

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Укладачі: О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2024

УДК 261.317 (075.8)

Т38

Укладачі: Безвесільна Олена Миколаївна, д-р техн. наук, проф.
Толочко Тетяна Олексіївна, ст. викл.

Рецензенти: Квасніков В.П. д-р техн. наук, проф. завідувач кафедри
комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій
Національного авіаційного університету
Маслов В.П. д-р техн. наук, проф. провідний науковий
співробітник відділу сенсорних систем Інституту фізики
напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Відповідальний редактор: Киричук Ю.В., д-р техн. наук, проф. завідувач кафедри
автоматизації та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря
Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 01.02.2024 р.)
за поданням вченої ради Приладобудівного факультету
(протокол № 1/24 від 29.01.2024 р.)*

Т38 Технічні засоби автоматизації [Електронний ресурс]: практикум : навч. посіб. для
здобувачів ступеня бакалавра за спец. 174 Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. М.
Безвесільна, Т. О. Толочко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПП ім. Ігоря
Сікорського, 2024. – 214 с.

У навчальному посібнику викладено інформацію щодо використання різних типів
технічних засобів автоматизації, які широко використовуються в автоматизованих
приладових системах вимірювання. Викладена інформація буде корисною у
процесі виконання практичних занять та дипломного проєктування за близькими
темами. Навчальний посібник містить організаційні питання роботи, приділено
увагу послідовності та методиці виконання практичних занять, наведено вимоги
щодо оформлення та процесу захисту виконаних практичних занять,
запропоновано студентам оформити таблиці заданих параметрів та відповідні
розрахунки, надати висновки.

Навчальний посібник призначено для здобувачів ступеня бакалавра за
спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка, буде також корисним для інженерно-технічних працівників,
фахівців, які займаються технічними засобами автоматизації у системах
автоматизації.

УДК 261.317 (075.8)

Реєстр. № НП 23/24-292. Обсяг 12,44 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, ЇХ ВИЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
ЗАНЯТТЯ 1	
ПРИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	8
ЗАНЯТТЯ 2	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	23
ЗАНЯТТЯ 3	
ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	29
ЗАНЯТТЯ 4	
ГЕНЕРАТОРНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	83
ЗАНЯТТЯ 5	
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	103
ЗАНЯТТЯ 6	
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	160
ЗАНЯТТЯ 7	
МІКРОДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	186
ЗАНЯТТЯ 8	
МІКРОДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ	195
ЗАНЯТТЯ 9	
АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	205
ЛІТЕРАТУРА.....	217

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, ЇХ ВИЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТЗА	—	технічні засоби автоматизації
ГВС	—	гнучкі виробничі системи
САУ	—	система автоматичного управління
ЧПК	—	числове програмне керування
ПВП	—	первинний вимірювальний перетворювач
ПрВП	—	проміжний вимірювальний перетворювач
ВП	—	відліковий пристрій
РП	—	реєструючий пристрій
ПП	—	потенціометричний перетворювач
БПП	—	багатообертовий потенціометричний перетворювач
ФПП	—	функціональний потенціометричний перетворювач
ПеП	—	п'єзоелектричні перетворювачі
ОТ	—	обертовий трансформатор
СКОТ	—	синусно-косинусний обертовий трансформатор
ЛОТ	—	лінійний обертовий трансформатор
ТрП	—	трансформаторний перетворювач
МП	—	механотронний перетворювач
ЕРС	—	електрорушійна сила
ПТ	—	поворотний трансформатор
ОА	—	оптичний акселерометр
СКПТ	—	синусно-косинусний поворотний трансформатор
ОДГ	—	оптична ділильна головка
САУ	—	системах автоматичного управління
АД	—	асинхронний двигун
ГД	—	гістерезисний двигун
РД	—	реактивний двигун
МПС	—	мікропроцесорна система
ММР	—	мехатронний модуль руху

АЦП	– аналого-цифровий перетворювач
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
BIC	– велика інтегральна схема
DSP	– Digital Signal Processor
RISC	– reduced instruction set computer - обчислювач з набором спрощених команд, архітектурний підхід до проектування процесорів
АЛП	– арифметико-логічний пристрій
ММ	– мехатронний модуль
МР	– модуль руху
ППБ	– підсилювально-перетворювальний блок
КП	– координатний перетворювач
РП	– регулятор положення
АСР	– автоматизовані системи регулювання

ВСТУП

У дисципліні “Технічні засоби автоматизації” розглядаються основні різновиди технічних засобів автоматизації (вимірювальних перетворювачів) з використанням різних фізичних принципів і конструктивних рішень. Це визначило методичну різноманітність виконання практичних занять. Кожне практичне заняття автономне у сенсі методу розрахунків та дослідження.

