення натискання на головку штифта повертається у вихідне положення. Такі кнопки керування називаються *безаретирними*, на відміну від ключів аретирних, в яких передбачено фіксацію рухомої системи у спрацьованому положенні. На цьому ж рисунку: *б* — замикаючий контакт, *в* — розмикаючий контакт, *г* — кнопкова станція нереверсивного керування, *д* — кнопкова станція реверсивного керування. Для зручності обслуговування головки кнопкових штифтів мають відповідні написи: «пуск», «стоп», «вперед», «назад» тощо; кнопковий штифт «стоп», як правило, фарбують у червоний колір.

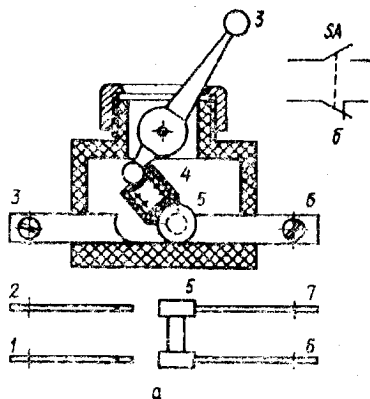


Рис. 3.1

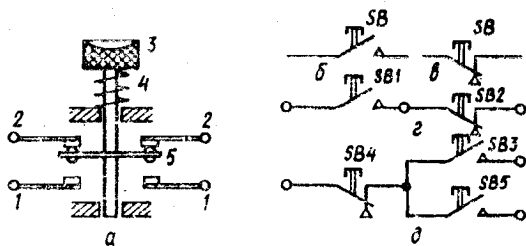


Рис. 3.2

Для замикання та розмикання потужних електричних кіл використовуються пакетні вимикачі (рис. 3.3); вони становлять одно-, дво- або триполюсні апарати, що складаються з пакета окремих кілець. Всередині кожного кільця розташована контактна система: два нерухомих контакти 1 та один рухомий 3, закріплений на ізоляційних дисках 2. З метою поліпшення дугогасіння пакетні вимикачі оснащуються механізмом для миттєвого перемикання контактів: поворотом рукоятки 7 обертання через верхню піввісь передається скоби 8, закручується пружина 9; нижня піввісь 10 разом із рухомих контактом 3 залишаються поки що нерухомими. При повороті рукоятки 7 на достатній кут нижня частина скоби 8 втворює кінець розрізної кільцевої пружинної шайби 6, закріпленої на пластмасовому кільці 4; шайба 6 звільняється від свого фіксуючого виступу 5 і під дією пружини 9 миттєво перекидається до наступного виступу, захоплюючи за собою з'єднану з нею піввісь 10 з рухомих контактом 3.

Вимикач ручної дії з автоматичним захистом при перевантаженні або короткому замиканні показаний на рис. 3.4, а. Якщо натиснути на кнопку 4, клин 6 зміщує клин 7 праворуч і фіксує шток 3 у нижньому положенні. При цьому контакти 1 і 2 замикаються. Натискання на кнопку 5 також переміщує клин 7 праворуч, фіксатор розчіплюється, шток 3 повертається у верхнє положення, і контакти 1 і 2 розмикаються. Те саме відбувається, коли струм перевищує допустимий: якір 8 втягується у котушку 9, і контакти 1, 2 розмикаються.

Для захисту від короткого замикання застосовують *плавкі запобіжники* (див. § 1.4).

Для захисту електродвигунів від перевантаження можна використовувати теплові реле (рис. 3.5, а): по нагрівальних елемен-

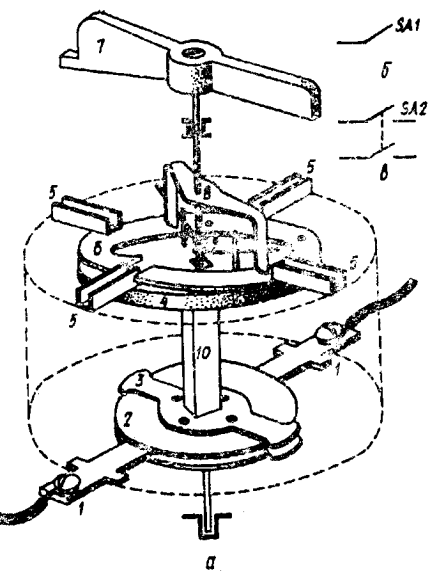


Рис. 3.3

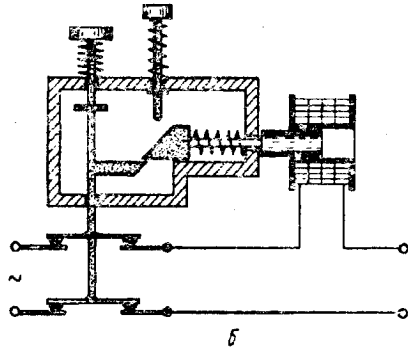
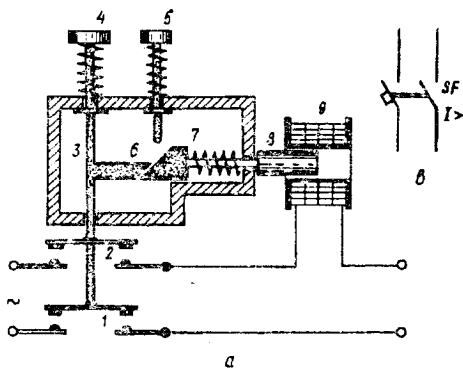


Рис. 3.4

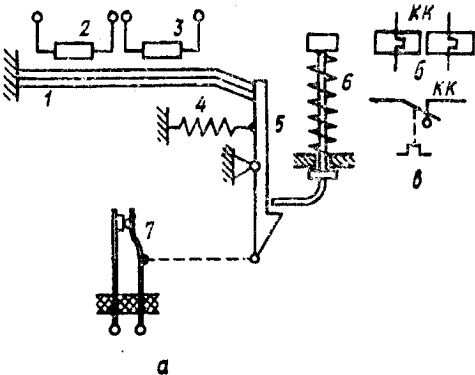


Рис. 3.5

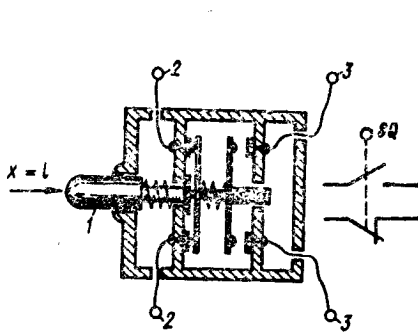


Рис. 3.6

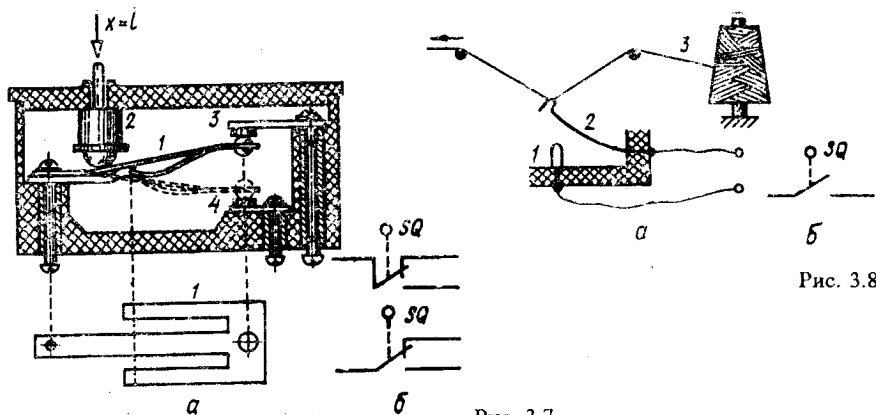


Рис. 3.7

Рис. 3.8

гах 2 та 3 проходить струм, що живить електродвигун. При перевантаженні електродвигуна струм його живлення зростає, і вільний кінець біметалевої консолі 1 переміщується вгору настільки, що верхній кінець важеля 5 зісковзує з неї і під впливом пружини 4 повертається проти годинникової стрілки, розмикаючи контакти 7. Після охолодження біметалевої пластини (й електродвигуна), натиснувши на кнопку 6, можна повернути механізм реле у вихідне положення. На схемах це реле позначається таким чином: рис. 3.5, б — нагрівальні елементи, 3.5, в — контакт.

Кінцеві вимикачі призначені для виявлення відносно великих лінійних переміщень деякого об'єкта (рис. 3.6: 1 — шток, 2—2 розмикаючий контакт, 3—3 — замикаючий; праворуч — умовне графічне позначення цих контактів). Якщо контрольоване тіло, переміщуючись, досягає певного заданого граничного положення, відбувається переміщення вимірювального штока і зв'язаної з ним рухомої контактної системи.

Малогабаритний кінцевий вимикач, або мікроперемикач, зображено на рис. 3.7, а. Рухомий контакт 1, виготовлений із плоскої пружини особливої конфігурації, закріплено у напруженому стані. Вимірювальний шток 2, переміщуючись, прогинає середню натягнуту смужку пружини 1, внаслідок чого відбувається миттєве перекидання рухомого контакту з верхнього граничного положення (розмикаючий контакт 1—3) в нижнє (замикаючий контакт 1—4). Завдяки такій будові контактної системи цей мікроперемикач при невеликих габаритних розмірах може застосовуватися для перемикання відносно значних струмів (до 3 А) при досить великих значеннях напруги (до 380 В).

Технологічні контакти встановлюються на деяких технологічних машинах з метою виявлення різноманітних порушень технологічного процесу. Наприклад, технологічний контакт, зображений на

рис. 3.8, може контролювати цілісність нитки 3. При її обриванні контактна пружина 2 замикається з нерухомим контактом 1 — технологічний контакт спрацював.

До первинних пристроїв систем автоматизованого дискретного керування належать також деякі розглянуті у § 1.6 комбіновані перетворювачі інформації: реле рівня рідини (див. рис. 1.95), контактний манометр (див. рис. 1.96), контактний термометр (див. рис. 1.97), дилатометричне реле (див. рис. 1.98) тощо.

### § 3.2. Вторинні пристрої систем автоматизованого дискретного керування

У системах автоматизованого дискретного керування вторинні пристрої призначаються для логічної переробки інформації у функціональній частині системи. Для цього використовуються різноманітні контактні (нейтральні й поляризовані електромагнітні реле, реле часу, лічильно-імпульсні реле тощо) та безконтактні (напівпровідникові) логічні елементи.

Деякі електромагнітні реле було розглянуто в § 1.6 (нейтральне (див. рис. 1.99), поляризоване (див. рис. 1.100)). Останнім часом набули поширення малогабаритні без'якірні електромагнітні реле постійного струму з магнітокеруваними герметизованими контактами — так звані *геркони*. Геркон (рис. 3.9) становить скляний балон 3, усередині якого містяться контактні пружини 2, виготовлені з феромагнітного матеріалу. Зовні скляного балона розміщено котушку 1, яка створює магнітне поле  $\Phi$ . Якщо вільні кінці контактних пластин намагнічуються різнойменно, вони притягуються один до одного (замикаючий контакт) (рис. 3.10, а), якщо одноіменно, то відштовхуються (розмикаючий контакт) (рис. 3.10, б); можна зробити й перемикаючий контакт (трійник) (рис. 3.10, в).

Поверхні контактування пластин покривають тонким шаром неокислюваного металу (як правило, золота). Геркони забезпечують високу надійність роботи приладу.

У системах дискретного керування іноді виникає потреба втримувати певні інтервали часу між деякими подіями. Для цього використовуються спеціальні реле, в яких штучно збільшено час спрацьовування (відпускання). Такі пристрої називають *реле часу*.

На рис. 3.11 наведено часову діаграму спрацьовування та відпускання нейтрального електромагнітного реле постійного струму (див. рис. 1.99): якщо в момент  $t_1$  вмикається напруга живлення котушки реле, а в момент  $t_2$  реле спрацьовує, то час його спрацьовування  $t_{сп} = t_2 - t_1$ ; якщо в момент  $t_3$  розмикається коло

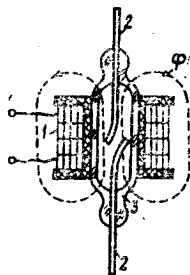


Рис. 3.9



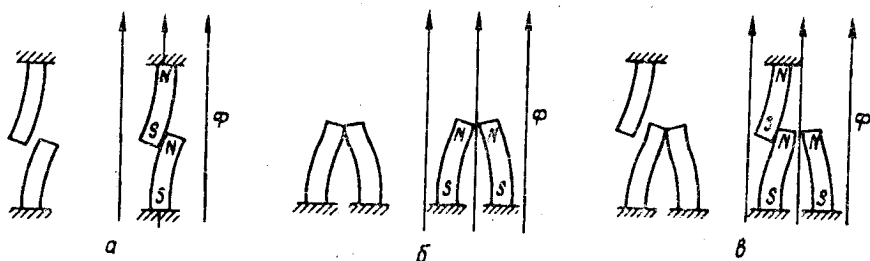


Рис. 3.10

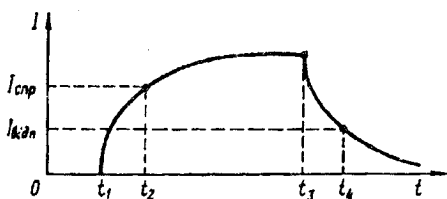


Рис. 3.11

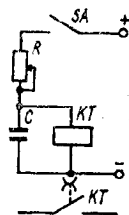


Рис. 3.12

котушки, а в момент  $t_4$  реле відпускає, то час його відпускання  $t_{\text{відп}} = t_4 - t_3$ .

З метою збільшення  $t_{\text{спр}}$  використовується схема рис. 3.12: чим більше  $R$  і  $C$ , тим повільніше заряджається конденсатор після замикання  $SA$  і тим пізніше струм  $I$  у котушці реле досягне значення  $I_{\text{спр}}$  (крива 2 на рис. 3.13, а; час спрацьовування дорівнює  $t_2'' - t_1$ ). У цій схемі збільшується також і час відпускання реле: після розмикання  $SA$  котушку підживлює конденсатор, що віддає момент, коли струм  $I$  знизиться до значення  $I_{\text{відп}}$  (крива 2 на рис. 3.13, б; час відпускання дорівнює  $t_4'' - t_3$ ; чим більша ємність конденсатора, тим більший час відпускання).

Один із варіантів електронного реле часу (на тиратроні з холодним катодом) зображено на рис. 3.14, а. Після перемикавання

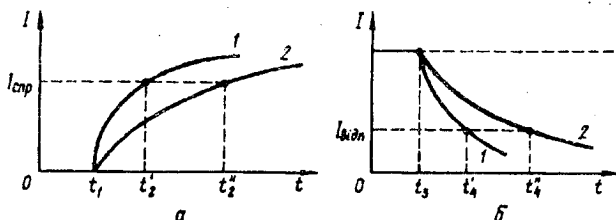


Рис. 3.13

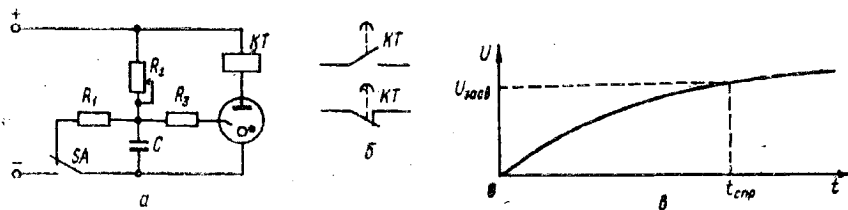


Рис. 3.14

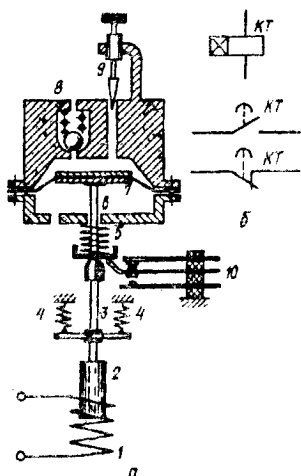


Рис. 3.15

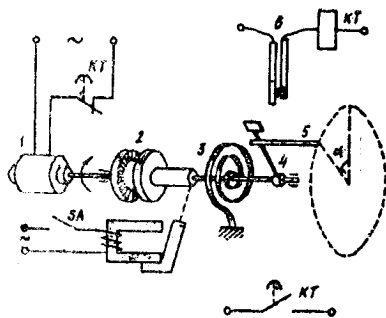


Рис. 3.16

SA конденсатор  $C$  починає заряджатися через резистор  $R_2$ . Напряга на конденсаторі та пусковому електроді тиратрона поступово зростає, і при певному її значенні виникає розряд між пусковим електродом та катодом, а потім і між анодом та катодом; тиратрон засвічується, реле  $KT$  спрацьовує. Час спрацьовування ( $t_{спр}$  на рис. 3.14, б) тим більший, чим більші  $C$  і  $R_2$ . Коли  $SA$  повертається у вихідне положення, тиратрон позбавляється живлення, і реле  $KT$  відразу відпускає; конденсатор розряджається через резистор  $R_1$ . Значення  $t_{спр}$  може сягати кількох секунд.

Ще один різновид реле часу — електропневматичне — зображено на рис. 3.15. При проходженні струму по котушці 1 якір 2 втягується в котушку, переміщуючи шток 3 і переборюючи пружність пружини 4. Під впливом пружини 5 шток 6 теж починає опус-

катися. Переміщення штока 6 гальмується мембраною 7, оскільки повітря в камеру над мембраною потрапляє через малий отвір, до того ж частково перекритий регульованою голкою 9. Тому контакти 10 перемикаються не відразу після спрацьовування електромагнітного привода, а тільки через певний час. Після знеструмлення котушки якір переміститься вгору, мембрана перешкоджати цьому не буде, тому що повітря з верхньої камери легко витісняється через кульовий клапан 8. На рис. 3.15, б зображена котушка та два контакти реле, уповільненого на спрацьовування (уповільнення може досягати 10...15 с).

Більш значних витримок часу можна досягти за допомогою *моторного (електродвигунного) реле часу* (рис. 3.16). Тихохідний синхронний сервоелектродвигун 1 обертається з постійною швидкістю. Після замикання SA спрацьовує електромагнітна муфта 2, і права піввісь, закручуючи спіральну пружину 3, починає обертатися разом із ротором сервоелектродвигуна. Через певний час поворотний важіль 4 замикає контакт 6, спрацьовує реле KT, своїм розмикаючим контактом зупиняє сервоелектродвигун, а замикаючий контакт цього самого реле може бути використаний для вмикання певного об'єкта керування. Витримка часу при спрацьовуванні залежить від початкового положення поворотного важеля який спирається у вихідному положенні на стержень 5: чим більший кут  $\alpha$  переміщення цього стержня, тим більшим буде час спрацьовування реле. Після розмикання SA пружина 3 повертає рухому систему реле у вихідне положення. Витримка часу для цього реле становить десятки секунд.

*Лічильно-імпульсне реле*, контакт якого замикається після надходження певної заданої кількості імпульсів, зображено на рис. 3.17. При поданні електричного імпульсу в котушку виникає магнітне поле у магнітопроводі, що складається з осердя 8 та якоря 2

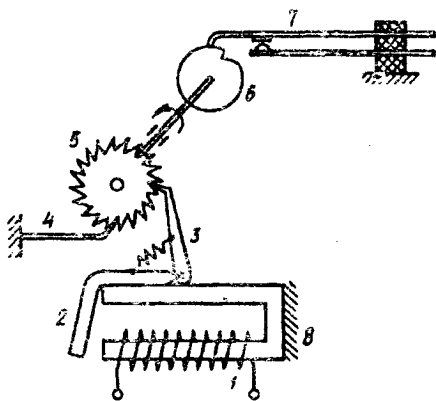


Рис. 3.17

Якір притягується до осердя. храпова защіпка 3 повертає храпове колесо 5 на один крок. Після припинення імпульсу храпова защіпка повертається у вихідне положення, прихоплюючи наступний черговий зуб храпового колеса; від зворотного обертання храпове колесо захищає запобіжна защіпка (пружина) 4. Через певну кількість імпульсів (залежно від конфігурації кулачка 6) контакт 7 спрацьовує. У цьому реле робоче переміщення храпового колеса відбувається при

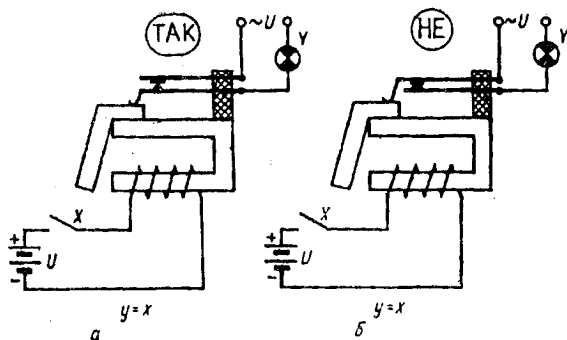


Рис. 3.18

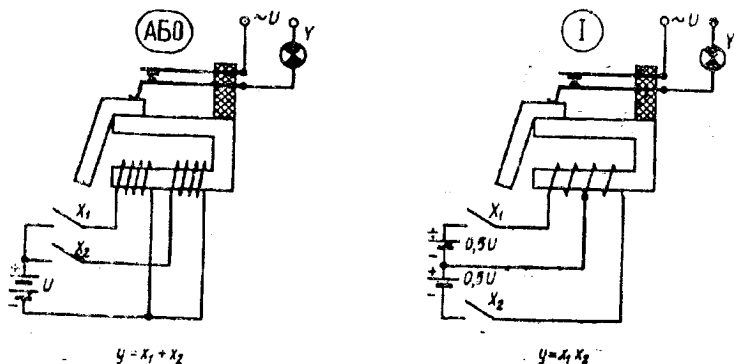


Рис. 3.19

Рис. 3.20

надходженні імпульсу струму в котушку; тому такий механізм називається *електромагнітним приводом прямої дії*.

У сучасних системах автоматизованого дискретного керування широко застосовуються безконтактні логічні елементи. Відомо, що за допомогою сукупності трьох функцій («НЕ», «АБО», «І») можна математично описати будь-які логічні зв'язки, тому ці функції вважаються основними. Деяке допоміжне значення має й функція «ТАК».

Релейно-контактні моделі унарних функцій (що залежать від одного аргумента) зображено на рис. 3.18; моделі бінарних (які залежать від двох аргументів) — на рис. 3.19, 3.20.

Логічне відношення *ствердження* (функція «ТАК») відображується формулою  $y=x$  (читається: «ігрек є ікс»); функція істинна ( $y=1$ ), якщо істинний аргумент ( $x=1$ ), і хибна — в протилежному разі. На моделі рис. 3.18, а, якщо ключ  $X$  замкнута, то реле спрацює, замкне свій контакт, і сигнальна лампа  $Y$  теж почне світитися.

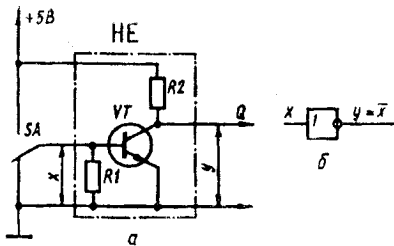


Рис. 3.21

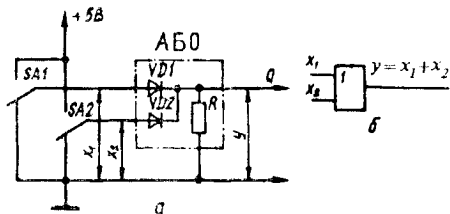


Рис. 3.22

Логічні елементи «ТАК» звичайно використовуються як підсилювачі.

Логічне відношення *заперечення* (функція «НЕ») відображується формулою  $y = \bar{x}$  (читається: «ігрек є не ікс»); функція істинна ( $y=1$ ), якщо хибний аргумент ( $x=0$ ), і навпаки, функція хибна ( $y=0$ ), якщо аргумент істинний ( $x=1$ ). На моделі рис. 3.18, б це можна показати так: якщо ключ  $X$  замкнути, реле спрацьовує, розмикає свій контакт, і сигнальна лампа  $Y$  гасне; і навпаки, при розімкненому ключі  $X$  лампа  $Y$  світиться.

Логічне відношення *диз'юнкція* (логічна сума, функція «АБО») відображується формулою  $y = x_1 + x_2$  (читається: «ігрек є ікс один або ікс два»); функція істинна ( $y=1$ ), якщо істинний хоча б один аргумент ( $x_1=1$  чи  $x_2=1$ ; або  $x_1=1$  та  $x_2=1$ ). На моделі (див. рис. 3.19) реле спрацьовує, і сигнальна лампа  $Y$  спалахує, якщо замкнути ключ  $X_1$  чи  $X_2$  або обидва  $X_1$  та  $X_2$ .

Логічне відношення *кон'юнкція* (логічний добуток, функція «І») відображується формулою  $y = x_1 \cdot x_2$  (читається: «ігрек є ікс один і ікс два»); функція істинна ( $y=1$ ) тільки в тому разі, якщо істинні обидва аргументи ( $x_1=1$  та  $x_2=1$ ). На моделі (див. рис. 3.20) замикання одного з ключів  $X_1$  або  $X_2$  не призведе до спрацьовування реле — напруга  $0,5U$  недостатня для цього; але якщо одночасно замкнути  $X_1$  та  $X_2$ , реле спрацює, і сигнальна лампа  $Y$  засвітиться.

Для більшості напівпровідникових логічних елементів логічною одиницею вважається напруга, близька до  $+5$  В («напруга високого рівня»), а логічним нулем — відсутність напруги або її невелике значення, наприклад  $(0,4 \dots 0,5)$  В («напруга низького рівня»). Найпростіший варіант внутрішньої схеми напівпровідникового логічного елемента «НЕ» показано на рис. 3.21. Якщо ключ  $SA$  у нижньому положенні, то на вході елемента напруги немає («логічний 0» на виході елемента, тобто  $x=0$ ), транзистор  $VT$  закритий, і на виході  $Q$  напруга близька до  $+5$  В («логічна 1» на виході елемента, тобто  $y=1$ ). Якщо ж ключ  $SA$  перевести у верхнє положення, на вхід елемента потрапляє напруга  $+5$  В (тобто  $x=1$ ), транзистор відкривається, і внаслідок падіння напруги на

резисторі  $R_2$  напруга на виході  $Q$  знижується майже до нуля ( $y=0$ ). Графічне позначення елемента «НЕ» на принципових схемах дискретного керування подано на рис. 3.21, б.

Можливий варіант внутрішньої схеми напівпровідникового логічного елемента «АБО» зображено на рис. 3.22.

Якщо обидва перемикачі  $SA1$  та  $SA2$  знаходяться у нижньому положенні, напруги на обох входах немає ( $x_1=0$  та  $x_2=0$ ), то через діоди  $VD1$  та  $VD2$  струм не проходить, і сигнал на виході  $Q$  також дорівнює нулю ( $y=0$ ). Якщо ж хоча б один перемикач (чи обидва) перевести у верхнє положення ( $x_i=1$ ), то через діод (чи обидва діоди) потече струм колом «+5 В —  $SA$  —  $VD$  —  $R$  — «земля»», і на виході  $Q$  з'явиться напруга високого рівня ( $y=1$ ), що дорівнюватиме напрузі джерела живлення за відрахуванням прямого падіння напруги в діоді. Умовне графічне позначення логічного елемента «АБО» на принципових схемах дискретного керування — на рис. 3.22, б.

Варіант внутрішньої схеми напівпровідникового логічного елемента «І» зображено на рис. 3.23. Якщо обидва ключі  $SA1$  та  $SA2$  знаходяться у нижньому положенні ( $x_1=0$  та  $x_2=0$ ), то обидва діоди  $VD$  відкриті. Майже вся напруга падає на резисторі  $R$ , тому потенціал точки  $M$  близький до нуля (він вищий від нуля тільки на значення прямого падіння напруги на двох паралельно з'єднаних діодах), і можна вважати, що  $y=0$ . Переведення одного з ключів  $SA$  у верхнє положення мало що змінить у схемі: діод, що відповідає цьому ключу, закриється, але другий залишиться відкритим, і потенціал точки  $M$  майже не зросте, він тепер дорівнюватиме прямому падінню напруги на одному відкритому діоді. Тільки у разі переведення вгору обох ключів  $SA$  ( $x_1=1$  та  $x_2=1$ ) закриються обидва діоди, й потенціал точки  $M$  підніметься до високого рівня — до +5 В (тобто  $y=1$ ). Умовне графічне позначення логічного елемента  $I$  на принципових схемах дискретного керування — на рис. 3.28, б (крім двоходових, бувають також елементи з трьома або чотирма входами).

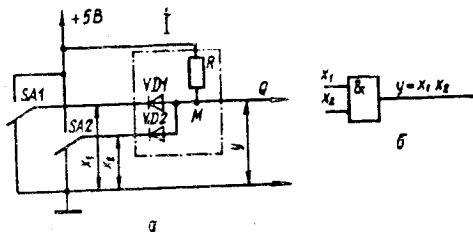


Рис. 3.23

### § 3.3. Вихідні пристрої систем автоматизованого керування й регулювання

До вихідних пристроїв належать тягові електромагніти, електромагнітні муфти, сервоелектродвигуни, серводвигуни мембранні та плунжерні.

Тяговий електромагніт постійного струму зображено на рис. 3.24, а (1 — котушка, 2—5 — осердя, 6 — якір). Чим менший повітряний зазор  $\delta$  між якорем 6 та частиною 2 осердя, тим меншим буде початкове значення струму при спрацьовуванні електромагніта. На рис. 3.24, б показано, як зменшити повітряний зазор, не зменшуючи довжини ходу  $l$ : треба виготовити верхній кінець якоря у формі конуса, а в осерді зробити конічне заглиблення. Умовні графічні позначення — праворуч на рис. 3.24 (два варіанти).

Тяговий електромагніт змінного струму показаний на рис. 3.25 (1 — мідне кільце для усунення вібрації якоря, 2 — котушка, 3 — осердя, 4 — якір), а на рис. 3.26 — двообмотковий тяговий електромагніт реверсивної дії ( $\omega_{\text{пр}}$  — котушка прямого ходу;  $\omega_{\text{звор}}$  — котушка зворотного ходу. Умовне графічне позначення б).

Електромагнітна *фрикційна муфта* релейної дії (сухого тертя) зображена на рис. 3.27 (1 — осердя, розташоване на ведучому валу 2; 4 — котушка; 7 — якір на веденому валу 6). При пропусканні струму по котушці якір, переміщуючись по шпонці, притискується до осердя, причому дотикання здійснюється по кільцевій поверхні, де і на осерді, і на якорі нанесено покриття 5, з високим коефіцієнтом тертя; тому якір починає обертатися разом з осердям. Після припинення подачі струму в котушку пружина відштовхує якір від осердя, й муфта розчіплюється. Для підведення струму до котушки використовуються контактні кільця та міднографітові щітки 3. Умовні графічні позначення для електричних схем — рис. 3.27, б, для кінематичних — 3.27, в.

Електромагнітна *феропорошкова муфта* плавної дії (в'язкого тертя) показана на рис. 3.28, а (1 — ведучий вал, 2 — пристрій для підведення струму до котушки, 3 — котушка, 4 — дисковий якір на веденому валу 7, 5 — порожнисте осердя, 6 — феропорошок). При пропусканні струму по котушці намагнічується феромагнітний наповнювач (порошок карбонільного заліза; суміш залізного порошку з тальком; суміш залізного порошку з силіконовим маслом), що заповнює внутрішню порожнину осердя (зазор між осердям і якорем). Це збільшує в'язкість наповнювача, внаслідок чого виникає механічний зв'язок між ведучим та веденим валами. Змінюючи струм, можна змінювати обертальний момент, що передається від ведучого вала до веденого, — тобто також і швидкість обертання веденого вала. Ланцюжки з дрібних частинок феропорошку, які зчіплюються між собою під впливом магнітного потоку  $\Phi$ , у збільшеному вигляді показані на рис. 3.28, б.

Найбільшого поширення набули допоміжні електродвигуни (*сервоелектродвигуни*, від англ. serve — служити), які можуть житися від однофазної мережі змінного струму: конденсаторні та з розщепленими полюсами. У першому з них (рис. 3.29) обертове магнітне поле створюється за допомогою двох котушок  $\omega_1$  і  $\omega_2$  (кожна з них складається з двох напівкотушок), змішених у про-

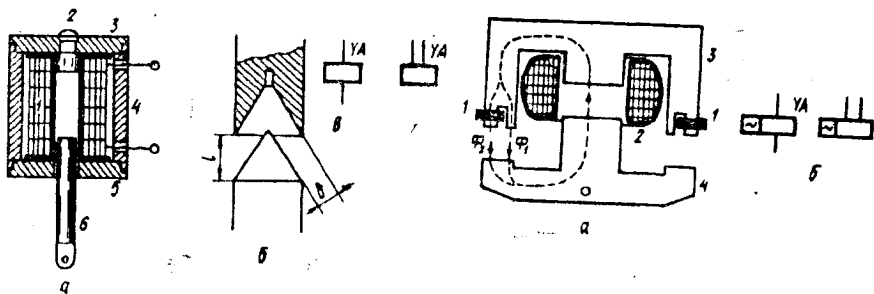


Рис. 3.24

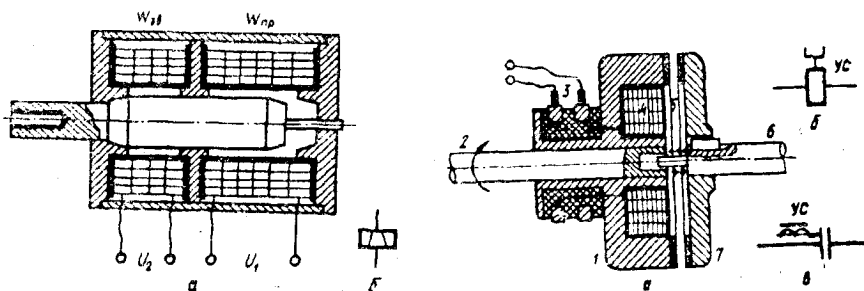


Рис. 3.26

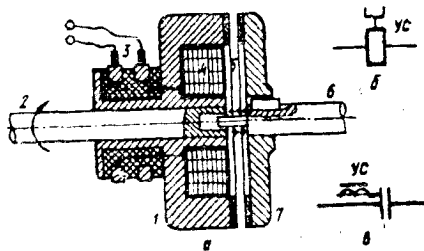


Рис. 3.27

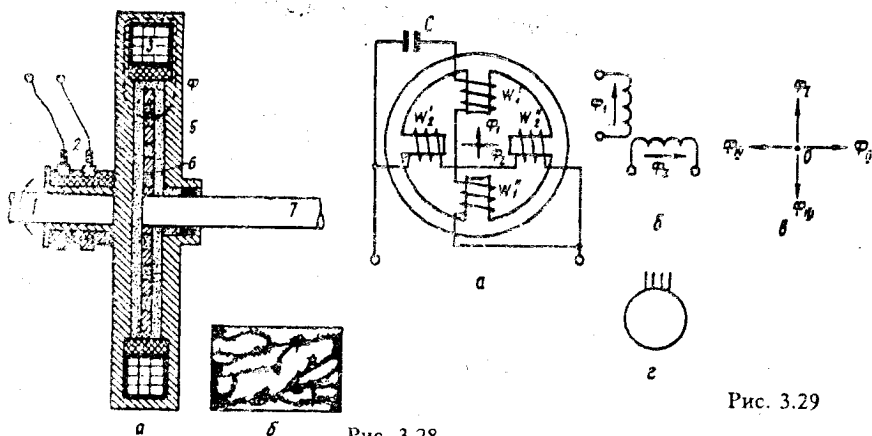


Рис. 3.28

Рис. 3.29



сторі на  $90^\circ$ ; одна з цих котушок (на рис. 3.29, *a* — перша) ввімкнена через конденсатор, тому струм у ній випереджає струм другої котушки на чверть періоду. Внаслідок цього магнітний потік  $\Phi_1$  випереджає  $\Phi_2$  на  $90$  електричних градусів. У такому статорі сумарний магнітний потік  $\Phi$  змінює свій напрям (рис. 3.29, *b, в*), по черзі займаючи позиції  $\Phi_I - \Phi_{II} - \Phi_{III} - \Phi_{IV}$ , тобто обертаючись навколо осі  $O$ ; у даному випадку обертання відбувається за годинниковою стрілкою (правило: від напрямку магнітного поля, що випереджає, до напрямку поля, яке відстає). Умовне графічне позначення статора такого електродвигуна — рис. 3.29, *г*.

У статорі двигуна на рис. 3.30, *в* тільки одна котушка (теж із двох напівкотушок), але магнітні полюси розщеплені, причому на одній частині кожного полюса розміщене мідне кільце (так само, як і в електромагнітному перетворювачі змінного струму (див. рис. 1.33, *б*)). Внаслідок цього загальний магнітний потік котушки поділяється на дві частини —  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ , причому  $\Phi_2$  відстає від  $\Phi_1$  майже на  $90$  електричних градусів. Зміщення двох магнітних полів на  $90^\circ$  як у просторі, так і в часі спричинює виникнення обертального поля (у даному випадку теж за годинниковою стрілкою, від напрямку поля  $\Phi_1$ , що випереджає, до напрямку поля  $\Phi_2$ , яке відстає). Умовне графічне позначення статора електродвигуна з розщепленими полюсами — рис. 3.30, *б*.

Різні варіанти роторів для сервоелектродвигунів зображено на рис. 3.31, 3.32 та 3.33.

У асинхронних сервоелектродвигунах використовуються ротори типу «біляче колесо», знайдені російським фізиком і електротехніком М. Й. Доліво-Добровольським (рис. 3.31: *a* — розташування провідників у короткозамкненому роторі, *б* — конфігурація феромагнітної пластини для ротора, *в* — ротор «біляче колесо» у зібраному стані, *г* — умовне графічне позначення такого ротора). Недоліком цього ротора є велика інерційність. Для зменшення інерційності замість «білячого колеса» можна використати ротор у вигляді алюмінієвого стакану, запропонований італійським фізиком та електротехніком Галілео Феррарисом (рис. 3.32, *a*: 1 — нерухоме феромагнітне осердя ротора, 2 — алюмінієвий стакан, 3 — вал ротора). Такий електродвигун теж асинхронний. Умовне графічне позначення такого ротора — на рис. 3.32, *б*.

Якщо ротор виконати з постійного магніту (рис. 3.33, *a*) і розкрутити його до такої ж швидкості обертання, з якою обертається магнітне поле, то надалі він обертатиметься з постійною швидкістю, такою ж, з якою обертається магнітне поле (це буде синхронний сервоелектродвигун з активним ротором). Але самостійно почати обертання в обертальному магнітному полі такий ротор не здатний. Умовне графічне позначення — на рис. 3.33, *б*. Для усунення цього недоліку можна виконати ротор у вигляді суцільного циліндра (рис. 3.33, *в*) з магнітотвердого матеріалу, з великим  $g$ -

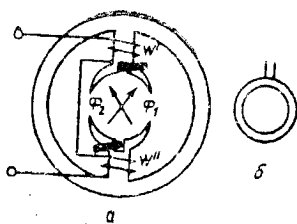


Рис. 3.30

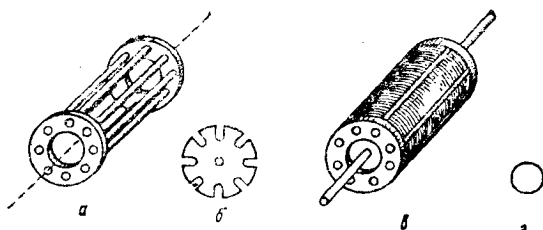


Рис. 3.31

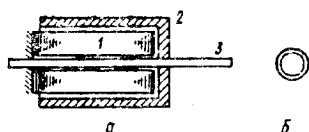


Рис. 3.32

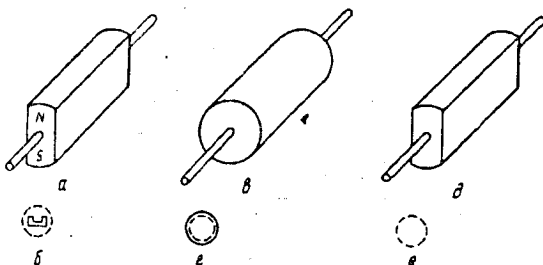


Рис. 3.33

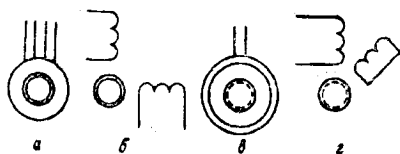


Рис. 3.34

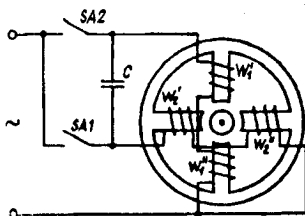


Рис. 3.35

стерезисом. Такий ротор, якщо його помістити в обертове поле, сплатку почне обертатися з асинхронною швидкістю, потім буде «втягнутий у синхронізм»: обертове поле захопить ротор, і надалі він працюватиме як активний. Цей синхронний сервоелектродвигун дістав назву *гістерезисного* (умовне графічне позначення — на рис. 3.33, e).

Можна виготовити ротор і з магнітм'якого матеріалу, якщо забезпечити магнітну асиметрію (рис. 3.33, d): у магнітному полі цей ротор прагнучиме зайняти таке положення, при якому його магнітний опір буде найменшим; це можливе тоді, коли магнітний потік проходить вздовж його головної осі симетрії (для рис. 3.33, d — вертикально). Спочатку ротор обертається з асинхронною швидкістю, потім втягується в синхронізм. Такий синхронний

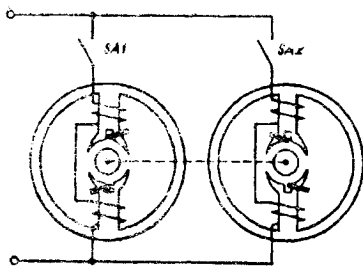


Рис. 3.36

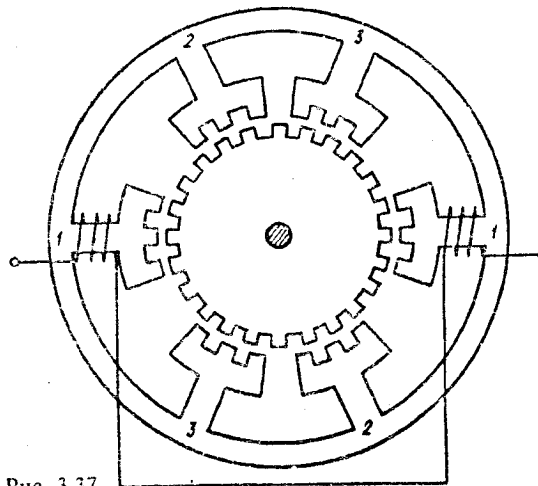


Рис. 3.37

сервоелектродвигун дістав назву *реактивного* (умовне графічне позначення — на рис. 3.33, е).

Зразки графічних позначень сервоелектродвигунів змінного струму зображено на рис. 3.34 (а, б — варіанти позначень для асинхронного конденсаторного сервоелектродвигуна з ротором Феррариса; в, г — варіанти позначень для синхронного гістерезисного сервоелектродвигуна з розщепленими полюсами).

Схеми реверса конденсаторного сервоелектродвигуна — на рис. 3.35: при замиканні SA1 конденсатор ввімкнений послідовно з  $\omega_1$  (обертання за годинниковою стрілкою); при замиканні SA2 конденсатор ввімкнений послідовно з  $\omega_2$  (обертання проти годинникової стрілки).

Оскільки змінити напрям обертання магнітного поля в сервоелектродвигуні з розщепленими полюсами неможливо (без зміни його конструкції — перестановки мідного кільця), для реверса такого сервопривода потрібна здвоєна конструкція (рис. 3.36: замикання SA1 забезпечує обертання за годинниковою стрілкою; при замиканні SA2 обертання буде в протилежному напрямі).

Зрозуміло, що в обох випадках (рис. 3.35 і 3.36) неприпустимо одночасно замикати SA1 та SA2.

*Кроковий сервоелектродвигун* зображено на рис. 3.37 (на відміну від перетворювача, зображеного на рис. 1.34, у цьому сервоелектродвигуні крок руху значно менший). На статорі цього пристрою знаходяться три котушки, кожна з яких розділена на дві половини (на рисунку показано тільки першу котушку). Якщо подати живлення на першу котушку, ротор сервоелектродвигуна займе таке положення, як на рис. 3.37 та 3.38, а. Вимкнення першої котушки і подача живлення на другу примусить ротор обернутися

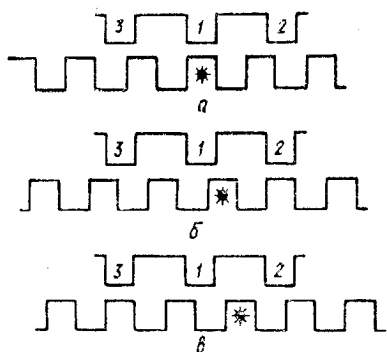


Рис. 3.38

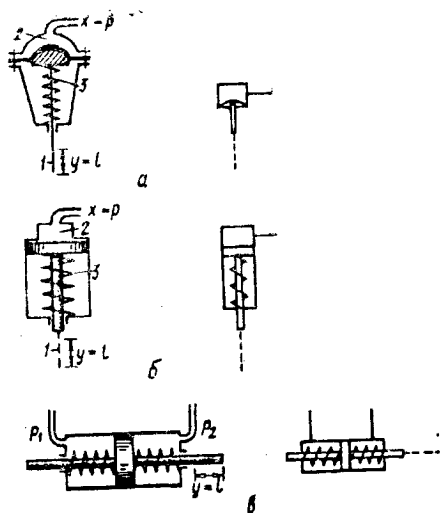


Рис. 3.39

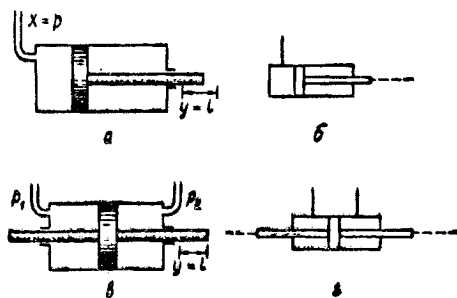


Рис. 3.41

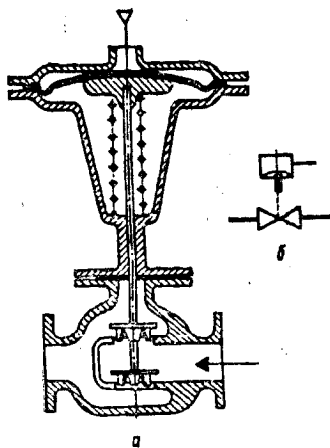


Рис. 3.40

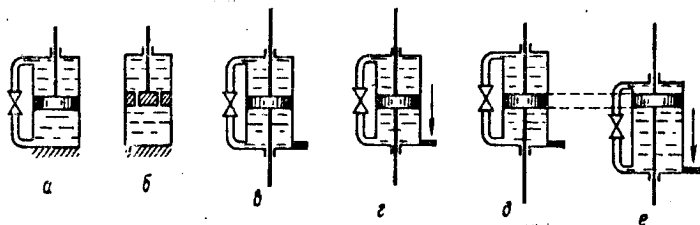


Рис. 3.42

за годинниковою стрілкою на  $1/3$  зубчастого кроку (рис. 3.38, б). При вимкненні другої і подачі живлення на третю — ще один такий же крок у тому ж напрямі (рис. 3.38, в) і т. д. Почергове живлення котушок у порядку 1—3—2 забезпечує обертання ротора проти годинникової стрілки.

Перевагою цього сервоелектродвигуна є те, що при його роботі ротор діє як безінерційний: миттєво починає обертання, якщо розпочинається подача імпульсів у котушки, та миттєво зупиняється після припинення живлення котушок або також миттєво змінює напрям обертання.

*Мембранний сервопривод* (пневматичний або гідравлічний) наведено на рис. 3.39, а — звичайно на основі мембранних перетворювачів із м'якою мембраною (див. рис. 1.16, а (1 — шток, 2 — мембрана, 3 — пружина)). Якщо в камеру над мембраною 2 подати стиснене повітря ( $x=p$ ), то робочий шток 1, долаючи протидію пружини 3, переміститься вниз ( $y=l$ ). Близький до нього за принципом дії і зображений на рис. 3.39, б підпружинений поршневий серводвигун. Після припинення подачі робочої речовини (під тиском,  $x=p$ ) пружина повертає поршень у вихідне положення.

Якщо робочою речовиною заповнюються камери з обох сторін від поршня (рис. 3.39, в), то залежно від різниці між  $p_1$  та  $p_2$  поршень рухатиметься: праворуч при  $p_1 > p_2$  і ліворуч при  $p_1 < p_2$ . Після припинення подачі робочої речовини пружини повертають поршень у середнє положення.

Використання мембранного сервопривода для керування регулюючим органом (вентилем) на трубопроводі показано на рис. 3.40, а (умовне графічне позначення — б).

*Поршневі сервоприводи* безпружинні (без самоповернення) зображено на рис. 3.41: одnobічний (а) та двобічний (в). Після припинення подачі робочої речовини поршень у цих сервоприводах залишається нерухомим — у тому положенні, якого він досяг до моменту припинення подачі стисненого повітря або рідини під тиском (умовні графічні позначення — б, г).

У деяких системах автоматики застосовується спеціальний допоміжний пристрій — *демпфер* (рис. 3.42, а): на трубі, що іззовні з'єднує верхню й нижню порожнини демпфера, встановлено регулювальний клапан, який гальмує перетікання робочої рідини з однієї порожнини в іншу. Якщо корпус демпфера закріпити, то цей пристрій можна вжити для гальмування при переміщенні окремих деталей. Варіант конструкції демпфера — на рис. 3.42, б.

Проте можна використати демпфер й інакше. Якщо корпус демпфера переміщувати досить швидко, разом з корпусом буде змушений так само переміщуватися й поршень — навіть при деякій протидії (рис. 3.42, в, г). Якщо ж корпус демпфера переміщується повільно, поршень при наявності протидії залишається нерухомим (рис. 3.42, д, е).

## Розділ II

# СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

### Глава 4

## СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З АВТОМАТИЗОВАНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

### § 4.1. Вимірювання; обробка результатів вимірювання

Для раціонального керування будь-яким об'єктом (див. рис. В.31) необхідно мати інформацію про стан об'єкта, для чого слід вимірювати певні технологічні параметри. В системах керування це здійснюється за допомогою відповідних елементів (ЕС на рис. В.33), які сприймають інформацію про стан об'єкта і перетворюють її на сигнал  $\Phi$  найбільш доцільної у даній системі керування форми (у системах ручного керування — у вигляді візуального аналогового або цифрового сигналу, призначеного для сприймання його оператором; у системах автоматизованого керування — найчастіше у вигляді електричного або пневматичного сигналу, теж аналогового чи дискретного, для подачі його в логічний елемент ЛЕ розпорядчої ланки).

Експериментальне добування повідомної інформації (знаходження значення фізичної величини шляхом порівняння її з одиницею цієї величини) за допомогою певних технічних засобів називається *вимірюванням*. Вимірювання поділяються на *прямі* та *непрямі* (серед непрямих — найпоширеніші опосередковані).

При прямих вимірюваннях результат визначається безпосередньо засобами вимірювання — прямим порівнянням вимірюваної величини з мірою (наприклад, вимірювання довжини метром) або за допомогою вимірювального приладу, проградуєваного в одиницях вимірювання (наприклад, вимірювання температури термометром). Прямі вимірювання в лабораторних умовах повторюють, як правило, багаторазово; на виробництві прямі вимірювання виконують одноразово.

При опосередкованих вимірюваннях значення величини знаходять за відомою залежністю її від однієї або кількох величин, які вимірюють прямо (наприклад, вимірявши масу тіла  $m$  і його об'єм  $V$ , можна обчислити густину  $\rho$  цього тіла за формулою  $\rho = m/V$ ).

Проте точне експериментальне визначення фізичної величини можливе лише тоді, коли вона має дискретний характер (таке відображення кількості однорідних матеріальних об'єктів числом називається *лічбою*). Істинне ж значення безперервної фізичної величини визначити абсолютно точно за допомогою експерименту

неможливо; в результаті експерименту можна тільки наблизитися до істини, дістаючи приближну її оцінку. Відхилення одержаного результату вимірювання від істинного значення фізичної величини називається *похибкою вимірювання*.

За способом вираження похибки вимірювання поділяються на *абсолютні та відносні*.

*Абсолютна похибка*  $\Delta_x$  вимірювання  $X$  виражається в одиницях цієї величини й визначається формулою «виміряне мінус істинне»:

$$\Delta_x = x - X, \quad (4.1)$$

де  $x$  — значення, одержане при вимірюванні;  $X$  — істинне значення вимірюваної величини.

*Відносна похибка*  $\delta_x$  вимірювання величини  $X$  дорівнює відношенню абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини

$$\delta_x = \Delta_x / X \quad (4.2)$$

і виражається в частках одиниці.

Оскільки істинне значення вимірюваної величини невідоме (якби воно було відоме, навіщо було б вимірювати?), обчислити похибки за формулами (4.1) та (4.2) неможливо. Для одержання хоча б наближених відомостей про розмір похибок  $\Delta_x$  і  $\delta_x$  у формули (4.1) та (4.2) замість невідомого істинного значення можна підставити так зване дійсне значення, добуто експериментально з найбільш можливою точністю.

Залежно від місця виникнення похибка може мати кілька складових: методичну, інструментальну, від впливу зовнішніх причин, суб'єктивну.

*Методична* складова похибки виникає внаслідок недосконалості методу вимірювань. Наприклад, при опосередкованому вимірюванні опору за допомогою амперметра й вольтметра за схемами, зображеними на рис. 4.1, похибки виникають через недосконалість методу; на рис. 4.1, *а* вольтметр показує не спадання напруги на резисторі, а сумарне спадання напруги на усьому послідовному колі, що складається з амперметра та резистора; у схемі на рис. 4.1, *б* — навпаки, вольтметр показує спадання напруги на резисторі, але показання амперметра завищені на величину, що дорівнює силі струму, який проходить через вольтметр.

Інструментальна складова похибки зумовлена недосконалістю засобів вимірювання (неточність градування шкали, недостатня стабільність та ін.). Її значення звичайно вказується у вигляді нормованої метрологічної характеристики засобу вимірювання. Для ви-

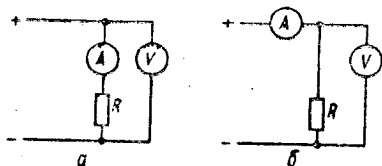


Рис. 4.1

мірювальних приладів безпосередньої оцінки (амперметри, вольтметри, манометри тощо) такою нормованою метрологічною характеристикою є граничне значення допустимої основної похибки  $\Delta_n$  (притаманної приладу в нормальних умовах експлуатації), яке може бути обчислене за класом точності приладу.

$$\Delta_n = (k_n N_n) / 100, \quad (4.3)$$

де  $k_n$  — клас точності приладу, %;  $N_n$  — діапазон вимірювання приладу (в одиницях вимірювання даної величини).

Класи точності приладів:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5 (зразкові й точні прилади);

1,0; 1,5; 2,5; 5,0 (робочі прилади).

Діапазон вимірювання для однобічної шкали визначається верхньою межею вимірювань; для двобічної шкали з нулем посередині — повним розмахом шкали. Наприклад, для вольтметра зі шкалою 0...30 В значення  $N_n = 30$  В; для вольтметра зі шкалою -5...0...+5 В значення  $N_n = 10$  В.

Складова похибки, що обумовлена впливом зовнішніх причин, виникає в результаті порушення нормальних для даного способу вимірювання умов експлуатації (наприклад, відхилення температури  $t_2$  вільних кінців термопари (див. рис. 1.92) від тієї температури, при якій вимірювальна система градуювалася).

Суб'єктивна складова похибки може виникнути внаслідок недоскопалості органів чуттів спостерігача, його неувважності у момент відліку показів тощо.

Похибки вимірювань залежно від закономірності прояву можуть мати дві складові: систематичну  $\Delta_{xc}$  і випадкову  $\Delta_x$ .

*Систематичною* називається така складова похибки вимірювання, яка залишається незмінною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях тієї самої величини (наприклад, похибка через неправильне градуювання шкали аналогового вимірювального приладу; похибки, що виникають при вимірюванні опору за схемами, зображеними на рис. 4.1).

*Випадковою* називається складова похибки вимірювання, яка змінюється випадково при повторних вимірюваннях тієї самої величини. Випадкові похибки проявляються в тому, що при повторних вимірюваннях незмінної величини одержують результати, які трохи відрізняються один від одного (звичайно в останніх значущих цифрах). Випадкові похибки формуються під впливом великої кількості незалежно діючих факторів, і хоча кожний з них незначно впливає на вимірювання порівняно з сумарним впливом усіх інших, передбачити, яким буде загальна дія усіх цих факторів у кожний момент часу, — неможливо. Якби при повторних вимірюваннях деякої величини було одержано однакові числові значення, це свідчило б не про відсутність випадкових похибок, а про недо-



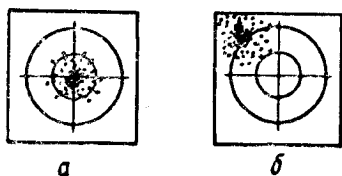


Рис. 4.2

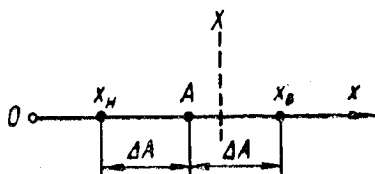


Рис. 4.3

статню чутливість вимірювального приладу. Результати, які повністю збігаються, також як і результати, що занадто відрізняються один від одного, свідчать про недосконалість вимірювання. Необхідною умовою вимірювання має бути одержання (при старанному проведенні експерименту) результатів, які дещо відрізняються один від одного.

Різновиди похибок за характером їх змінювання показано на рис. 4.2, де зображено результати стрільби по мішені (відхилення кожного попадання від центра мішені можна розглядати як похибку при стрільбі): *а* — випадкові похибки при відсутності систематичних; *б* — сукупність випадкових похибок і незмінної систематичної (зміщений приціл).

Випадкова складова похибки характеризує відхилення окремого спостереження від певного центра їх групування; систематична — зміщення цього центра групування щодо істинного значення вимірюваної величини.

Метою метрологічної обробки результатів вимірювань є обчислення найвірогіднішого результату вимірювання  $A$  і надійної межі його загальної похибки  $\pm \Delta A$  з певною ймовірністю  $\gamma$  (у технічних вимірюваннях — як в лабораторії, так і в умовах виробництва, звичайно вважають достатньою ймовірність 95 %, тобто  $\gamma = 0,95$ ). Тоді остаточна повна форма запису результату вимірювання буде мати вигляд

$$X = A \pm \Delta A \quad (\text{при } \gamma = 0,95). \quad (4.4)$$

Такий запис означає: з ймовірністю 0,95 % можна стверджувати, що шукане істинне значення  $X$  вимірюваної величини міститься в інтервалі між  $A - \Delta A$  та  $A + \Delta A$  (рис. 4.3:  $x_n$  — нижня межа ймовірного інтервалу;  $x_b$  — його верхня межа); проте істинне значення  $X$  може опинитися й за межами даного інтервалу, хоча ймовірність цього й незначна (лише 0,05, тобто 5 %).

Як правило, остаточне значення  $\Delta A$  виражають числом з однією значущою цифрою. Наприклад:

$$\Delta A = 0,0432 = 0,04 \mid 32 \approx 0,04;$$

$$\Delta A = 0,0483 = 0,04 \mid 83 \approx 0,05;$$

$$\Delta A = 7,8415 = 7 \mid ,8415 \approx 8;$$

$$\Delta A = 256,37 = 2 \mid 56,37 \approx 3 \cdot 10^2.$$

Числове значення  $A$  повинно закінчуватися десятковим знаком того ж розряду, яким закінчується  $\Delta A$ . Наприклад:

$$\left. \begin{array}{l} A = 3,72 \quad | \underline{96} \\ \Delta A \approx 0,04 \end{array} \right\} 3,73 \pm 0,04;$$

$$\left. \begin{array}{l} A = 2 \\ \Delta A \approx 0,05 \end{array} \right\} 2,00 \pm 0,05;$$

$$\left. \begin{array}{l} A = 529 \quad | \underline{34} \\ \Delta A \approx 8 \end{array} \right\} 529 \pm 8;$$

$$\left. \begin{array}{l} A = 15 \quad | \underline{94,7} \\ A \approx 15 \quad | 94,7 \end{array} \right\} 16 \cdot 10^2 \pm 3 \cdot 10^2.$$

Вихідними даними при обробці результатів багаторазових прямих вимірювань певної фізичної величини  $X$  є сукупність  $n$  результатів окремих спостережень;  $x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_n$ .

Метрологічна обробка результатів цих спостережень здійснюється у такій послідовності:

1) усуваються (або по можливості зменшуються) систематичні похибки;

2) обчислюється надійна межа  $\theta$  неусунених залишків систематичної похибки;

3) обчислюється найбільш вірогідне значення  $A$  шуканої величини;

4) обчислюється надійна межа  $\epsilon$  випадкової похибки результату;

5) знаходиться надійна межа  $\Delta A$  загальної похибки результату;

6) записується результат багатократного прямого вимірювання.

Усунення систематичних похибок здійснюється на основі поглибленого аналізу умов проведення експерименту (впроваджуються поправки на неточність градуювання вимірювального приладу — якщо вони відомі, й поправки, що компенсують методичну похибку тощо).

Але не всі систематичні похибки можна виключити. Наприклад, в аналогових приладах (див. рис. 2.19 або 2.24) переміщенню рухомої системи перешкоджає тертя в опорах. Тому переміщення рухомої системи припиняється не тоді, коли протидіючий момент  $M_{пр}$  точно зрівняється з обертовим моментом  $M_{об}$ , а трохи раніше — коли різниця  $M_{об} - M_{пр}$  зменшиться до рівня перешкоджаючого моменту, що його створює тертя. В результаті цього усталене відхи-

лення показчика приладу буде трохи заниженим, якщо рухома система до своєї зупинки переміщувалась у напрямі, що відповідає збільшенню вимірюваної величини, або трохи завищеним, коли рухома система підходила до усталеного відхилення з протилежного боку. Така похибка є систематичною, її абсолютне значення відоме, але передбачити, у якому напрямі в даному разі переміщувалась рухома система перед її зупинкою — неможливо, тому знак цієї систематичної похибки невідомий, і її виключити неможливо.

Надійна межа  $\theta$  неусунених залишків систематичної похибки у найпростішому випадку встановлюється граничним значенням  $\Delta_n$  допустимої основної похибки вимірювального способу і може бути обчислена за формулою (4.3):

$$\theta = (k_n N_n) / 100. \quad (4.5)$$

Найвірогіднішим значенням вимірюваної величини можна вважати середнє арифметичне з результатів спостережень:

$$A \approx \bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.6)$$

Надійна межа  $\epsilon$  випадкової похибки результату прямого вимірювання обчислюється за формулою

$$\epsilon = t_\gamma S_{\bar{x}}, \quad (4.7)$$

де  $t_\gamma$  — коефіцієнт надійності при заданій ймовірності (запропонований англійським математиком Уільямом Госсетом, відомим під псевдонімом Стюдент); значення  $t_\gamma$  для  $n=4 \dots 20$  при ймовірності  $\gamma=0,95$  подане в додатку 2;  $S_x$  — середнє квадратичне відхилення найбільш вірогідного значення  $\bar{x}$  результату вимірювання від істинного значення; обчислюється за формулою

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.8)$$

( $x_i - \bar{x}$  — випадкове відхилення  $i$ -го результату спостереження від знайденого значення  $\bar{x}$ ).

Для зручності обчислень на ЕЦОМ формулу (4.8) доцільно перетворити:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n^2 - n} (\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)}. \quad (4.9)$$

При обчисленні надійної межі  $\Delta A$  загальної похибки результату прямого вимірювання треба враховувати як  $\epsilon$ , так і  $\theta$ . Для цього спочатку обчислюється допоміжний параметр  $\theta/S_{\bar{x}}$  причому:

якщо  $\theta/S_x \leq 0,8$ , то величиною  $\theta$  можна знехтувати і вважати, що

$$\Delta A = \varepsilon; \quad (4.10)$$

якщо  $\theta/S_x \geq 8$ , то знехтувати можна величиною  $\varepsilon$ , зважаючи, що

$$\Delta A = \theta; \quad (4.11)$$

при  $0,8 < \theta/S_x < 8$  значення

$$\Delta A = K S_{\Sigma}, \quad (4.12)$$

де

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_x + (\theta/\sqrt{3})}; \quad S_{\Sigma} = \sqrt{S_x^2 + (\theta/\sqrt{3})^2}. \quad (4.13)$$

Після обробки результату багаторазового прямого вимірювання маємо  $X = A \pm \Delta A$  (при  $\gamma = 0,95$ ). Наприклад, при прямих вимірюваннях напруги за допомогою вольтметра класу точності 1,5 зі шкалою 0...15 В одержали таку сукупність спостережень:  $x_1 = 10,3$  В;  $x_2 = 10,1$  В;  $x_3 = 10,3$  В;  $x_4 = 10,4$  В.

Вважаємо, що систематичні похибки по можливості вже усунені; надійну межу невиключених залишків систематичних похибок обчислюємо за формулою (4.5):

$$\theta = \frac{1,5 \cdot 15}{100} = 0,225 \approx 0,2.$$

Знаходимо  $\bar{x}$  за формулою (4.6):

$$\bar{x} = \frac{1}{4} (10,3 + 10,1 + 10,3 + 10,4) = 10,275.$$

Для  $n = 4$  в додатку 2 дістаємо  $t_{\gamma} = 3,182$ .  $S_x$  визначаємо за формулою (4.8) або (4.9):

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 3} [(10,3 - \bar{x})^2 + (10,1 - \bar{x})^2 + (10,3 - \bar{x})^2 + (10,4 - \bar{x})^2]} = 0,062915286.$$

Тоді за формулою (4.7)

$$\varepsilon = 3,182 \cdot 0,062915286 = 0,20019644 \approx 0,2.$$

Обчислюємо допоміжний параметр

$$\frac{\theta}{S_x} = \frac{0,225}{0,0629} = 3,5762374.$$

Оскільки  $0,8 < \frac{\theta}{S_{\bar{x}}} < 8$ ,  $KS_{\Sigma}$  обчислюємо за формулою (4.13):

$$KS_{\Sigma} = \frac{0,20 + 0,22}{0,063 + 0,13} \sqrt{0,063^2 + 0,13^2} = 0,31437121 \approx 0,3.$$

Результатом цього прямого вимірювання буде  $X = 10,3 \pm 0,3$  (при  $\gamma = 0,95$ ), тобто з ймовірністю 95 % можна стверджувати, що шукане значення напруги, виміряне в даному експерименті, міститься між 10,0 та 10,6 В.

У виробничих умовах, як уже зазначалося, звичайно прямі вимірювання здійснюються одноразово. В цьому разі статистичну обробку результатів вимірювань за формулами (4.7) ... (4.13) не виконують, а щодо точності результатів можна зробити висновок із нормованих метрологічних характеристик вимірювальних приладів.

Результати прямих одноразових спостережень обробляють таким чином:

1) виключають (або по можливості зменшують) систематичні похибки;

2) обчислюють надійну межу  $\Delta A$  похибки результату за формулою (4.5);

3) записують результати вимірювання  $A$ , заокругливши його числове значення відповідно до значення надійної межі похибки  $\Delta A$  результату; значення  $\Delta A$  звичайно не вказується, а тільки враховується при заокругленні. Наприклад, при прямому вимірюванні напруги за допомогою вольтметра класу точності 1,0 з однібічною шкалою до 30 В одержано результат 16,25 В.

За формулою (4.5) обчислюємо

$$\theta = \frac{1 \cdot 30}{100} = 0,3 \text{ В.}$$

При остаточному запису результату вимірювання виконується відповідне заокруглення:  $A \approx 16,2 \text{ В}$ .

Вихідними даними при *опосередкованих* вимірюваннях є результати прямих вимірювань однієї чи кількох величин — аргументів:

$$X_1 = A_1 \pm \Delta A_1;$$

$$X_2 = A_2 \pm \Delta A_2;$$

. . . . . ,

а також формула, яка відображає залежність шуканої величини від цих аргументів (формула зв'язку),

$$E = f(X_1, X_2 \dots).$$

Результати опосередкованих вимірювань обробляються у такій послідовності:

1) обчислюється найвірогідніше значення  $A_E$  результату вимірювань;

2) знаходиться надійна межа  $\Delta A_E$  загальної похибки результату;

3) записується результат опосередкованого вимірювання.

Для одержання найбільш вірогідного значення  $A_E$  шуканої величини  $E$  треба у формулу зв'язку підставити значення  $A_i$

$$A_E = f(A_1, A_2, \dots). \quad (4.14)$$

Методика обчислення надійної межі  $\Delta A_E$  загальної похибки результату залежить від характеру формули зв'язку.

Для формул зв'язку типу алгебраїчної суми

$$E = X_1 + X_2 + \dots \quad (4.15)$$

надійна межа  $\Delta A_E$  обчислюється за формулою

$$\Delta A_E = A_E \sqrt{\left(\frac{\Delta A_1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_2}{A_2}\right)^2 + \dots}; \quad (4.16)$$

для формул зв'язку типу добутку

$$E = kX_1^a X_2^b \dots \quad (4.17)$$

(де  $k$  — деякий коефіцієнт) надійна межа  $\Delta A_E$  обчислюється за формулою

$$\Delta A_E = A_E \sqrt{\left(a \frac{\Delta A_1}{A_1}\right)^2 + \left(b \frac{\Delta A_2}{A_2}\right)^2 + \dots} \quad (4.18)$$

Результат опосередкованого вимірювання записуємо за формулою (4.4).

Розглянемо приклад обробки результатів опосередкованого вимірювання для формули зв'язку типу алгебраїчної суми: припустимо, що формула зв'язку  $E = X + Y$ , а результати прямих вимірювань аргументів відповідно

$$X = 5,0 \pm 0,2;$$

$$Y = 10,0 \pm 0,3.$$

Обчислюємо  $A_E = 5 + 10 = 15$ . Знаходимо

$$\Delta A_E = 15 \sqrt{\left(\frac{0,2}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,3}{10}\right)^2} = 0,75 \approx 0,8.$$

Результат вимірювання:

$$E = 15,0 \pm 0,8 \quad (\text{при } \gamma = 0,95).$$

Приклад обробки результатів опосередкованого вимірювання для формул зв'язку типу добутку: припустимо, що треба визначити

потужність у колі постійного струму за результатами прямих вимірювань величини струму  $I$  та опору навантаження  $R$ ; формула зв'язку  $P=I^2R$  (тут  $k=1$ ;  $X_1=I$ ;  $a=2$ ;  $X_2=R$ ;  $b=1$ ).

Відомо, що  $I=5,26\pm 0,04$  А;  $R=10,2\pm 0,8$  Ом; в обох випадках  $\gamma=0,95$ . Обчислюємо

$$A_P = 5,26^2 \cdot 10,2 = 282,20952 \text{ Вт};$$

$$\Delta A_P = A_P \sqrt{\left(2 \frac{0,04}{5,26}\right)^2 + \left(\frac{0,8}{10,2}\right)^2} = 22,546398 \text{ Вт}.$$

Оскільки  $\Delta A_P \approx 2 \cdot 10$  Вт, результат вимірювання:

$$P = (28 \cdot 10 \pm 2 \cdot 10) \text{ Вт (при } \gamma = 0,95).$$

Приклад обробки результатів опосередкованого вимірювання для таких формул зв'язку, де функція залежить тільки від одного аргументу: припустимо, що  $E = 4\sqrt[3]{X^2}$ , причому відомо, що внаслідок прямого вимірювання одержано результат:  $X = 27,5 \pm 0,6$  (при  $\gamma = 0,95$ ). Обчислюємо  $A_E = 4\sqrt[3]{27,5^2} = 36,443079$ ; далі  $\Delta A_E = A_E \frac{2}{3} \cdot \frac{0,6}{27,5} = 0,53008112$ ; тоді  $E = 36,4 \pm 0,5$  (при  $\gamma = 0,85$ ).

## § 4.2. Приклади аналізу систем автоматичної сигналізації

*Реле контролю розмірів* (електроконтактні вимірювальні головки) використовуються для визначення відхилень лінійних розмірів виробу від норми. За конструкцією вони поділяються на безважільні (рис. 4.4) та важільні (рис. 4.5) ( $1$  — вимірювальний виріб,  $2$  — вимірювальний шток,  $3$  — нерухомий контакт мінімального розміру,  $5$  — те ж саме, максимального;  $4$  — рухомий контакт;  $B$  — важіль). У важільному реле величина контролюваного допуску регулюється за допомогою мікрометричних гвинтів  $6$  та  $7$ .

Схема вмикання сигнальних елементів для електроконтактних вимірювальних головок — на рис. 4.4: якщо рухомий контакт  $4$  не торкається нерухомих, то світиться неонові лампа з написом «Норма»; якщо він торкається верхнього нерухомого  $5$  — світиться лампа «Брак+»; якщо рухомий контакт  $4$  торкається нижнього нерухомого  $3$  — світиться лампа «Брак-».

Складаємо функціональну схему автоматизації за ГОСТ 21.404-85 (додаток 3):

1.1 — первинний вимірювальний перетворювач переміщення ( $GE$ );

1.2 — сигнальний пристрій ( $GA$ ;  $H$ ,  $L$ );

1.3, 1.4, 1.5 — сигнальні лампи.

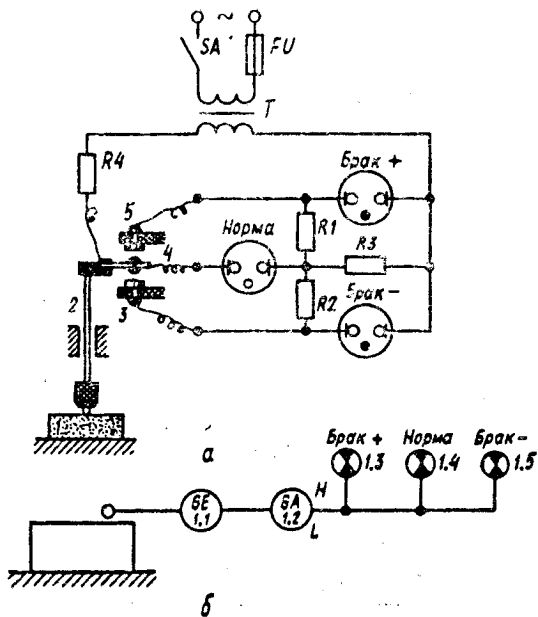


Рис. 4.4

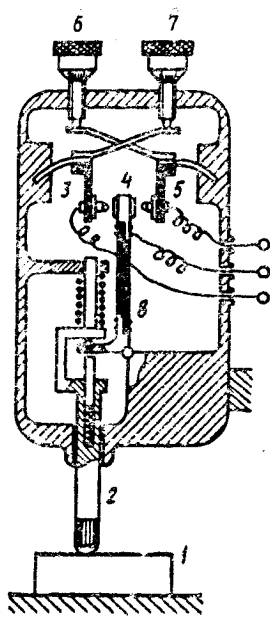


Рис. 4.5

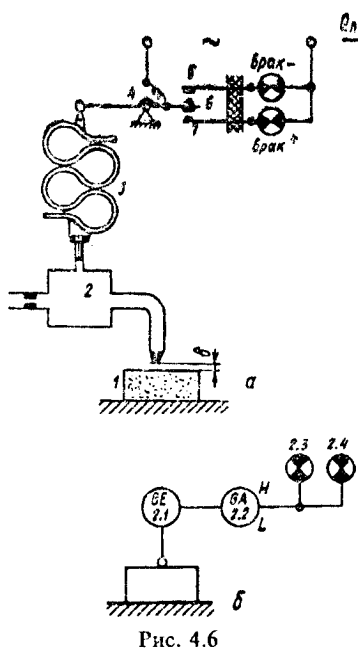


Рис. 4.6

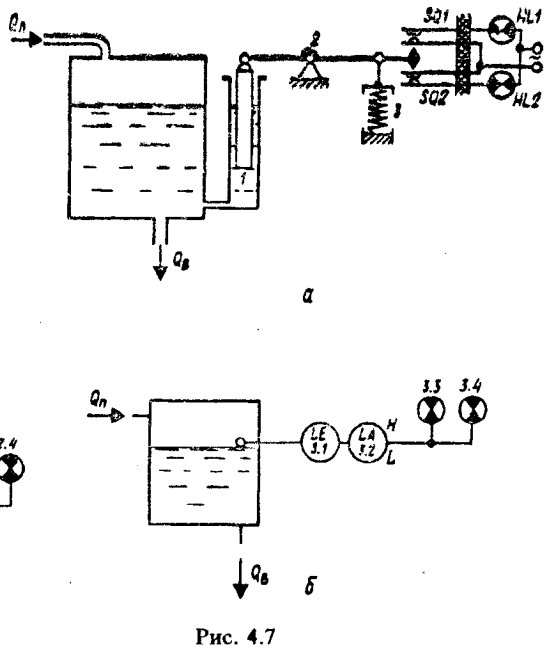


Рис. 4.7



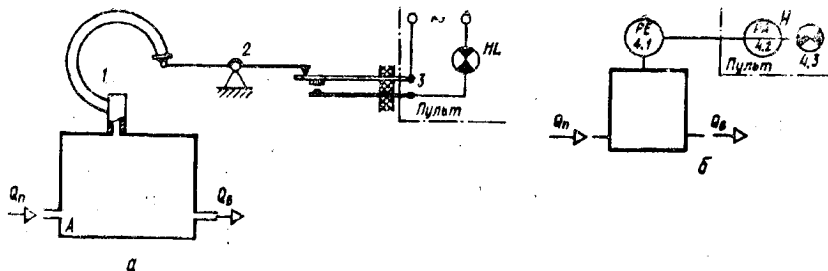


Рис. 4.8

Ще один прилад для сигналізації відхилень лінійних розмірів деталі від норми зображено на рис. 4.6. Первинним тут є перетворювач «сопло—заслінка». Роль заслінки виконує поверхня контрольованої деталі 1: чим ближче вона до сопла, тим більшим буде тиск у камері 2. Для вимірювання тиску слугує контактний манометр (3 — манометрична трубка, 4 — важіль, 5 та 7 — нерухомі контакти, 6 — рухомий контакт). При нормальному розмірі виробу сигнальні лампи не світяться, при відхиленні розміру від норми за-свічуються лампи «Брак +» або «Брак —».

Функціональна схема автоматизації:

2.1 — первинний перетворювач розміру (GE);

2.2 — сигнальний пристрій (GA; H, L);

2.3, 2.4 — сигнальні лампи.

Система автоматичної сигналізації рівня рідини в резервуарі показана на рис. 4.7 (1 — буйковий перетворювач, 2 — важіль, 3 — пружинка, SQ1 та SQ2 — контактні перетворювачі, HL1 та HL2 — сигнальні лампи). Відхилення рівня рідини від норми примушує засвітитися відповідну сигнальну лампу: при зменшенні рівня світяться HL1, при збільшенні — HL2.

Функціональна схема автоматизації:

3.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини (LE);

3.2 — сигнальний пристрій (LA; H, L);

3.3, 3.4 — сигнальні лампи.

Система автоматичної сигналізації тиску газу в балоні зображена на рис. 4.8. Підвищення тиску примушує манометричний трубчастий перетворювач 1 частково розігнутися, при цьому правий кінець важеля 2 замикає контактну групу 3, і на пульті вмикається сигнальна лампа HL.

Функціональна схема автоматизації:

4.1 — первинний вимірювальний перетворювач тиску (PE);

4.2 — пристрій для сигналізації про досягнення верхньої межі контрольованого параметра (PA; H);

4.3 — сигнальна лампа на пульті.

Перший автоматичний сигналізатор температури був створе-

ний у 1874 р. відомим російським електротехніком П. М. Яблочковим на основі контактного термометра (див. рис. 1.97). У сучасних системах автоматичної сигналізації температури звичайно використовуються терморезистори (див. рис. 1.90, 1.91) або термопар (див. рис. 1.92).

Систему автоматичної сигналізації верхнього і нижнього рівнів температури в камері  $K$  подано на рис. 4.9. Первинним вимірювальним перетворювачем у цій системі є

термістор  $r_2$ . Значення опору резистора  $r_1$  вибирають так, щоб воно дорівнювало значенню  $r_2$  при заданій температурі  $t_0$ . Тоді підвищення температури відносно  $t_0$  спричинить зменшення опору  $r_2$ , потенціал точки  $D$  стане нижчим від потенціалу точки  $C$ , і струм через котушку поляризованого реле піде від  $F$  до  $G$ ; верхній кінець якоря набуде полярності  $N$ , нижній  $S$ ; тому верхній його кінець переміститься праворуч, і контакт  $SQ2$  замкнеться; засвітиться сигнальна лампа  $HL2$ .

При зниженні температури  $r_2$  зростає, і  $U_D$  стане вищим за  $U_C$ , тому струм через котушку піде від  $G$  до  $F$ , верхній кінець якоря зміститься ліворуч,  $SQ1$  замкнеться й засвітиться  $HL1$ .

Функціональна схема автоматизації:

5.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури (TE);

5.2 — пристрій для сигналізації (TA; H, L);

5.3, 5.4 — сигнальні лампи.

Система автоматичної сигналізації температури показана на рис. 4.10. Первинним вимірювальним перетворювачем є термістор  $r_1$ . При певній заданій температурі  $t_0$ , яку вважаємо нормальною для даного об'єкта, дотримуються умови рівноваги мостової схеми  $r_1 r_3 = r_2 r_4$ .

Якщо вимірювана температура в камері  $K$  збільшується, опір термістора зменшується, тому напруга точки  $C$  стає вищою від напруги точки  $D$ . Через котушку поляризованого реле  $KP$  протікає струм від  $C$  до  $D$ . Воно спрацьовує, а контакт замикає коло живлення котушки  $KM1$ ; це реле також спрацьовує, й сигнальна лампа

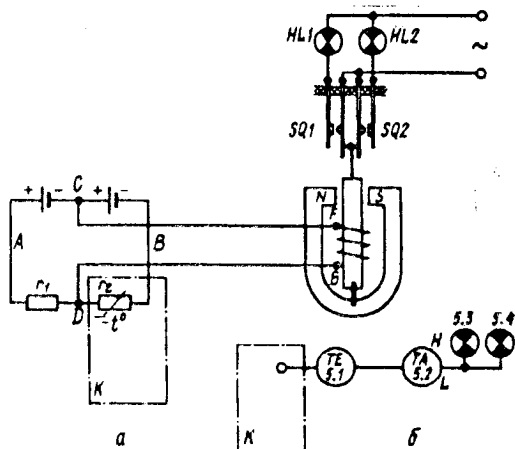


Рис. 4.9

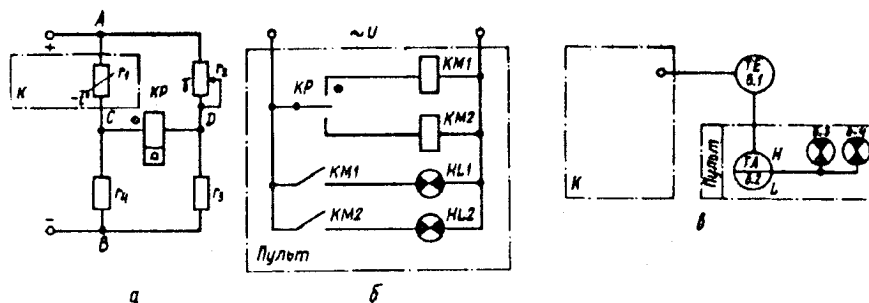


Рис. 4.10

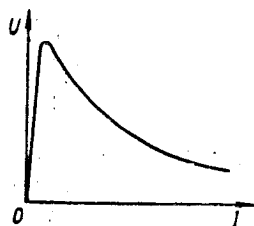


Рис. 4.11

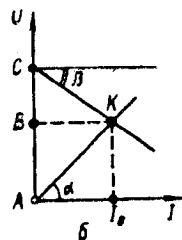
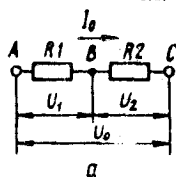


Рис. 4.12

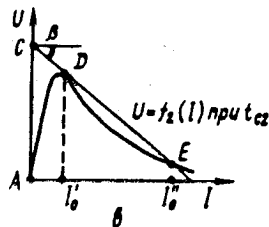
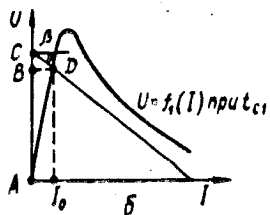
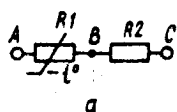


Рис. 4.13

$HL1$  на пульті засвічується: це — сигнал збільшення температури вище нормального значення.

Якщо ж температура в камері  $K$  стає меншою за норму, опір термістора зростає, й струм через котушку  $KP$  протікає від  $D$  до  $C$ . Реле  $KP$  спрацьовує так, що його контакт замикає коло живлення котушки реле  $KM2$ , воно спрацьовує і вмикає сигнальну лампу  $HL2$  на пульті (це сигнал про зменшення температури нижче норми).

За допомогою змінного опору  $r_2$  можна змінювати значення температури, при якій у вихідному стані схема збалансована: якщо повзун  $r_2$  перемістити вгору, значення опору  $r_2$  зменшиться, і рівновага настане при відповідно меншому значенні  $r_1$ , тобто при вищій

температурі. При переміщенні повзуна  $r_2$  униз значення його опору збільшиться, тому рівновага настане при також більшому опорі  $r_1$ , тобто при нижчій температурі. Отже, опір  $r_2$  відіграє роль уставки ( $\gamma$  на рис. В. 33).

Функціональна схема автоматизації:

6.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури (TE);

6.2 — пристрій на пульті для сигналізації (ТА; Н, L);

6.3, 6.4 — сигнальні лампи на пульті.

Вольт-амперна характеристика деяких термісторів (рис. 4.11) дає змогу одержати в електричному колі релейний ефект, на основі якого можна створити *безконтактний автоматичний сигналізатор температури*.

Розглянемо графоаналітичний метод аналізу електричного кола, що складається з двох опорів, з'єднаних послідовно і підключених до джерела живлення — спочатку для схеми, де обидва опори лінійні (рис. 4.12, а). Насамперед на осі  $U$  треба відкласти відрізок  $CA$ , що показує напругу живлення  $U_0$  (рис. 4.12, б), з точки  $A$  побудувати вольт-амперну характеристику для опору  $R_1$  під кутом  $\alpha$ , де

$$\alpha = \arctg R_1; \quad (4.19)$$

з точки  $C$  у дзеркальному зображенні побудувати характеристику для опору  $R_2$  під кутом  $\beta$ , де

$$\beta = \arctg R_2. \quad (4.20)$$

Проекція точки  $E$  перетину цих характеристик на вісь  $I$  дає можливість визначити силу струму  $I_0$  у цьому колі, а проекція її на вісь  $U$  визначає спадання напруги на кожному з опорів:  $U_1$  — відрізок  $AB$ ,  $U_2$  — відрізок  $BC$ .

Аналогічно виконується графоаналітичний розрахунок і в тому випадку, якщо один з опорів, наприклад,  $R_1$  — нелінійний (рис. 4.13, а) — два варіанти: у першому з них (рис. 4.13, б) при температурі  $t_{c1}$  в електричному колі виникає струм  $I_0$ ; в другому (рис. 4.13, в) при температурі  $t_{c2}$  (тут  $t_{c2} > t_{c1}$ ) в електричному колі відбувається стрибкоподібна зміна сили струму від  $I'_0$  до  $I''_0$ .