Практичні заняття спрямовані на вирішення наступних задач:

- вивчення різновидів конструкцій і технічних даних перетворювачів ТЗА;
- набуття навичок складання методики розрахунків для практичного визначення основних характеристик перетворювачів;
- проведення порівняння результатів практичних занять з матеріалами лекцій та лабораторних досліджень для визначення найважливіших характеристик перетворювачів;

– закріплення теоретичних знань (у тому числі методів розрахунків), отриманих студентами під час лекційних занять з даної дисципліни.

Навчальний посібник містить 9 практичних занять, які рекомендуються до виконання студентам під час вивчення дисципліни «Технічні засоби автоматизації».

Практичні заняття з дисципліни «Технічні засоби автоматизації (ТЗА)» спрямовані на вирішення певних фахових задач у сфері проєктування та розробки технічних засобів автоматизації. Під час виконання практичних занять студент має продемонструвати глибоке розуміння матеріалів, отриманих на лекціях з дисципліни ТЗА та інформації, викладеної у запропонованих підручниках та навчальних посібниках.

Основними завданнями даного навчального посібника є своєчасне ознайомлення студентів з тематикою практичних занять, змістом та об'ємом необхідних матеріалів, необхідних для виконання практичного заняття, етапами практичного заняття, правилами оформлення практичного заняття, умовами оцінювання виконаних практичних занять. У даному навчальному посібнику розглянуто використання різних типів вимірювальних перетворювачів автоматизованих приладових систем.

Організація проведення практичних занять. На першому занятті студенти знайомляться з методикою виконання практичних занять. Викладачем надаються відомості щодо варіантів, згідно з якими студенти виконують розрахунки по практичним заняттям.

До кожної роботи студент допускається після попередньої співбесіди з викладачем і при наявності підготовленої форми практичного заняття. Дані, отримані у процесі виконання практичного заняття, перевіряються і підписуються викладачем. Після обробки даних, розрахунків та письмового аналізу результатів розрахунків або дослідження практичного заняття (висновків по роботі) студент захищає виконану роботу на практичному занятті, отримуючи певну кількість рейтингових балів (згідно з інформацією про рейтингову систему оцінювання з даної дисципліни у силабусі). У випадку дистанційного навчання, студентам буде надано доступ до

дисципліни ТЗА на платформі Електронний Кампус КПІ, де розміщено усі необхідні матеріали та є можливість завантажити протокол з результатами практичного заняття, пройти захист практичного заняття у вигляді тестів тощо.

При виконанні практичних занять доцільно користуватись літературою [1-7].

Порядок виконання практичних занять

1. Ознайомитись з метою, теоретичними відомостями до практичного заняття,
2. Ознайомитись з різновидами конструкцій, принципом дії, основами теорії перетворювачів ТЗА,
3. Ознайомитися з значеннями параметрів досліджуваних перетворювачів ТЗА,
4. Ознайомитись з методикою розрахунків ТЗА досліджуваних перетворювачів ТЗА,
5. Затвердити методику розрахунків перетворювача згідно свого варіанту у викладача.

Вимоги до змісту звіту з практичного заняття

Для кожного практичного заняття студент готує звіт (формат А4), який містить інформацією про виконавця (титульний лист), мету практичного заняття, короткі теоретичні відомості щодо конкретного перетворювача ТЗА, результати розрахунків, висновки за результатами практичного заняття.

Звіт повинний містити:

- 1) результати розрахунків, які отримано при виконанні практичного заняття;
- 2) графіки статичних характеристик досліджуваних ТЗА, побудовані на основі розрахункових даних;
- 3) висновки, отримані на основі проведених практичних занять.