Сім'ю вольт-амперних характеристик термістора для темпера-

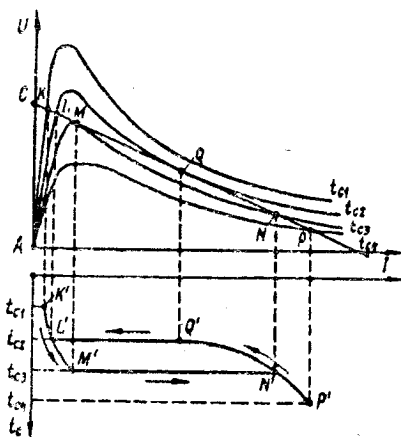


Рис. 4.14

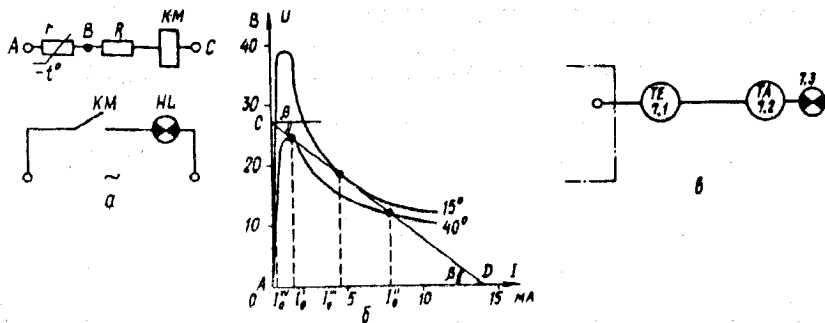


Рис. 4.15

тур  $t_{c_1} \dots t_{c_n}$ , для яких одержано значення струмів в електричному колі для кожної температури, зображено на рис. 4.14.

Залежність змін сили струму  $I=f(t_c)$  у цьому колі від температури навколишнього середовища показано на рис. 4.14 (унизу); ця характеристика має релейний характер.

Схему, яка може здійснити автоматичну сигналізацію при певній температурі середовища, наприклад при  $+40^\circ\text{C}$ , подано на рис. 4.15, а. Для цієї температури знаходимо вольт-амперну характеристику (рис. 4.15, б); проводимо лінію  $CD$  так само, як на рис. 4.13 в. Очевидно, що стрибок струму буде від  $I_0'$  до  $I_0''$ . Нахил  $\beta$  лінії  $CD$  дає змогу визначити, що сумарне значення активного опору котушки  $KM$  та опору  $R$  дорівнює  $\text{tg } \beta$  (у даному разі  $\text{tg } \beta = 1,9 \text{ кОм}$ ). Далі треба встановити, при якому зниженні температури лінія  $CD$  стане дотичною до певної вольт-амперної характеристики (так, як у точці  $Q$  на рис. 4.14); це стосується вольт-амперної характеристики для  $+15^\circ\text{C}$ ; тобто при зниженні температури середовища до  $+15^\circ\text{C}$  у схемі відбуватиметься зворотний стрибок струму від  $I_0'''$  до  $I_0^{\text{IV}}$ .

Розрахунок допомагає вибрати відповідне реле: його струм спрацьовування має перевищувати  $I_0'$  (а також і  $I_0'''$ ), струм відпускання — меншим за  $I_0'''$ ; а опір котушки — не вищим від  $1,9 \text{ кОм}$ . При підвищенні температури середовища до  $+40^\circ\text{C}$  реле спрацьовуватиме, і сигнальна лампа  $HL$  засвітиться; при зниженні температури до  $+15^\circ\text{C}$  реле відпускатиме, і сигнальна лампа погасне.

Функціональна схема автоматизації:

- 7.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури ( $TE$ );
- 7.2 — сигнальний пристрій ( $TA$ );
- 7.3 — сигнальна лампа.

### § 4.3. Приклади аналізу систем автоматичного контролю технологічних параметрів

Система контролю натягу нитки у технологічній машині показана на рис. 4.16 (*A* — натяг нитки).

Натяг нитки вигинає пружну консоль, деформація якої вимірюється за допомогою чотирьох дротяних або фольгових тензорезисторів (зверху  $r_1$  та  $r_3$ , знизу  $r_2$  та  $r_4$ ), увімкнених у незрівноважену мостову схему. Напругу нерівноваги реєструє електромеханічний осцилограф.

Функціональна схема автоматизації:

1.1 — первинний вимірювальний перетворювач переміщення (*AE*);

1.2 — вторинний перетворювач для дистанційної передачі інформації (*AT*);

1.3 — вимірювальний прилад, показуючий та реєструвальний (*AIR*).

Прилад для вимірювання обертального моменту в технологічній машині (*торсіометр*) зображено на рис. 4.17 та 4.18. Вимірюваний момент спричинює деформацію крутіння вала (рис. 4.17, *a*), виготовленого з високолегованої сталі. У трьох перерізах вала приварено диски (*Л* — лівий, *С* — середній, *П* — правий) з немагнітної сталі, до яких приварені фігурні кільця ротора з магнітм'якої сталі. Один із утворених між зубцями ротора повітряних зазорів (лівий,  $\delta_1$  (рис. 4.17, *в*)) збільшується при скручуванні вала, другий (правий,  $\delta_2$ , (рис. 4.17, *в*)) зменшується. На статорі датчика знаходяться дві котушки, що охоплюють ротор (рис. 4.17, *б*; 4.18 (*СВ* — обертальний момент); магнітний потік кожної котушки замкається через зубці ротора та повітряні зазори між ними. При зміні зазорів змінюються їхні магнітні опори, а отже, й індуктивності котушок: у даному разі індуктивність лівої котушки  $\omega_1$  зменшується, індуктивність правої  $\omega_2$  — збільшується. Котушки увімкнені в мостову схему змінного струму, на виході якої міститься показуючий та реєструвальний прилад (при відносно повільних змінах вимірювального моменту) або електромеханічний осцилограф (для вивчення швидкозмінних моментів).

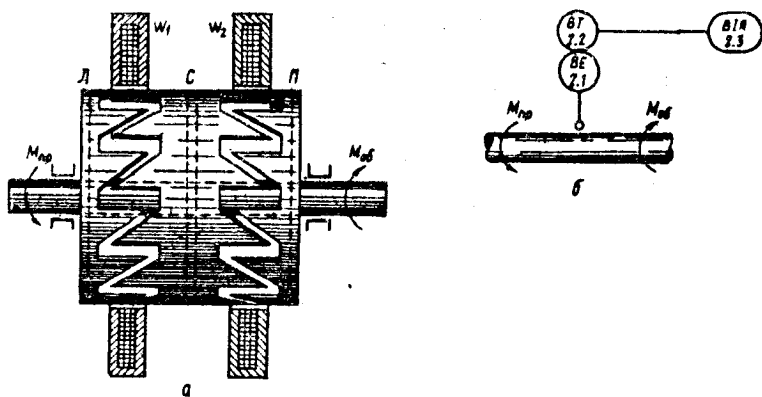
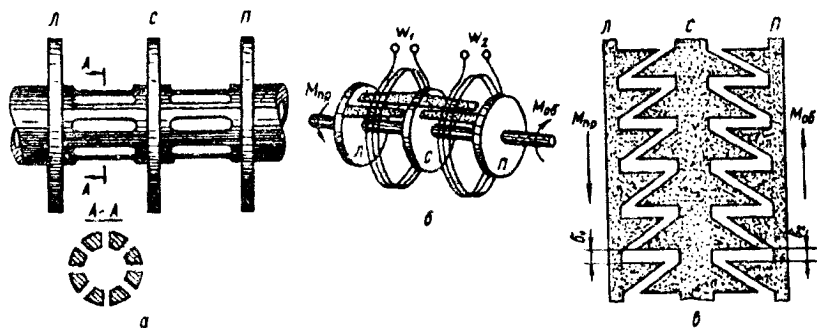
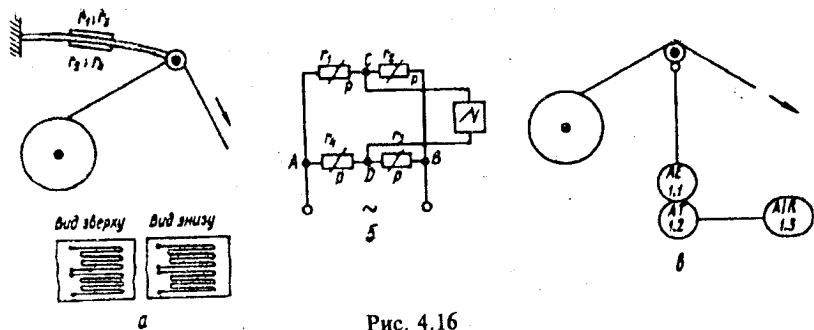
Функціональна схема автоматизації:

2.1 — первинний вимірювальний перетворювач (*BE*);

2.2 — вторинний перетворювач для дистанційного передавання інформації (*BT*);

2.3 — показуючий та реєструвальний прилад (*BIR*).

Система для дистанційного вимірювання підвищення рівня води в резервуарі *B* наведена на рис. 4.19 (*1* — поплавок, *2* — передача рейкова зубчата, *3* — трансформаторний перетворювач із поворотною котушкою, *4* — випрямляч, *V* — вольтметр). Для рівня води, який вважається нижньою межею, площину котушки трансформа-



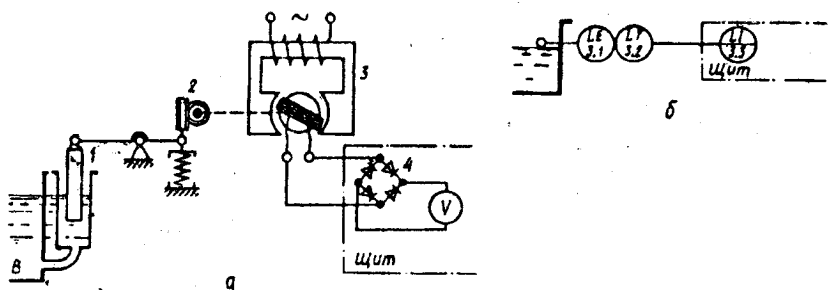


Рис. 4.19

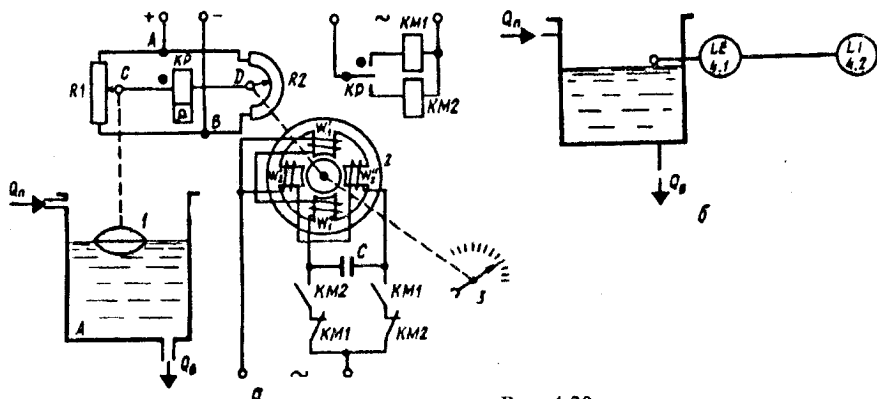


Рис. 4.20

торного перетворювача слід встановити горизонтально. У цьому разі при підвищенні рівня води котушка буде обертатися проти годинникової стрілки, і на її виході з'явиться змінна напруга, яка через випрямляч вимірюється вольтметром на щиті. Шкалу вольтметра слід проградувати в значеннях відхилення рівня води в резервуарі від нижньої межі.

Функціональна схема автоматизації:

3.1 — первинний перетворювач рівня води ( $LE$ );

3.2 — вторинний перетворювач для дистанційного передавання показань ( $LT$ );

3.3 — показуючий прилад на щиті ( $LI$ ).

Система для дистанційного вимірювання рівня води в резервуарі  $A$  зображена на рис. 4.20. У цій системі за переміщенням повзуна  $R2$  слідкують через переміщення повзуна  $R1$ ; індикатором рівноваги у слідкуючій системі слугує поляризоване електромагнітне реле  $KP$ . Якщо на кінець обмотки, позначений на рисунку чорною крапкою, підключити «+», то спрацює той контакт  $KP$ , який теж позначений чорною крапкою.

Припустимо, що початковими положеннями обох повзунів бу-



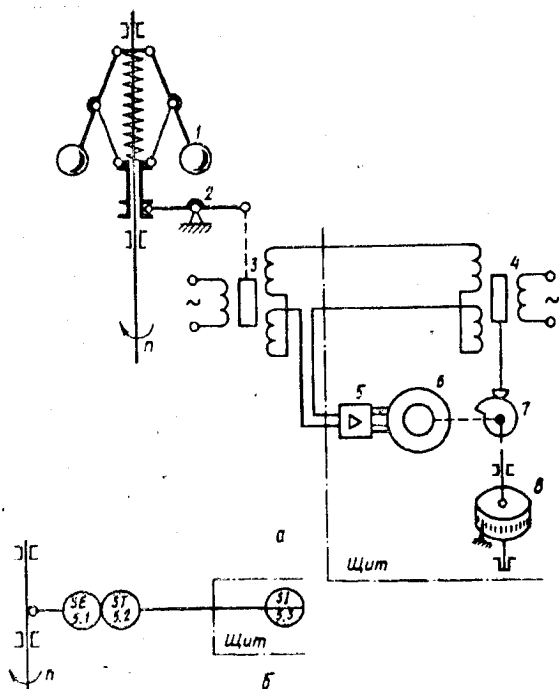


Рис. 4.21

відобразить пристрій 3. При зменшенні рівня води спрацює КМ2, і через конденсатор виявиться ввімкнутою обмотка  $\omega_2$ , тому ротор обертається за годинниковою стрілкою.

Функціональна схема автоматизації:

4.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини (LE);

4.2 — показуючий прилад (LI).

Система для дистанційного вимірювання швидкості обертання вала технологічної машини (рис. 4.21) складається з таких елементів: відцентрового перетворювача 1 швидкості обертання вала, важеля 2, диференціальних трансформаторних перетворювачів соленоїдного типу 3 та 4, підсилювача 5, конденсаторного сервоелектродвигуна 6, кулачка 7, відлічувального пристрою 8. Для мінімальної вимірювальної швидкості обертання якір лівого трансформаторного перетворювача повинен займати крайнє нижнє положення, для максимальної швидкості — крайнє верхнє положення. Нехай при деякій швидкості обертання якір лівого трансформаторного перетворювача займає проміжнє положення. Якщо якір правого трансформаторного перетворювача перебуває в іншому положенні,

дуть  $U_{CD} = 0$ . Збільшення рівня води переміщує поплавков 1 і повзун R1 вгору. Потенціал точки C стає більшим, ніж потенціал точки D, при цьому спрацьовує поляризоване електромагнітне реле КР, його контакт вмикає КМ1; спрацьовує також і реле КМ1 і вмикає конденсаторний сервоелектродвигун 2 ( $\omega_1$  — через конденсатор С,  $\omega_2$  — безпосередньо). Ротор сервоелектродвигуна починає обертатися проти годинникової стрілки, наближаючи повзун D до «+» шпруги живлення; коли  $U_D$  стане таким же, як і  $U_C$ , ротор сервоелектродвигуна зупиниться. Рівень води у резервуарі

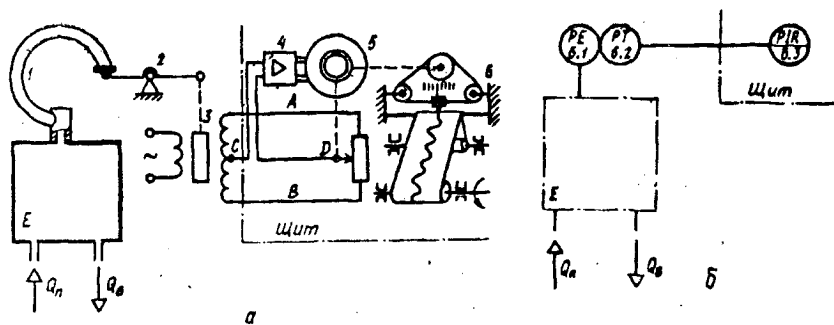


Рис. 4.22

то різницева напруга підсилюється і вмикає сервоелектродвигун, який за допомогою кулачка встановить якір правого перетворювача на рівні лівого якоря. Відлічувальний пристрій з рухомою циліндричною шкалою дає змогу з'ясувати значення вимірюваної швидкості обертання вала.

Функціональна схема автоматизації:

5.1 — первинний вимірювальний перетворювач швидкості обертання (SE);

5.2 — вторинний перетворювач для дистанційної передачі інформації на щит (ST);

5.3 — відлічувальний пристрій на щиті (SI).

Система для дистанційного вимірювання тиску газу в резервуарі *E* зображена на рис. 4.22. Прилад (рис. 4.22, *a*) складається з манометричного трубчастого перетворювача *1*, важеля *2*, диференціального трансформаторного перетворювача соленоїдного типу *3*, підсилювача *4*, конденсаторного сервоелектродвигуна *5* та відлічувально-реєструвального пристрою *6*. При такому значенні тиску (який вважається нормою) якір трансформаторного перетворювача і показчик відлічувально-реєструвального пристрою повинні займати середнє положення. Зміна тиску примушує якір переміщуватися. Різниця потенціалів  $U_{CD}$ , що при цьому виникає, підсилюється й вмикає сервоелектродвигун, який переміщує повзун  $r$  у протилежному напрямі. Коли настає рівновага, ротор сервоелектродвигуна зупиняється, причому положення ротора (і показчика відлічувально-реєструвального пристрою) також безумовно відповідає новому значенню тиску.

Функціональна схема автоматизації:

6.1 — первинний вимірювальний перетворювач тиску (PE);

6.2 — вторинний перетворювач для дистанційного передавання інформації (PT);

6.3 — відлічувально-реєструвальний пристрій на щиті (PIR).

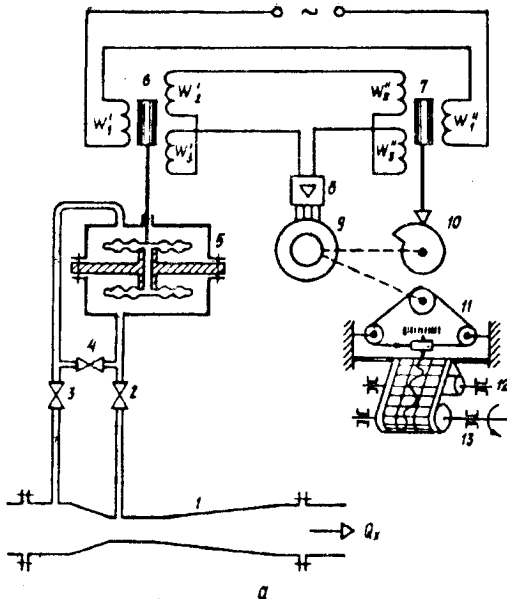
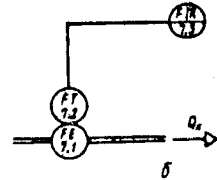


Рис. 4.23



Система для вимірювання витрат речовини в трубопроводі наведена на рис. 4.23. Первинним перетворювачем є нормальна труба Вентурі 1, перепад тиску вимірюється мембранним диференціальним манометром 2. Внутрішні порожнини мембранних коробок з'єднані між собою й заповнені дистильованою водою. Розглянемо роботу системи. Для вимірювання витрати рідини дифманометр слід встановлювати нижче звужувального пристрою (щоб уникнути впливу газових бульбашок на результат вимірювання), а при вимірюванні витрати газу — навпаки, дифманометр повинен бути вище звужувального пристрою (щоб уникнути похибок від випадкового потрапляння рідини у прилад). При налагодженні витратоміра використовуються зрівняльний 4 та замикаючі 2, 3 вентилі. Спочатку всі три вентилі мають бути замкненими; потім відкривається зрівняльний вентиль (щоб запобігти пошкодженню мембран від тиску речовини в трубопроводі), після чого обидва замикаючі. Далі закривається зрівняльний вентиль і розпочинається вимірювання.

Передавання вимірювальної інформації на потрібну відстань здійснює система з двома диференціальними трансформаторними перетворювачами соленоїдного типу (6 та 7 — перетворювачі, 8 — підсилювач, 9 — сервоелектродвигун, 10 — ексцентрик, 11 — реєструвальний пристрій, 12 та 13 — рулонний папір для реєстрації результатів вимірювання). Вторинний прилад встановлюється на щиті.

Функціональна схема автоматизації:

7.1 — первинний вимірювальний перетворювач витрати газу (FE);

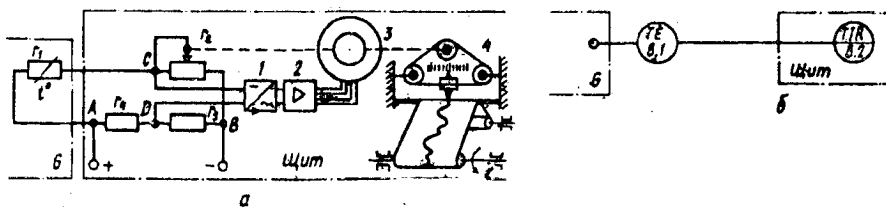


Рис. 4.24

7.2 — вторинний перетворювач для дистанційного передавання інформації (FT);

7.3 — показуючий та реєструвальний прилад на щиті (FIR).

Система для дистанційного вимірювання температури в камері  $G$  зображена на рис. 4.24. Первинним вимірювальним перетворювачем слугує провідниковий терморезистор  $r_1$ ; значення  $r_3$  та  $r_4$  вибирають такими, щоб вони дорівнювали значенню опорору  $r_1$  при температурі, яка вважається нормою; таким же спочатку повинно бути й значення змінного опорору  $r_2$ . Збільшення температури в камері  $G$  приведе до зростання  $r_1$ , різниця потенціалів  $U_{CD}$  потрапляє на вхід перетворювача 1, підсилюється (2 — підсилювач) і вмикає сервоелектродвигун 3, який переміщує повзун  $r_2$  ліворуч доти, поки не зникне  $U_{CD}$ . При зменшенні температури, навпаки, повзун переміщуватиметься праворуч. Проте в обох випадках кожному значенню температури відповідатиме певне положення повзуна після зупинки сервоелектродвигуна. Отже, якщо до ротора сервоелектродвигуна приєднати відлічувально-реєструвальний пристрій 4, він відобразить зміни температури в камері  $G$ .

Функціональна схема автоматизації:

8.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури (TE);

8.2 — показуючий та реєструвальний прилад на щиті (TIR).

Автоматичний міст для вимірювання температури при двопродічному вмиканні провідникового терморезистора й живленні від джерела постійного струму показаний на рис. 4.25.

При зростанні температури опір  $R_t$  збільшується, в діагоналі  $CD$  виникає напруга нерівноваги; постійна напруга перетворюється на змінну 1, підсилюється 2 й примушує працювати серводвигун 3 так, щоб повзун реохорда  $R$  переміщувався ліворуч — при цьому  $r'$  зменшується, а  $r''$  збільшується; обидва ці процеси приводять до зрівноважування. Коли настає рівновага, серводвигун зупиняється і за покажчиком 4 визначається температура. Якщо схема живиться від джерела змінного струму, потреба в перетворювачі 1 зникає. (Опір  $R1$  — для обмеження струму через терморезистор;  $R2$  та  $R3$  — для змінювання границь вимірювання;  $R4$  та  $R5$  — опори нижньої вітки моста;  $R6$  — для обмеження напруги живлення.)

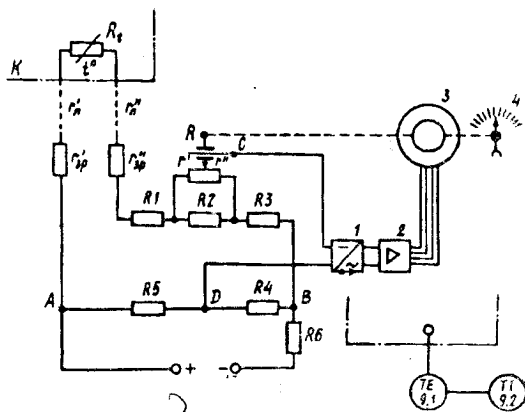


Рис. 4.25

том. Це порушує градування шкали моста. Для збереження градування треба, щоб незалежно від довжини з'єднувальних проводів забезпечувалася незмінність опорів, які, крім  $R_t$ , знаходяться в плечі AC. Це досягається застосуванням зрівнювальних опорів  $r'_{сп}$  та  $r''_{сп}$ , виконаних у вигляді котушок з манганінового дроту, причому з цих котушок треба відмотати стільки дроту, щоб сумарний опір становив  $r'_{л} + r'_{сп} + r''_{л} + r''_{сп} = 5 \text{ Ом}$ . Цього ж можна досягти й за допомогою тільки однієї зрівняльної котушки, наприклад  $r'_{сп}$ : не чіпаючи  $r'_{сп}$ , можна, змінюючи  $r'_{сп}$ , досягти того, щоб  $r'_{л} + r'_{л} + r'_{сп} + r''_{сп} = 5 \text{ Ом}$ .

З урахуванням зрівняльних котушок градується шкала моста. Така схема дистанційного вмикання вимірювального опору називається *двопровідною*.

Суттєвим недоліком двопровідної схеми є систематична температурна похибка: при коливаннях температури навколишнього середовища опори  $r'_{л}$  та  $r''_{л}$  змінюються; а це навіть при незмінності  $R_t$  порушує рівновагу моста і тому сприймається, як зміна вимірюваної температури.

Функціональна схема автоматизації:

9.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури (TE);

9.2 — показуючий прилад (TI).

Автоматичний міст для вимірювання температури при трипровідному підключенні провідникового терморезистора й живленні від джерел змінного струму зображено на рис. 4.26.

У трипровідній схемі не обов'язково домагатися, щоб  $r'_{л} + r'_{сп} + r''_{л} + r''_{сп} = 5 \text{ Ом}$ ; важливо лише, щоб точно виконувалась умова

Якщо терморезистор  $R_t$  розташований на деякій відстані від моста, вмикання терморезистора здійснюється за допомогою з'єднувальних проводів з опорними провідниками  $r'_{л}$  та  $r''_{л}$ . При такому дистанційному способі вмикання в плечі AC знаходяться не тільки  $R_t$ , а й опори  $r'_{л}$  та  $r''_{л}$ , величина яких залежить від довжини проводів між вимірюваним опором та мостом.

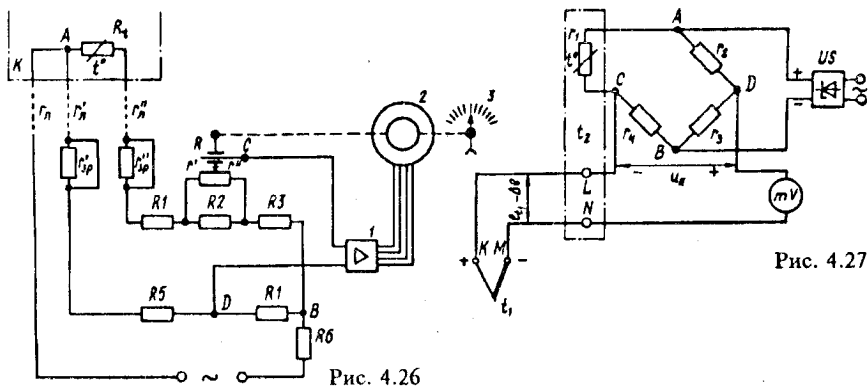


Рис. 4.26

Рис. 4.27

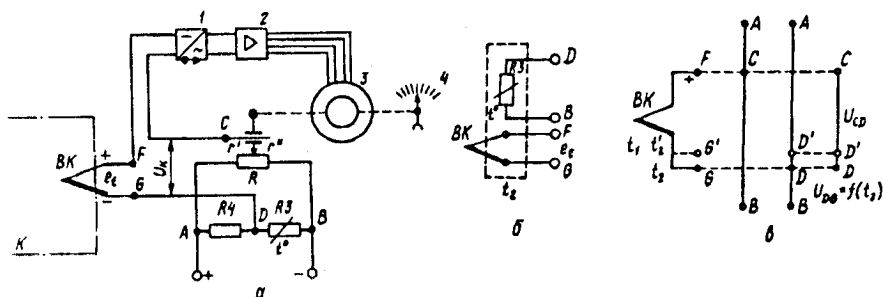


Рис. 4.28

$r'_{л} + r'_{зп} = r''_{л} + r''_{зп}$ . Якщо опір  $r_{л}$  кожної лінії не перевищує 2,5 Ом, то зрівнювальні котушки можна вмикати, не відмотуючи з них частину проводу; при  $r_{л} > 2,5$  Ом зрівнювальні котушки можна взагалі закортити (див. рис. 4.26).

У трипровідній схемі систематична температурна похибка відсутня: опори  $r'_{л}$  та  $r''_{л}$  при коливанні температури навколишнього середовища змінюються однаково, а оскільки вони розташовані у суміжних плечах моста, одночасні зміни опорів у плечах AD і AC майже не порушують рівновагу моста; в цьому легко перекопати на прикладі рівняння (2.7) для схеми на рис. 2.33.

Якщо міст буде живитися від джерела постійного струму, перед підсилювачем слід ввімкнути перетворювач постійної напруги на змінну.

Функціональна схема автоматизації така ж сама, як на рис. 4.25.

Схеми вимірювання температури за допомогою термопари подано на рис. 4.27 та 4.28.

Якщо при вимірюванні температури використовується термопара, її вільні («холодні») кінці приєднуються до мілівольметра або

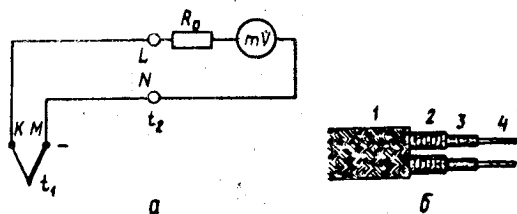


Рис. 4.29

зання приладів треба вводити поправки.

При введенні поправок розрахунковим методом слід забезпечити сталість температури  $t_2$  шляхом перенесення кінців у зону постійної температури за допомогою спеціальних подовжувальних (так званих компенсаційних) проводів (рис. 4.29, а: провід  $KL$  повинен бути таким же, як і кінець «+» термопарі, а провід  $MN$  — як і її кінець «-»; наприклад, для термопарі ТХК провід  $KL$  повинен бути хромельовий, а провід  $MN$  — копельовий). На рис. 4.29, б — варіант конструкції продовжувального (компенсаційного) проводу (4 — провід, 3 — гумова ізоляція, 2 — бавовняне обплетення, 1 — бавовняне обплетення, просочене антигнільною сумішшю).

Більш досконалим методом усунення похибок від коливань температури  $t_2$  вільних кінців термопарі є автоматичне введення компенсаційної напруги.

Схема застосування так званої компенсаційної коробки, яка забезпечує компенсацію впливу відхилення від  $+20^\circ\text{C}$  температури  $t_2$  вільних кінців термопарі на результат вимірювання, зображено на рис. 4.27. Якщо температура  $t_2$  стає більшою  $+20^\circ\text{C}$ , вихідний сигнал термопарі зменшується на  $\Delta e$  (і, навпаки, при зменшенні  $t_2$  від  $+20^\circ\text{C}$  вихідний сигнал збільшується). Компенсація цієї похибки здійснюється за допомогою мостової схеми, у плече  $AC$  якої увімкнено провідниковий терморезистор  $r_1$ ; схема живиться від стабілізатора напруги  $US$ . Якщо температура вільних кінців термопарі, а також і  $r_1$  відрізняється від  $+20^\circ\text{C}$ , на виході  $CD$  моста виникає напруга нерівноваги  $u_k$ . Значення й знак цієї напруги такі, що вона компенсує вплив відхилення  $t_2$  на термоелектрорушійну силу, тобто

$$e_{t_1} - \Delta e + u_k = e_{t_1} \quad (4.21)$$

Схема автоматичного компенсатора для вимірювання температури за допомогою термопарі подана на рис. 4.28 ( $BK$  — термопара, 1 — перетворювач постійної напруги в змінну, 2 — підсилювач, 3 — сервоелектродвигун, 4 — показчик;  $R$  — реохорд;  $R_4$  — резистор з незмінним опором;  $R_3$  — провідниковий терморезистор).

Терморезистор  $R_3$  розташований поруч із затискачами вільних кінців термопарі (рис. 4.28, б), тому температура для  $R_3$  і для цих затискачів однакова ( $t_2$ ).

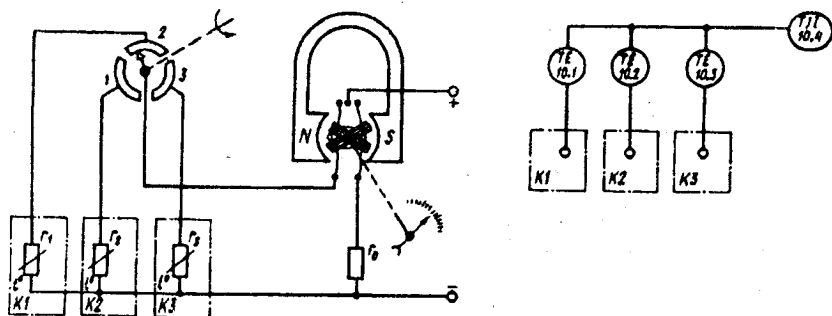


Рис. 4.30

Вважаємо, що температура «гарячих» кінців термопари залишається незмінною й дорівнює  $t_1$ .

При температурі вільних кінців термопари  $t_2 = 20^\circ\text{C}$  термоелектрорушійна сила дорівнює  $e_t$  (на діаграмі рис. 4.28, в їй відповідає відрізок  $FG$ ). Якщо  $t_2$  збільшується й стає  $t'_2$ , термоелектрорушійна сила знижується до  $e'_t$  (відрізок  $FG'$ ).

При  $t_2 = 20^\circ\text{C}$  і вимірюваній температурі  $t_1$  компенсуюча напруга дорівнює  $U_k$  (відрізок  $CD$  на рис. 4.28, в). Для температури  $t'_2$  компенсуюча напруга буде  $U'_k$  (відрізок  $CD'$ ).

Таким чином, компенсуюча напруга  $U_k$  при коливанні  $t_2$  змінюється так само, як змінюється  $e_t$  при даному  $t_1$  і змінах  $t_2$ ; тому в такій системі відсутня похибка від коливань температури  $t_2$  вільних кінців термопари.

Система дистанційного вимірювання температури з почерговим опитуванням трьох об'єктів  $K1$ ,  $K2$  і  $K3$  зображена на рис. 4.30. Первинними вимірювальними перетворювачами є дротяні терморезистори  $r_1$ ,  $r_2$  і  $r_3$ ; вони почергово підключаються до логометра, який порівнює опір терморезистора з опором  $r_0$ ; результат порівняння подається на відлічувальний пристрій, градуйований у значеннях температури.

Функціональна схема автоматизації:

10.1, 10.2 і 10.3 — первинні вимірювальні перетворювачі температури ( $TE$ );

10.4 — відліковий пристрій з почерговим опитуванням об'єктів  $T(JI)$ .

Автоматичне вимірювання вологості повітря можна здійснювати за допомогою психрометра.

Будову датчика автоматичного психрометра показано на рис. 4.31. У корпусі 5 розміщені два провідникові терморезистори: «сухий»  $R_c$  та «мокрый»  $r_m$ . Терморезистор  $r_m$  обгорнений бавовняною г'язею, яка всмоктує воду з посудини 7. Вода в посудину потрапляє через трубку 1. Підтримує постійний рівень води в посудині



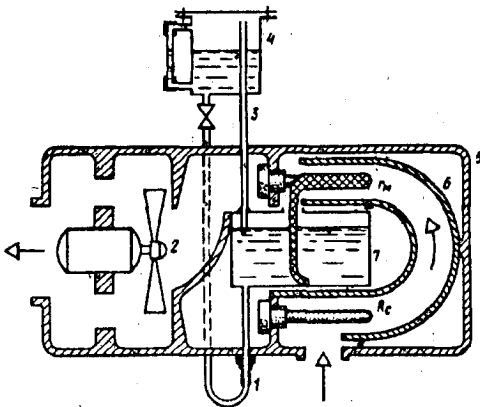


Рис. 4.31

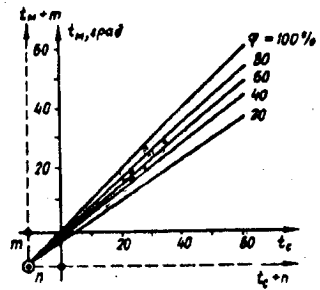


Рис. 4.32

переливна трубка 3: якщо рівень води знижується, через нижній кінець переливної трубки починає надходити повітря в бачок 4, і відповідна кількість води доливається в посудину 7. Обидва термометри  $R_0$  та  $r_m$  розташовані у трубі 6 з термоізоляційного матеріалу, в яку за допомогою вентилятора 2 через відповідний отвір засмоктується досліджуване повітря.

Графік, зображений на рис. 1.45, можна подати по-іншому — у вигляді сім'ї функцій  $t_m = f(t_c)$  для незмінної вологості  $\varphi$ . Можна вважати, що приблизно ці функції становлять сім'ю прямих, які перетинаються у точці з координатами  $m$ ;  $n$  (рис. 4.32). Рівняння цих прямих має вигляд

$$t_m + m = k(t_c + n), \quad (4.22)$$

причому кут нахилу, зв'язаний з вологістю,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{t_m + m}{t_c + n} = k = f(\varphi). \quad (4.23)$$

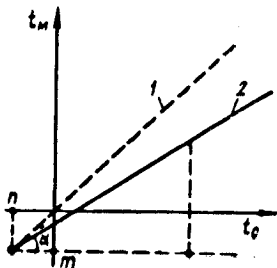


Рис. 4.33

Очевидно, що для  $\varphi = 100\%$  кут нахилу дорівнює  $45^\circ$  (рис. 4.33, пряма 1); для  $\varphi < 100\%$  кут нахилу менший.

Вимірювальна схема (рис. 4.34) становить два незрівноважених мости; напруга у вимірювальній діагоналі  $C_1D$  першого з них

$$U_c = f_1(t_c + n), \quad (4.24)$$

другого (в діагоналі  $C_2D$ ) —

$$U_m = f_2(t_m + m). \quad (4.25)$$

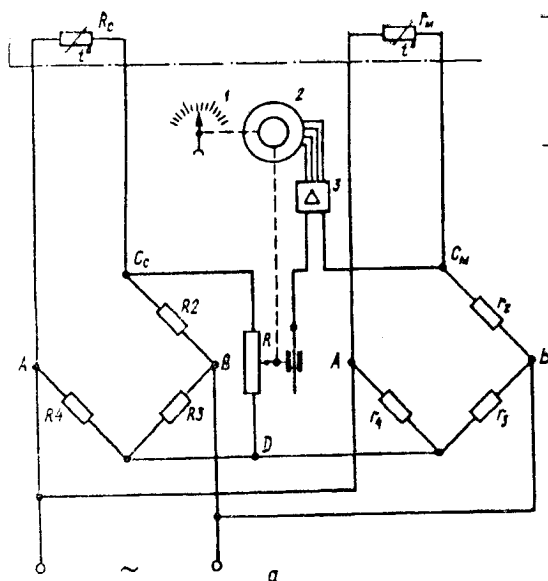
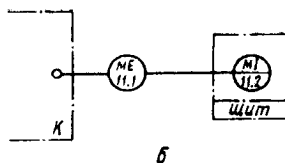


Рис. 4.34



Очевидно, що  $U_c \geq U_m$ . Ці напруги компенсуються за допомогою реохорда  $R$ . Якщо

$$U_m \neq xU_c, \quad (4.26)$$

де  $x$  — переміщення повзуна реохорда, то різниця  $U_m - xU_c$  підсилюється за допомогою підсилювача 3 й примушує працювати сервоелектродвигун 2. Досягши рівноваги

$$U_m = xU_c, \quad (4.27)$$

сервоелектродвигун зупиниться. З рівняння (4.27) випливає, що переміщення повзуна реохорда в момент рівноваги дорівнює

$$x = \frac{U_m}{U_c} = \frac{f_2(t_m + m)}{f_1(t_c + n)} = f_3(k) = F(\varphi). \quad (4.28)$$

Отже, шкала відлікового пристрою 1, зв'язаного з повзуном реохорда, може бути градуйована безпосередньо в процентах відносної вологості досліджуваного повітря.

Функціональна схема автоматизації:

11.1 — первинний перетворювач (ME);

11.2 — показуючий прилад на щиті (MI).

Автоматичний прилад для вимірювання вологості повітря за точкою роси зображено на рис. 4.35.

Як відомо, точкою роси називається температура, при якій водяна пара, що міститься в газі, насичує його. Якщо визначити цю температуру, то за відповідними таблицями можна знайти відносну вологість.

Для спостереження точки роси використовується полірована поверхня порожнистого циліндра 2 з нержавіючої сталі. Циліндр вміщується у газ, вологість якого вимірюється. Через внутрішню порожнину циліндра безперервно протікає охолоджувальна рідина, температура якої може регулюватися електричним нагрівачем

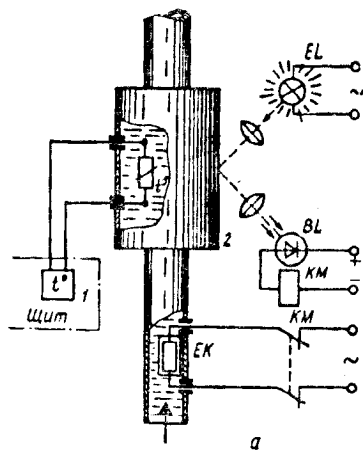
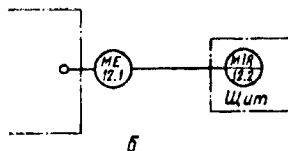


Рис. 4.35



*ЕК*. Світловий потік лампи *EL* відбивається полірованою поверхнею циліндра й потрапляє на фотодіод *BL*. Якщо світловий потік достатній, реле *KM* спрацьовує й припиняє живлення нагрівача. Температура охолоджувальної рідини знижується. Коли вона досягне точки роси, то туман, що з'являється на полірованій поверхні, зменшує світловий потік, який потрапляє на фотодіод; внутрішній опір фотодіода

зростає, реле відпускає й замикає коло живлення нагрівача. Температура охолоджувальної рідини починає зростати, туман з полірованої поверхні зникає, світловий потік зростає, реле *KM* знову спрацьовує, живлення нагрівача знову припиняється і т. д.

Отже, температура охолоджувальної рідини безперервно коливається поблизу точки роси; вимірюється вона реєструвальним приладом *1* (наприклад, автоматичний міст).

Функціональна схема автоматизації:

12.1 — первинний перетворювач (*ME*);

12.2 — показуючий та реєструвальний прилад на щиті (*MIR*).

Час в умовах виробництва вимірюється за допомогою електрогодинникової системи, яка складається з первинного годинника, певної кількості вторинних та електричних проводів, що з'єднують первинний годинник із вторинними.

Первинний годинник працює у такому режимі: 2 с у мережу посилається імпульс струму (наприклад, «+»), після 58 с паузи знову 2 с посилається імпульс струму протилежної полярності (наприклад, «-»), і знову 58 с паузи і т. д.

Один із варіантів механізму вторинного електрогодинника зображено на рис. 4.36. Якір обертається завдяки взаємодії поля постійного магніту та електромагніту. Постійний магніт *10* намагнічує *Z*-подібний якір *4* так, що його нижній кінець завжди має полярність *S*, а верхній — *N*. Якщо на затискач *2* надходить «+», а на затискач *f* — «-», то башмак *3* електромагніту стає *N*-полюсом, а башмак *5* полюсом *S*. Очевидно, що при цьому якір обернеться на 90° у напрямі за годинниковою стрілкою. Наступний імпульс струму матиме протилежну полярність, тому башмак *3* стане *S*-полю-

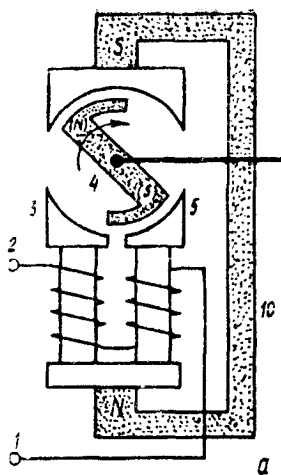


Рис. 4.36

сом, а  $\delta$  — полюсом  $N$ , і яркір змушений буде повернутися на  $90^\circ$  у тому ж напрямі. Таким чином, кожен хвилину з надходженням нового імпульсу яркір обертається на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою. Через черв'ячну передачу  $6$  рух якоря передається на хвилину передачу  $7$ , а далі через зубчасту передачу  $9$  — на годинну стрілку  $8$ .

Функціональна схема автоматизації:

13.1, 13.2 — первинний електрогодинник ( $KE, KT$ );

13.3, 13.4, 13.5 — вторинні електрогодинники (показуючі) ( $KI$ ).

Для вимірювання певних відрізків часу (наприклад, відліку часу простою технологічного устаткування) до електрогодинникової мережі можна підключати електромагнітні лічильники імпульсів (див. рис. 2.25).

Структурну схему цифрового лічильника для вимірювання інтервалів часу подано на рис. 4.37, де  $G$  — генератор імпульсів (з кварцовою стабілізацією частоти);  $T$  — стробуюча схема, спроможна пропускати імпульси тільки протягом вимірюваного відрізка часу  $t_x$ ;  $CT$  — лічильна схема, що лічить імпульси, які пропустила стробуюча схема за час  $t_x$ ; результат підрахунку відтворюється на цифровому індикаторі (значення відрізка часу  $t_x$ ).

Функціональна схема автоматизації:

14 — прилад для вимірювання відрізків часу ( $KDI$ ).

Структурну схему електронномеханічного годинника показано на рис. 4.38 (генератор  $1$  з кварцовою стабілізацією частоти генерує синусоїдні коливання; у перетворювачі  $2$  вони перетворюються на прямокутні імпульси, які примушують обертатися кроковий сервоелектродвигун  $3$ ; зубчаста передача  $4$  забезпечує кроковий

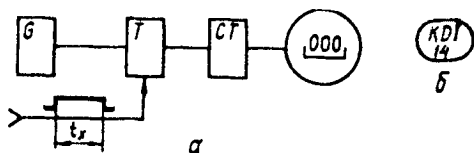


Рис. 4.37

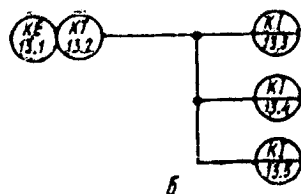


Рис. 4.38

рух секундної стрілки 5 кожної секунди на кут  $6^\circ$  (хвилинна та годинна стрілки на схемі не показані)).

У сучасних вимірювальних системах для вимірювання технологічних параметрів дедалі частіше застосовуються цифрові вимірювальні прилади (ЦВП). Для розширення функціональних можливостей ЦВП деякі з них оснащуються мікропроцесорами. При цьому зміни функціональних можливостей вимірювальної системи відбуваються без переробки її структури, програмним способом.

Застосування мікропроцесорів дає змогу, наприклад, здійснити автоматизований вибір потрібних меж вимірювання та введення корекцій для усунення систематичних похибок, подання результату вимірювання в натуральних або логарифмічних одиницях, у прямокутних або полярних координатах, обчислення середнього значення вимірюваної величини та результатів автоматизованого проведення складних вимірювань (наприклад, опосередкованих), збільшення інформативності цифрового результату вимірювання (зміна кольору світлового сигналу, його миготіння або звукова сигналізація — при дотриманні певних умов) та ін.

## Глава 5

# СИСТЕМИ НАПІВАВТОМАТИЧНОГО ТА АВТОМАТИЧНОГО ДИСКРЕТНОГО КЕРУВАННЯ

### § 5.1. Складання релейно-контактних схем

При складанні принципових релейно-контактних схем систем дискретного керування слід точно сформулювати технічні умови такої системи. Надалі можна йти двома шляхами: скласти принципову схему з типових фрагментів, які відображають окремі позиції технічних умов, або записувати технічні умови логічними формулами (використовуючи логічні функції НЕ, АБО, І), математично обробляти одержану узагальнену формулу й відображати її відповідною схемою.

Типові фрагменти релейних схем для систем керування електроприводом наведені у табл. 5.1. Розглянемо їх.

1. Використовується в схемах як підсилювач (наприклад, якщо при спрацьовуванні малопотужного контакту  $SA1$  треба забезпечити замикаання кола більш потужного навантаження — лампи  $EL1$ ) або при необхідності розмножити кількість контактів (наприклад, якщо спрацьовування одного замикаючого контакту  $SA1$  має забезпечити роздільне замикаання кількох навантажень  $R$ ).

2. Використовується при необхідності змінити вид контакту на протилежний (наприклад, якщо треба, щоб при спрацьовуванні замикального контакту  $SA2$  коло лампи  $EL2$  розривалось).

3. Струм по колу проходить, якщо замикається хоч один з паралельно з'єднаних замикальних контактів.

4. Струм у колі зберігатиметься, доки залишається замкненим хоч один із паралельно з'єднаних розмикальних контактів.

5. Струм по колу проходить, якщо замикаються всі послідовно з'єднані замикальні контакти.

6. Струм у колі зберігатиметься, якщо залишаються замкненими всі послідовно з'єднані розмикальні контакти.

7. Якщо певна подія може статися тільки після деякої попередньої.

8. Якщо, навпаки, певна подія може статися тільки при відсутності іншої.

9. Натиснення на кнопку  $SB1$  примушує реле  $KM11$  спрацювати, внаслідок чого замикальний контакт  $KM11$  шунтує контакт

Фрагмент	Операція	Схема
<i>Логічна</i>		
1	Ствердження (реле-повторювач: при замиканні SA1 замикаються лампа EL1 та навантаження R <sub>1</sub> і R <sub>2</sub> )	
2	Заперечення (реле-інвертор: при замиканні SA2 лампа EL2 відмикається)	
3	Диз'юнкція стверджень (реле KM3 спрацює, якщо замикаються контакти SA3 або SA4)	
4	Диз'юнкція заперечень (реле KM4 спрацює, поки замкнені контакти SA5 або SA6)	
5	Кон'юнкція стверджень (реле KM5 спрацює, якщо замикаються контакти SA7 та SA8)	
6	Кон'юнкція заперечень (реле KM6 спрацює, поки замкнені контакти SA9 та SA10)	
<i>Блокування</i>		
7	Дозволене (замикання SA12 спричинить спрацювання реле KM8 тільки при умові, якщо до цього спрацювало реле KM7)	

Фрагмент	Операція	Схема
8	Виключення (замикання SA14 спричинить спрацьовування реле KM10 тільки при умові, якщо до цього не спрацювало реле KM9)	
<i>Самоблокування</i>		
9	З режимним поверненням (для нереверсивного керування; кнопкова станція складається з кнопок SB1 та SB2)	
10	При керуванні з двох кнопкових станцій (перша кнопкова станція складається з кнопок SB3 та SB4, друга — з SB5 та SB6)	
11	З режимним поверненням і взаємовиключним блокуванням (для реверсивного керування; кнопкова станція — з кнопок SB7, SB8 та SB9)	
12	З режимним (для нереверсивного керування; кнопкова станція — з кнопок SB10 та SB11) або аварійним поверненням (при спрацьовуванні теплового реле КК)	
13	З режимним (для нереверсивного керування; кнопкова станція — з кнопок SB12 та SB13) або аварійним поверненням (при спрацьовуванні будь-якого з технологічних контактів в SQ1 чи SQ2; оскільки контакт SQ2 — замикальний, треба використати реверс-інвертор KM17, контакт якого розриває коло котушки реле KM16)	



Фрагмент	Операція	Схема
<i>Інші</i>		
14	Вмикання сигнальних ламп (засвічування лампи <i>HL1</i> при роботі реле <i>KM13</i> , лампи <i>HL2</i> при роботі <i>KM14</i> , лампи <i>HL3</i> при відмиканні цих обох реле)	
15	Нереверсивне керування трифазним асинхронним електродвигуном із короткозамкненим ротором (для аварійного захисту від перевантаження ввімкнені нагрівальні елементи теплового реле <i>KK</i> )	
16	Ревєрсивне керування трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором	
17	Плавкі запобіжники <i>FU</i> ; для вимикання живлення при їх заміні слугують розмикачі <i>QS</i>	
18	Автоматичний вимикач <i>SF</i> для вимикання живлення при певній максимальній силі струму <i>I</i>	

*SB1*, і реле *KM11* залишиться спрацьованим і після розмикання контакту кнопки *SB1*; якщо ж хоча б короткочасно натиснути на кнопку *SB2*, реле *KM11* відпустить, і схема повернеться у початкове положення, у якому й залишиться до нового натиснення на кнопку *SB1*.

10. Використовується при необхідності керувати схемою з двох незалежних кнопкових станцій, розміщених на віддалі одна від одної.

11. Натискання на *SB7* забезпечує роботу електродвигуна в певному напрямі (назвемо таку роботу «вперед»); натиснення на *SB9* забезпечує роботу в протилежному напрямі («назад»); натиснення на *SB8* розмикає коло будь-якої котушки (*KM13* або *KM14*) й зупинку електродвигуна; розмикальний контакт *KM13* послідовно з котушкою *KM14* та розмикальний контакт *KM14* послідовно з котушкою *KM13* забезпечують взаємовиключаюче блокування (якщо вже спрацювало *KM13* — вмикання *KM14* неможливе, і навпаки, якщо спрацювало *KM14*, то неможливе вмикання *KM13*).

12. Для режимної зупинки використовується *SB11*, для аварійної — контакт *KK* реле захисту (див. рис. 3.5); відповідно до фрагмента 6 — контакти *SB11* та *KK* поєднуються послідовно (це — так звана «схема магнітного пускача»).

13. Забезпечує вмикання реле *KM16* з самоблокуванням, режимне його відмикання (за допомогою *SB13*), а також аварійне відмикання при спрацюванні будь-якого технологічного контакта (*SQ1* або *SQ2*); для цього розмикальний контакт *SQ1* вмикається послідовно з *SB13*, а замикальний контакт *SQ2* спочатку треба інвертувати, і контакт реле-інвертора *KM17* теж ввімкнути у послідовне коло.

14. Вмикання сигнальних ламп (для реверсивного керування електроприводом, фрагмент 11).

15. Силова частина схеми нереверсивного керування трифазним електродвигуном; для захисту електродвигуна від перевантаження у дві його фази вмикаються нагрівальні елементи теплового реле *KK* (див. рис. 3.5).

16. Силова частина схеми реверсивного керування трифазним електродвигуном: контакти *KM13* подають на статор фази *A—B—C*, контакти *KM14* подають фази *C—B—A*; очевидно, що одночасне спрацювання *KM13* та *KM14* призвело б до короткого замикання; щоб уникнути цього, й здійснюється взаємовиключне блокування (фрагмент 11).

17. Застосування плавких запобіжників для захисту джерела живлення від короткого замикання. При заміні плавких запобіжників напруга з них знімається за допомогою розмикачів (для розмикання струму розмикачі не придатні).

18. Замість плавких запобіжників можна використати автоматичний вимикач *SF*.

Розглянемо складання принципової схеми на прикладі системи дискретного керування електроприводом. Схема повинна:

1) забезпечити нереверсивне керування електродвигуном *M2* (з двох незалежних кнопкових станцій) та реверсивне керування електродвигуном *M3*;

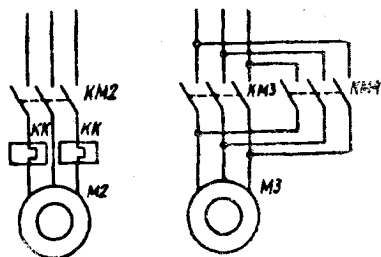


Рис. 5.1

Силова частина системи керування електродвигунами  $M2$  та  $M3$  зображена на рис. 5.1.

Забезпечення виконання умови 1) для  $M2$  подано на рис. 5.2, а, виконання умови 2) — рис. 5.2, б, умови 3) — рис. 5.2, в, умови 4) — рис. 5.2, г. Схема для  $M3$  зображена на рис. 5.3, а схема сигналізації — на рис. 5.4.

Загальний вигляд принципової схеми для вказаного завдання подано на рис. 7.24.

Розглянемо ще один приклад складання схеми системи керування електроприводом — з використанням реле часу (див. § 3.2):

1) реле  $KM1$  має спрацювати й стати на самоблокування при одночасному натисненні на дві кнопки «пуск»  $SB1$  та  $SB2$  — при умові, що замикальні контакти обох кінцевих вимикачів  $SQ1$  та  $SQ2$  замкнені;

2) через 10 с після цього повинен автоматично спрацювати контактор (потужне реле)  $KM2$ ;

3) режимне відключення  $KM1$  та  $KM2$  — одночасне, при натисненні на кнопку «стоп»  $SB3$ .

Спрацьовування та відпускання реле  $KM1$  забезпечує схема, наведена на рис. 5.5. Умова спрацьовування контактора  $KM2$  ( $KT$  — реле часу, вповільнене на спрацьовування) — на рис. 5.6.

Для того щоб контактор  $KM2$  відмикався одночасно з  $KM1$ , вводиться послідовно з котушкою  $KM2$  замикальний контакт  $KM1$  (рис. 5.7).

Узагальнену схему з можливими спрощеннями зображено на рис. 5.8.

Принципові релейно-контактні схеми можна складати й аналітичним способом, якщо записати технічні умови логічними формулами.

Нехай технічні умови задані словесно, наприклад: сигнальна лампа  $X$  повинна засвітитися, якщо [(замкнений контакт  $A$ ) І (замкнений контакт  $B$ )] АБО [(НЕзамкнений  $A$ ) І (НЕзамкнений  $B$ )].

Ірландський математик Дж. Буль розробив методику відобра-

2) передбачити тепловий захист  $M2$  від перевантаження;

3) передбачити аварійний захист  $M2$  при спрацьовуванні будь-якого з двох замикальних технологічних контактів  $SQ2$  або  $SQ4$ ;

4) робота  $M2$  повинна здійснюватися тільки в тому разі, якщо вже працює  $M3$  («вперед» або «назад»);

5) сигнальна лампа  $HL2$  повинна засвічуватися при роботі  $M2$ , а сигнальна лампа  $HL3$ , навпаки, при зупинці  $M3$ .

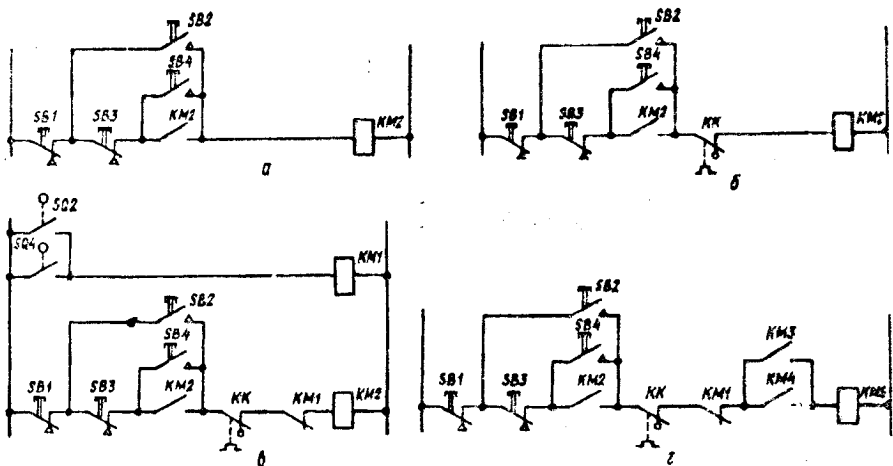


Рис. 5.2

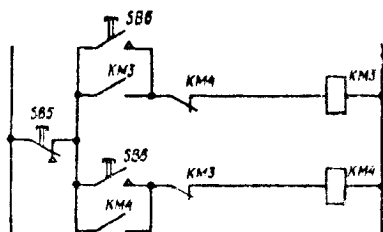


Рис. 5.3

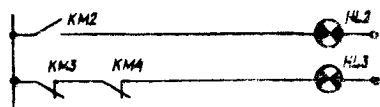


Рис. 5.4

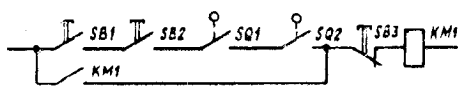


Рис. 5.5

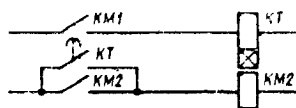


Рис. 5.6

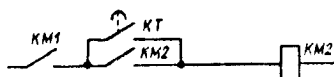


Рис. 5.7

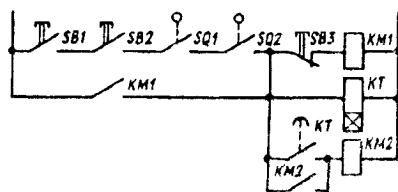
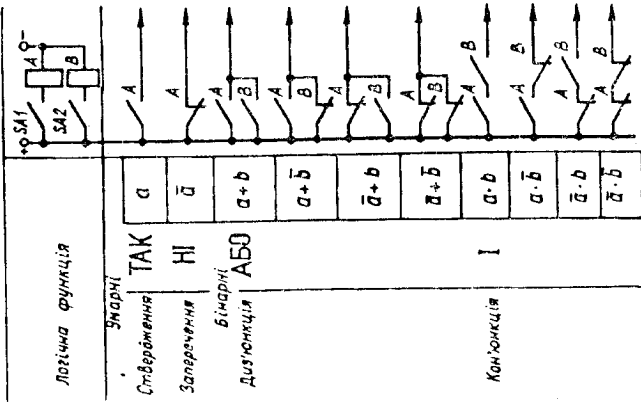
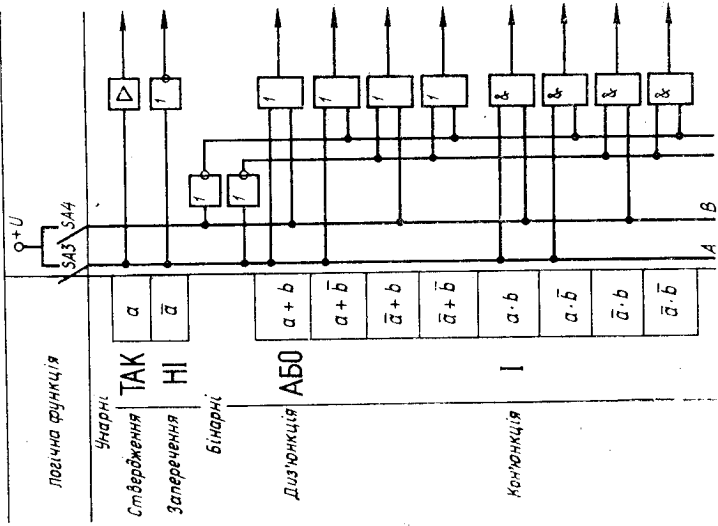


Рис. 5.8

Таблиця 5.2



Таблиця 5.3



ження логічних функцій за допомогою математичних формул, сукупність яких одержала згодом назву *алгебри Буля* (або *бульової алгебри*). Технічні умови роботи сигнальної лампи  $X$  можна записати за допомогою формул бульової алгебри:

$$f(X) = a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b}. \quad (5.1)$$

Відображення функцій бульової алгебри у вигляді принципів релейно-контактних і безконтактних схем показано в табл. 5.2, 5.3. Вважається, що при замиканні  $SA1$  спрацьовує реле  $A$ , при замиканні  $SA2$  — реле  $B$ .

Враховуючи дані табл. 5.2, можна накреслити принципову релейно-контактну схему для наведеного завдання (рис. 5.9).

Якщо технічні умови роботи системи відображаються складними формулами, іноді їх можна спростити за правилами бульової алгебри.

Основні формули алгебри Буля:

1.  $x+x=x$ .
2.  $\bar{x}+\bar{x}=\bar{x}$ .
3.  $x \cdot x=x$ .
4.  $\bar{x} \cdot \bar{x}=\bar{x}$ .
5.  $x+\bar{x}=1$ .
6.  $x \cdot \bar{x}=0$ .
7.  $x+0=x$ .
8.  $x+1=1$ .
9.  $x \cdot 0=0$ .
10.  $x \cdot 1=x$ .
11.  $0+1=1$ .
12.  $1+1=1$ .
13.  $0 \cdot 1=0$ .
14.  $1 \cdot 1=1$ .
15.  $\bar{\bar{1}}=0$ .
16.  $\bar{\bar{0}}=1$ .
17.  $\bar{\bar{x}}=x$ .
18.  $\overline{x+y}=\bar{x} \cdot \bar{y}$ .
19.  $\overline{xy}=\bar{x}+\bar{y}$ .
20.  $(x+y)z=xz+yz$ .
21.  $xy+z=(x+z)(y+z)$ .

Як за диз'юнкції, так і за кон'юнкції для двох однакових аргументів їх функція є просто цей аргумент — закони тавтології, формули 1)...4).

Диз'юнкція ствердження й заперечення відповідає логічній константі 1 (формула 5)), а кон'юнкція ствердження й заперечення є логічною константою 0 (формула 6)). Варіанти диз'юнкцій і кон'юнкцій з використанням логічних констант — у формулах 7)...14).

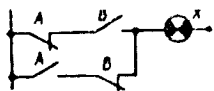


Рис. 5.11

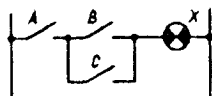


Рис. 5.10

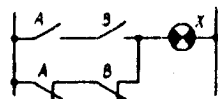


Рис. 5.9

Заперечення 1 є 0, і навпаки (формули 15), 16)).

Подвійне заперечення є ствердженням (формула 17)).

Важливе значення мають дві формули, запропоновані шотландським математиком Огюстесом де Морганом: заперечення диз'юнкції є кон'юнкція заперечень (формула 18)), і навпаки, заперечення кон'юнкції є диз'юнкція заперечень (формула 19)).

І, нарешті, дуже важливими є дві формули розподільних законів: перший — як у звичайній алгебрі (формула 20)), а другий — специфічний (21)).

Приклад спрощення формули: припустимо, що

$$f(X) = a\bar{b}c + ab\bar{c} + abc. \quad (5.2)$$

На основі формули 20) дістанемо

$$f(X) = ab(\bar{c} + c) + a\bar{b}c.$$

Оскільки  $\bar{c} + c = 1$ , на основі формул 5) та 10) можна отримати

$$f(X) = ab + a\bar{b}c.$$

Знову використаємо 20):

$$f(X) = a(b + \bar{b}c).$$

Вираз у дужках можна спростити на основі 21):

$$f(X) = a(b + \bar{b})(b + c).$$

Оскільки  $b + \bar{b} = 1$ , остаточний вираз має вигляд

$$f(X) = a(b + c).$$

Відповідна схема подана на рис. 5.10.

При складанні принципової релейно-контактною схеми технічні умови можна зобразити у вигляді так званої таблиці істинності (таблиці станів):

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Отже, при  $A=B=0$  значення  $X$  теж дорівнює нулю; при  $A=0$  і  $B=1$ , а також при  $A=1$  і  $B=0$  значення  $X=1$ , а при  $A=B=1$  значення  $X=0$ .

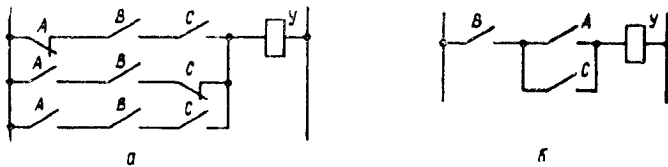


Рис. 5.17

Для кожного стану, коли виконавчий механізм  $X$  мусить спрацювати (тобто, коли  $X=1$ ), треба отримати кон'юнкції функцій  $a$  (для  $A=1$ ),  $\bar{a}$  (для  $A=0$ ),  $b$  (для  $B=1$ ) і  $\bar{b}$  (для  $B=0$ ), а отримані вирази об'єднати знаками диз'юнкції. Для таблиці істинності це стосується другого й третього рядків:

$$f(X) = \bar{a}b + a\bar{b}. \quad (5.3)$$

Спрощення тут неможливе (рис. 5.11).

За допомогою алгебри Буля іноді можна спростити релейно-контактні схеми, складені з типових фрагментів. Наприклад, для деякого реле  $Y$  існує схема, зображена на рис. 5.12, а. Відповідною формулою є

$$f(Y) = \bar{a}bc + ab\bar{c} + abc. \quad (5.4)$$

За формулою 20)

$$f(Y) = \bar{a}bc + ab(\bar{c} + c).$$

Оскільки  $\bar{c} + c = 1$ , дістаємо

$$f(Y) = \bar{a}bc + ab.$$

Знову скористаємося формулою 20)

$$f(Y) = b(\bar{a}c + a)$$

і за 21)

$$f(Y) = b(\bar{a} + a)(c + a).$$

Як відомо,  $\bar{a} + a = 1$ , звідси

$$f(Y) = b(a + c).$$

Відповідну спрощену схему подано на рис. 5.12, б.

## § 5.2. Складання схем систем дискретного керування на безконтактних елементах

Побудову безконтактної схеми системи дискретного керування починають з логічної формули, яка за допомогою булевих функцій відображає технічні умови роботи цієї системи (логічну формулу можна складати на основі словесного завдання, таблиці істинності або готової релейно-контактної схеми, створеної з типових фрагментів).



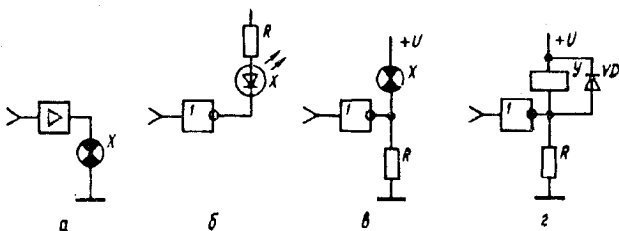


Рис. 5.13

Реалізацію булевих функцій при побудові безконтактних схем показано у табл. 5.3.

На виході безконтактної схеми можна включати різні навантаження (сигнальні лампи, світлодіоди, електромагнітні реле тощо).

Два варіанти вмикання сигнальної лампи на виході безконтактної логічної схеми системи дискретного керування показано на рис. 5.13, а, б. У першому з них (а) сигнальна лампа ввімкнена між виходом схеми та корпусом (який має потенціал —  $U$ ), лампа буде світитися, якщо на вихід логічної схеми надходитиме сигнал високого рівня. Між виходом схеми і лампою доцільно ввімкнути підсилювач.

У другому варіанті (рис. 5.13, б) як сигнальна лампа використовується світлодіод; у цій схемі він світитиметься, коли на вихід надійде сигнал низького рівня. Для того щоб він світився при надходженні на вихід схеми сигналу високого рівня, між виходом схеми і світлодіодом вмикається інвертор. Резистор  $R$  у цій схемі обмежує силу струму через світлодіод.

Для зменшення навантаження на вихідний інвертор можна до виходу схеми підключити резистор  $R$  (як показано на рис. 5.13, в). Через нього лампа додатково буде підживлюватися, і від вихідного інвертора буде споживатися менша потужність.

На виході логічної схеми можна включити котушку електромагнітного реле (рис. 5.13, г); крім резистора  $R$ , у цій схемі застосована й схема іскрогасіння (як на рис. 1.56, б).

Покажемо, як треба складати безконтактні схеми на елементах НЕ, АБО, І — на прикладі формул (5.1) — (5.3).

Для формули (5.1) складаємо схему в такій послідовності:

- відображаємо кон'юнкцію  $a, b$  (рис. 5.14, а);
- зображуємо  $\bar{a}, \bar{b}$  (рис. 5.14, б);
- додаємо диз'юнкцію  $ab + \bar{a}\bar{b}$  (рис. 5.14, в);
- об'єднуємо всі елементи в загальну схему (рис. 5.15; приймаємо варіант вмикання сигнальної лампи — до —  $U$ ).

Для формули (5.2) після спрощення (рис. 5.16) — варіант вмикання сигнальної лампи (світлодіода) — до +  $U$ .

Для формули (5.3) (рис. 5.17) — варіант підключення сигналь-

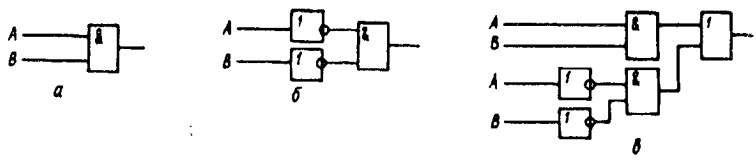


Рис. 5.14

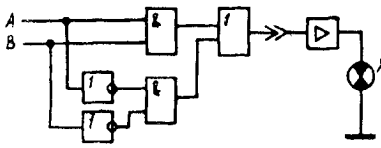


Рис. 5.15

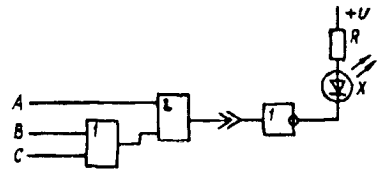


Рис. 5.16

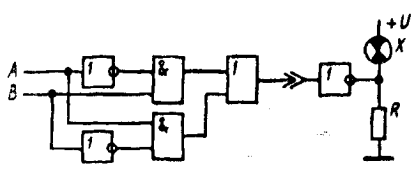


Рис. 5.17

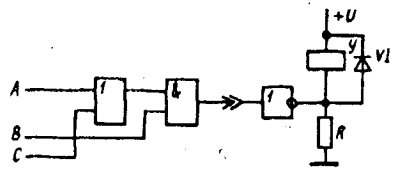


Рис. 5.18

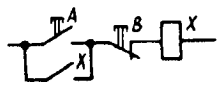


Рис. 5.19

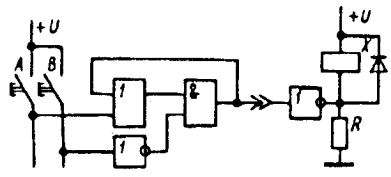


Рис. 5.20

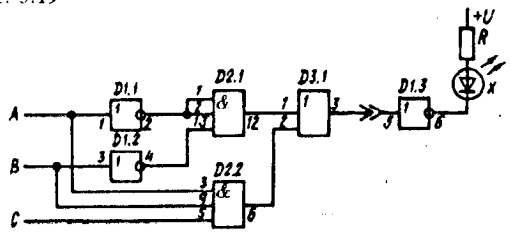


Рис. 5.21

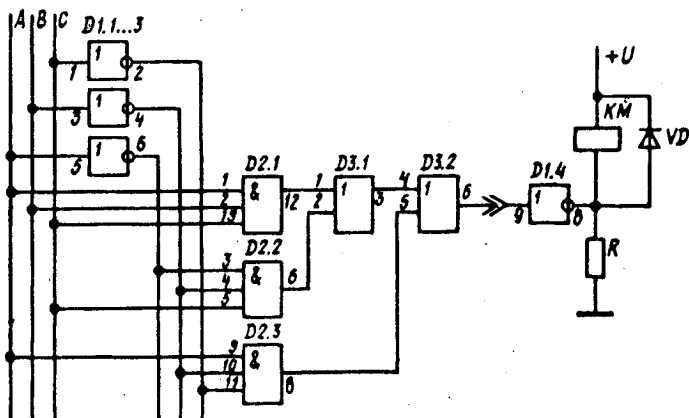


Рис. 5.22

ної лампи — до  $+U$  та з додатковим підживленням через резистор  $R$ .

Для формули (5.4) після спрощення схему зображено на рис. 5.18.

На безконтактних елементах можна виконати схеми, еквівалентні релейно-контактним схемам із самоблокуванням (фрагмент 9 у табл. 5.1). Для такої схеми (рис. 5.19) логічна формула має вигляд  $f(X) = (a+x)\bar{b}$ . Відповідну безконтактну схему наведено на рис. 5.20.

Якщо виникає потреба, крім принципової схеми, накреслити схему з'єднань логічних елементів, користуються їх цоколювкою (додаток 4).

Розглянемо складання схеми з'єднань на прикладі формули

$$f(X) = \bar{a}\bar{b} + abc.$$

Відповідна схема зображена на рис. 5.21:  $D1$  — мікросхема типу К155ЛН1;  $D2$  — типу К155ЛИ4;  $D3$  — типу К155ЛЛ1.

Оскільки для кон'юнкції обрано тривходову мікросхему К155ЛИ4, а для логічної операції  $\bar{a}\bar{b}$  треба тільки два входи, то в елементі  $D2.1$  зайвий вхід слід приєднати до одного з діючих (затискач 5 приєднуємо до 6).

Ще один приклад — для логічної функції:

$$f(KM) = abc + \bar{a}\bar{b}c + a\bar{b}\bar{c}.$$

Схему показано на рис. 5.22. Вибираємо мікросхеми:  $D1$  — це К155ЛН1;  $D2$  — К155ЛИ4;  $D3$  — К155ЛЛ1.

Оскільки в серії К155 не існує логічного елемента АБО з трьома входами, використовуємо двовходовий елемент АБО, спочатку здійснюючи операцію  $abc + \bar{a}\bar{b}c$ , за допомогою мікросхеми  $D 3.1$ , потім забезпечуючи операцію  $(abc + \bar{a}\bar{b}c) + a\bar{b}\bar{c}$  за допомогою  $D 3.2$ .

### § 5.3. Використання гнучких логічних схем для систем дискретного керування

Розглянуті логічні схеми систем дискретного керування (релейно-контактні, безконтактні) мають жорстку (незмінну) логічну структуру: програма роботи закладена при виготовленні, і в процесі експлуатації змінити її неможливо (для цього треба було б існуючу схему розібрати й створити нову).

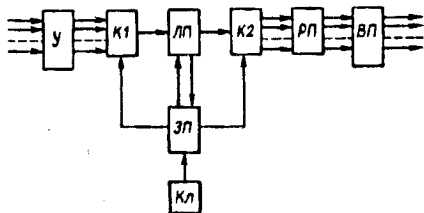


Рис. 5.23

У сучасних системах дискретного керування дедалі більшого поширення набувають програмовані мікроконтролери — пристрої, що мають гнучку логічну структуру (програмування здійснюється не при виготовленні, а безпосередньо перед застосуванням; для того ж у процесі експлуатації можна змінювати програму і вводити її з клавіатури).

Спрощену функціональну схему програмованого мікроконтролера зображено на рис. 5.23. Вхідні сигнали надходять через вузол узгодження  $У$  (призначений для узгодження рівнів електричної напруги вхідних сигналів з рівнем сигналів контролера). Комутатор  $К1$  по чергово вибирає певний вхідний сигнал (згідно з командою, що надходить від запам'ятовувального пристрою  $ЗП$ ) і подає його на вхід логічного процесора  $ЛП$ ; вид логічних операцій встановлюють команди, які надходять із  $ЗП$ . Результат виконаних логічних операцій передається через вихідний комутатор  $К2$  до регістру пам'яті  $РП$  і далі на вихід контролера через вихідні підсилювачі  $ВП$ . Після цього  $ЗП$  подає команду на  $К1$  перейти до чергового вхідного сигналу, забезпечує надходження його на вхід  $ЛП$ , відповідне оброблення та передачу результату через  $К2$  на вихід і т. д.

Програма до запам'ятовувального пристрою  $ЗП$  вводиться за допомогою клавіатури  $Кл$  (її можна при необхідності змінити в будь-який момент).

Програмовані контролери застосовуються при автоматизації електроприводів і в інших системах дискретного керування технологічними процесами в багатьох галузях промисловості.

## Глава 6

# СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### § 6.1. Класифікація локальних систем автоматичного регулювання

У локальних системах автоматичного регулювання всі процеси в розпорядчій ланці відбуваються автоматично.

За принципом дії вони поділяються на дві групи: системи з регулюванням за збуренням і з регулюванням за відхиленням.

Принцип регулювання за збуренням був запропонований у 1829 р. французьким математиком і механіком Ж.-В. Понселе. Структурну схему системи регулювання, побудованої за «принципом Понселе», зображено на рис. 6.1: вимірюється значення збурювального впливу  $\lambda$ , що змінюється у часі, і відповідно до цього регулятор виробляє розпорядчий сигнал  $\mu$ , який забезпечує необхідне значення регульованої величини  $y(t)$ .

У системах регулювання за збуренням значення регульованої величини  $\varphi$  не вимірюється і не порівнюється із завданням  $\psi$ , тому керуючий вплив  $\mu$  не залежить безпосередньо від значень  $\varphi$  і  $\psi$ ; внаслідок цього точність регулювання в них невелика. У цих системах важко змінювати завдання  $\psi$ ; але вони швидкодіючі й стійкі в роботі.

Приклад системи автоматичного регулювання за збуренням дано на рис. 6.2, а. Система призначена для регулювання рівня рідини в резервуарі А. Головне збурення  $\lambda$  — це витрата  $Q_v$ .

Якщо подача  $Q_n$  дорівнює витраті  $Q_v$ , рівень рідини  $H$  не змінюється. Для вимірювання  $Q_v$  використовується труба Вентурі 5 з диференціальним манометром 4. Зростання  $Q_v$  призводить до збільшення різниці  $p_1 - p_2$ , діафрагма диференціального манометра переміщується праворуч, тягнучи за собою струминну трубку 3. Внаслідок цього тиск у нижній частині поршневого серводвигуна 2 перевершує тиск у верхній, поршень трохи зміщується вгору, і

клапан 1 частково відкривається, збільшуючи подачу  $Q_n$ . Якщо ж рівновага порушується внаслідок зменшення  $Q_v$ , завдяки втручання регулятора подача  $Q_n$  зменшується.

Функціональна схема автоматизації для цієї системи — на рис. 6.2, б:

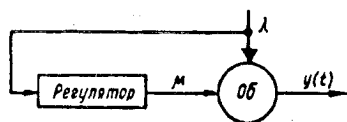


Рис. 6.1

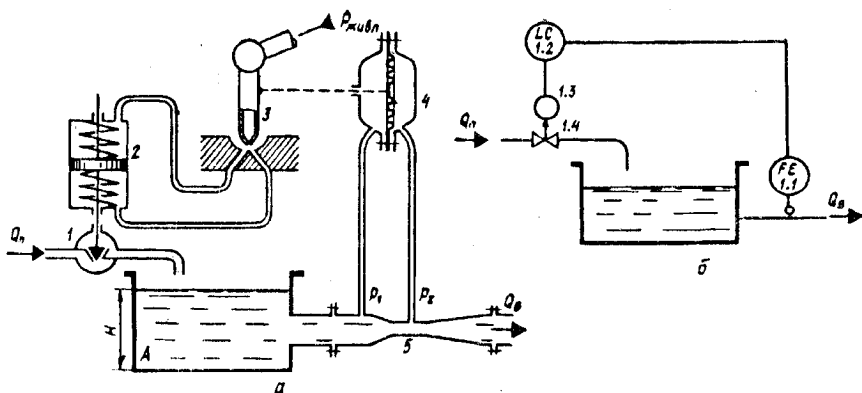


Рис. 6.2

1.1 — первинний вимірювальний перетворювач витрати рідини (FE);

1.2 — регулятор рівня рідини (LC);

1.3 — виконавчий механізм, який після припинення подачі розпорядчого сигналу відкриває регулюючий орган;

1.4 — клапан на трубопроводі.

Структурну схему системи регулювання за відхиленням зображено на рис. 6.3. Усі ці процеси в розпорядливій ланці (див. рис. В.33) відбуваються автоматично: вимірюється регульований параметр  $y(t)$ , результат вимірювання  $\varphi$  порівнюється з  $\psi$ , різниця  $\varepsilon = \psi - \varphi$  потрапляє на вхід регулятора, де виробляється розпорядливий сигнал  $\mu$ , який забезпечує необхідне значення регульованої величини  $y(t)$  при збурювальному впливі  $\lambda$ . Ручним способом виконується тільки одна операція — введення уставки  $\gamma$ .

Принцип регулювання за відхиленням був уперше практично застосований в парових машинах І. І. Ползунова (для регулювання рівня води (див. рис. В.7)) і Д. Уатта (для регулювання швидкості обертання вала машини (див. рис. В.8)), тому він дістав назву *принципу Ползунова—Уатта*.

Приклад системи автоматичного регулювання за відхиленням подано на рис. 6.4, а (система регулювання рівня води в резервуарі В). Якщо подача води  $Q_{\text{п}}$  дорівнює витраті  $Q_{\text{в}}$ , рівень  $H$  не змінюється. Якщо ж  $Q_{\text{в}}$  зменшується, рівень  $H$  води починає зростати, буйковий перетворювач б підіймається вгору, через важіль 4 прикриває сопло вторинного перетворювача сопло-заслонка 3, тиск повітря на його виході підвищується, і мембранний серводвигун 2 прикриває кла-

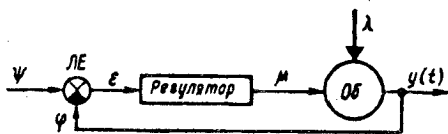


Рис. 6.3

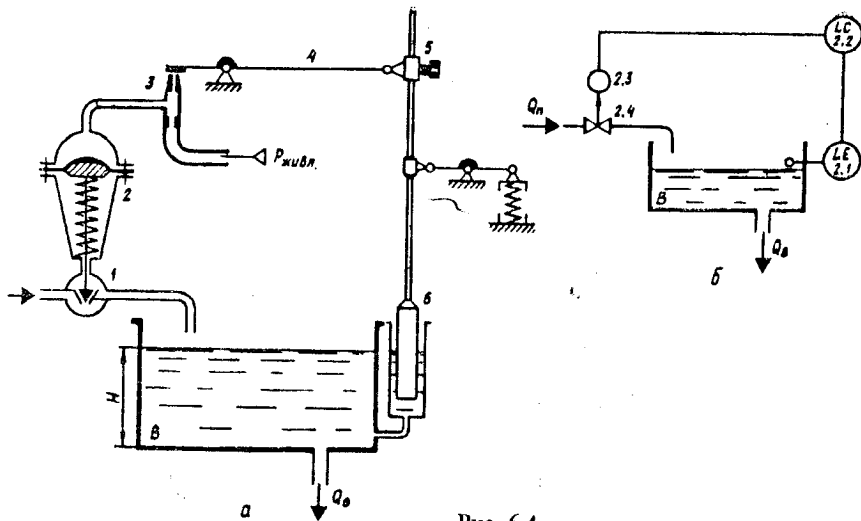


Рис. 6.4

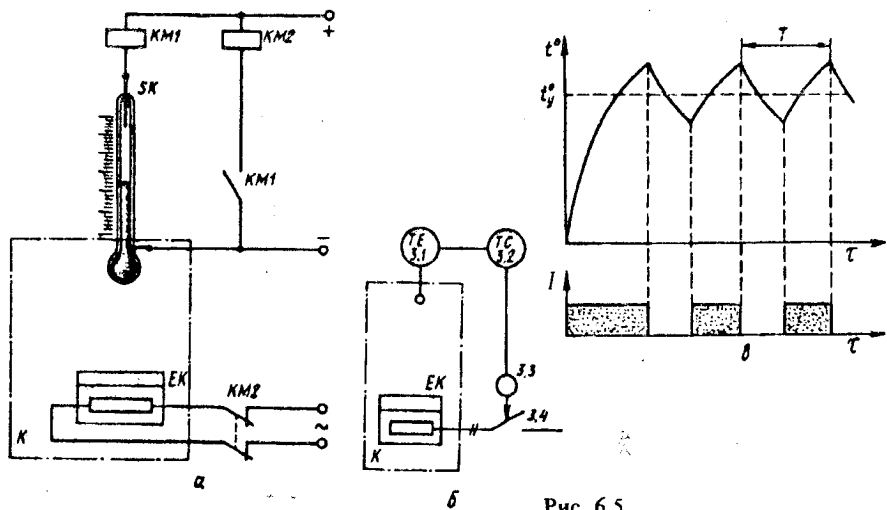


Рис. 6.5

пан 1, зменшуючи подачу  $Q_{п.}$  При порушенні рівноваги внаслідок зростання  $Q_{в.}$  регулятор забезпечує відповідне збільшення  $Q_{п.}$  За допомогою фіксатора 5 можна змінювати  $\psi$ , рівень  $H$  якого буде підтримувати регулятор: якщо фіксатор перемістити униз, регулятор підтримуватиме нижчий рівень води, якщо ж фіксатор перемістити угору — вищий. Таким чином, переміщення фіксатора дає змогу змінювати уставку  $\gamma$  регулятора.

Схема автоматизації для розглянутої системи — на рис. 6.4, б:

2.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини ( $LE$ );

2.2 — регулятор рівня рідини ( $LC$ );

2.3 — виконавчий механізм;

2.4 — клапан на трубопроводі.

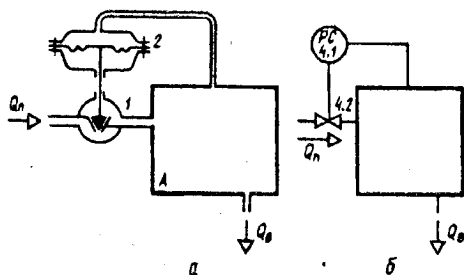


Рис. 6.6

Системи автоматичного регулювання за відхиленням поділяються за такими ознаками: характер впливу на об'єкт, наявність додаткових джерел живлення; алгоритм функціонування, залежність розпорядчого сигналу  $\mu$  від різниці  $\epsilon$  між повідомною інформацією  $\phi$  та завданням  $\psi$ .