Заняття 1

ПРИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета практичного заняття 1 – ознайомитись з функціональним призначенням ТЗА; з основними визначеннями ТЗА; функціональними особливостями застосування технічних засобів в вимірювальних, інформаційних вимірювальних, інформаційних-керуючих, керуючих системах.

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У системах автоматизованого управління (САУ), у приладобудуванні та машинобудуванні та у сучасних інформаційних комп'ютерних системах широко використовуються технічні засоби автоматизації.

Без ТЗА не відбувається жоден вимірювальний або автоматизований технологічний процеси.

При підготовці спеціалістів у галузі автоматизованого управління технологічними процесами, у приладобудуванні, машинобудуванні, механіці, радіотехніці питанням ТЗА приділяється велика увага.

Автоматизацією виробничих процесів називається виконання цих процесів з обмеженою участю людини [1].

Системою автоматизації виробничих процесів називається сукупність приладів і пристроїв, пов'язаних між собою та персоналом і суміжними службами устаткуванням, що реалізує даний виробничий процес відповідними методами [1].

Останнім часом автоматизація виробничих процесів стає одним з основних напрямів технічного прогресу у промисловості. Ефективність автоматизації зумовлюється, у першу чергу, підвищенням продуктивності праці, тобто обсягом випуску виробів за одиницю часу, що припадає на одну зайняту у виробництві людину. Це забезпечується як у наслідок автоматизації підготовки виробництва, так і у наслідок автоматизації саме технологічних процесів.

Зростання продуктивності праці в автоматизованому виробництві, порівняно з неавтоматизованим виробництвом, забезпечується наступними чинниками[1]:

- загальним скороченням чисельності працюючих, оскільки в автоматизованому виробництві частина функцій робітників, техніків та інженерів виконується машинами;
- скороченням тривалості робочих циклів випуску виробів.

Робочим циклом називається відрізок часу, за який у технологічному процесі здійснюється повторюваний випуск одного виробу. Час робочого циклу $t_{\text{ц}}$ є сумою часу робочих $t_{\text{р.х}}$ і холостих $t_{\text{х.х}}$ ходів обладнання. Відповідно з цим

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р.х}} + t_{\text{х.х}} . \quad (1.1)$$

Робочі ходи не залежать від рівня автоматизації технологічного процесу і виконуються технологічним обладнанням (верстатами, пресами, стендами тощо) відповідно до їх проектного призначення. При виконанні робочих ходів відбуваються зняття стружки, штампування, фарбування, запресовування підшипників та інші технологічні операції. Тривалість виконання робочих ходів $t_{\text{р.х}}$ залежить від конструкції технологічного обладнання, методів і режимів його використання.

Холості ходи являють собою допоміжні рухи, які необхідні для підготовки виконання робочих ходів. До холостих ходів слід віднести установлення і зняття деталей на верстатах, транспортування деталей, налагодження устаткування тощо. Ці та подібні дії в автоматизованому виробництві виконуються автоматичними машинами без участі людини або за її участю, зведеною до мінімуму, тому на їх виконання витрачається менше часу, ніж у неавтоматизованому виробництві [1].

Скорочення часу робочого циклу дає можливість зменшити час на виробництво одиниці продукції і, отже, веде до зниження трудомісткості і собівартості її виготовлення. Підготовка виробництва виробів, яка потребує переробки великого обсягу конструкторської та технологічної інформації, з появою відносно дешевих і надійних ЕОМ також може бути автоматизована.

Автоматизація виробничих процесів на практиці здійснюється на різних рівнях.

Автоматизація нульового рівня має місце, коли участь людини виключається тільки при виконанні робочих ходів. Прикладом може служити включення і виключення обертання шпинделя або руху подачі інструментів. Автоматизація нульового рівня називається також *механізацією*. Для проведення автоматизації необхідно провести механізацію виробничих процесів [1].