За характером впливу на об'єкт регулятори можуть бути релейної або безперервної дії (наприклад, на рис. 6.4).

Найпростішим регулятором релейної дії є двопозиційний. Його призначення полягає в тому, щоб для підтримання регульованої величини приблизно на заданому рівні періодично вмикати й вимикати приплив енергії або речовини до об'єкта керування.

Приклад двопозиційного регулятора наведено на рис. 6.5, а: контактний термометр  $SK$ , встановлений у камері  $K$ , при досягненні певного рівня температури замикає коло котушки реле  $KM1$ , яке спрацьовує й вмикає виконавче реле  $KM2$ , яке своїми розмикаючими контактами припиняє подачу електроенергії до нагрівача  $EK$ . Температура в камері починає знижуватися; коли контакт термометра знову розімкнеться, реле  $KM1$  та  $KM2$  відпустять, і нагрівач  $EK$  знову одержить живлення.

Графік двопозиційного регулювання подано на рис. 6.5, в ( $t^0$  — регульована величина (температура);  $\tau$  — час; регульована величина здійснює коливання з періодом  $T$ ;  $t_y^0$  — усереднене значення регульованої величини;  $I = f(\tau)$  — графік змін струму в нагрівачі).

Функціональну схему автоматизації для цієї системи зображено на рис. 6.5, б:

3.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури ( $TE$ );

3.2 — регулятор температури ( $TC$ );

3.3 — виконавчий механізм для вмикання й вимикання нагрівача;

3.4 — контакти виконавчого механізму.

За наявністю додаткових джерел живлення регулятори поділяються на регулятори прямої і непрямої дії.



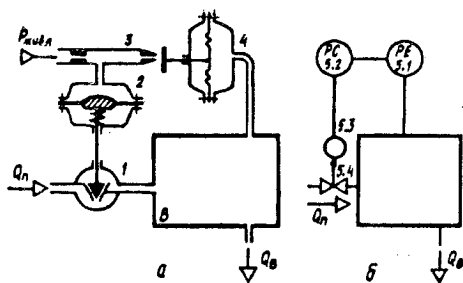


Рис. 6.7

Регулятори *прямої дії* не мають ніякого додаткового живлення для своєї роботи, їх виконавчий механізм працює за рахунок енергії первинного вимірювального перетворювача.

Приклад регулятора прямої дії показаний на рис. 6.6, а. Об'єкт — бак А, до якого подається газ під тиском. Якщо  $Q_в < Q_п$ , тиск у

баці зростає, мембрана вимірювального перетворювача 2 прогинається й зменшує подачу газу через клапан 1. Функціональна схема для цієї системи — на рис. 6.6, б:

4.1 — первинний вимірювальний перетворювач тиску, який виступає як функція виконавчого механізму (PC);

4.2 — регулюючий орган (клапан).

У цьому разі виконавчий механізм окремо не зображується.

У регуляторах *непрямої дії* використовується додаткове живлення для роботи тих чи інших елементів.

Приклад регулятора непрямої дії наведено на рис. 6.7, а: при  $Q_в < Q_п$  тиск у баці В зростає, мембрана вимірювального перетворювача 4 прогинається ліворуч, заслінка частково прикриває сопло вторинного перетворювача 3, зростає тиск у верхній частині виконавчого механізму 2, зменшується подача  $Q_п$  газу через клапан 1.

Відповідна функціональна схема — на рис. 6.7, б:

5.1 — первинний вимірювальний перетворювач (PE);

5.2 — регулятор тиску (PC);

5.3 — виконавчий механізм;

5.4 — клапан.

За алгоритмом функціонування системи автоматичного регулювання поділяються на три види: стабілізуючі, програмні, слідуючі.

У *стабілізуючих* системах регулятор підтримує контрольовану величину на постійному рівні, який задається уставкою  $\gamma$ . Наприклад (рис. 6.8, а): у камері К нагрівання здійснюється за допомогою електронагрівача ЕК. Первинним вимірювальним перетворювачем є термопара, електрорушійна сила  $e_t$  якої порівнюється з напругою  $\Delta U$ , що знімається з подільника R і відіграє роль уставки  $\gamma$ . Подільник R живиться від джерела стабільної напруги  $U_{ст}$ . Оскільки  $e_t$  і  $\Delta U$  ввімкнуті назустріч одне одному, при  $\Delta U = e_t$  їх сума дорівнює нулю. Якщо температура в камері К вище заданої, то  $e_t > \Delta U$ , величина  $e_t - \Delta U$  перетворюється на змінний струм (1 — перетворювач постійного струму у змінний), підсилюється (2 — підсилювач) і вмикає сервоелектродвигун 3, який переміщує

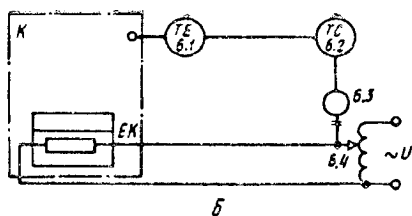
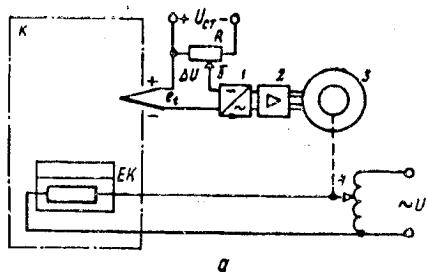


Рис. 6.8

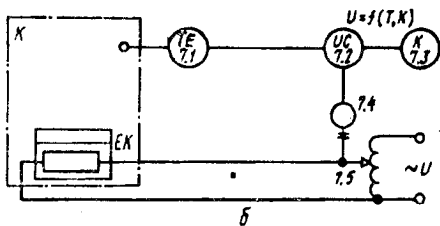
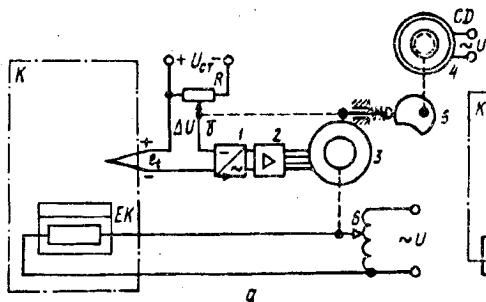


Рис. 6.9

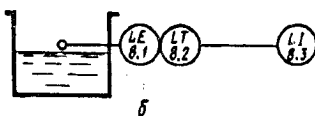
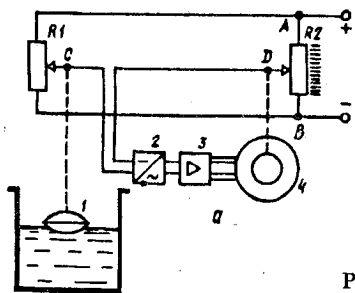


Рис. 6.10

повзун автотрансформатора 4 униз, зменшуючи напругу живлення нагрівача. У результаті температура у камері  $K$  не перевищує заданої межі. Якщо температура в камері нижче заданої, сервоелектродвигун перемістить повзун автотрансформатора вгору, збільшуючи температуру.

Функціональна схема — на рис. 6.8, б:

6.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури (TE);

6.2 — регулятор температури (TC);

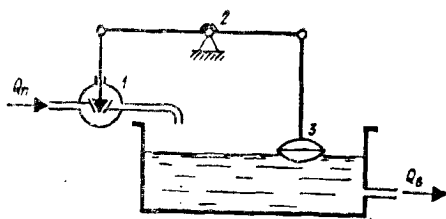


Рис. 6.11

6.3 — виконавчий механізм, який після припинення подачі розпорядчого сигналу залишає регулюючий орган у незмінному стані;

6.4 — регулювальний орган (автотрансформатор).

*Програмна* — це така стабілізуюча система, у якій уставка змінюється за певним

законом. Ця система (рис. 6.9, а), наприклад, відрізняється від попередньої тим, що уставка переміщується за допомогою кулачка 5; рівномірне обертання його здійснює синхронний сервоелектродвигун з розщепленими полюсами 4.

Функціональна схема для цієї системи — на рис. 6.9, б:

7.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури ( $TE$ );

7.2 — регулятор температури, дія якого залежить від часу ( $UC$ );

7.3 — пристрій, який забезпечує дію регулятора залежно від часу ( $K$ );

7.4 — виконавчий механізм;

7.5 — регулюючий орган (автотрансформатор).

У *слідкуючій* системі автоматичного регулювання вихідний сигнал повинен відтворювати вхідну керуючу дію, яка змінюється за довільним законом. Повзун  $C$  реостата  $R_1$  (рис. 6.10, а) переміщується залежно від змін рівня води в резервуарі. Якщо потенціал точки  $D$  відрізняється від потенціалу точки  $C$ , різниця потенціалів  $U_C - U_D$  перетворюється на змінний струм, підсилюється й вмикає конденсаторний сервоелектродвигун, який переміщує повзун  $D$  доти, поки  $U_D$  не зрівняється з  $U_C$ . Таким чином, повзун  $D$  слідкує за положенням повзуна  $C$  і повторює усі його переміщення. А в цілому ця система може бути використана для дистанційного вимірювання рівня води в резервуарі; функціональна схема — на рис. 6.10, б.

Слідкує регулювання здійснюється також у схемах автоматичних мостів і потенціометрів (див. рис. 2.9, 2.10, 2.32, 2.33, 4.21... 4.26, 4.28).

За функцією залежності розпорядчого сигналу  $\mu$  від різниці  $\epsilon$  між повідомленою інформацією  $\phi$  та завданням  $\psi$  (законом регулювання) регулятори безперервної дії поділяються на: з пропорційним законом регулювання ( $P$ -регулятори); з інтегральним законом ( $I$ -регулятори); з пропорційно-інтегральним законом ( $PI$ -регулятори) та ін. Приклади цих трьох систем наведено на рис. 6.11...6.13.

У  $P$ -регуляторі відхилення регульованої величини від завдання

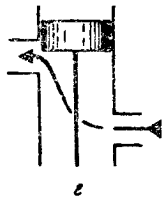
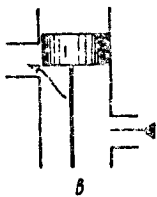
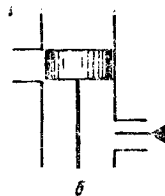
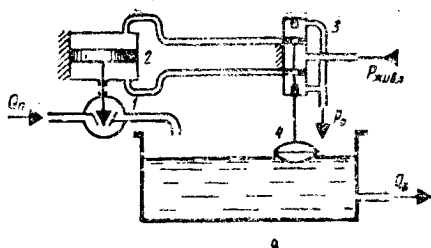


Рис. 6.12

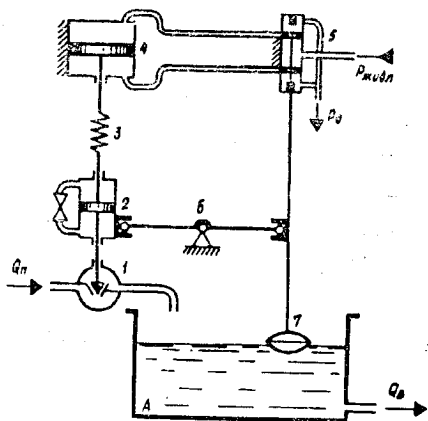


Рис. 6.13

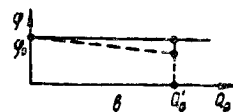
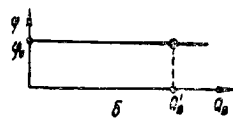


Рис. 6.14

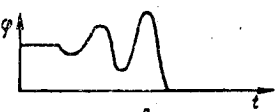
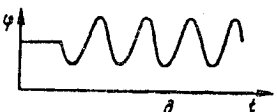
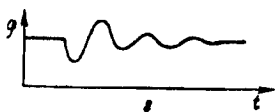
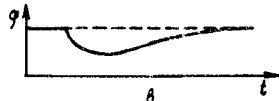
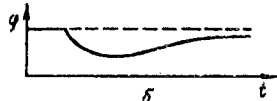
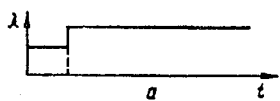


Рис. 6.15

зумовлює пропорційне за значенням переміщення регулюючого органу

$$\mu = Ke. \quad (6.1)$$

До  $P$ -регулятора (рис. 6.11) входять поплавок 3, важіль 2 та клапан 1. Клапан відкривається пропорційно відхиленню поплавка від початкового рівня. Система працює таким чином: якщо  $Q_v = Q_n$ , регульований параметр (рівень води) не змінюється; при збільшенні  $Q_v$  рівень знижується, поплавок 3 переміщується вниз і за допомогою важеля 2 збільшує подачу  $Q_n$  через клапан 1. Рівень води починає потроху підійматись, але до попереднього значення не доходить, зупиняється на рівні, коли подача  $Q_n$  дорівнюватиме новому значенню  $Q_v$ . Тому чим більше навантаження  $Q_v$  на об'єкт, тим більшим буде кінцеве відхилення регульованої величини  $\varphi$  від початкового значення  $\varphi_0$ . Цю особливість  $P$ -регулятора ілюструє його статична характеристика (рис. 6.14, а): кінцеве відхилення для навантаження  $Q'_v$  дорівнює  $\Delta\varphi'$ , і воно тим більше, чим більше навантаження.

Перехідні процеси у системі з  $P$ -регулятором закінчуються швидко, система у перехідному режимі звичайно стійка; якщо у такій системі раптово змінюється навантаження (стрибок значення  $\lambda$  рис. 6.15, а), графік перехідного процесу може мати вигляд, як на рис. 6.15, б.

У  $I$ -регуляторі регулюючий вплив триває доти, доки регульована величина не повернеться до заданого значення. Величина регулюючого впливу пропорційна інтегралу відхилення регульованої величини від завдання за часом

$$\mu = \frac{1}{T} \int \varepsilon dt, \quad (6.2)$$

де  $T$  — стала часу.

$I$ -регулятор (рис. 6.12) складається з поплавка 4, золотника 3, поршневого серводвигуна 2 та клапана 1. У цій системі чим більша різниця  $\varepsilon = \varphi - \varphi_0$ , тим більше відкриваються вихідні отвори золотника (рис. 6.12, б, в, г), тим з більшою швидкістю переміщується поршень серводвигуна. В результаті клапан відкриватиметься тим більше, чим більшим буде відхилення регульованого параметра від завдання й чим довше діятиме виконавчий механізм, тобто відкриття клапану залежатиме від інтеграла  $\int \varepsilon dt$ . Якщо система працює при  $Q_n = Q_v$ , рівень води не змінюється. Але якщо раптово збільшиться навантаження  $Q_v$ , рівень почне зменшуватися, поплавок переміщуватиметься вниз, робоча рідина через золотник під тиском  $p_{живл}$  почне надходити до нижньої порожнини поршневого серводвигуна, а верхня порожнина одержить вихід до атмосферного тиску  $p_0$ . У результаті поршень почне переміщуватися вгору, збільшуючи подачу  $Q_n$  води через клапан. Рівень води підіймається, і при досягненні заданої величини золотник перекриє подачу

робочої рідини до серводвигуна, і той зупиниться. Ідеально було б, якби при цьому нове значення  $Q_{\text{п}}$  зрівнялося з новим значенням навантаження  $Q_{\text{в}}$ ; перехідний процес для цього випадку показано на рис. 6.15, *в*. Якщо ж серводвигун зупиниться, збільшивши подачу так, що нове значення  $Q_{\text{п}}$  перевищить нове значення  $Q_{\text{в}}$ , то рівень води стане підійматися над заданим, і золотник примусить серводвигун прикрити клапан. Такі коливання в системі можуть відбуватися кілька разів, важливо лише, щоб вони були загасаючими (рис. 6.15, *г*). Цінною властивістю *I*-регулятора є те, що закінчує свою роботу він при встановленні точно заданого рівня. Тому статична характеристика горизонтальна, вона не залежить від значень  $Q_{\text{в}}$  (рис. 6.14, *б*). Якщо ж перехідний процес буде не загасаючим, а стаціонарним (рис. 6.15, *д*) або навіть таким, що розширюється (рис. 6.15, *е*), то ця система не здатна виконувати функції регулювання, вона нестійка.

Динамічні властивості системи з *I*-регулятором обмежують її застосування; ці регулятори можуть працювати не з усіма об'єктами.

Узагальнюючи сказане, можна зробити висновок, що *P*-регулятори виявляють позитивні властивості в динамічному режимі, але мають істотні недоліки в статичному, а *I*-регулятори, навпаки, позитивні у статиці, проте їхні недоліки проявляються у динаміці.

*PI-регулятор* поєднує позитивні властивості обох розглянутих регуляторів: при відхиленні регульованої величини від заданого значення спочатку спрацьовує пропорційна частина регулятора (це поліпшує динамічні властивості системи), а потім на об'єкт починає впливати інтегральна частина (а це вже поліпшує статичні властивості системи). Роботу *PI*-регулятора може приблизно проілюструвати рис. 6.14, *в*: спочатку робоча точка міститься на лінії *P*-регулятора, потім вона переходить на лінію *I*-регулятора. Закон регулювання *PI*-регулятора:

$$\mu = K_{\epsilon} + \frac{1}{T} \int \epsilon dt. \quad (6.3)$$

Приклад *PI*-регулятора дано на рис. 6.13 (*1* — клапан, *2* — демпфер, *3* — пружина, *4* — поршневий серводвигун, *5* — золотник, *6* — важіль, *7* — поплавок).

Якщо навантаження  $Q_{\text{в}}$  на об'єкт раптово збільшується, поплавок починає опускатися, важіль переміщує вгору корпус демпфера (разом з його поршнем, якщо поплавок переміщується досить швидко); при цьому клапан відразу трохи відкривається, збільшуючи подачу  $Q_{\text{п}}$ . При опусканні поплавок переміщується також поршень золотника, і робоча рідина потрапляє в нижню порожнину поршневого серводвигуна; його поршень змушений повільно переміщуватися вгору, розтягуючи пружину. В результаті цього поршень демпфера також починає переміщуватися вгору, додатково

відкриваючи клапан подачі води в резервуар *A*. Робота регулятора закінчиться тільки тоді, коли клапан подачі опиниться в такому положенні, при якому буде забезпечено рівень води в резервуарі, що точно дорівнює заданому.

При раптовому зменшенні навантаження всі процеси відбуваються у протилежних напрямках. Отже, цей регулятор при раптових змінах навантаження спочатку спрацьовує як пропорційний, а потім як інтегральний, виявляючи позитивні властивості як у динамічному режимі (коли він працює як *P*-регулятор), так і в статичному (коли він працює як *I*-регулятор).

## § 6.2. Приклади аналізу локальних систем автоматичного регулювання

Система автоматичного регулювання рівня води в резервуарі *B* зображена на рис. 6.16 (*1* — клапан, *2* — поршневий сервопривод, *3* — струминний перетворювач, *4* — диференціальний мембранний манометр, *5* — нормальна діафрагма).

При  $Q_{\text{п}} = Q_{\text{в}}$  рівень води в резервуарі не змінюється. Якщо  $Q_{\text{в}}$  зростає, збільшується різниця  $p_1 - p_2$ , мембрана дифманометра переміщується праворуч; струминна трубка збільшує тиск у нижній порожнині серводвигуна й зменшує у верхній; тому поршень, переборюючи протидію пружини, трохи переміщується вгору, відкриваючи клапан і збільшуючи подачу  $Q_{\text{п}}$ . Якщо ж  $Q_{\text{в}}$  зменшується, то регулятор забезпечує й зменшення  $Q_{\text{п}}$ .

Принцип регулювання відбувається за збуренням.

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.16, б):

1.1 — первинний вимірювальний перетворювач витрати речовини у трубопроводі (*FE*);

1.2 — регулятор рівня (*LC*);

1.3 — виконавчий механізм, що відкриває регулюючий орган після припинення дії розпорядливого сигналу;

1.4 — клапан.

Систему регулювання рівня води в резервуарі *B* зображено на рис. 6.17.

Якщо подача води  $Q_{\text{п}}$  дорівнює витраті  $Q_{\text{в}}$ , рівень *H* не змінюється. Якщо  $Q_{\text{в}}$  зменшується, рівень води зростає, буйковий перетворювач *3* підіймається; важіль *2* трохи прикриває клапан *1*, і подача  $Q_{\text{п}}$  зменшується. При порушенні рівноваги через зростання  $Q_{\text{в}}$  регулятор забезпечує відповідне збільшення  $Q_{\text{п}}$ . Протидія пружини *4* зумовлює значення  $\psi$ : чим менша протидія пружини, тим нижчим буде значення рівня води, яке регулятор намагатиметься підтримувати. А оскільки протидія пружини залежить від переміщення нижньої точки її опори, то поворотом ексцентрика *5* можна змінювати уставку регулятора: при повороті ексцентрика у напрямі за годинниковою стрілкою значення  $\psi$  збільшується, при повороті проти годинникової стрілки — навпаки, зменшується.

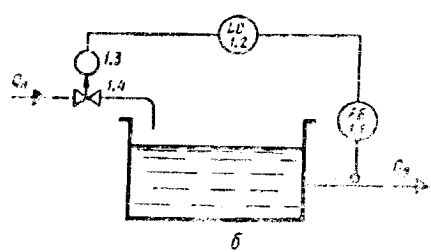
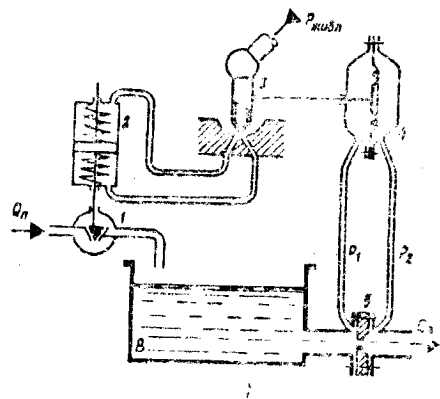


Рис. 6.16

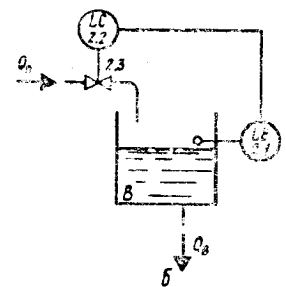
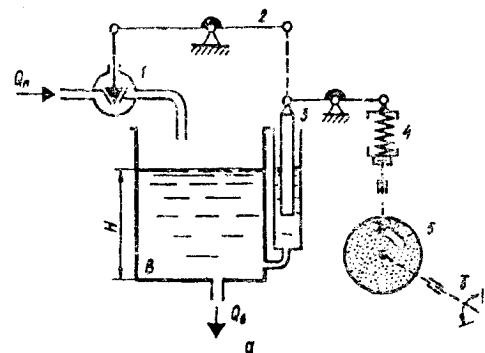


Рис. 6.17

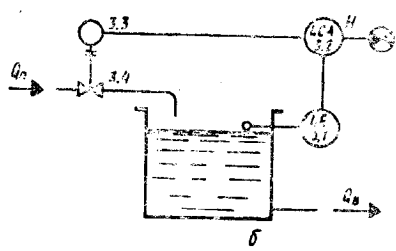
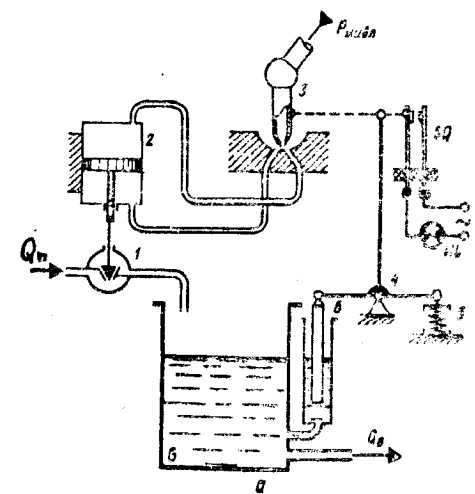


Рис. 6.18



Принцип регулювання відбувається за відхиленням, характер впливу — безперервний, регулятор прямої дії, стабілізуючий; закон регулювання пропорційний (*P*-регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.17, б):

2.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини (*LE*);

2.2 — регулятор рівня рідини (*LC*), який безпосередньо керує роботою регулюючого органа;

2.3 — клапан на трубопроводі.

Систему автоматичного регулювання рівня води в резервуарі *G* зображено на рис. 6.18 (1 — клапан, 2 — поршневий серводвигун, 3 — струминний перетворювач, 4 — важіль, 5 — пружина, 6 — буйковий перетворювач, *SQ* — замикаючий технологічний контакт, *HL* — сигнальна лампа. При  $Q_{п} = Q_{в}$  рівень залишається незмінним. При зменшенні витрати  $Q_{в}$  рівень зростає, замикається *SQ* і засвічує *HL*, одночасно з цим переміщується проти годинникової стрілки струминна трубка, підвищуючи тиск робочої рідини над поршнем серводвигуна; поршень переміщується вниз, зменшуючи подачу  $Q_{п}$ . При збільшенні  $Q_{в}$ , навпаки, регулятор збільшує  $Q_{п}$ .

Принцип регулювання відбувається за відхиленням, регулятор безперервної дії, непрямой дії, стабілізуючий, закон регулювання інтегральний (*I*-регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.18, б):

3.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини (*LE*);

3.2 — регулятор рівня з сигналізацією верхньої межі рівня (*LCA, H*);

3.3 — виконавчий механізм, що після припинення дії розпорядливого сигналу не впливає на регулюючий орган;

3.4 — клапан.

Систему автоматичного регулювання рівня рідини у резервуарі *M* показано на рис. 6.19: 1 — поршневий сервопривод, 2 і 4 — пружини, 3 — золотник, 5 — клапан, 6 — буйковий перетворювач, 7 — пружина, *KP* — поляризоване електромагнітне реле, *KM1* і *KM2* — електромагнітні реле, *УА1* і *УА2* — електромагнітні сервоприводи. При  $Q_{п} = Q_{в}$  рівень не змінюється. Якщо стане  $Q_{в} > Q_{п}$ , то рівень знижується, повзун *C* на опорі *R*<sub>1</sub> переміщується вгору; реле *KP* спрацьовує так, що живлення подається на котушку *KM1*; спрацьовує *УА1*, поршні золотника зміщуються праворуч; у праву порожнину поршневого серводвигуна подається робоча рідина під тиском, тому його поршень переміщується ліворуч, збільшуючи подачу  $Q_{п}$ . При  $Q_{в} < Q_{п}$  поршневий серводвигун зменшує подачу  $Q_{п}$ . Положення повзуна *D* визначає рівень, який вважається за норму (це — уставка  $\gamma$ ).

Регулювання відбувається за відхиленням, характер впливу —

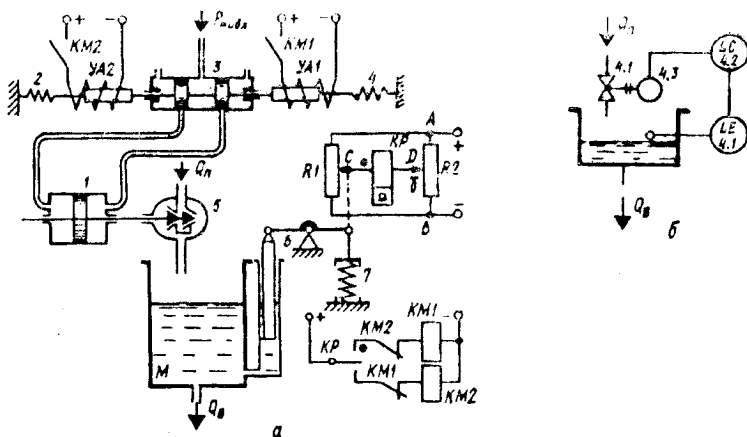


Рис. 6.19

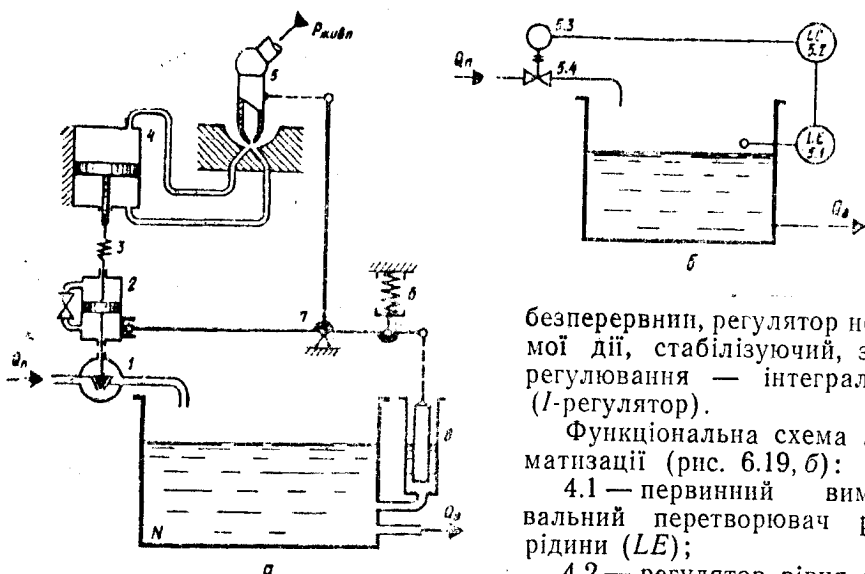


Рис. 6.20

що після припинення дії розпорядчого сигналу залишає регулюючий орган у незмінному положенні;

4.4 — клапан.

Систему автоматичного регулювання рівня рідини у резервуарі  $N$  зображено на рис. 6.20: 1 — клапан, 2 — демпфер, 3, 6 — пружини, 4 — поршневий серводвигун, 5 — струминний перетворювач, 7 — важіль, 8 — буйковий перетворювач рівня рідини. При рівності подачі й витрати  $Q_{п} = Q_{в}$  регульований параметр (рівень рі-

безперервний, регулятор непрямої дії, стабілізуючий, закон регулювання — інтегральний ( $I$ -регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.19, б):

4.1 — первинний вимірний перетворювач рівня рідини ( $LE$ );

4.2 — регулятор рівня рідини ( $LC$ );

4.3 — виконавчий механізм,

дини) залишається незмінним. При раптовому зростанні  $Q_v$  рівень рідини знижується. Важіль 7, повертаючись за годинниковою стрілкою, по-перше, дещо переміщує вгору корпус демпфера разом із його поршнем, збільшуючи подачу  $Q_p$ , а по-друге, переміщує праворуч вільний кінець струминної трубки; тиск робочої рідини у нижній порожнині поршневого серводвигуна стає більшим за тиск у верхній, тому поршень сервоприводу, в свою чергу, теж переміщується вгору, збільшуючи подачу  $Q_p$ . Рівень рідини у резервуарі потроху підвищується, важіль потроху опускає корпус демпфера, але поршень останнього майже не переміщується, оскільки його не пускає поршень серводвигуна. В результаті цих сумісних дій подача  $Q_p$  врешті-решт буде такою, що точно дорівнюватиме  $Q_v$ . При раптовому зменшенні  $Q_v$  регулятор теж забезпечить встановлення відповідного значення  $Q_p$ .

Принцип регулювання відбувається за відхиленням, вплив на об'єкт безперервний, регулятор непрямої дії, стабілізуючий, закон регулювання пропорційно інтегральний (PI-регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.20, б):

5.1 — первинний вимірювальний перетворювач рівня рідини (LE);

5.2 — регулятор рівня рідини (LC);

5.3 — виконавчий механізм, який після припинення дії розпорядчого сигналу залишає регулюючий орган у незмінному положенні;

5.4 — клапан.

Систему автоматичного регулювання швидкості обертання вала парової турбіни зображено на рис. 6.21: 1 — вісь турбіни, 2 — важіль, 3 — відцентровий перетворювач, 4 — золотник, 5 — поршневий серводвигун, 6 — клапан.

При певній швидкості обертання вала клапан подачі пари має бути напівзакритим. Якщо навантаження на турбіну знижується, швидкість обертання її вала підвищується, тягарі розходяться врізнібіч, важіль трохи повертається за годинниковою стрілкою, поршень золотника переміщується униз, робоча рідина потрапляє у верхню порожнину серводвигуна, поршень якого прикриває клапан, зменшуючи подачу пари до турбіни. Якщо навантаження на турбіну збільшується, теж буде збільшена й подача пари. Це буде регулювання за відхиленням; регулятор безперервної непрямої дії, стабілізуючий, з інтегральним законом регулювання (I-регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.21, б):

6.1 — первинний перетворювач швидкості обертання (SE);

6.2 — регулятор швидкості обертання (SC);

6.3 — сервопривод, який після припинення дії розпорядчого сигналу залишає регулюючий орган у незмінному положенні;

6.4 — клапан для регулювання подачі пари.

Система автоматичного регулювання тиску газу в технологіч-

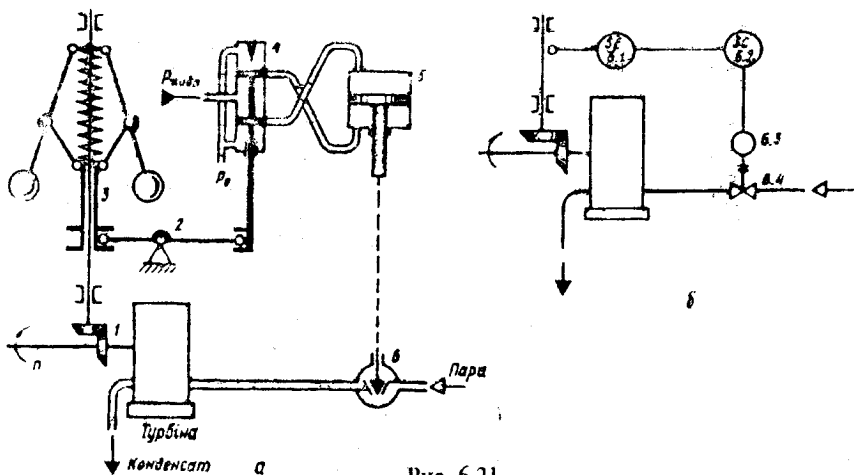


Рис. 6.21

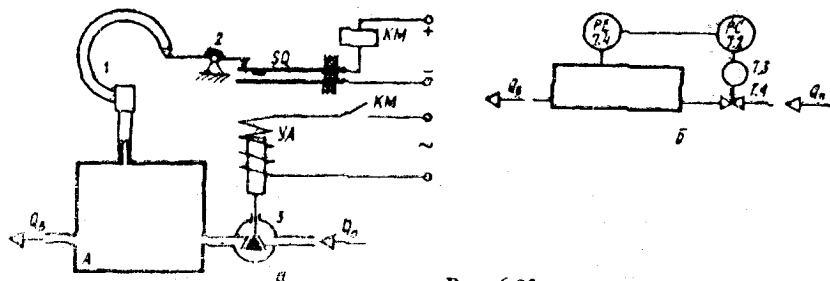


Рис. 6.22

ній місткості А (рис. 6.22) складається з таких елементів: 1 — манометричний трубчастий перетворювач, 2 — важіль; SQ — контактна група, 3 — клапан. Підвищення тиску понад норму замикає контакт SQ, при цьому спрацьовує реле КМ й вмикає сервопривод УА, який повністю закриває подачу газу  $Q_p$ . Коли тиск у технологічній місткості знижується, контакт SQ розмикається, реле КМ відпускає й вимикає сервопривод УА, подача  $Q_p$  поновлюється.

Принцип регулювання відбувається за відхиленням; за характером впливу — регулятор релейний (двопозиційний), непрямої дії, стабілізуючий.

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.22, б):

- 7.1 — первинний вимірювальний перетворювач тиску (PE);
- 7.2 — регулятор тиску (PC);
- 7.3 — виконавчий механізм, який у разі припинення дії розпорядчого сигналу відкриває регулюючий орган;
- 7.4 — клапан.

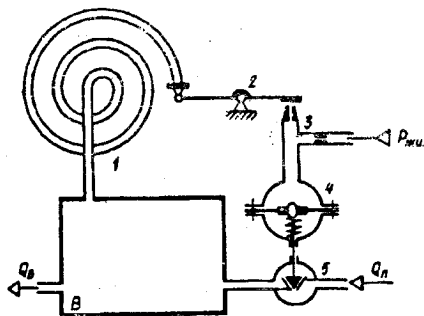


Рис. 6.23

Систему автоматичного регулювання тиску газу в резервуарі  $B$  зображено на рис. 6.23: 1 — манометричний трубчастий перетворювач, 2 — важіль, 3 — перетворювач «сопло-заслінка», 4 — мембранний сервопривод, 5 — клапан. Якщо навантаження  $Q_B$  зменшується, тиск у місткості  $B$  збільшується, важіль прикриває сопло, тиск у верхній порожнині сервоприводу зростає й клапан зменшує подачу  $Q_n$ . При зро-

станні  $Q_B$  тиск у місткості  $B$  зменшується; в результаті роботи регулятора подача  $Q_n$  буде теж збільшена.

Принцип регулювання — за відхиленням, регулятор безперервної прямої дії, стабілізуючий, з пропорційним законом регулювання ( $P$ -регулятор).

Функціональна схема автоматизації — така ж сама, як на рис. 6.22.

Систему автоматичного регулювання тиску газу у технологічній місткості  $C$  наведено на рис. 6.24: 1 — клапан, 2 — поршневий сервопривод, 3 — струминний перетворювач, 4 — сільфон.

При зменшенні навантаження  $Q_B$  тиск у місткості зростає, сільфон переміщує струминну трубку ліворуч; в результаті тиск робочої рідини у верхній порожнині сервоприводу зростає, у нижній — зменшується, і поршень сервоприводу зменшує подачу газу  $Q_n$ . При збільшенні  $Q_B$  подача газу  $Q_n$  теж зростає.

Принцип регулювання — за відхиленням; регулятор безперервної дії, стабілізуючий, з інтегральним законом регулювання ( $I$ -регулятор).

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.24, б):

8.1 — первинний вимірювальний перетворювач тиску ( $PE$ );

8.2 — регулятор тиску ( $PC$ );

8.3 — виконавчий механізм, який у разі припинення дії розпорядчого сигналу залишає регулюючий орган у незмінному стані;

8.4 — клапан.

Систему автоматичного регулювання температури у камері з паровим підігрівом наведено на рис. 6.25: 1 — зміювик, 2 — біметалічний перетворювач,  $KM1$ ,  $KM2$  та  $KM$  — електромагнітні реле,  $УА$  — електромагнітний серводвигун, 3 — клапан, 4 — пружина. Якщо температура в камері нижча норми, рухомий контакт торкається верхнього нерухомого, і спрацьовує реле  $KM1$ . Замикаючий контакт  $KM1$  вмикає котушку реле  $KM$  (оскільки до цього не спрацьовало реле  $KM2$ ), реле  $KM$  спрацьовує, самоблокується й

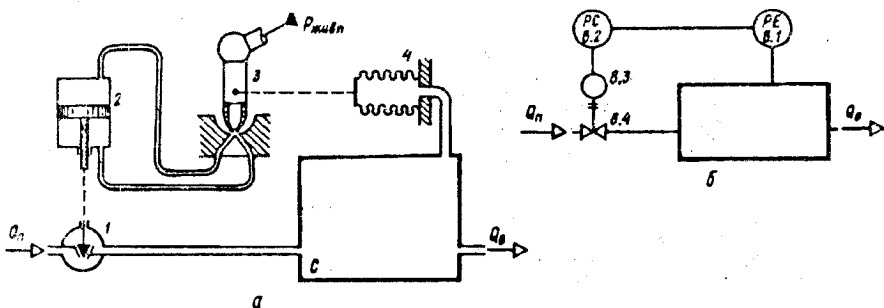


Рис. 6.24

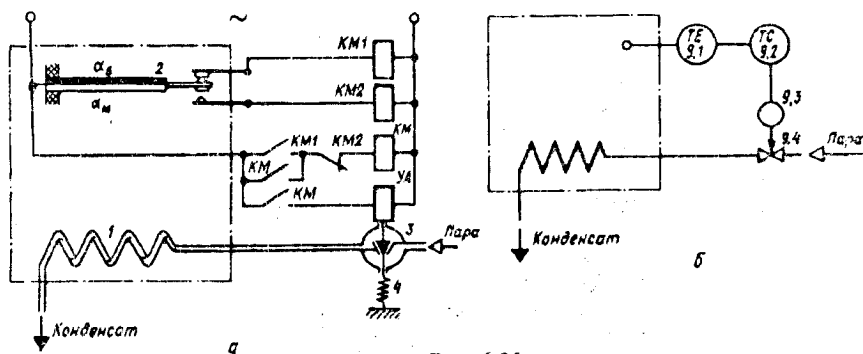


Рис. 6.25

вмикає сервопривод  $УА$  клапана; пара подається у змійовик, температура у камері підвищується. Коли температура досягає заданої межі, біметалічний перетворювач вигинається так, що рухомий контакт спочатку відходить від верхнього нерухомого ( $КМ1$  відпускає), потім торкається нижнього нерухомого; спрацьовує реле  $КМ2$  й розмикає коло котушки  $КМ$ . В результаті котушка  $УА$  позбавляється живлення, і пружина закриває клапан; надходження пари у змійовик припиняється. Температура у камері знижується, реле  $КМ2$  відпускає, але  $КМ$  не спрацьовує доти, доки знову не спрацює реле  $КМ1$ .

Принцип регулювання — за відхиленням, характер впливу — релейний (регулятор двопозиційний), регулятор непрямої дії, стабілізуючий.

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.25, б):

9.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури ( $TE$ );

9.2 — регулятор температури ( $TC$ );

9.3 — виконавчий механізм, який після припинення дії розпорядчого сигналу закриває регулюючий орган;

9.4 — клапан.

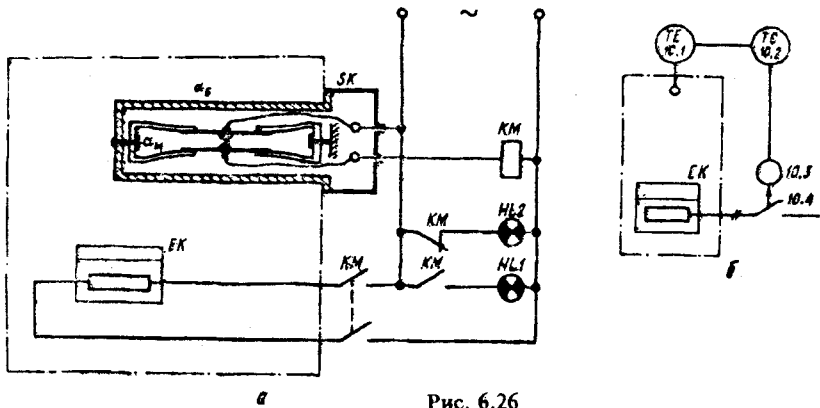


Рис. 6.26

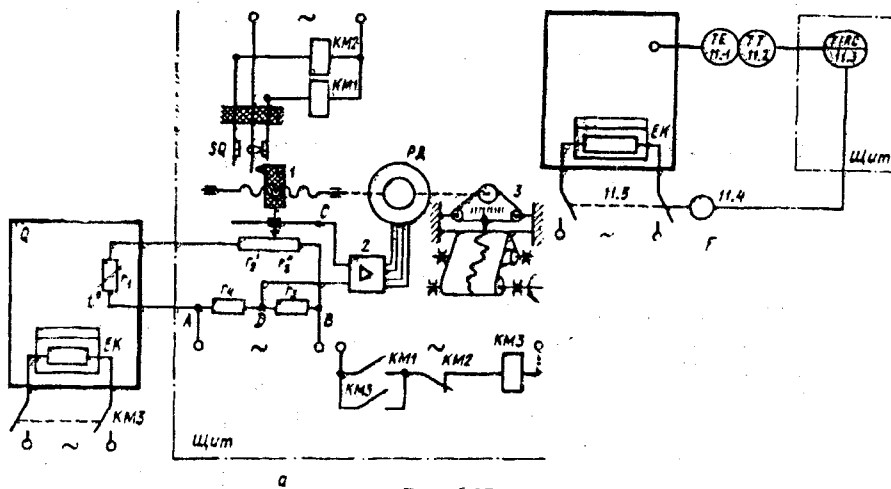


Рис. 6.27

Систему автоматичного регулювання температури у камері з електричним підігрівом показано на рис. 6.26: при температурі в камері  $K$  нижче заданої контакт дилатометричного реле  $SK$  замкнений, реле  $KM$  спрацьоване, його контакти подають струм до нагрівача  $EK$ ; сигнальна лампа  $HL1$  світиться, лампа  $HL2$  знеструмлена. Якщо температура об'єкта зростає, при певному її значенні розмикається контакт  $SK$ , відпускає реле  $KM$ , при цьому припиняється живлення нагрівача, засвічується лампа  $HL2$  і гасне  $HL1$ .

Принцип регулювання — за відхиленням; за характером впливу — регулятор релейний (двопозиційний), непрямої дії, стабілізуючий.

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.26, б):

10.1 — первинний перетворювач температури ( $TE$ );

10.2 — регулятор температури ( $TC$ );

10.3 — виконавчий механізм, який після припинення дії розподільчого сигналу відкриває регулюючий орган;

10.4 — контакт, який керує роботою нагрівача.

Систему автоматичного регулювання й дистанційного вимірювання температури в камері  $Q$  зображено на рис. 6.27:  $r_1$  — провідниковий терморезистор,  $r_2$  — реостат повзунковий,  $r_3$  і  $r_4$  — резистори,  $I$  — повзун реостата  $r_2$ ,  $2$  — підсилювач,  $PD$  — реверсивний конденсаторний сервоелектродвигун,  $3$  — відліково-реєструвальний пристрій,  $SQ$  — контактний пристрій (технологічний контакт),  $KM1$ ,  $KM2$  і  $KM3$  — електромагнітні реле,  $EK$  — нагрівач камери  $Q$ . Умовою рівноваги мостової схеми є рівняння  $(r_1 + r_2')r_3 = r_2''r_4$ ; в цьому разі  $U_{CD} = 0$ , і ротор реверсивного сервоелектродвигуна нерухомий. При зміні температури змінюється і значення  $r_1$ , що викликає появу  $U_{CD} \neq 0$ ; ця напруга підсилюється й примушує обертатись ротор сервоелектродвигуна, одночасно змінюючи  $r_2'$  і  $r_2''$  (так швидше буде досягнуто нової рівноваги). Наприклад, при збільшенні контрольованої температури зростає  $r_1$ , і для відновлення рівноваги повзун  $I$  повинен переміститися ліворуч, одночасно зменшуючи  $r_2'$  і збільшуючи  $r_2''$ . Кожному значенню температури у камері  $Q$  відповідатиме певне положення повзуну при рівновазі, отже, і положення показника відліково-реєструвального пристрою.

Якщо температура у камері  $Q$  нижча від встановленого рівня, рухомий контакт  $SQ$  торкається правого нерухомого, і спрацьовує реле  $KM1$ . Оскільки реле  $KM2$  відпущено, спрацьовує й самоблокується реле  $KM3$ , вмикаючи нагрівач  $EK$ . Температура у камері зростає; коли повзун  $I$  перемістить рухомий контакт ліворуч, спрацює реле  $KM2$ , що розірве коло котушки реле  $KM3$ , яке вимкне нагрівач  $EK$ . Температура почне знижуватися, доки повзун  $I$  не відпустить рухомий контакт  $SQ$ , який при цьому знову торкнеться правого нерухомого, і спрацює реле  $KM1$ .

Принцип регулювання відбувається за відхиленням, характер впливу — релейний, двопозиційний; регулятор стабілізуючий.

Функціональна схема автоматизації (рис. 6.27, б):

11.1 — первинний вимірювальний перетворювач температури ( $TE$ );

11.2 — вторинний перетворювач, призначений для дистанційної передачі вимірювальної інформації ( $TT$ );

11.3 — прилад вимірювальний (показання та реєстрація) і регулювальний ( $TIRC$ );

11.4 — виконавчий механізм;

11.5 — регулювальний орган (контактний пристрій).



### § 6.3. Об'єднання локальних систем автоматичного регулювання в автоматизовані або автоматичні комплекси

Локальні системи автоматичного регулювання (тиску, рівня рідини, її витрати, температури тощо) вирішують окремі завдання керування певними технологічними процесами. При цьому в таких системах дедалі більшого поширення поряд з аналоговими набувають локальні пристрої цифрової автоматики, основою яких є мікропроцесори: *екстремальні регулятори* (автоматичні оптимізатори, які вибирають найкращі умови перебігу технологічних процесів), *промислові роботи* тощо.

Дальшим кроком є об'єднання окремих локальних систем в управлінські комплекси — автоматизовані чи автоматичні.

*Автоматизованою* системою називається така сукупність об'єкта керування та автоматичних керуючих пристроїв, у якій частину функцій управління виконує людина — оператор.

*Автоматичною* системою називається сукупність об'єкта керування і автоматичних пристроїв, у якій (на відміну від автоматизованої) все керування здійснюється без участі людини.

Прикладом автоматизованого управлінського комплексу може бути автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП). Використовують ці системи для вирішування таких завдань керування технологічними процесами, для яких із тих чи інших причин частину питань, пов'язаних з прийняттям рішень, неможливо формалізувати; тому виконання цих функцій покладається безпосередньо на людину. В АСУ ТП збирання, первинне оброблення й зберігання інформації та вирішення деяких завдань керування здійснюють відповідні комплекси пристроїв, побудовані, як правило, на основі мікропроцесорних технічних засобів. Крім того, ці комплекси збирають інформацію про перебіг технологічного процесу й готують її у формі, найбільш зручній і доступній для сприйняття людиною. На основі цього оператор і здійснює прийняття того чи іншого остаточного рішення щодо керування процесом.

Одним із різновидів сучасної автоматичної системи управління є *супервізорне*; це такий спосіб управління технологічним процесом — за допомогою ЕЦОМ, яка періодично аналізує перебіг технологічного процесу, визначає управлінські дії, необхідні для наближення процесу до оптимуму, й спрямовує їх безпосередньо у локальні системи автоматичного управління у вигляді уставок. Функції оператора у такому комплексі обмежуються загальним спостереженням за перебігом процесу; його втручання необхідне буде лише при виникненні непередбачених (наприклад, аварійних) ситуацій.

Найвищим рівнем автоматичних систем управління в сучасному виробництві є системи загального цифрового управління, коли всіма технологічними процесами замість локальних систем управління безпосередньо керує центральний управлінський комплекс на основі спеціальної ЕЦОМ.

До автоматичних систем управління належать також системи програмного управління, автоматичні поточкові лінії, цехи та заводи-автомати.

## Глава 7

### ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

#### § 7.1. Перехідні процеси у вимірювальних перетворювачах

На вході вимірювального перетворювача, що становить аперіодичну ланку першого порядку, значення  $x(t)$  змінюється так, як показано на рис. 7.1, а. Треба побудувати графік перехідного процесу на виході цього перетворювача, якщо його параметри:  $K=4A$ ;  $T_1=A$  хв.

Значення  $A$  можна обчислити за формулою

$$A = \sqrt[3]{\sqrt{z+5}} \quad (7.1)$$

де  $z$  — двозначне число, що визначається двома останніми цифрами персонального шифру студента (номери його залікової книжки).

Значення  $K$  і  $T_1$  слід заокруглити до двох значущих цифр.

Значення  $y(t)$  для перехідного періоду обчислюємо за формулою

$$y = y_n + (y_k - y_n) (1 - e^{-(t-\theta)/T_1}), \quad (7.2)$$

де  $t$  — час;  $e$  — основа натуральних логарифмів;  $y_n$  — початкове значення  $y(t)$ ;  $y_k$  — кінцеве значення  $y(t)$ ; вважаємо, що  $y_n = Kx_n$ ;  $y_k = Kx_k$ .

Як видно з рис. 7.1, а,  $\theta = 2$  хв; значення  $y_n$  та  $y_k$  можна обчислити, коли врахувати, що згідно з рисунком значення  $x_n = 1$ ;  $x_k = 5$ .

Для спрощення обчислень доцільно скористатися програмами мікрокалькуляторами (БЗ-34, МК-54, МК-61, МК-52). Програма обчислень має вигляд

П9	FO	П8	XУ	П0	С/П	ИП0	—	ИП1	;
/—/	Fe <sup>x</sup>	1	—	ИП8	ИП9	—	×	ИП8	+
БП	05								

Інструкція до програми:

1. Увімкнути машину; ФПРГ; ввести програму; ФАВТ.
2. Заслати значення  $T_1$  у реєстр адресовуваної пам'яті Р1, —  $T_1 = \text{П1}$ .
3. Натиснути В/О.
4. Ввести з клавіатури  $\theta \uparrow y_n \uparrow y_k$ , С/П (індикація « $\theta$ »).

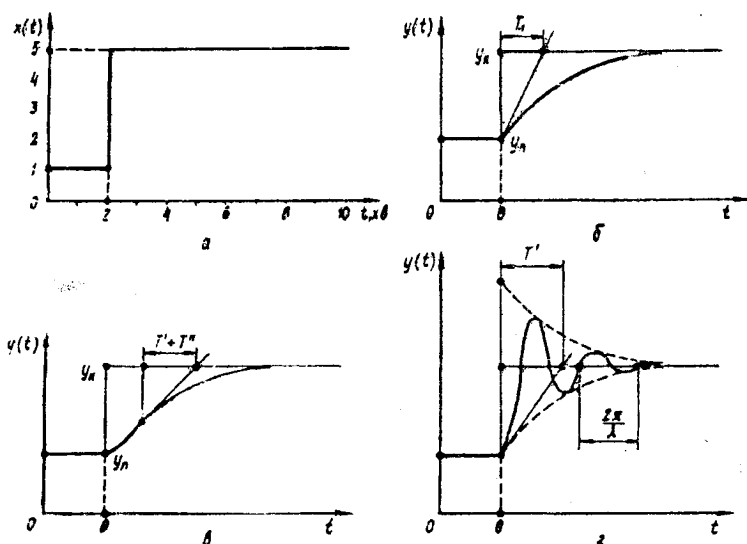


Рис. 7.1

5. Набрати на клавіатурі значення  $t$ , С/П (індикація «у»); операцію повторити необхідну кількість разів.

Результати обчислень відобразити у вигляді графіка (рис. 7.1, б) й показати значення одиниць вимірювання (для осі абсцис — у хвилину, для осі ординат — у безрозмірних одиницях).

На вході вимірювального перетворювача, що становить аперіодичну ланку другого порядку, значення  $x(t)$  змінюється так, як на рис. 7.1, а. Побудувати графік перехідного процесу на виході цього перетворювача, якщо його параметри:  $K = 4A$ ;  $T_1 = 1$  хв,  $T_2 = 0,6$  хв. Значення  $A$  — за формулою (7.1);  $y(t)$  — за формулою

$$y = y_n + (y_k - y_n) \left[ 1 - \frac{1}{T' - T''} \left( T' e^{-(t-0)/T'} - T'' e^{-(t-0)T''} \right) \right]; \quad (7.3)$$

де

$$T' = \frac{2T_2^2}{T_1 - \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}};$$

$$T'' = \frac{2T_2^2}{T_1 + \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}.$$

Як впливає з рис. 7.1, а,  $\theta=2$  хв; значення  $y_n$  та  $y_k$  — за формулою  $y=Kx$ , де  $x_n=1$ ;  $x_k=5$ .

Програма обчислень має вигляд:

ИП1	↑	Fx <sup>2</sup>	4	ИП2	Fx <sup>2</sup>	ПЗ	×	—	F√
П4	—	2	ИП3	×	ПЗ	ХУ	:	П5	ИП3
ИП1	ИП4	+	:	П6	Cx	С/П	П4	FO	ПЗ
ХУ	П0	С/П	ИП10	—	/—/	П7	ИП5	:	Fe <sup>x</sup>
ИП5	×	ИП6	ИП7	ИП6	:	Fe <sup>x</sup>	×	—	ИП5
ИП6	—	:	1	—	ИП3	ИП4	—	×	ИП3
+	БП	32							

Інструкція до програми:

1. Ввести програму.
2.  $T_1=П1$ ;  $T_2=П2$ .
3. В/О.
4. С/П (індикація «0»).
5.  $\theta \uparrow y_n \uparrow y_k$ , С/П (індикація « $\theta$ »).
6.  $t$ , С/П (індикація « $y$ »); операцію повторити необхідну кількість разів.

Результати обчислень відобразити у вигляді графіка (рис. 7.1, в) й показати шкалу для кожної осі.

На вході вимірювального перетворювача, що становить коливальну ланку другого порядку, значення  $x(t)$  змінюється так, як на рис. 7.1, а. Побудувати графік перехідного процесу на виході цього перетворювача, якщо його параметри:  $K=4A$ ;  $T_1=\frac{1}{2}A$  хв;  $T_2=0,6$  хв. Значення  $A$  дано за формулою (7.1);  $y(t)$  — за формулою

$$y = y_n + (y_k - y_n) \{ 1 - e^{-\frac{(t-\theta)}{T'}} [\cos \nu(t - \theta) + \frac{1}{T'\lambda} \sin \lambda(t - \theta)] \}, \quad (7.4)$$

де  $T'$  — стала часу обвідної експоненти:  $T' = 2T_2^2/T_1$ ;  $\lambda$  — кутова частота коливань:  $\lambda = (\sqrt{4T_2^2 - T_1^2}/2T_2^2)$ .

Як видно з рис. 7.1, а,  $\theta=2$  хв; значення  $y_n$  та  $y_k$  — за формулою  $y=Kx$ , де  $x_n=1$ ;  $x_k=5$ .

Програма обчислень:

ИП2	Fx <sup>2</sup>	2	×	ПЗ	ИП1	:	П5	ИП3	2
×	ИП1	Fx <sup>2</sup>	—	F√	ИП3	:	П6	Cx	С/П
П4	FO	ПЗ	ХУ	П0	С/П	ИП0	—	П7	/—/
ИП5	:	Fe <sup>x</sup>	ИП7	ИП6	×	П8	F sin	ИП5	ИП6
×	:	ИП8	F cos	+	×	1	—	ИП3	ИП4
—	×	ИП3	БП	25					

Інструкція до програми:

1. Ввести програму.
3. Перемикач «радіани — градуси» встановити у положення «радіани».
3.  $T_1 = P1$ ;  $T_2 = P2$ .
4. В/О.
5. С/П (індикація «0»).
6.  $\theta \uparrow y_n \uparrow y_n$ , С/П (індикація «3»).
7.  $t$ , С/П (індикація «у»); операцію повторити необхідну кількість разів.

Результати обчислень відобразити у вигляді графіка (рис. 7.1, з), але шкалу показати для кожної осі.

### § 7.2. Системи керування з автоматизованим зворотним зв'язком

**Метрологічне оброблення результатів багаторазових прямих вимірювань.** Припустимо, що в результаті прямих вимірювань деякої незмінної фізичної величини одержано вісім числових значень, тобто  $n=8$ :  $x_1 x_2 x_3 \dots x_8$ .

Вважаємо, що вимірювання здійснювалося за допомогою приладу класу точності  $k_n=2,5$  зі шкалою —  $10\dots0\dots+10$  одиниць.

Обчислити найвірогідніше значення результату цього вимірювання  $A$  і надійну межу його загальної похибки  $\pm \Delta A$  з імовірністю  $\gamma=0,95$ .

Значення  $x_i$  для метрологічного оброблення можна одержати за допомогою моделювання на мікро-ЕОМ; для цього використовуємо програмовані мікрокалькулятори БЗ-34, МК-54, МК-61 або МК-52, якщо ввести таку програму:

Fл	F1/x	П0	ИП0	3	7	×	1	+	ПД
КИПД	XУ	ИПД	—	ИП0	2	×	Fл	×	F sin
XУ	П0	F1/x	F ln	2	×	F√	×	1	0
F1/x	×	1	+	ИП7	9	:	9	+	F√
×	С/П	БП	03						

Інструкція до програми:

1. Ввести програму.
2. Перемикач «радіани — градуси» перевести в положення «радіани» ( $P \leftarrow \Gamma$ ).
3. Записати значення  $z$  (дві останні цифри персонального шифру студента) у реєстр P7:  $z = P7$ .
4. В/О.
5. С/П; через 11 с записати перше число; С/П; через 11 с — друге число; С/П; через 11 с — третє число і т. д.; операцію повторити  $n$  разів.

6. Для іншого варіанта — повторити операції від 3 до 5. Значення  $x_i$  записати, заокругливши їх до трьох значущих цифр:

$i$	$x_i$
1	
2	
...	
8	

Метрологічне оброблення результатів спостережень доцільно теж здійснити на мікро-ЕОМ. Для програмованих мікрокалькуляторів можна використати програму, яка має вигляд:

ПО	Cx	П1	П2	П4	КИП4	ИП4	С/П	↑	Fx <sup>2</sup>
ИП2	+	П2	XУ	ИП1	+	П1	FL0	05	ИП4
:	ПА	С/П	ПД	XУ	ИП2	ИП4	ИПА	Fx <sup>2</sup>	×
—	ИП4	Fx <sup>2</sup>	ИП4	—	:	Fγ <sup>-</sup>	П3	×	ПВ
ИПД	+	ИП3	ИПД	3	Fγ <sup>-</sup>	:	П5	+	:
ИП3	Fx <sup>2</sup>	ИП5	Fx <sup>2</sup>	+	Fγ <sup>-</sup>	×	ПС	ИПД	ИП3
:	П6	С/П							

Схема програми — на рис. 7.2.

Інструкція до програми:

1. Ввести програму.
2. В/О.
3. Ввести з клавіатури  $n$ , натиснути С/П; після індикації «1» ввести  $x_1$ , С/П; після індикації «2» ввести  $x_2$ , С/П і т. д.
4. Після введення  $x_n$ , С/П — індикація  $A = \bar{x}$  (останнє засилається також у РА).
5. Ввести з клавіатури  $t_\gamma \uparrow \theta_x$ , С/П — індикація  $\theta/S_x^-$  (останнє засилається також у Р6).
6. Значення  $\epsilon$  можна вилучити з РВ, значення  $KS_x$  — в РС,  $\theta$  — в РД.

7. Відповідно до значення  $\theta/S_x^-$  вибрати необхідне  $\Delta A$  і записати результат вимірювання:  $X = A \pm \Delta A$  (при  $\gamma = 0,95$ ).

8. Для іншого варіанта — повторити операції від 2 до 7. Наприклад, одержано такі результати спостережень:

4,77   4,16   3,84   4,55   4,43   4,55   3,99   5,43

Обчислюємо

$$\theta = \frac{2,5 \cdot 20}{100} = 0,5;$$

з додатка 2 дістанемо для  $n = 8$  значення  $t_\gamma = 2,365$ .

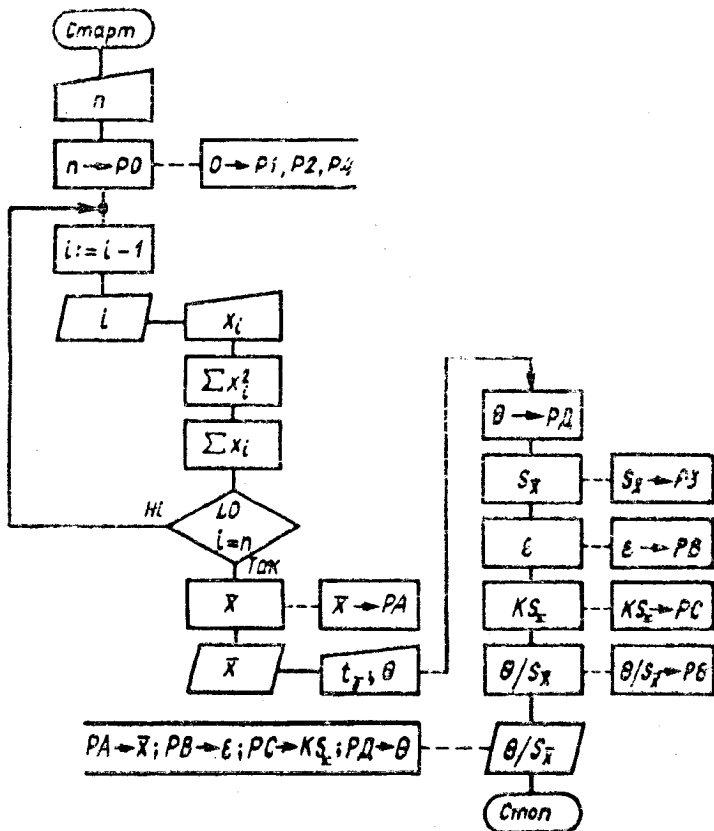


Рис. 7.2

Результати обчислень за програмою:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 4,465125; \\ \varepsilon &= 0,41907071 \approx 0,4; \\ KS_{\Sigma} &= 0,66822804 \approx 0,7; \\ \theta/S_{\bar{x}} &= 2,8217194. \end{aligned}$$

Звідси результат прямого багаторазового вимірювання:  $X = 4,5 \pm \pm 0,7$  (при  $\gamma = 0,95$ ).

Запис результатів прямого вимірювання (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента). При опрацюванні результатів багаторазового прямого вимірювання (кількість спостережень  $n$ ) одержано найвірогідніше значення результату вимірювання  $\bar{x}$  та надійні межі його випадкової похибки  $\varepsilon$ .

Шкала приладу і клас його точності  $k_n$  наведені в табл. 7.1.



Таблиця 7.1

Вариант	$n$	$\bar{x}$	$s$	Шкала	$k_n$
0	8	75,2570	5,9501	-100...0...+100	0,5
1	6	51,43572	3,19265	0...60	1,0
2	15	7315,06	70,4724	0...10000	5,0
3	10	93,500121	0,204673	0...100	0,5
4	12	32,256	0,21678	-50...0...+50	1,0
5	7	95,4354	7,3412	0...100	1,5
6	10	80,0756	2,79741	0...100	1,5
7	9	46,7512	4,96712	0...100	1,0
8	7	2095,42	52,30561	0...5000	5,0
9	10	79,8357	4,82937	-100...0...+100	0,5

Записати результат багаторазового вимірювання. Наприклад, для  $n=18$ ;  $\bar{x}=95,4326$ ;  $s=8,79237$ ; шкали приладу 0...100, клас точності 2,5, обчислюємо:

$$0 = \frac{2,5 \cdot 100}{100} = 2,5.$$

З додатка 2 дістанемо  $t_\gamma=2,110$ ; тоді

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{t_\gamma} = 4,167;$$

$$0/S_{\bar{x}} = 0,599952;$$

оскільки  $0/S_{\bar{x}} < 0,8$ , то  $\Delta A = \varepsilon \approx 9$ , і результат вимірювання  $X = 95 \pm 9$  (при  $\gamma=0,95$ ).

Шкала приладу та його клас точності  $k_n$  наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Вариант	Шкала	$k_n$	$X$
0	0...5	0,5	3
1	0...100	5,0	73,5
2	0...250	1,5	218,5
3	0...30	1,5	21
4	-25...0...+25	5,0	18,25
5	0...200	2,5	127,25
6	0...100	1,0	77,5
7	-1...0...+1	2,5	0,4t
8	0...30	2,5	24
9	0...10000	5,0	817,5

Показ приладу  $x$ . Записати результат одноразового вимірювання. Наприклад, на приладі зі шкалою 0...1000 класу точності 2,5 дістанемо  $x=875$ . Обчислюємо

$$0 = \frac{2,5 \cdot 1000}{100} = 25 \approx 2,10;$$

тоді результат вимірювання слід заокруглити таким чином:  $X \approx 88...10$ .

Запис результату опосередкованого вимірювання (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента). При опосередкованому вимірюванні величини  $E$  одержано результати прямих вимірювань ( $X, Y, Z$ ). Формулу зв'язку подано у табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Варі- ант	$X$	$Y$	$Z$	Формула зв'язку
0	$5,0 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,2$	$E = 40 XYZ$
1	$3,0 \pm 0,1$			$E = X^3$
2	$4,0 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,5$		$E = 30 X^2 Y$
3	$4,0 \pm 0,4$	$5,0 \pm 0,5$		$E = 3 XY$
4	$4,0 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,5$		$E = 5 X^2/Y$
5	$8,0 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,1$		$E = \sqrt{XY}$
6	$2,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,3$		$E = \frac{1}{2} X^2 Y$
7	$20 \pm 1$	$10 \pm 1$		$E = X/Y$
8	$1,00 \pm 0,03$	$1,00 \pm 0,04$		$E = XY$
9	$3,0 \pm 0,1$			$E = 2X^3$

Записати результат вимірювання. Наприклад, якщо  $E = XY$ ;  $X = 3,0 \pm 0,3$ ;  $Y = 2,0 \pm 0,2$ , то  $A_E = 3 \cdot 2 = 6$ ;

$$\Delta A_E = 6 \sqrt{\left(\frac{0,3}{3}\right)^2 + \left(\frac{0,2}{2}\right)^2} = 0,8485281 \approx 0,8.$$

Тоді

$$E = 6,0 \pm 0,8 \quad (\text{при } \gamma = 0,95).$$

Ще приклад:  $E = 4\sqrt[3]{X}$ ;  $X = 64 \pm 3$ . Звідси  $A_E = 4 \cdot \sqrt[3]{64} = 16$ ;

$$\Delta A_E = 16 \sqrt{\left(\frac{1}{3} \cdot \frac{3}{64}\right)^2} = 0,25 \approx 0,2. \quad \text{Тоді } E = 16,0 \pm 0,2 \quad (\text{при } \gamma = 0,95).$$

Аналіз принципових схем систем дистанційного вимірювання технологічних параметрів або автоматичної сигналізації. Завдання: проаналізувати принципову схему (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента); побудувати відповідну функціональну схему за ГОСТ 21.404—85 (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Вариант	Призначення системи	Рисунок
0	Дистанційного вимірювання зміни зусилля $F$ з реєстрацією результатів	7.3
1	Дистанційного вимірювання кута повороту вала технологічної машини	7.4
2	Дистанційного вимірювання витрати рідини в трубопроводі	7.5
3	Дистанційного вимірювання тиску газу в технологічній місткості	7.6
4	Дистанційного вимірювання тиску газу в технологічній місткості	7.7
5	Дистанційного вимірювання температури в камері $M$	7.8
6	Дистанційного вимірювання температури з почерговим опитуванням трьох об'єктів	7.9
7	Автоматичної сигналізації відхилення рівня рідини в резервуарі від норми	7.10
8	Автоматичної сигналізації відхилення від норми тиску газу в технологічній місткості	7.11
9	Автоматичної сигналізації температури у камері $M$	7.12

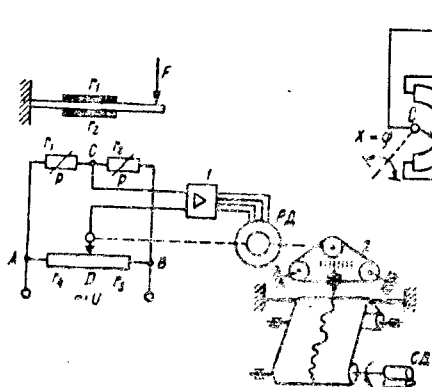


Рис. 7.3

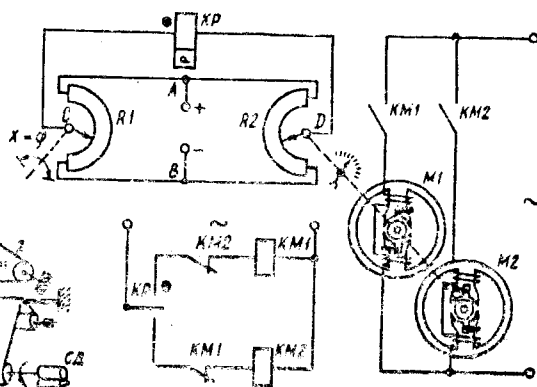


Рис. 7.4

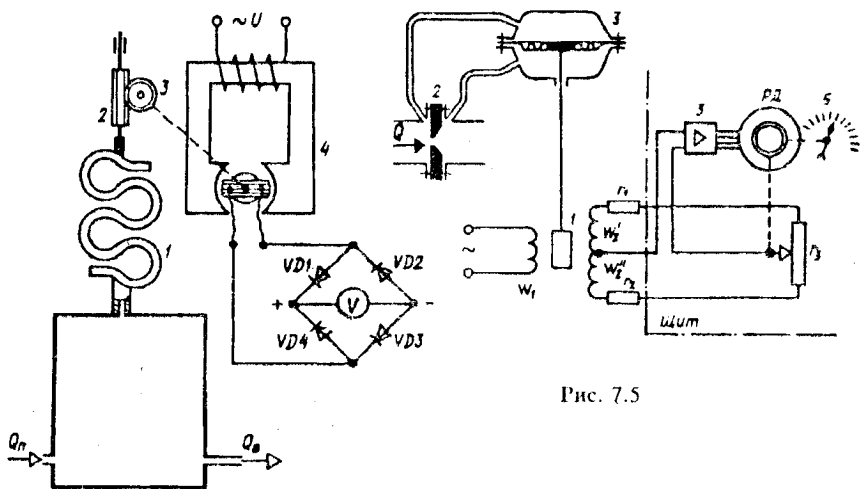


Рис. 7.6

Рис. 7.5

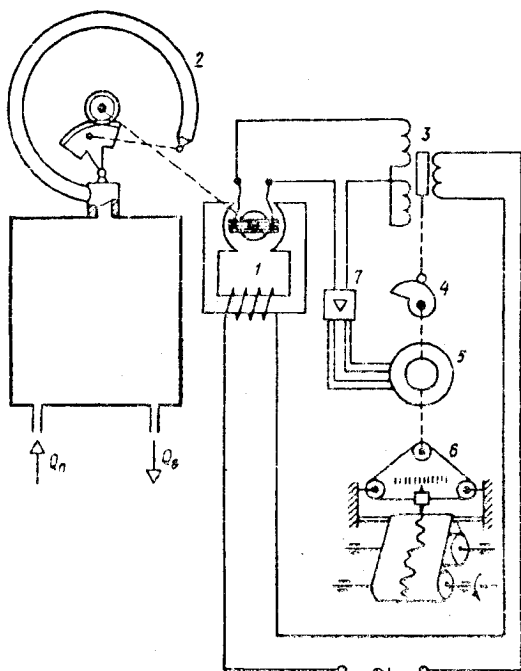


Рис. 7.7

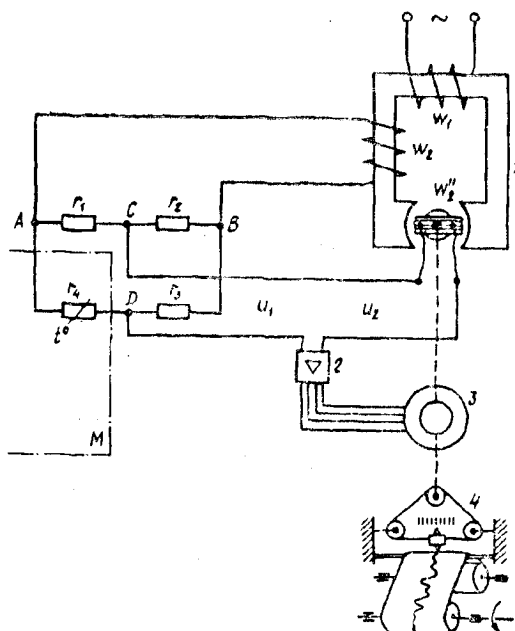


Рис. 7.8

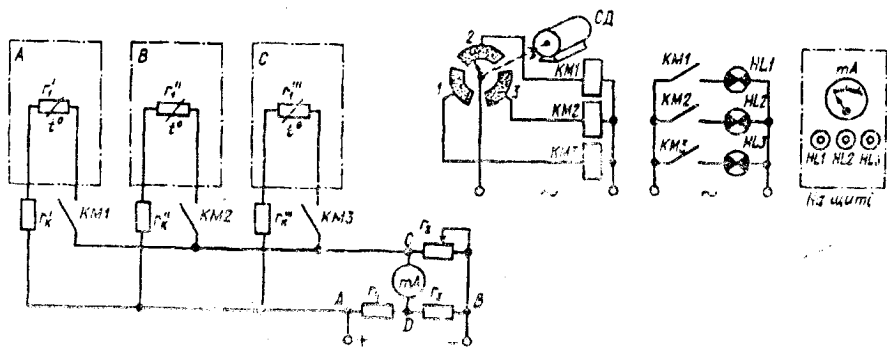


Рис. 7.9

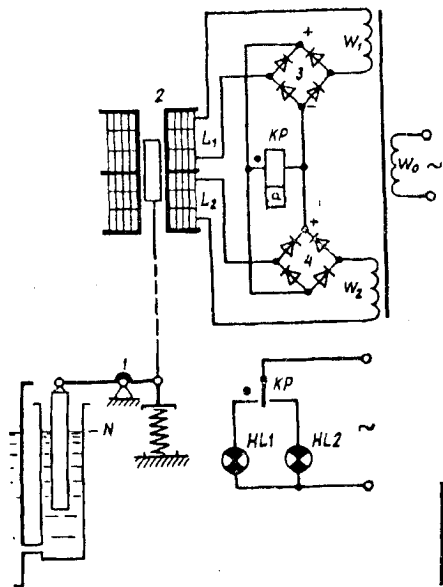


Рис. 7.10

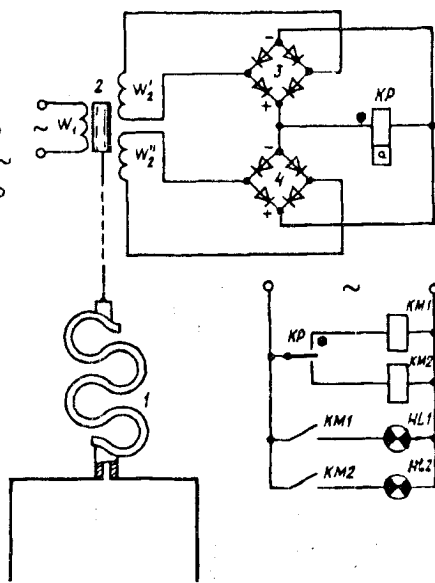


Рис. 7.11

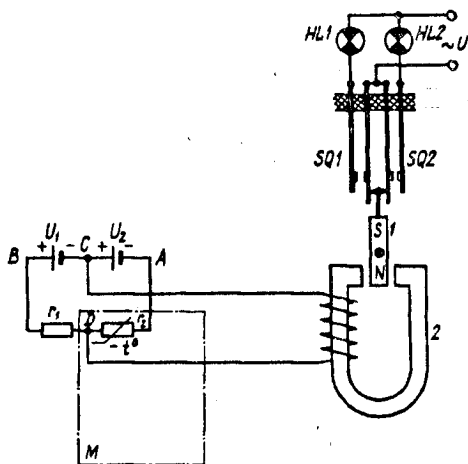


Рис. 7.12

Аналіз функціональних схем систем дистанційного вимірювання технологічних параметрів або автоматичної сигналізації. Завдання: проаналізувати функціональну схему (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента); вказати,

які елементи автоматики можуть бути використані при складанні принципової схеми:

Варіант	Рисунок
0	7.13
1	7.14
2	7.15
3	7.16
4	7.17

Варіант	Рисунок
5	7.18
6	7.19
7	7.20
8	7.21
9	7.22

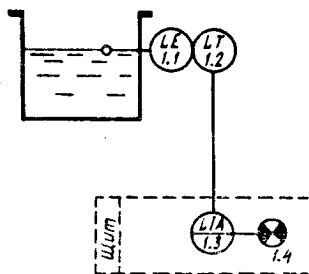


Рис. 7.13

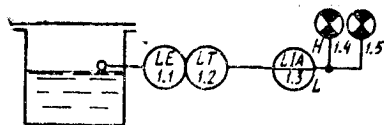


Рис. 7.14

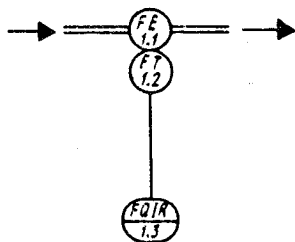


Рис. 7.15

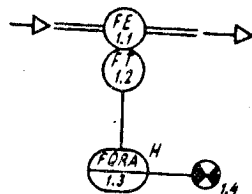


Рис. 7.16

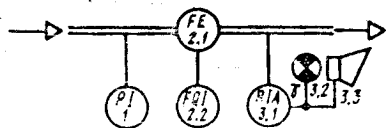


Рис. 7.17

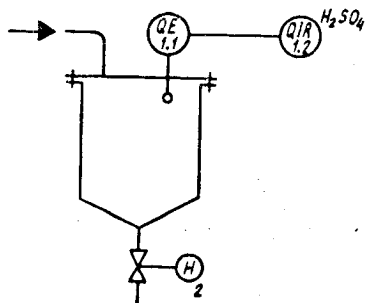


Рис. 7.18

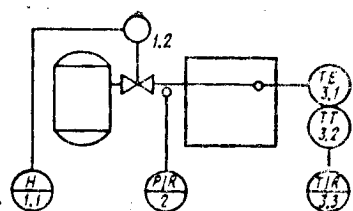


Рис. 7.19

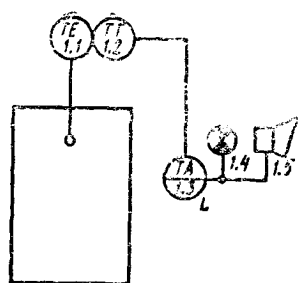


Рис. 7.20

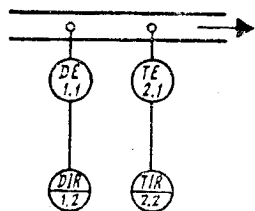


Рис. 7.21

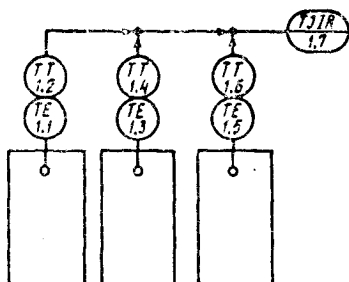


Рис. 7.22

**Складання функціональних схем систем дистанційного вимірювання технологічних параметрів або систем автоматичної сигналізації.** Завдання: проаналізувати описану принципову схему (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента) і скласти для неї функціональну схему автоматизації за ГОСТ 21.404—85.

**Варіант 0.** Дистанційне вимірювання витрати рідини в трубопроводі: первинний перетворювач — труба Вентурі. Дифманометр переміщує котушку датчика системи синхронного зв'язку на трансформаторних перетворювачах з поворотними котушками; приймач цієї системи міститься на щиті, до його рухомої системи підімкнений показчик.

**Варіант 1.** Автоматична сигналізація тиску: вимірюваний перетворювач — контактний манометр, вторинний перетворювач для дистанційного передавання сигналу — з електромагнітним реле на виході. Сигнальний блок знаходиться на пульті (лампи «+», «норма», «-»).

**Варіант 2.** Дистанційний індикатор рівня рідини: буйковий перетворювач через важіль, поєднаний з трансформаторним перетворювачем соленоїдного типу (для дистанційного передавання показань); вихідна напруга з трансформаторного перетворювача пере-



дається до приладу магнітоелектричної системи, який встановлюється на щиті (через випрямляч).

*Варіант 3.* Автоматичний сигналізатор температури: терморезистор платиновий, вторинний прилад на щиті — логометр показувальний з контактним пристроєм, сигнальна лампа «температура більше норми».

*Варіант 4.* Автоматичний сигналізатор температури: контактний ртутний термометр за місцем вимірювання, електронний вторинний прилад із сигнальною лампою (на щиті).

*Варіант 5.* Дистанційне вимірювання рівня води: буйковий первинний перетворювач; вторинний перетворювач типу ДСП (сигнал 0...20 мА на виході), магнітоелектричний прилад на щиті (показувальний та реєструвальний).

*Варіант 6.* Автоматична сигналізація вологості повітря: автоматичний психрометр за місцем вимірювання, вторинний прилад на щиті (показувальний та реєструвальний) з контактним пристроєм та сигнальними лампами «мало», «норма», «багато».

*Варіант 7.* Система дистанційного вимірювання зусилля, прикладеного до консольного бруса; при деформації бруса переміщується якор трансформаторного перетворювача з повітряним зазором. Напряга зі вторинної котушки трансформаторного перетворювача передається до вольтметра електромагнітної системи, встановленого на пульті оператора.

*Варіант 8.* Система дистанційного вимірювання швидкості обертання вала технологічної машини: первинний перетворювач — відцентровий; через важіль до нього приєднаний якор диференціального індуктивного перетворювача соленоїдного типу (що виконує функцію датчика системи синхронного зв'язку); другий перетворювач (приймач цієї системи) міститься на щиті, до якоря якого підключений показчик.

*Варіант 9.* Дистанційне вимірювання маси: вимірювана маса навантажує осердя магнітопружного трансформаторного перетворювача, напруга з вторинної котушки якого вимірюється вольтметром постійного струму через випрямляч.

### **§ 7.3. Системи керування з автоматизованим прямим зв'язком**

Складання релейно-контактних схем дискретного керування електроприводом технологічних машин. Завдання: побудувати принципову схему керування двома трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкненими роторами; характер керування кожним з електродвигунів  $M_1$ ,  $M_2$  або  $M_3$  — у графі А (табл. 7.5). Режимне керування кожним з цих електродвигунів повинно здійснюватися з Б кнопкових станцій; передбачити в схемі тепловий захист електродвигуна В, а також аварійну зупинку електро-

Таблиця 7.5

Варі- ант	А			В			В	Г			Д	Е	
	М1	М2	М3	М1	М2	М3		М1	М2	М3			
0	Н		Р	1		1		SQ2 або SQ4				М1 при ро- боті М3 «вперед»	HL3 при роботі М3 «назад»
1		Н	Р		1	1	М2		SQ1 або SQ4			М2 при ро- боті М3 «назад»	HL3 при роботі М3 «вперед»
2		Н	Р		2	1	М2		SQ1	SQ4		М2 при ро- боті М3 «вперед» або «назад»	HL2 при роботі М2
3	Н		Р	2		1		SQ2		SQ3		М3 при ро- боті М1	HL1 при зупинці М1
4	Н	Н		2	2		М2	SQ2		SQ3		М2 при ро- боті М1	HL2 при роботі М2
5	Н		Р	1		1		SQ2 або SQ4				М3 при зу- пинці М1	HL3 при роботі М3 «вперед»
6		Н	Р		1	1	М2		SQ2 або SQ3			М3 при зу- пинці М2	HL3 при роботі М3 «назад»
7		Н	Р		2	1	М2		SQ1	SQ4		М3 при ро- боті М2	HL2 при зупинці М2
8	Н		Р	2		1		SQ3		SQ2		М3 при ро- боті М1	HL1 при зупинці М1
9	Н	Н		2	2		М2	SQ1		SQ3		М2 при ро- боті М1	HL2 при зупинці М1 та М2

Примітка: Н — нереверсивне керування, Р — реверсивне.

двигуна Г при спрацьовуванні будь-якого з технологічних контактів (SQ1, SQ3 — розмикаючі; SQ2, SQ4 — замикаючі); запуск одного з електродвигунів М1, М2 або М3 має бути можливий лише за умови Д; передбачити у схемі автоматичну сигналізацію за допомогою сигнальних ламп HL1, HL2 або HL3 — за умовою Е.

Вибір варіанта завдання — відповідно до останньої цифри персонального шифру студента. На основі принципової схеми скласти схему з'єднань при умові, якщо цю схему передбачається монтувати на стенді, зображеному на рис. 7.23.

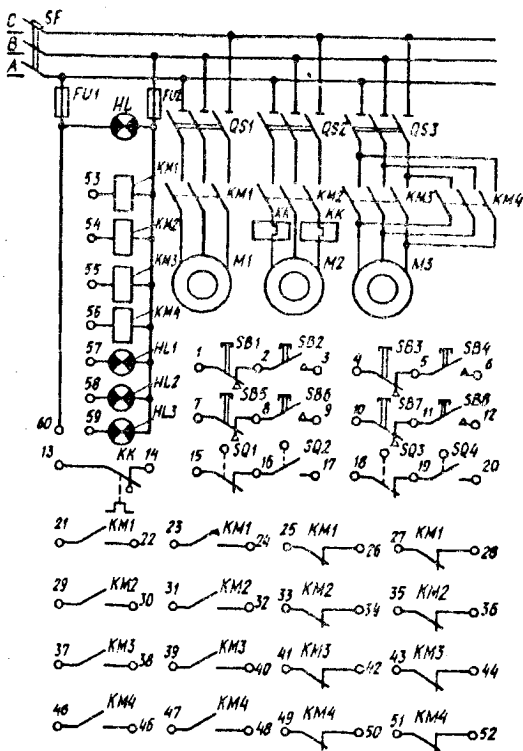


Рис. 7.23

Приклад виконання завдання: А (M2 — Н; M3 — Р); Б (M2—2; M3—1); В (M2); Г (M2 — SQ2 або SQ4); Д (M2 при роботі M3 «вперед» або «назад»); Е (HL2 при роботі M2, HL3 при зупинці M3).