При автоматизації робочого циклу у серійному і потоковому виробництвах часто обмежуються створенням пристроїв, що виключають участь людини у виконанні холостих ходів на окремих агрегатах технологічного обладнання. У цьому випадку говорять про автоматизацію *першого рівня*. При автоматизації першого рівня у штучному часі має враховуватись як основний час робочих циклів, так і допоміжний час, що витрачається на відведення і підведення інструмента, завантаження обладнання і контроль, а також час технічного обслуговування, що витрачається на заміну інструмента, налагодження устаткування, видалення відходів, управління та відпочинок робітника [1].

Автоматизація першого рівня не означає зв'язок робочих машин між собою автоматичним зв'язком. Транспортування і контроль виробів здійснюється у цьому випадку з участю людини. Технологічне обладнання, яке застосовується, може бути як автоматичним, так і напіваавтоматичним. У разі використання напіваавтоматичного обладнання автоматизується тільки процес виготовлення однієї деталі, а її встановлення і зняття здійснюється за участю людини. У разі використання автоматичного устаткування автоматизується як процес виготовлення одного виробу (деталі), так і його встановлення і зняття. Прикладом автомата може служити сучасний багатошпиндельний токарний верстат, який виконує обточування, свердлування, зенкування, розгортання і нарізання різьби, де заготовкою є сталевий пруток, який багаторазово автоматично подається до упору [1].

Автоматизація *другого рівня* зводиться до автоматизації технологічного процесу у цілому. При другому рівні автоматизації забезпечується вирішення

завдань автоматизації транспортування, контролю виробу (деталі), видалення відходів та керування системами машин. Цьому рівню автоматизації відповідають різного типу автоматичні лінії і гнучкі виробничі системи (ГВС) [1].

Автоматична лінія – це автоматично діюча система машин, встановлених у технологічній послідовності і об'єднаних засобами транспортування, завантаження-розвантаження, контролю, керування і видалення відходів. Прикладом можуть слугувати різного роду автоматичні лінії, що широко застосовуються в автомобільному виробництві. Автоматична лінія складається з окремих одиниць технологічного обладнання, які компонуються під певний вид транспорту і зв'язуються з ним за допомогою тих чи інших пристроїв завантаження-розвантаження (маніпуляторів, лотків, підйомників). У такій лінії, крім робочих позицій, можуть бути і холості позиції, які необхідні для огляду та обслуговування даної лінії [1].

На гнучких виробничих системах, на відміну від автоматичних ліній, не може бути заздалегідь передбачена обробка деталей одного будь-якого найменування або оброблення конструкційно і технологічно подібних виробів. Тому на таких ГВС технологічне обладнання має мати можливість переналагодження (найчастіше це верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК)); воно не розташовується у технологічній послідовності, оскільки ця технологічна послідовність не може бути відома заздалегідь. Документом, що регламентує послідовність виконання технологічних операцій, тут є не маршрутна технологія, як у випадку автоматичної лінії, а розклад завантаження обладнання, складений внаслідок планування роботи даної гнучкої виробничої системи.

Третьому рівню автоматизації відповідає комплексна автоматизація. *Комплексна автоматизація* охоплює всі етапи і ланки виробничого процесу, починаючи від конструкторської та технологічної підготовки виробництва (а також заготівельних процесів) і закінчуючи проведенням випробувань і відправкою готових виробів. Комплексна автоматизація передбачає реалізацію всіх попередніх рівнів автоматизації. Вона потребує високої

технічної оснащеності виробництва і великих капітальних витрат. Така автоматизація є особливо ефективною при досить великих програмах випуску виробів стабільної конструкції [1].

Як приклад, можна назвати виробництво підшипників, окремих агрегатів машин, апаратів електрообладнання тощо. Однак, незважаючи на зазначені обмеження, саме комплексна автоматизація здатна забезпечити розвиток виробництва в цілому і ефективне використання капітальних витрат. Це підтверджується світовою практикою розвитку машинобудування.

Здійснюючи третій рівень автоматизації виробництва, можна досягти вирішення задач автоматизації складування і міжцехового транспортування виробів з його автоматичним адресуванням, переробкою відходів і керуванням виробництвом на базі широкого використання засобів обчислювальної техніки. На цьому рівні автоматизації участь людини у виробництві на всіх його етапах зводиться до обслуговування обладнання та підтримки його в робочому стані.

Нарешті, часто використовується також поняття *інтегрованої виробничої системи*. Для інтегрованої виробничої системи характерне злиття (інтеграція) сфери інформаційної технології з виробничою сферою. Це передбачає також створення та ведення автоматизованих конструкторських і технологічних архівів і автоматизацію організаційної і конструкторсько-технологічної підготовки виробництва [1]. Організація, ведення та використання у виробництві різного роду баз даних потребує уніфікації використовуваних при цьому ідентифікаційних одиниць, перебудови всього виробництва і, як наслідок, великих зведених капітальних витрат. Проте саме в такому випадку різко скорочуються терміни освоєння нових виробів і тривалості робочих циклів їх виробництва. Рівні автоматизації наведено на рис. 1.1.

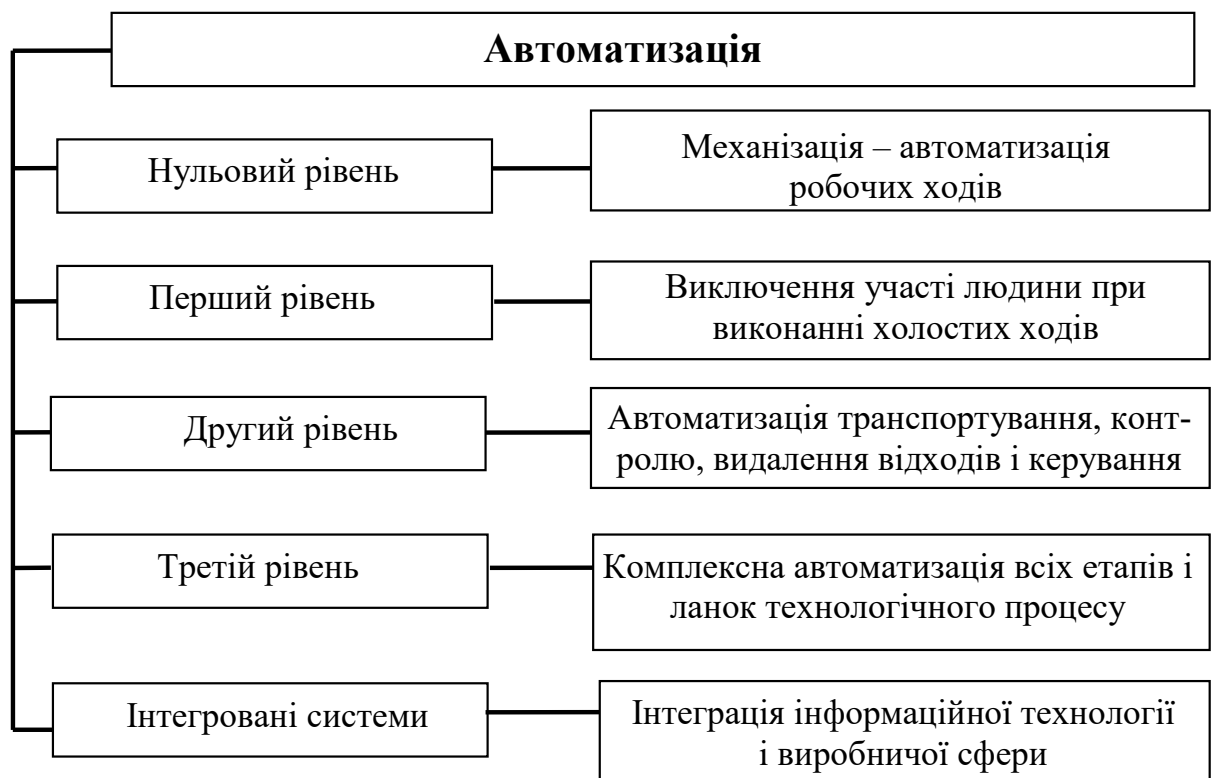


Рис. 1.1. Рівні автоматизації [1]

Автоматизація спрямована на вирішення проблем виробництва, які в умовах ринкової економіки змінюються відповідно кон'юнктури, що складається. В умовах ринкової економіки можна виділити *наступні риси, характерні для сучасного виробництва* [1]:

- автоматизація стає технологічно гнучкішою, оскільки відбувається більш швидке моральне старіння виробів, зростає розмаїття модифікацій виробів, підвищуються вимоги щодо якості і надійності машин, збільшується частка дрібносерійного і серійного виробництва;
- розвиток автоматизації відбувається на базі все більш широкого використання комп'ютерної, особливо мікропроцесорної техніки, в першу чергу в системах керування і контролю;
- значно більше, ніж раніше, уваги приділяється автоматизації заготівельних процесів і збирання.