Принципову схему для цього завдання наведено на рис. 7.24 (а — силова схема, б — схема керування), а схема з'єднань — на рис. 7.25: з'єднання елементів монтажного стенда відображене потовщеними лініями (60—1—16—19—7—31—43; 2—4; 3—6—30—13; 14—25; 26—45—37; 38—46—54; 20—17—53; 8—39—47—11; 12—48—41; 42—56; 32—58; 44—51; 52—59).

**Аналіз контактних схем систем дискретного керування.** Завдання 1. Якою логічною формулою алгебри Буля описують контактну схему, зображену на рис. 7.26, 7.27? При яких значеннях А, В, С лампа Х світиться? Вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента: варіанти 0—4 — рис. 7.26, а — д; варіанти 5—9 — рис. 7.27, а — д. Наприклад,  $f(X) = (a+c)b$  (рис. 7.28). Лампа Х світиться при  $f(X) = 1$ ; а це можливо, якщо  $A=1$ ;

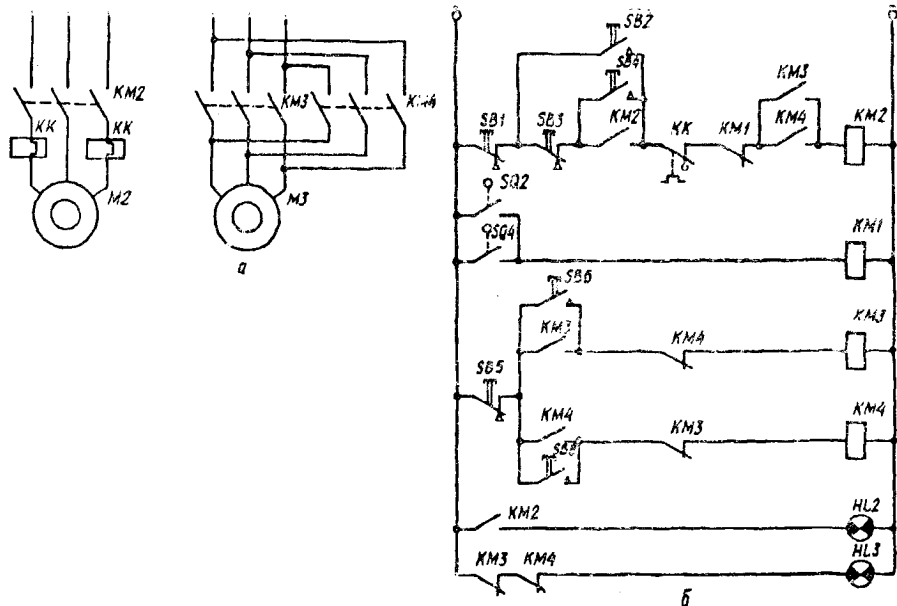


Рис. 7.24

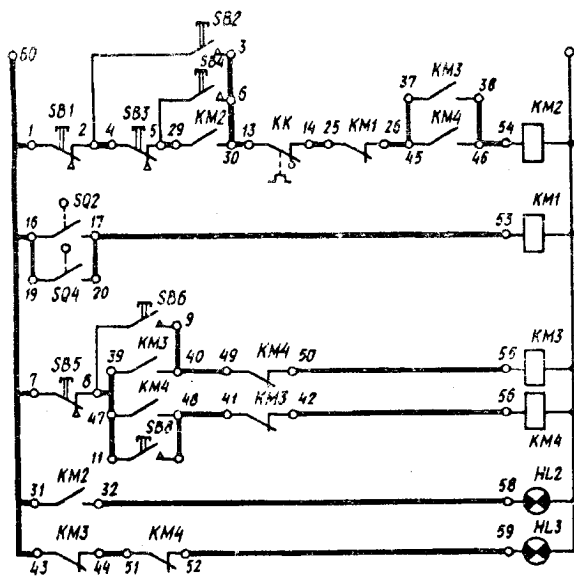


Рис. 7.25

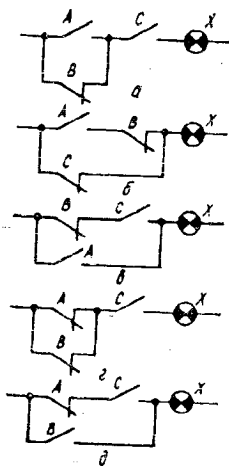


Рис. 7.26

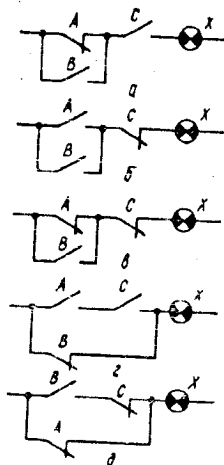


Рис. 7.27

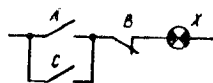


Рис. 7.28

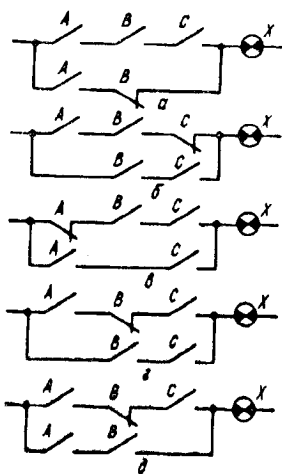


Рис. 7.29

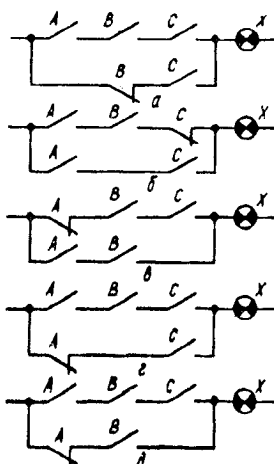


Рис. 7.30

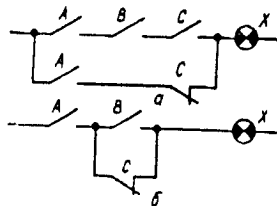


Рис. 7.31

$B=0$  (при будь-якому значенні  $C$ ) або  $B=0; C=1$  (при будь-якому  $A$ ).

2. Спростити контактну схему, зображену на рис. 7.29, 7.30. При яких значеннях  $A, B, C$  лампа  $X$  світиться? Вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента: варіанти 0—4 — рис. 7.29, а—д, варіанти 5—9 — рис. 7.30, а—д. Наприклад,  $f(X) = abc + a\bar{c} = a(bc + \bar{c}) = a(b + \bar{c})(c + \bar{c}) = a(b + \bar{c})$  (рис. 7.31, а).

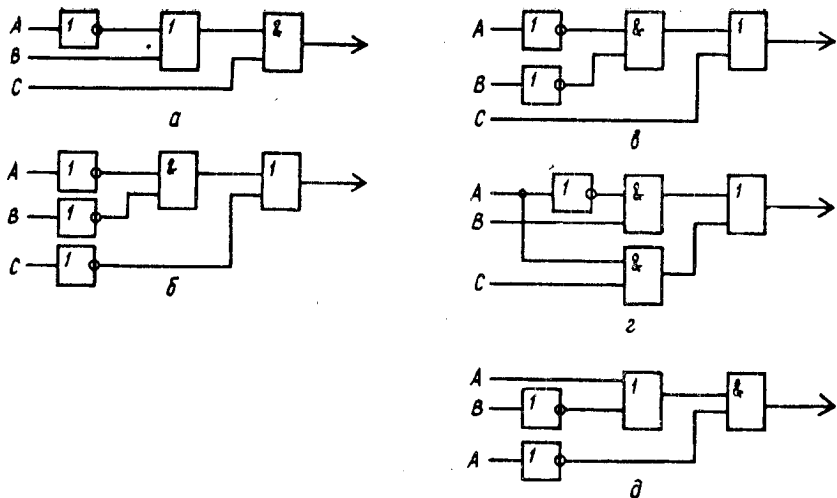


Рис. 7.32

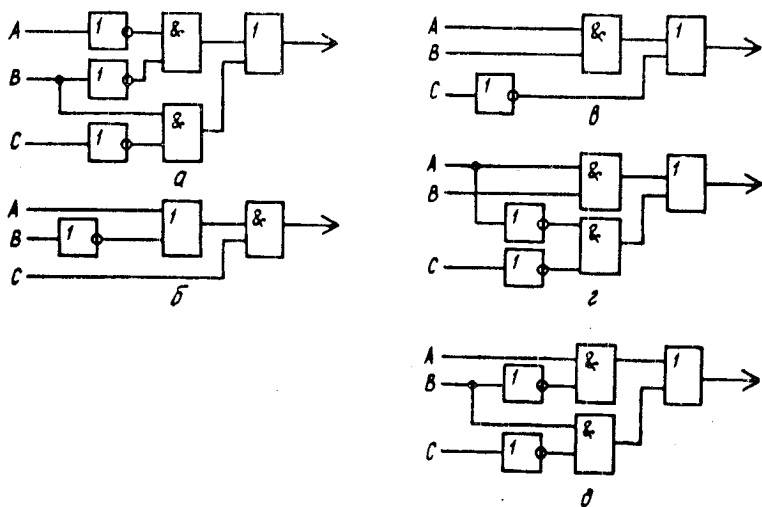


Рис. 7.33

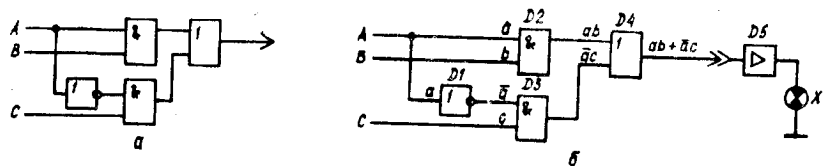


Рис. 7.34

Відповідна спрощена схема подана на рис. 7.31, б. Лампа  $X$  світиться при  $f(X)=1$ ; а це можливо, якщо  $A=1$ ;  $B=1$  (при будь-якому  $C$ ) або  $A=1$ ;  $C=0$  (при будь-якому  $B$ ).

**Аналіз безконтактних схем систем дискретного керування.** Завдання: якою логічною формулою алгебри Буля описують безконтактну схему, зображену на рис. 7.32, 7.33? При яких значеннях  $A, B, C$  лампа  $X$  світиться, якщо вона підключена так, як вказано в табл. 7.6? Вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента. Наприклад, якщо лампу підключити до  $-U$ , то вона буде світитися (рис. 7.34, а) при  $f(X)=1$ ; значення  $f(X)=ab+\bar{a}c$ .

Зміни сигналу після кожного логічного елемента  $D1...D4$  показано на рис. 7.34, б; лампу слід підключати через підсилювач  $D5$ . Очевидно, що  $f(X)=1$ , якщо  $A=1$ ,  $B=1$  (при будь-якому  $C$ ) або  $A=0$ ,  $C=1$  (при будь-якому  $B$ ).

За цими умовами лампа у схемі, що на рис. 7.34, буде світитися. Наведемо ще приклад, якщо лампу підключати до  $+U$  (рис. 7.35, а). Зміни сигналу після кожного логічного елемента  $D1...D4$  показані на рис. 7.35, б. На виході основної схеми (після  $D4$ ) сигнал стає таким:  $(\bar{a}+\bar{c})b$ . Очевидно, що при  $A=0$ ,  $B=1$  (для будь-якого  $C$ ) або  $B=1$ ,  $C=0$  (для будь-якого  $A$ ). Цей сигнал дорівнює логічній одиниці (сигнал високого рівня). Але при підключенні лампи до  $+U$  вона світитиметься тільки тоді, коли на виході логічної схеми буде логічний нуль (сигнал низького рівня). Для перетворення сигналу  $(\bar{a}+\bar{c})b$  у його логічну протилежність слугує інвертор  $D5$ : сигнал на його виході дорівнює

$$\overline{(\bar{a} + \bar{c})b} = \overline{(\bar{a} + \bar{c})} + \bar{b} = ac + \bar{b}.$$

Таблиця 7.6

Варіант	Рисунок	Підключення лампи	Варіант	Рисунок	Підключення лампи
0	7.32, а	до $+U$	5	7.33, а	до $-U$
1	7.32, б	до $-U$	6	7.33, б	до $+U$
2	7.32, в	до $+U$	7	7.33, в	до $+U$
3	7.32, г	до $-U$	8	7.33, г	до $-U$
4	7.32, д	до $+U$	9	7.33, д	до $-U$

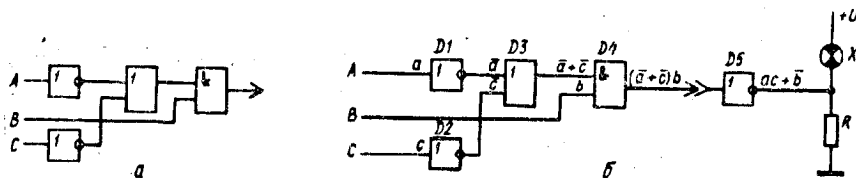


Рис. 7.35

Варіант	Умови роботи сигнальної лампи
0	[(НЕспрацьовування реле А) І (спрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування В) І (спрацьовування С)]
1	[(НЕспрацьовування реле А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(спрацьовування А) І (НЕспрацьовування С)]
2	[(Спрацьовування реле А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування А) І (НЕспрацьовування С)]
3	[(НЕспрацьовування реле А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(спрацьовування А) І (спрацьовування С)]
4	[(НЕспрацьовування реле А) І (спрацьовування В)] АБО [(спрацьовування А) І (НЕспрацьовування С)]
5	[(Спрацьовування реле А) І (спрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування В) І (спрацьовування С)]
6	[(НЕспрацьовування реле А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(спрацьовування В) І (спрацьовування С)]
7	[(Спрацьовування реле А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(спрацьовування В) І (НЕспрацьовування С)]
8	[(НЕспрацьовування реле А) І (спрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування В) І (НЕспрацьовування С)]
9	[(Спрацьовування реле А) І (спрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування В) І (НЕспрацьовування С)]

Неважко переконатися, що цей сигнал дорівнює нулю також при  $A=0, B=1$  (для будь-якого  $C$ ), або  $B=1, C=0$  (для будь-якого  $A$ ). Тобто при цих умовах лампа  $X$  (у схемі на рис. 7.35) світиться.

**Синтез контактних та безконтактних схем систем дискретного керування на основі словесного завдання.** Завдання: скласти контактну та безконтактну схеми, які забезпечать світіння сигнальної лампи  $X$  при виконанні умов, вказаних у табл. 7.7. Безконтактну схему (на елементах НЕ, АБО, І) намалювати у двох варіантах (з підключенням лампи до  $-U$  та  $+U$ ). Наприклад, умову [(Спрацьовування А) І (НЕспрацьовування В)] АБО [(НЕспрацьовування А) І (спрацьовування С)] можна відобразити логічною формулою  $f(X) = ab + \bar{a}c$ ; відповідні схеми наведені на рис. 7.36.

**Мінімізація формул алгебри Буля та синтез безконтактних схем дискретного керування на основі логічних формул.** Завдання: скласти логічну формулу для контактної схеми, вказаної на рис. 7.37, 7.38 (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента), мінімізувати (спростити) цю формулу за правилами алгебри Буля й скласти відповідну безконтактну схему на елементах НЕ, АБО, І (у двох варіантах: з підключенням сигнальної лампи до  $-U$  та до  $+U$ : варіанти 0—3 — для рис. 7.37,  $a — z$ , варіанти 4—9 — для рис. 7.38,  $a — e$ ). Наприклад, для схеми на рис. 7.39,  $a$

$$f(X) = abc + ab\bar{c} + \bar{b}c + a\bar{b}\bar{c} = ab(c + \bar{c}) + \bar{b}c(1 + a) = ab + \bar{b}c.$$



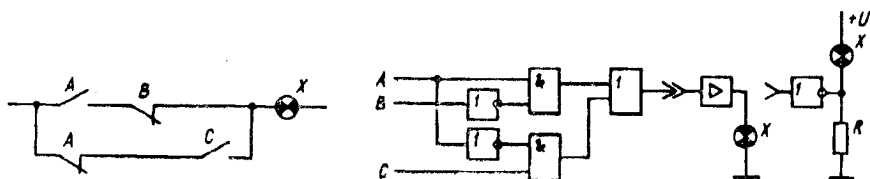


Рис. 7.36

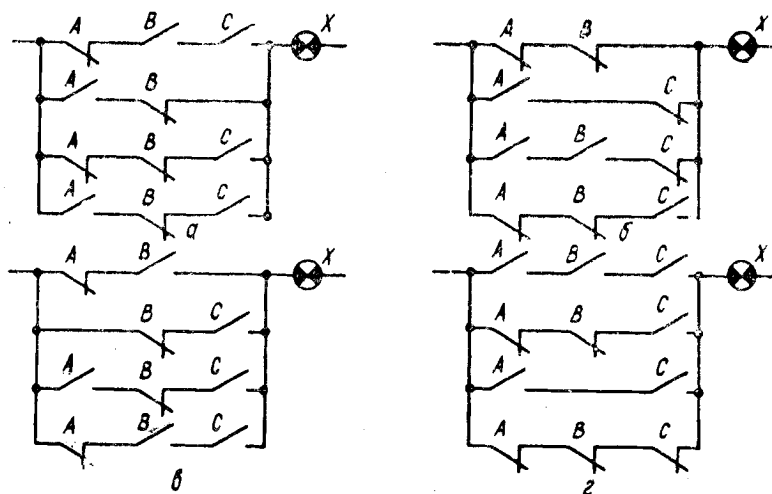


Рис. 7.37

Відповідні безконтактні схеми наведені на рис. 7.39, б, в.

**Синтез контактних та безконтактних схем систем дискретного керування на основі таблиць істинності.** З а в д а н н я: скласти контактну та безконтактну схеми, які забезпечать спрацювання електромагнітного реле *КМ* при виконанні умов, вказаних у таблиці істинності (табл. 7.8). Безконтактну схему виконати на елементах НЕ, АБО, І. Вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента, наприклад, для таблиці істинності:

A	B	C	КМ	A	B	C	КМ
0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1	1	1

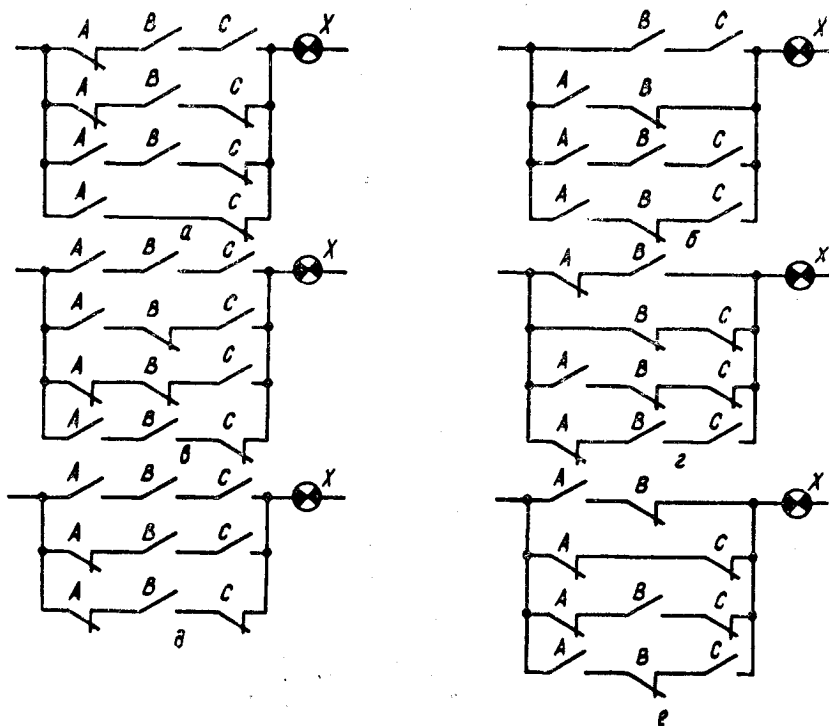


Рис. 7.38

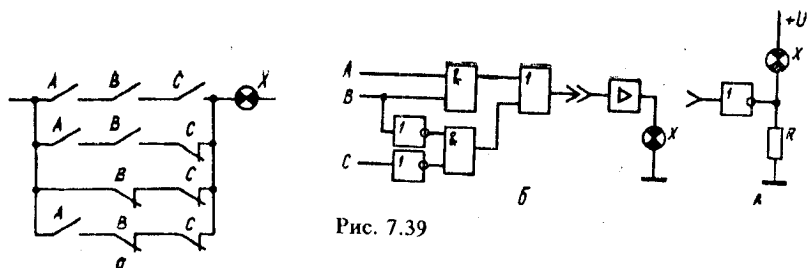


Рис. 7.39

Логічною формулою для цього випадку е:

$$f(KM) = \bar{a}\bar{b}\bar{c} + abc.$$

Спростуємо формулу:

$$f(KM) = ab(\bar{c} + c) + \bar{a}\bar{b}\bar{c} = ab + \bar{a}\bar{b}\bar{c}.$$

A	B	C	Варіанти									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0

Контактну схему, що відповідає формулі після її спрощення, пода-  
но на рис. 7.40, а, безконтактну — на рис. 7.40, б.

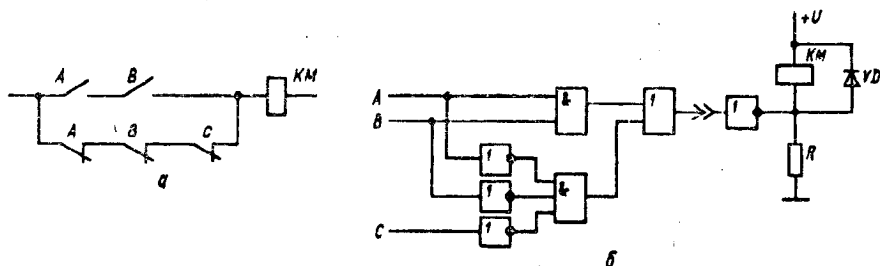


Рис. 7.40

## § 7.4. Системи автоматичного регулювання

**Аналіз принципів схем систем автоматичного регулювання.** З а в д а н н я: проаналізувати принципову схему; описати роботу елементів, із яких вона складається; описати роботу схеми в цілому (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента); побудувати відповідну функціональну схему за ГОСТ 21.404—85 (табл. 7.9).

**Аналіз функціональних схем систем автоматичного регулювання.** З а в д а н н я: проаналізувати функціональну схему (вибір варіанта — за останньою цифрою персонального шифру студента); вказати, які елементи автоматики можуть бути використані при складанні принципової схеми: варіанти: 0 — рис. 7.51, 1 — рис. 7.52, 2 — рис. 7.53, 3 — рис. 7.54, 4 — рис. 7.55, 5 — рис. 7.56, 6 — рис. 7.57, 7 — рис. 7.58, 8 — рис. 7.59, 9 — рис. 7.60.

**Складання функціональних схем систем автоматичного регулювання технологічних параметрів.** З а в д а н н я: проаналізувати принципову схему (вибір варіанта — за останньою цифрою персо-

Варіант	Призначення системи	Рисунок
0	Автоматичне керування роботою компресора, який накачує стиснене повітря в технологічну місткість	7.41
1	Автоматичне регулювання й вимірювання температури у теплообміннику	7.42
2	Автоматичне регулювання температури в камері з паровим підігрівом	7.43
3	Автоматичне регулювання тиску газу в технологічній місткості	7.44
4	Автоматичне регулювання рівня води в резервуарі	7.45
5	Автоматичне регулювання рівня води в резервуарі	7.46
6	Автоматичне регулювання рівня води в резервуарі А	7.47
7	Автоматичне регулювання рівня води в резервуарі	7.48
8	Автоматичне регулювання тиску газу в технологічній місткості	7.49
9	Автоматичне регулювання швидкості обертання вала парової турбіни	7.50

нального шифру студента) і скласти для неї функціональну схему за ГОСТ 21.404—85.

**Варіант 0.** Автоматичний регулятор температури: контактний ртутний термометр, електричний вторинний прилад з електромагнітним реле на виході, що керує роботою електронагрівача.

**Варіант 1.** Автоматичний регулятор роботи привода компресора: сильфонний первинний перетворювач, контактний пристрій, що викликає привод компресора при досягненні певного тиску в резервуарі.

**Варіант 2.** Автоматичний регулятор температури в сушильній камері з паровим нагрівом: терморезистор мідний, автоматичний

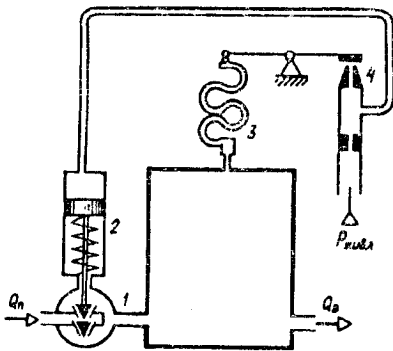


Рис. 7.41

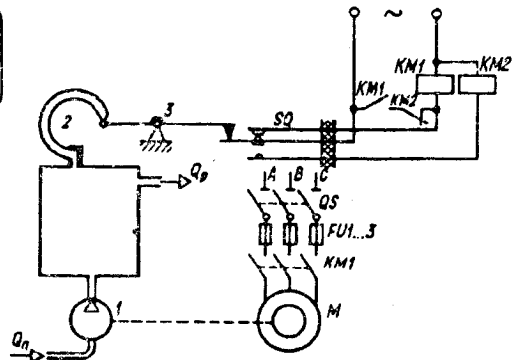


Рис. 7.42

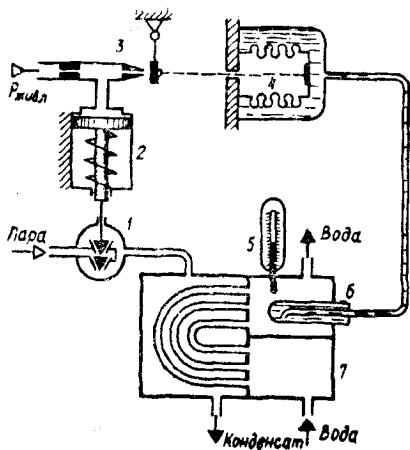


Рис. 7.43

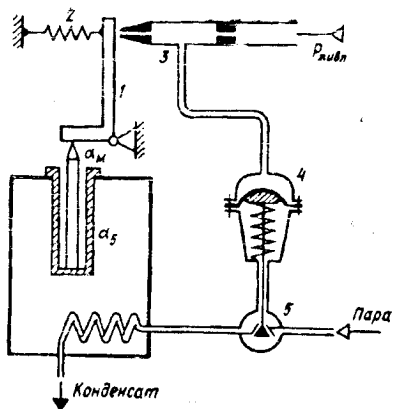


Рис. 7.44

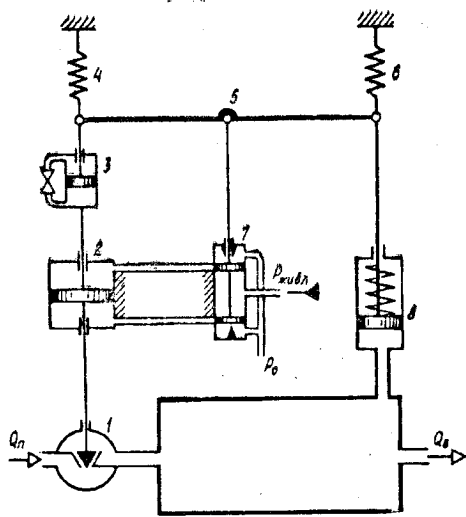


Рис. 7.45

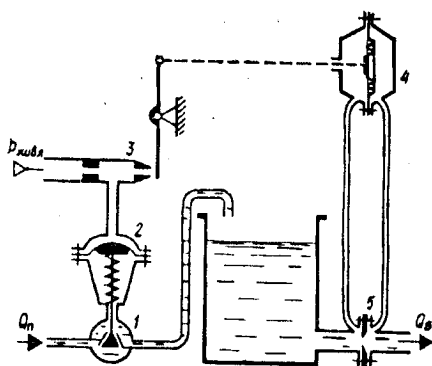


Рис. 7.46

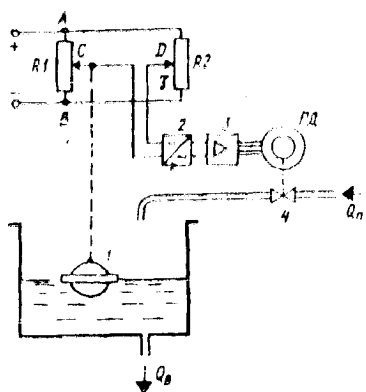


Рис. 7.47

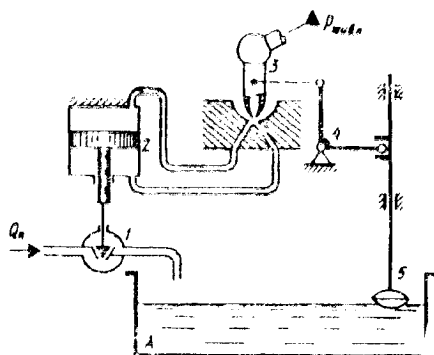


Рис. 7.48

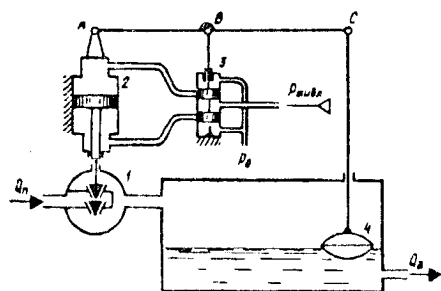


Рис. 7.49

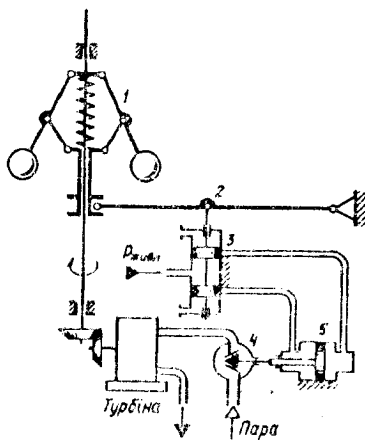


Рис. 7.50

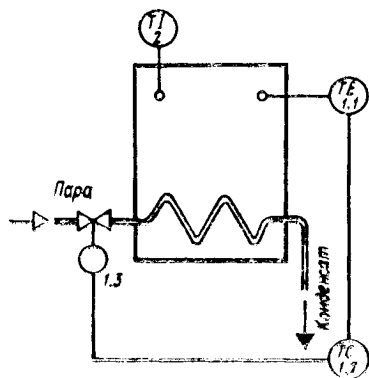


Рис. 7.51

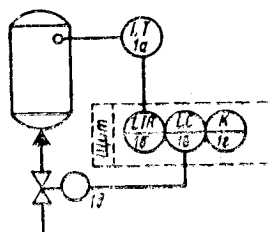


Рис. 7.52

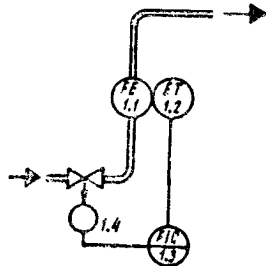


Рис. 7.53

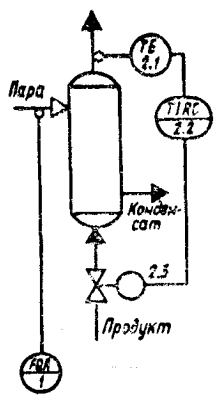


Рис. 7.54

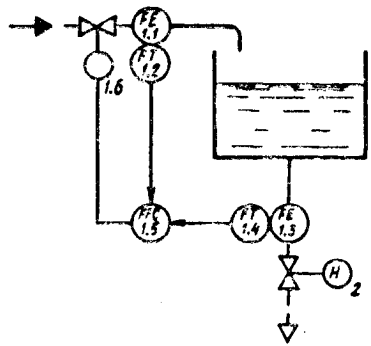


Рис. 7.55

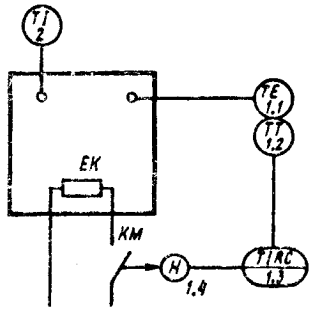


Рис. 7.56

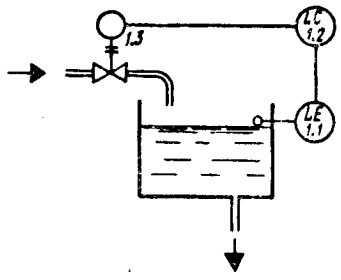


Рис. 7.57

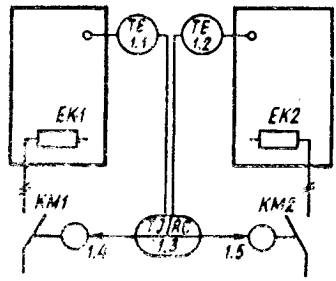


Рис. 7.58

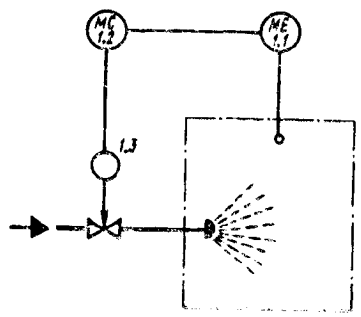


Рис. 7.59

міст із двопозиційним контактним пристроєм, який керує електромагнітним приводом клапана подачі пари.

*Варіант 3.* Дилатометричний регулятор температури, вторинне електромагнітне реле, що вмикає й вимикає електронагрівач.

*Варіант 4.* Автоматичний регулятор температури: термопара, автоматичний потенціометр на щиті з контактним пристроєм, який керує роботою електронагрівача.

*Варіант 5.* Автоматичний регулятор температури повітря в сушильній камері: терморезистор дріт'яний, автоматичний міст на щиті з контактним пристроєм для керування роботою електронагрівача й сигналізації.

*Варіант 6.* Автоматичний регулятор температури: первинний перетворювач — термістор, вторинний електронний прилад з електромагнітним реле на виході, яке керує роботою електромагнітного привода клапана подачі пари.

*Варіант 7.* Автоматичний регулятор подачі рідини: ротаметр, вторинний диференціальний трансформаторний датчик соленоїдного типу, слідкуюча система керує переміщенням приймача, а також роботою клапана подачі рідини (з моторним приводом).

*Варіант 8.* Автоматичний регулятор рівня води прямої дії: первинний перетворювач буйковий, через важіль впливає на клапан подачі води.

*Варіант 9.* Автоматичний регулятор рівня води: буйковий перетворювач переміщує поршень золотника, який подає робочу рідину у поршневий серводвигун, що керує роботою клапана подачі води в резервуар.

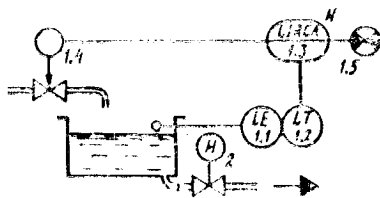


Рис. 7.60

## § 7.5. Приклади принципів схем для організації контролю засвоєння навчального матеріалу

**З а в д а н н я:** проаналізувати принципову схему; описати властивості елементів, із яких вона складається; побудувати відповідні функціональні схеми за ГОСТ 21.404—85:

Система автоматичного контролю сили ваги — рис. 7.61.

Система дистанційного вимірювання зусилля  $P$ , прикладеного до бруса — рис. 7.62.

Система дистанційного вимірювання рівня води у резервуарі — рис. 7.63.

Система автоматичної сигналізації рівня води у резервуарі — рис. 7.64.



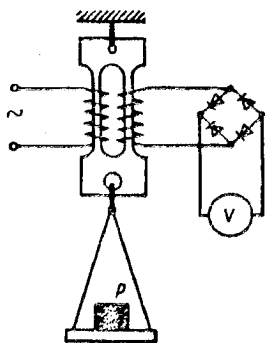


Рис. 7.61

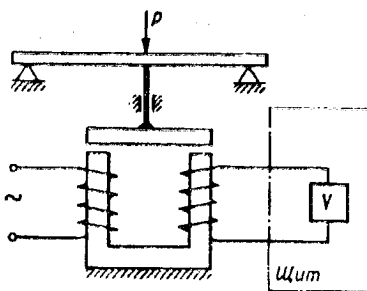


Рис. 7.62

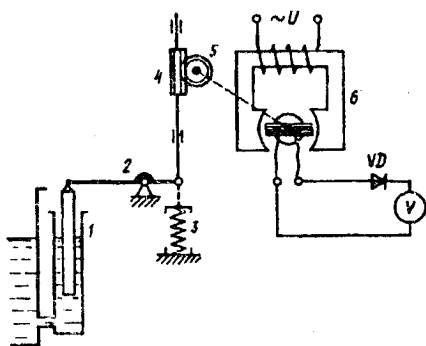


Рис. 7.63

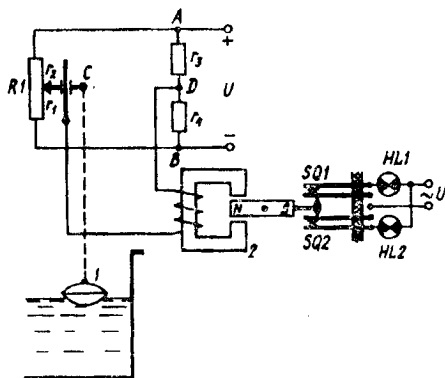


Рис. 7.64

Система автоматичного регулювання й сигналізації рівня рідини у технологічному резервуарі — рис. 7.65.

Система автоматичного регулювання й сигналізації рівня води у резервуарі — 7.66.

Система автоматичного регулювання рівня робочого розчину у ванні з використанням контактних електродів — рис. 7.67.

Система автоматичного регулювання рівня рідини у резервуарі — рис. 7.68, 7.69.

Система автоматичного регулювання рівня рідини у технологічній ванні — рис. 7.70.

Система автоматичного регулювання рівня води у технологічній місткості — рис. 7.71.

Системи автоматичного регулювання рівня води у резервуарі — рис. 7.72.

Система автоматичного регулювання рівня води у технологічній місткості — рис. 7.73.

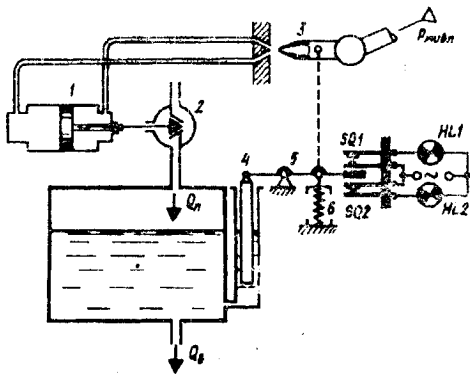


Рис. 7.65

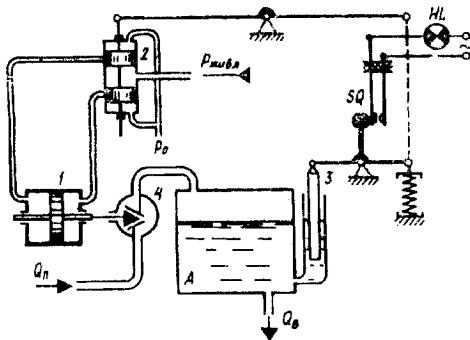


Рис. 7.66

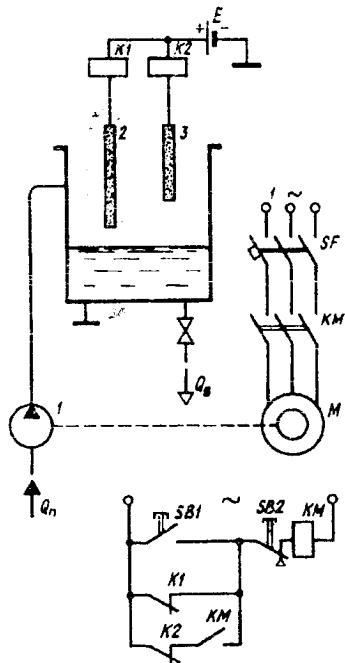


Рис. 7.67

Система автоматичного регулювання рівня води у резервуарі — рис. 7.74.

Системи автоматичного регулювання швидкості обертання вала парової турбіни — рис. 7.75, 7.76, 7.77, 7.78, 7.79.

Системи дистанційного вимірювання швидкості обертання вала технологічної машини — рис. 7.80, 7.81.

Система аналізу рівномірності швидкості обертання вала технологічної машини — рис. 7.82.

Система автоматичного регулювання напруги генератора постійного струму — рис. 7.83.

Система дистанційного вимірювання тиску газу або рідини в технологічній місткості — рис. 7.84.

Системи автоматичного регулювання тиску газу в технологічній місткості — рис. 7.85, 7.86, 7.87, 7.88, 7.89.

Система автоматичного керування роботою компресора, який накачує стиснене повітря у технологічну місткість — рис. 7.90.