Таким чином, нині *основними напрямками технічного прогресу, пов'язаними з розвитком автоматизації*, є:

- підвищення технологічності конструкцій машин та їх компонентів;

- створення технологічних процесів та технологічного обладнання з оптимальною концентрацією найпростіших операцій;
- широке застосування різного роду автоматичних (автоматизованих) ліній і гнучких виробничих систем у галузі автоматизації масового, серійного та дрібносерійного виробництва;
- автоматизація завантаження і розвантаження технологічного обладнання;
- автоматизація транспортування та контролю виробів, а також видалення відходів;
- автоматизація керування технологічними та виробничими процесами.

Однак, технологічні та виробничі процеси – це не одне і те ж. *Виробничим процесом* прийнято називати сукупність всіх етапів виробництва виробів (деталей) [1]. Виробничий процес включає в себе виготовлення заготовок, різні види їх оброблення, контроль якості, складання і випробування агрегатів і машин. На підприємствах виробничий процес поділяється на частини, які розміщуються в окремих спеціалізованих цехах або корпусах: ковальсько-пресове, ливарне, механозбиральне, інструментально-штампове виробництва тощо. Технологічним процесом називається частина виробничого процесу, яка безпосередньо пов'язана з механічною і термічним обробленням або складанням виробів.

Економічна ефективність застосування автоматизації різного рівня в основному зумовлюються двома факторами [1]:

- річною програмою випуску;
- технологічністю конструкції виробу і його елементів.

Для сучасного етапу розвитку автоматизації характерно не лише автоматизація власне виробничого процесу, а й автоматизація підготовки виробництва. Залежно від призначення, *системи автоматизації виробничих процесів поділяються таким чином [1]:*

- автоматичної сигналізації, призначені для оповіщення обслуговуючого персоналу про стан (роботи, очікування роботи, перебування в ремонті) того чи іншого технологічного агрегату або про перебіг того чи іншого технологічного або виробничого процесу;

- автоматичного контролю (без участі людини) за різними параметрами і величинами, що характеризують роботу того чи іншого технологічного агрегату або перебіг того чи іншого технологічного чи виробничого процесу;
- блокування та захисту, що запобігають виникненню аварійних ситуацій в тих чи інших технологічних агрегатах;
- автоматичного або автоматизованого пуску і зупинки (забезпечують включення, зупинку і реверс різних двигунів, необхідних для запрограмованого проходження того чи іншого технологічного чи виробничого процесу);
- автоматичного або автоматизованого керування роботою того чи іншого технологічного агрегату або ж їх груп, або протіканням того чи іншого технологічного чи виробничого процесу.

Загальні характеристики ТЗА

Вимірювання здійснюються за допомогою технічних засобів автоматизації, які використовують ті чи інші фізичні принципи. На об'єкт вимірювання, зазвичай, встановлюється вимірювальний перетворювач.

Вимірювальний перетворювач – це пристрій, що сприймає вимірюваний параметр і створює відповідний сигнал з метою передачі його для подальшого використання або реєстрації у формі, неприйнятній спостерігачем [1].

Вимірювальні перетворювачі (ВП) поділяються на параметричні та генераторні.

Параметричний ВП змінює будь-який зі своїх параметрів під впливом самої вимірюваної величини і потребує підключення до будь-якого зовнішнього джерела енергії [1].

Генераторний ВП сам генерує вихідний сигнал і не потребує підключення до зовнішнього джерела енергії. Як приклади датчиків такого роду, можна назвати різні п'єзоелектричні датчики тиску [1].

До параметричних датчиків належать [1]:

- резистивні;
- індуктивні;
- трансформаторні;
- ємнісні.

До генераторних датчиків належать [1]:

- термоелектричні;
- індукційні;
- п'єзоелектричні;
- оптико - електричні.