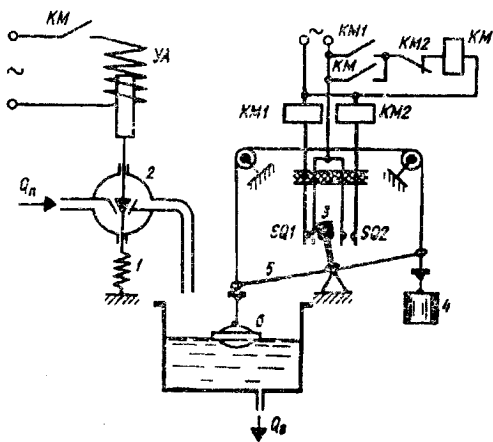


Рис. 7.68

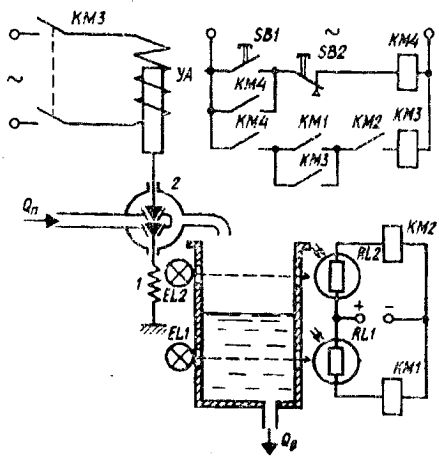


Рис. 7.69

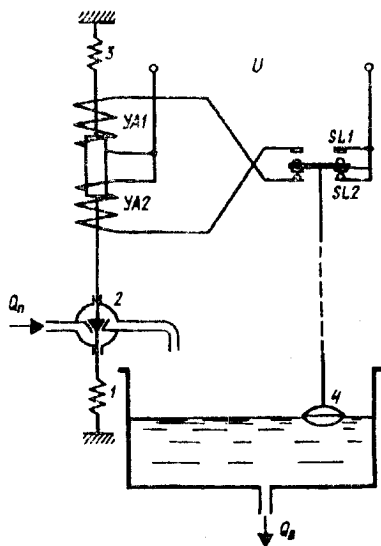


Рис. 7.70

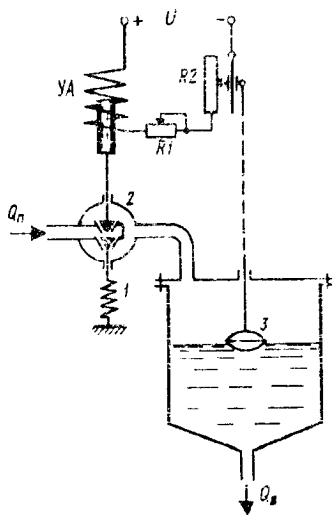


Рис. 7.71

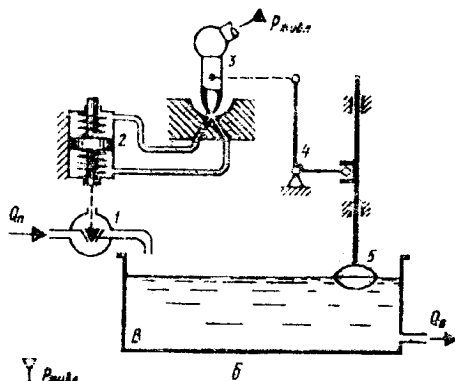
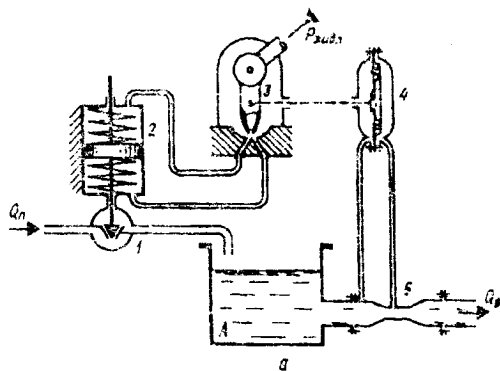


Рис. 7.72

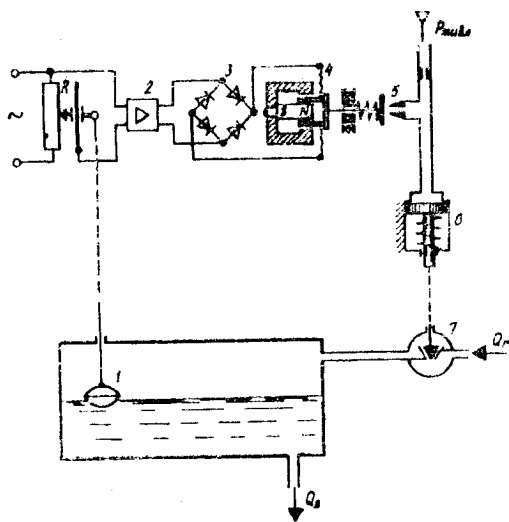


Рис. 7.73

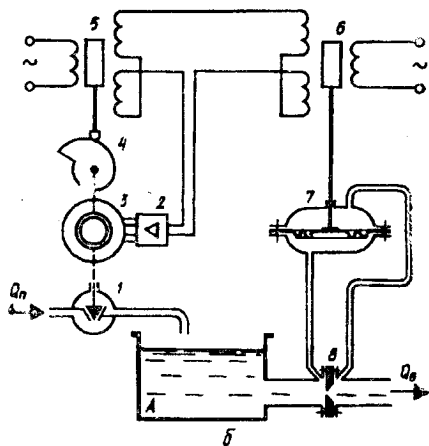
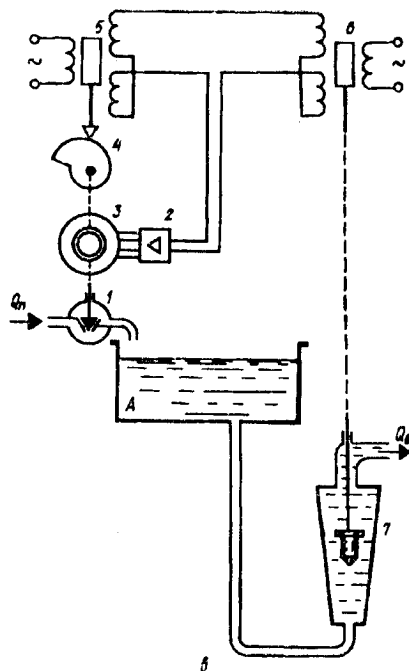
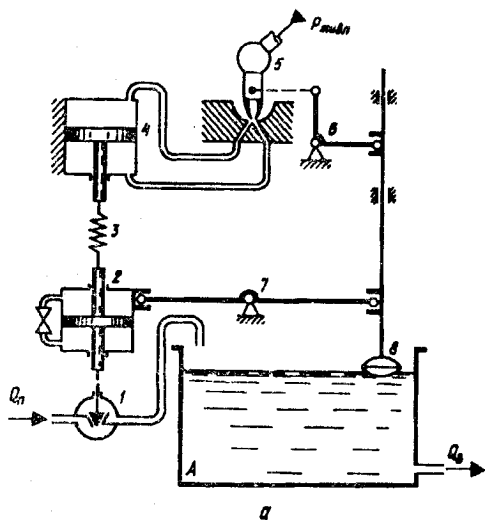


Рис. 7.74

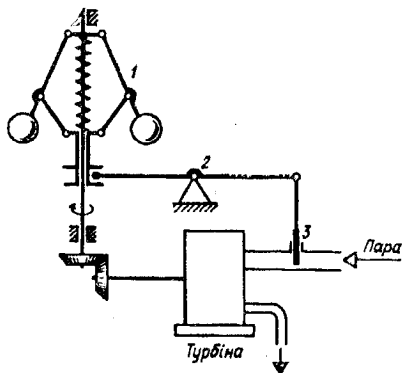


Рис. 7.75

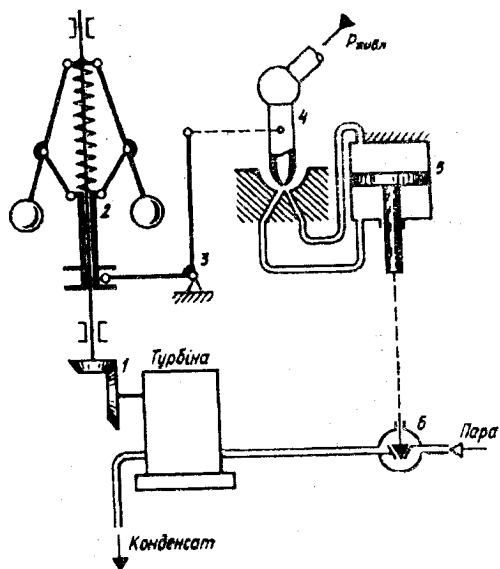


Рис. 7.76

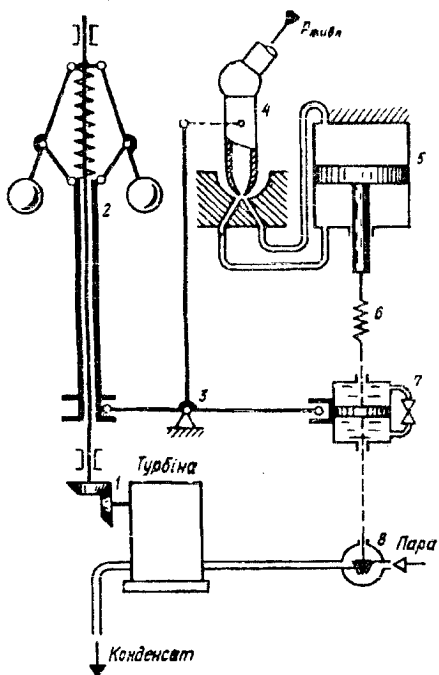


Рис. 7.77

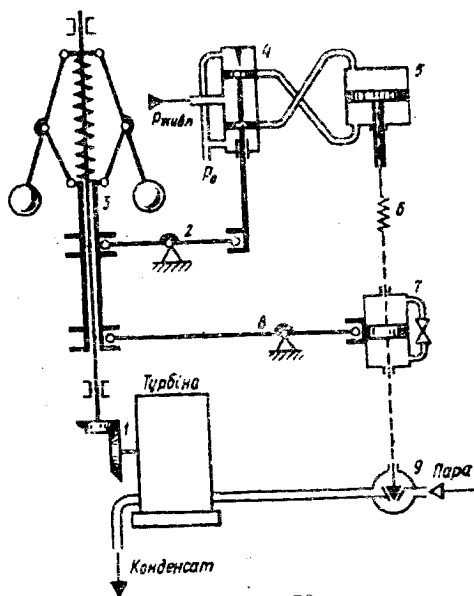


Рис. 7.78

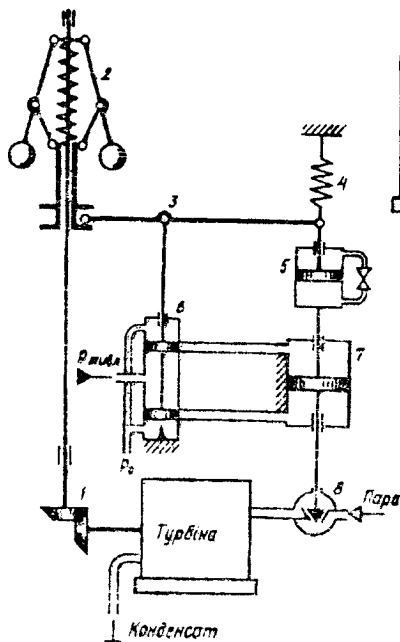


Рис. 7.79

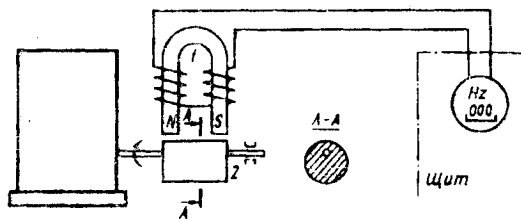


Рис. 7.80

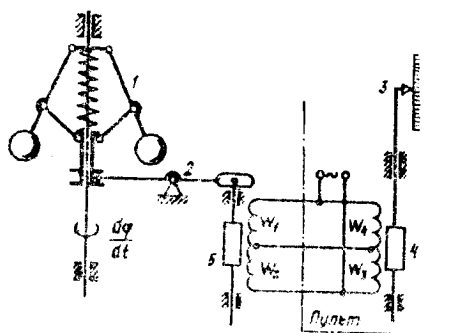


Рис. 7.81

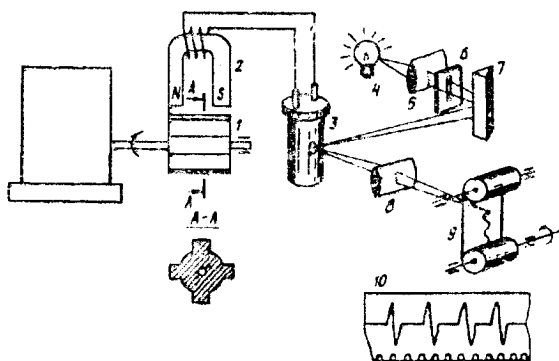


Рис. 7.82

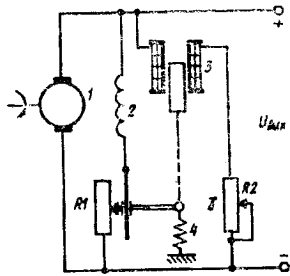


Рис. 7.83

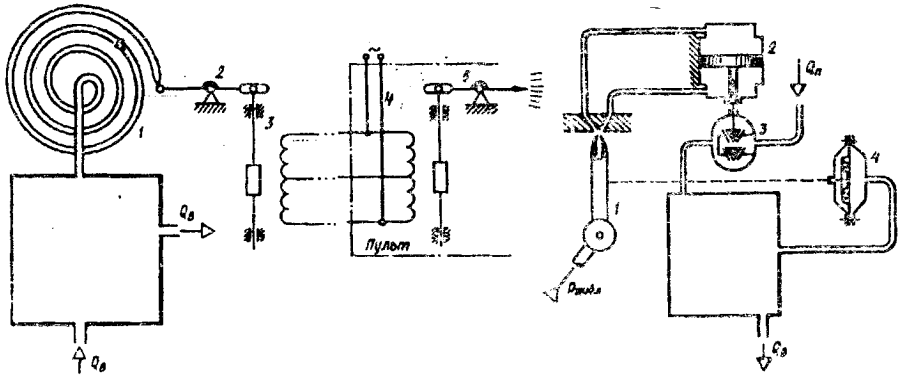


Рис. 7.84

Рис. 7.85

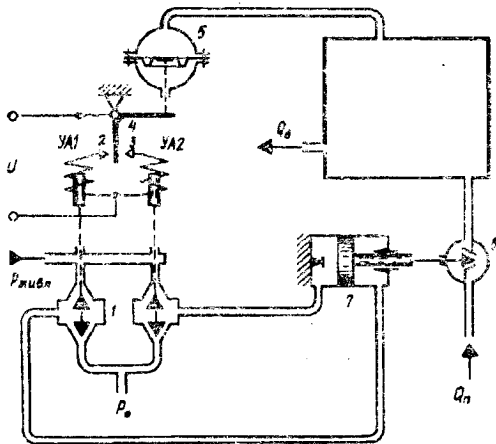


Рис. 7.86



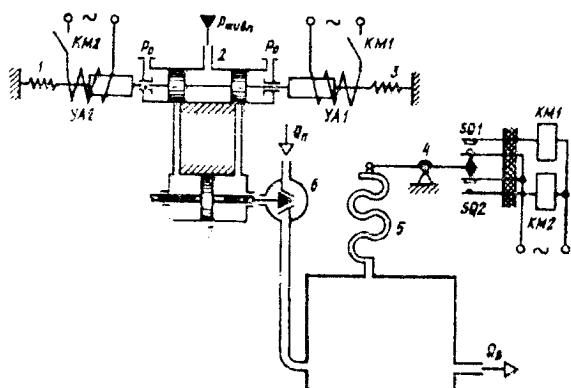


Рис. 7.87

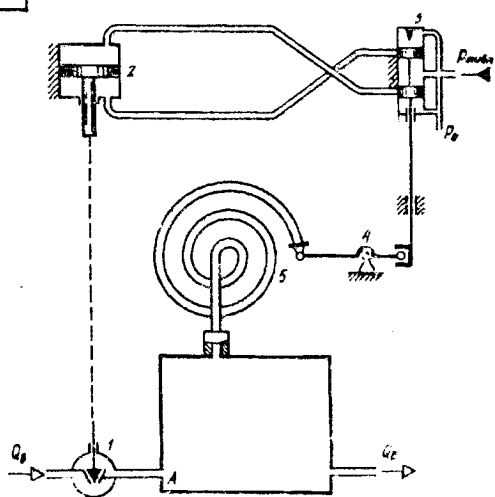


Рис. 7.89

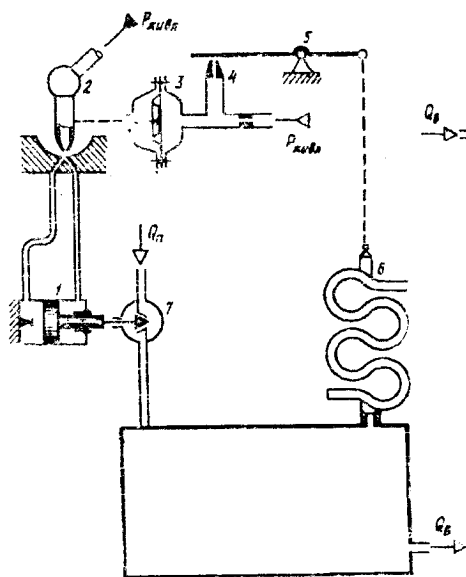


Рис. 7.88

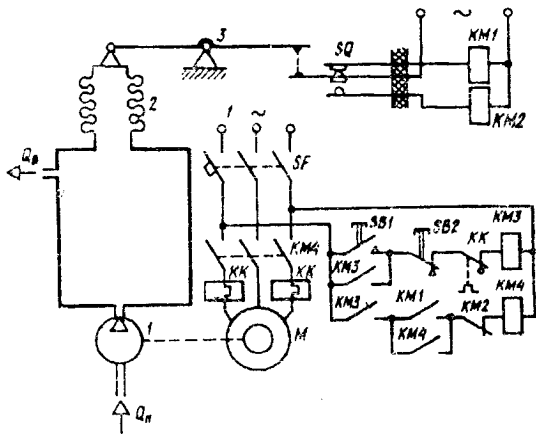


Рис. 7.90

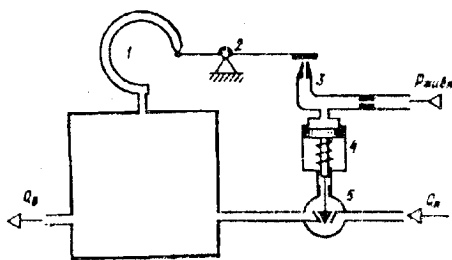


Рис. 7.91

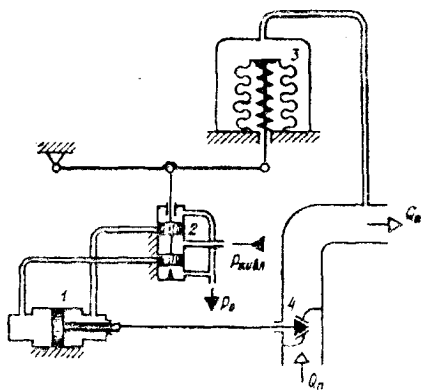


Рис. 7.92

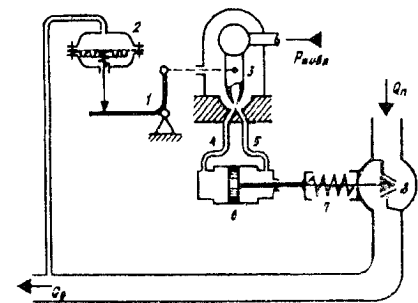


Рис. 7.93

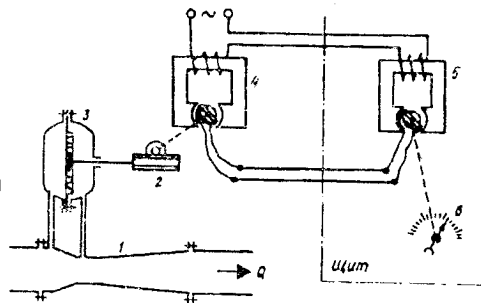


Рис. 7.94



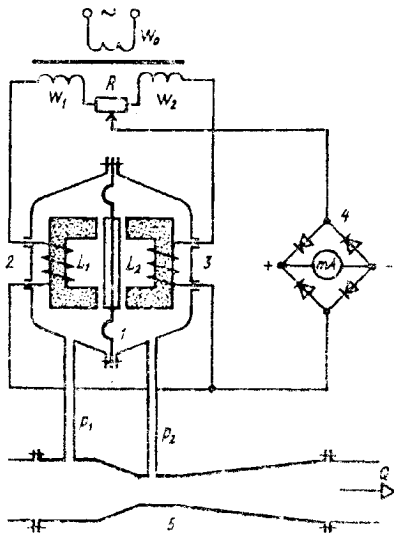


Рис. 7.99

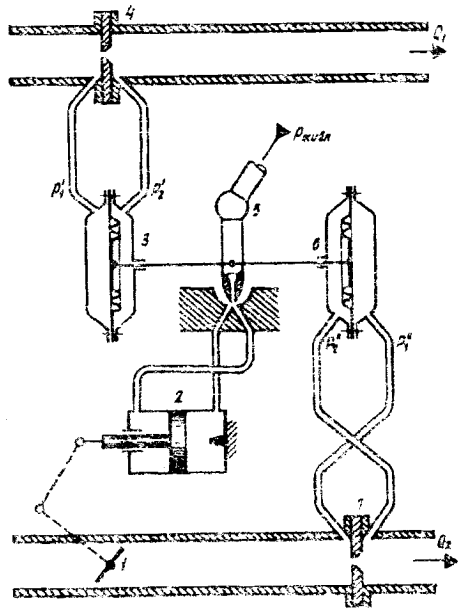


Рис. 7.100

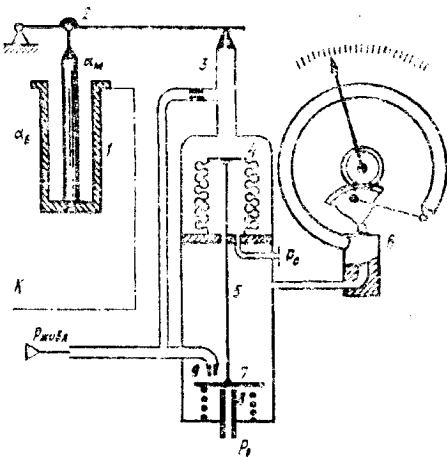


Рис. 7.101

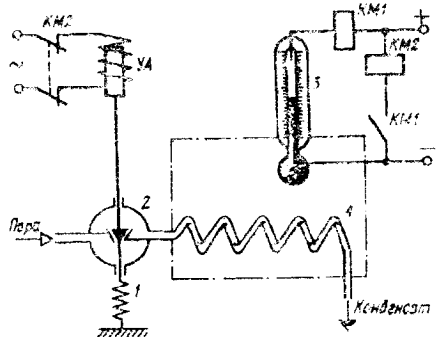


Рис. 7.102

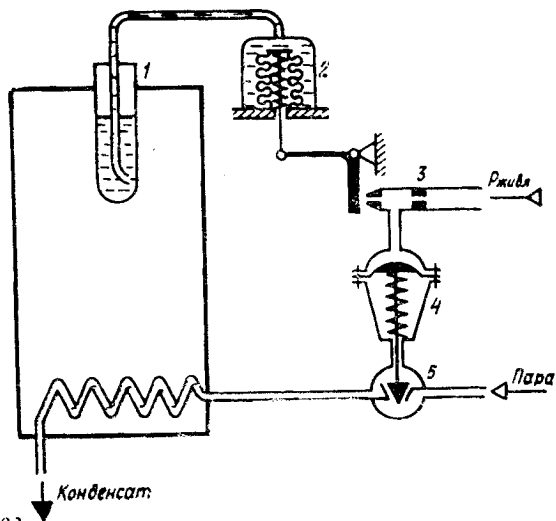


Рис. 7.103

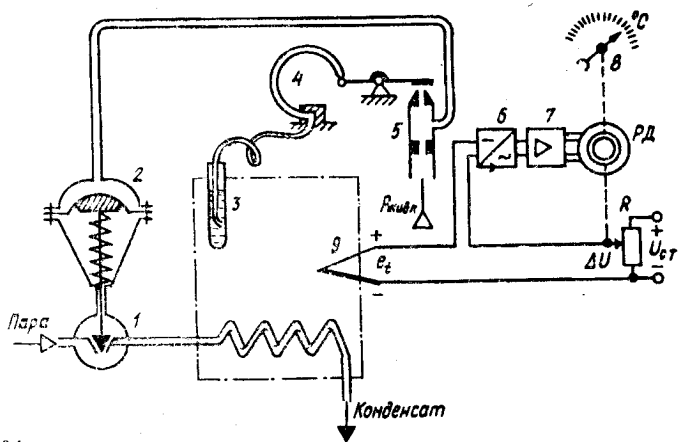


Рис. 7.104

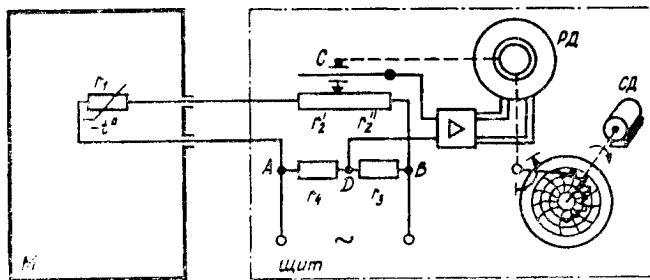


Рис. 7.105

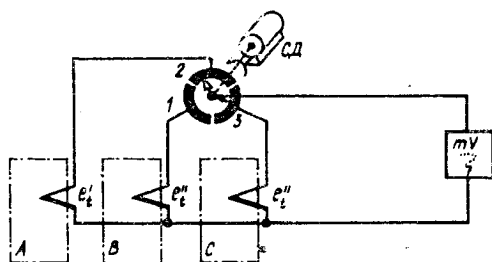


Рис. 7.106

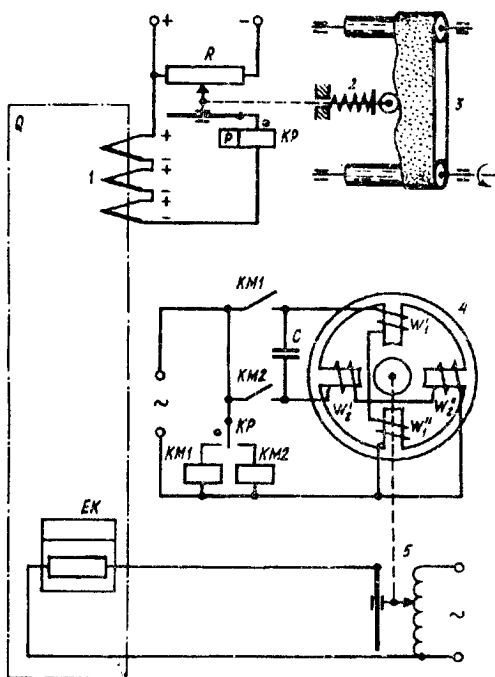


Рис. 7.107

Система автоматичного регулювання тиску газу в резервуарі — рис. 7.91.

Система автоматичного регулювання тиску газу в трубопроводі — рис. 7.92.

Система автоматичного регулювання тиску рідини в трубопроводі — рис. 7.93.

Система автоматичного регулювання тиску рідини в трубопроводі — рис. 7.94.

Система дистанційного вимірювання витрати рідини — рис. 7.95.

Системи дистанційного вимірювання витрати рідини в трубопроводі — рис. 7.96, 7.97, 7.98.

Система дистанційного вимірювання витрати газу в трубопроводі — рис. 7.99.

Система автоматичного регулювання співвідношення витрат у трубопроводах — рис. 7.100.

Система дистанційного вимірювання температури — рис. 7.101.

Системи автоматичного регулювання температури в камері з паровим підігрівом — рис. 7.102, 7.103.

Система автоматичного регулювання й дистанційного вимірювання температури у камері з паровим підігрівом — рис. 7.104.

Система дистанційного вимірювання температури — рис. 7.105.

Система дистанційного вимірювання температури з почерговим опитуванням трьох об'єктів — рис. 7.106.

Система програмного автоматичного регулювання температури в камері  $Q$  — рис. 7.107.

## ДОДАТКИ

Додаток 1

Умовні графічні позначення на принципових схемах (рис. Д.1)

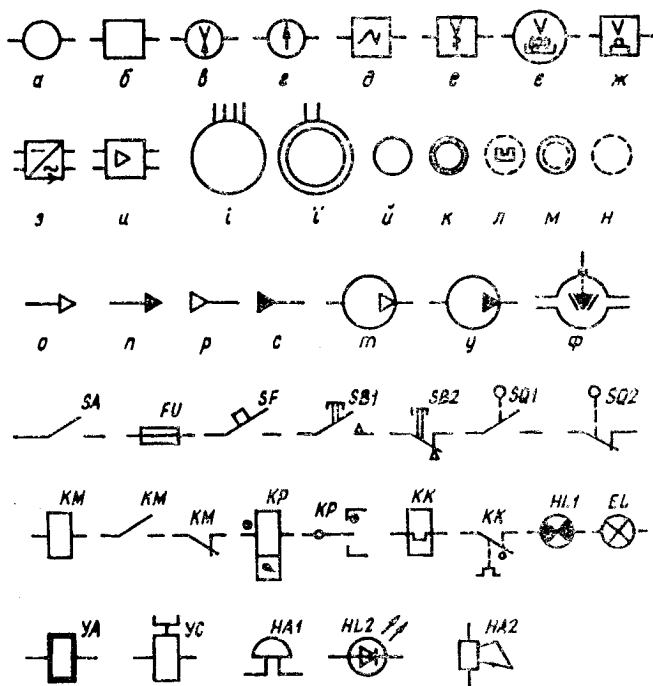


Рис. Д.1

- а — показуючий вимірювальний прилад;
- б — реєструвальний вимірювальний прилад;
- в — вольтметр аналоговий, показуючий, з двосторонньою шкалою і нулем посередині;
- г — гальванометр;
- д — осцилограф;



- e* — вольтметр аналоговий реєструвальний;  
*ε* — вольтметр цифровий показуючий;  
*жс* — вольтметр цифровий реєструвальний;  
*з* — перетворювач постійного струму на змінний;  
*и* — підсилювач;  
*і* — статор конденсаторного сервоелектродвигуна;  
*ї* — статор сервоелектродвигуна з розщепленими полюсами;  
*й* — ротор «бляче колесо»;  
*к* — порожнистий алюмінієвий ротор;  
*л* — активний ротор;  
*м* — гістерезисний ротор;  
*н* — реактивний ротор;  
*о* — струмінь газу;  
*п* — струмінь рідини;  
*р* — подача стисненого повітря;  
*с* — подача рідини під тиском;  
*т* — компресор повітряний;  
*у* — насос;  
*ф* — клапан для регулювання подачі газу або рідини по трубопроводу;  
*SA* — контакт неавтоматичного вимикача;  
*FU* — запобіжник плавкий;  
*SF* — контакт автоматичного вимикача;  
*SB1* — замикаючий контакт натискного вимикача;  
*SB2* — розмикаючий контакт натискного вимикача;  
*SQ1* — замикаючий контакт кінцевого вимикача;  
*SQ2* — розмикаючий контакт кінцевого вимикача;  
*KM* — котушка нейтрального електромагнітного реле, замикальний і розмикальний контакти цього реле;  
*KP* — котушка й контакти поляризованого електромагнітного реле (якщо до кінця котушки, позначеного чорною крапкою, додати «+», то рухомий контакт переміститься до нерухомого, також позначеного чорною крапкою);  
*KK* — чутливий елемент і контакт електротеплового реле захисту;  
*HL1* — сигнальна лампа;  
*EL* — освітлювальна лампа;  
*УА* — електромагніт;  
*УС* — електромагнітна муфта;  
*HA1* — дзвінок;  
*HL2* — світлодіод;  
*HA2* — гудок.

Додаток 2

Значення  $t_{\gamma}$  при  $\gamma = 0,95$

$n$	$t_{\gamma}$	$n$	$t_{\gamma}$	$n$	$t_{\gamma}$
4	3,182	10	2,262	16	2,131
5	2,776	11	2,228	17	2,120
6	2,571	12	2,201	18	2,110
7	2,447	13	2,179	19	2,101
8	2,365	14	2,160	20	2,093
9	2,306	15	2,145	∞	1,960

**Умовні позначення на схемах автоматизації технологічних процесів [за ГОСТ 21.404—85]**



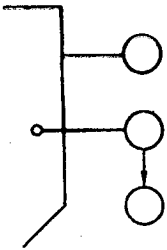
Перетворювач інформації; прилад, встановлений поза щитом



Прилад, встановлений на щиті або на пульті



————— або - - - - - Контур технологічного об'єкта



Загальне позначення розміщення первинного перетворювача або приладу поза щитом

Точне позначення розміщення первинного перетворювача

Використання стрілки для вказування напрямку передачі сигналу



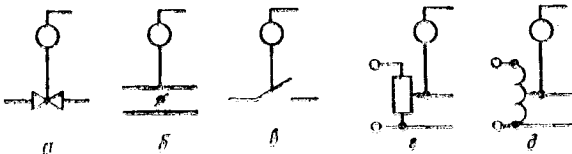
Загальне позначення розміщення приладу на щиті (пульті)



Виконавчий механізм (загальне позначення; з додатковим ручним приводом)



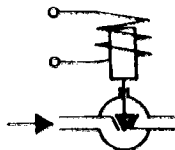
Використання виконавчих механізмів для керування регульовальними органами (наприклад, *а* — вентилем на трубопроводі, *б* — затвором поворотним, *в* — електричним контактом, *г* — подільником напруги, *д* — автотрансформатором регульовальним):



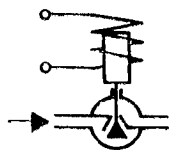
Характер роботи виконавчого механізму можна показати таким чином:



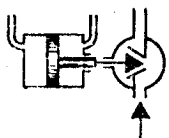
у разі припинення подачі керуючого сигналу він відкриває регулюючий орган; наприклад,



закриває його; наприклад,



залишає у незмінному стані, наприклад:



### Позначення контрольованої величини:

- D* — густина;
- E* — будь-яка електрична величина;
- F* — витрата;
- G* — розмір, положення, переміщення;
- K* — час;
- L* — рівень;
- M* — вологість;
- P* — тиск, вакуум;
- Q* — будь-яка характеристика речовини (склад, концентрація та ін.);
- R* — радіоактивність;
- S* — швидкість обертання;
- T* — температура;
- V* — в'язкість;
- H* — маса;
- W* — ручна дія;
- U* — здатність контролювати кілька величин.

Приклади конкретизації позначень *E*, *Q*, *R* та *U*:



*Струм*

— контрольована величина — електричний струм;



*Напруга*

— контрольована величина — електрична напруга;



*H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*

— контрольована величина — концентрація сірчаної кислоти;

- $\textcircled{Q}^{PH}$  — контрольована величина — рН;
- $\textcircled{R}^{\gamma}$  — контрольована величина —  $\gamma$ -випромінювання;
- $\textcircled{U}^{U=f(P,T)}$  — контрольовані величини — тиск та температура.

Позначення інших величин — резервними літерами *A, B, C, N* та ін.; значення цих букв пояснюється безпосередньо на схемі, наприклад:

- $\textcircled{A}$  — *A* — магнітний потік.

Характер контрольованої величини уточнюється за допомогою додаткових букв, які ставляться після позначення контрольованої величини: *D* — різниця; *F* — співвідношення; *Q* — інтегрування, наприклад:

- $\textcircled{TD}$  — контроль різниці температур;
- $\textcircled{PF}$  — контроль співвідношення тисків;
- $\textcircled{FQ}$  — контроль повної витрати рідини або газу.

Після позначення контрольованої величини вказуються функціональні ознаки: для перетворювачів: *E* — первинне перетворення інформації; *T* — додаткове перетворення інформації для дистанційної передачі сигналу; для приладів: *I* — показання; *R* — реєстрація; *C* — керування, регулювання; *S* — наявність контактного пристрою; *A* — сигналізація (*H* — верхньої межі, *L* — нижньої).

Наприклад:

- $\textcircled{TE}$  — первинний перетворювач температури;
- $\textcircled{FT}$  — вторинний перетворювач для дистанційної передачі інформації про витрату речовини;
- $\textcircled{TIR}$  — прилад поза щитом для вимірювання температури, показуючий та реєструвальний;
- $\textcircled{PA}^H_L$  — прилад на щиті для сигналізації верхньої та нижньої меж тиску.

Оббігаючий пристрій для почергового підключення кількох первинних перетворювачів до вимірювального приладу позначається буквою *I* після буквеного позначення контролюваної величини (рис. Д. 2). У нижній частині кола або овалу в позначеннях перетворювачів та приладів вказується позиційне позначення.

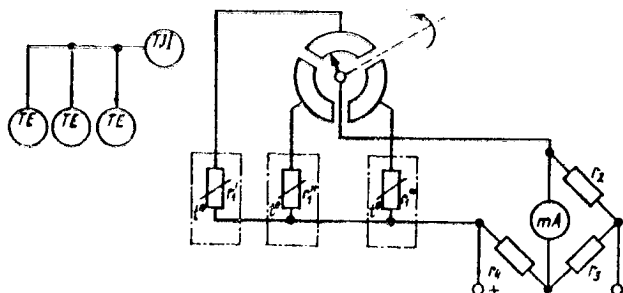


Рис. Д. 2

наприклад:

Приклади схем автоматизації наведено на рис. Д. 3—Д. 7.

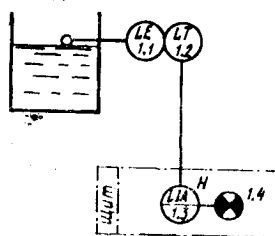


Рис. Д. 3

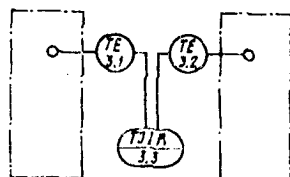


Рис. Д. 5

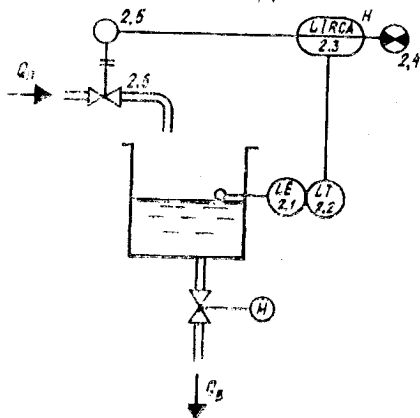


Рис. Д. 4

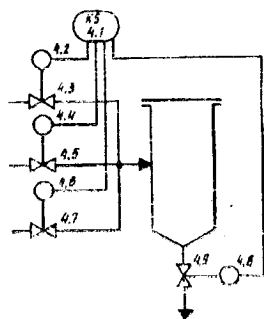


Рис. Д. 6

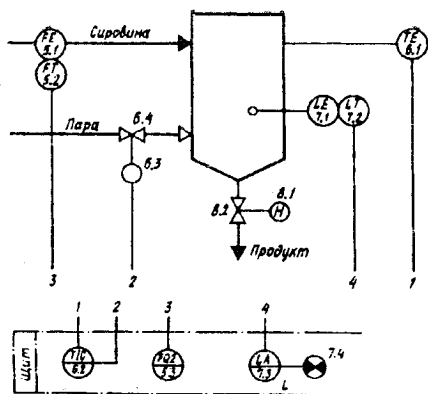
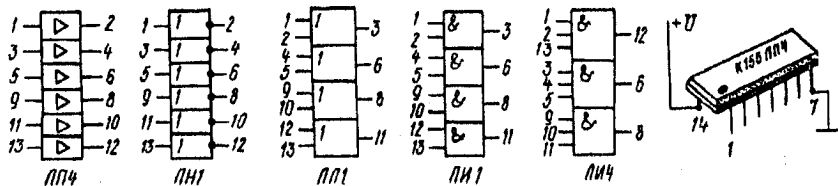


Рис. Д.7

Додаток 4

Цоколівка мікросхем серій К155 і К555



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Автоматизированные системы управления предприятиями и объединениями* / Под ред. М. А. Соломатина. М.: Экономика, 1985. 248 с.
2. *Баранов В. Я., Безновская Т. Х., Бак В. А. и др.* Промышленные приборы и средства автоматизации. Л.: Машиностроение, 1987. 847 с.
3. *Боборыкин Н. А.* Агрегатные комплексы технических средств АСУТП. Л.: Машиностроение, 1985. 271 с.
4. *Вотов Н. С., Назаров О. В., Петелин Б. В., Яковлев В. Г.* Автоматизированное управление технологическими процессами. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. 24 с.
5. *Головко Д. Б., Скрипник Ю. О., Глазков Л. А. та ін.* Засоби вимірювання автоматичного зрівноваження. К.: Либідь, 1994. 288 с.
6. *Емельянов А. И., Капник О. В.* Проектирование систем автоматизации технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 400 с.
7. *Залманзон Л. А.* Беседы об автоматике и кибернетике. М.: Наука, 1985. 416 с.
8. *Кулаков М. В.* Технологические измерения и приборы. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.
9. *Масленников И. М., Содиева Ю. Н., Цирлин А. М. и др.* Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами. М.: Химия, 1986. 336 с.
10. *Наладка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами* / Под ред. А. С. Клюева. М.: Энергия, 1977. 400 с.
11. *Рего К. Г.* Метрологическая обработка результатов технических измерений. К.: Техніка, 1987. 128 с.
12. *Скрипник Ю. А., Бондарь В. М., Рего К. Г.* Микропроцессорные средства для управления технологическими объектами легкой промышленности. К.: УМК ВО, 1989. 108 с.
13. *Скрипник Ю. А., Дубровский В. А., Танюк В. А.* Контроль параметров технологических процессов в легкой промышленности. К.: Техника, 1980. 240 с.
14. *Шкатов Б. Ф.* Технические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности. М.: Химия, 1986. 320 с.

## ЗМІСТ

Передмова . . . . .	3
Вступ . . . . .	5
<b>Розділ I. ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>Глава 1. Фізичні основи роботи перетворювачів інформації</b> . . . . .	<b>31</b>
§ 1.1. Класифікація і характеристики перетворювачів інформації . . . . .	31
§ 1.2. Перетворювачі, в яких вихідним сигналом є механічне переміщення (лінійне, оберতальне) . . . . .	35
§ 1.3. Перетворювачі, де вихідним сигналом є тиск газу або рідини . . . . .	45
§ 1.4. Перетворювачі з термічною величиною на виході . . . . .	48
§ 1.5. Перетворювачі, де вихідним сигналом є електрична величина . . . . .	50
§ 1.6. Комбіновані перетворювачі . . . . .	67
<b>Глава 2. Технічні засоби систем автоматизованого вимірювання і контролю</b> . . . . .	<b>72</b>
§ 2.1. Вторинні перетворювачі вимірювальної інформації . . . . .	72
§ 2.2. Вихідні пристрої систем автоматизованого вимірювання і контролю . . . . .	77
§ 2.3. Вимірювальні прилади безпосередньої оцінки й автоматизованого зрівноваження . . . . .	81
<b>Глава 3. Технічні засоби систем автоматизованого керування й регулювання</b> . . . . .	<b>91</b>
§ 3.1. Первинні пристрої систем автоматизованого дискретного керування . . . . .	91
§ 3.2. Вторинні пристрої систем автоматизованого дискретного керування . . . . .	95
§ 3.3. Вихідні пристрої систем автоматизованого керування й регулювання . . . . .	101
<b>Розділ II. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ</b> . . . . .	<b>109</b>
<b>Глава 4. Системи керування з автоматизованим зворотним зв'язком</b> . . . . .	<b>109</b>
§ 4.1. Вимірювання; обробка результатів вимірювання . . . . .	109
§ 4.2. Приклади аналізу систем автоматичної сигналізації . . . . .	118
§ 4.3. Приклади аналізу систем автоматичного контролю технологічних параметрів . . . . .	125
<b>Глава 5. Системи напівавтоматичного та автоматичного дискретного керування</b> . . . . .	<b>141</b>
§ 5.1. Складання релейно-контактних схем . . . . .	141
§ 5.2. Складання схем систем дискретного керування на безконтактних елементах . . . . .	151
§ 5.3. Використання гнучких логічних схем для систем дискретного керування . . . . .	155



Глава 6. Системи автоматичного регулювання . . . . .	156
§ 6.1. Класифікація локальних систем автоматичного регулювання . . . . .	156
§ 6.2. Приклади аналізу локальних систем автоматичного регулювання . . . . .	166
§ 6.3. Об'єднання локальних систем автоматичного регулювання в автоматизовані або автоматичні комплекси . . . . .	176
Глава 7. Завдання для самостійної роботи студентів . . . . .	178
§ 7.1. Перехідні процеси у вимірювальних перетворювачах . . . . .	178
§ 7.2. Системи керування з автоматизованим зворотним зв'язком . . . . .	181
§ 7.3. Системи керування з автоматизованим прямим зв'язком . . . . .	192
§ 7.4. Системи автоматичного регулювання . . . . .	202
§ 7.5. Приклади принципових схем для організації контролю засвоєння навчального матеріалу . . . . .	207
ДОДАТКИ . . . . .	223
Додаток 1. Умовні графічні позначення на принципових схемах . . . . .	223
Додаток 2. Значення $t_{\gamma}$ при $\gamma=0,95$ . . . . .	224
Додаток 3. Умовні позначення на схемах автоматизації технологічних процесів (за ГОСТ 21.404—85) . . . . .	225
Додаток 4. Цоколівка мікросхем серій К155 і К555 . . . . .	229
Список рекомендованої літератури . . . . .	230

## Підручник

Головко Дмитро Богданович  
 Рего Костянтин Георгійович  
 Скрипник Юрій Олексійович

## АВТОМАТИКА І АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Художник обкладинки *О. Г. Григір*  
 Художній редактор *Т. О. Щур*  
 Технічний редактор *І. М. Лукашенко*  
 Коректор *М. Г. Єхлакова*

Здано до набору 11.03.96. Підп. до друку 09.01.97. Формат 60×84/16. Папір офс. № 1.  
 Літ. гарн. Вис. друк. Ум. друк. арк. 13,49. Ум. фарбовідб. 13,84. Обл.-вид. арк. 16,68.  
 Вид. № 3710. Зам. № 7-2090.

Видавництво «Либідь» при Київському університеті, 252001 Київ, Хрещатик, 10

Свідоцтво про державну реєстрацію № 05591690 від 23.04.94

Віддруковано з готових матриць фірмою АТ «ВІПОЛ», 252151, Київ, вул. Волинська, 60.