Використовуються такі основні визначення та терміни [1].

Функція перетворення вимірювального перетворювача – це залежність вихідної величини даного вимірювального перетворювача від вхідної, що задається або аналітичним виразом, або графіком, або таблицею.

Чутливість перетворювача – це величина, що показує, наскільки зміниться вихідна величина при зміні вхідної величини на одну одиницю. Для термопари одиницею чутливості буде мВ/К (мілівольт на 1 градус Кельвіна), для регульованого електродвигуна – $(с^{-1})/В$ (оборотів в секунду на 1 вольт) тощо.

Роздільна здатність перетворення – це найменша зміна вхідного сигналу, яка може бути виміряна перетворювачем.

Відтворюваність є мірою того, наскільки близькі один до одного результати вимірювань однієї і тієї ж фізичної величини.

Точність (похибка) вимірювання показує, наскільки показане датчиком значення параметра близьке до його справжнього значення. Зазвичай, точність задається у відсотках від повної шкали вимірювального приладу і внаслідок чого є деякою абсолютною величиною.

Розрізняють *статичну* і *динамічну* характеристики датчика. Під статичною характеристикою датчика розуміють залежність між усталеними значеннями вхідної і вихідної величин.

Під динамічною характеристикою датчика розуміють поведінку вихідної величини під час перехідного процесу у відповідь на миттєву (ступеневу) зміну вимірюваної вхідної величини.

Якщо в статичній характеристиці датчика будується залежність тільки між значенням вихідної величини Y у відповідь на зміну вхідної величини X , то в динамічній характеристиці датчика бере участь параметр часу t , і така набуває залежності виду $Y = X(t)$.

Очевидно, що усталеним значенням вихідної величини датчика є те значення, яке набуває його вихідна величина після закінчення всіх перехідних процесів, тобто при $t \rightarrow \infty$. Залежність між усталеними значеннями вхідних і вихідних величин стосовно датчиків називається *тарировочною кривою*. Різні види статичних характеристик вимірювальних датчиків з пропорційним виходом наведені на рис. 1.2.

На рис. 1.2, *а* наведена ідеалізована статична характеристика такого датчика. Нульовому значенню вхідної величини в цьому випадку відповідає нульове значення величини на виході.

На рис. 1.2, *б* наведена ідеалізована статична характеристика датчика із зоною нечутливості. У такого датчика зміна вхідної величини до значення ΔX , яке називається порогом чутливості, не веде до появи будь-якого сигналу на виході. Лише після того, як виявиться, що $X > \Delta X$, вихідна величина буде зростати, починаючи від нуля, пропорційно зміні вхідної величини.

На рис. 1.2, *в* наведена ідеалізована статична характеристика датчика із зоною нечутливості і насиченням виходу. У такого датчика, після досягнення порогу чутливості вихідна величина зростає пропорційно зростанню вхідної величини, але до деякого граничного значення ΔY , яке називається значенням насичення вихідної величини. Після того, як виявиться, що $Y > \Delta Y$, подальше зростання вхідної величини X не призводить ні до якого зростання Y .

Нарешті, на рис. 1.2, *г* наведена ідеалізована статична характеристика датчика із зоною нечутливості на вході, з насиченням на виході і з петлею гістерезису.

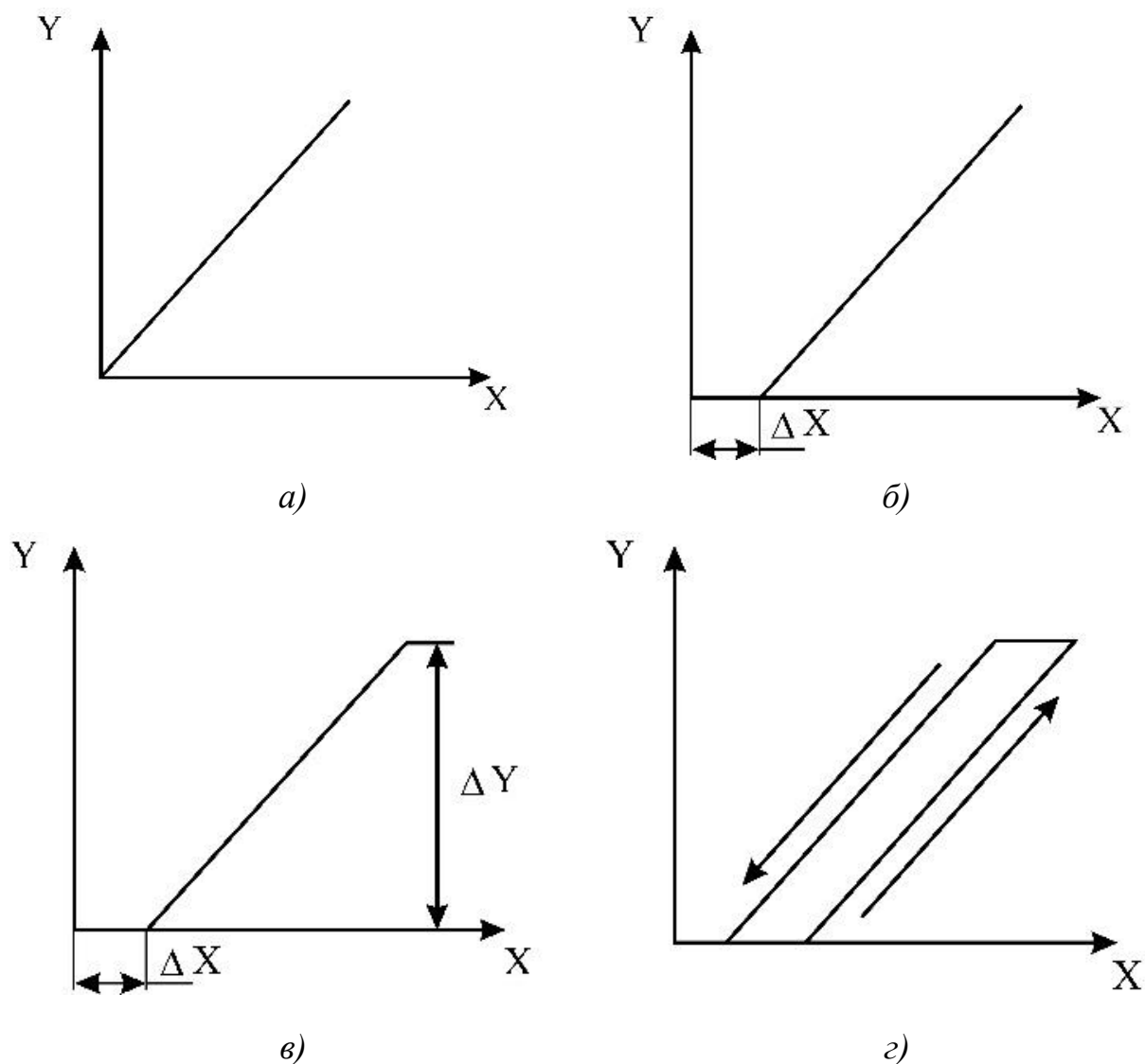


Рис. 1.2. Статичні характеристики датчиків з пропорційним виходом: а – ідеалізована статична характеристика; б – ідеалізована статична характеристика з зоною нечутливості; в – ідеалізована статична характеристика з зоною нечутливості та насиченням; г – ідеалізована статична характеристика з зоною нечутливості, насиченням і гістерезисом

Гістерезисом називається різниця між характером відповідності вихідних і вхідних величин при прямому і зворотньому ході зміни вхідної величини. Практично це виражається в тому, що значення вихідної величини при зростанні вхідної величини не збігається з її ж значеннями при зменшенні вхідної величини, а отже, при наявності гістерезису чутливість датчика при «прямому» і «зворотньому» ходах неоднакова. Зауважимо, що значення вихідної величини при зростанні вхідної величини може як

«випереджати», так і «відставати» порівнянно з її ж значеннями при зменшенні вхідної величини.

У першому випадку говорять про додатний гістерезис, а в другому – про від’ємний. Абсолютна величина різниці в значеннях X при зростанні і зменшенні вхідної величини, при яких на виході має місце одне й теж значення, називається шириною петлі гістерезису.

У ряді випадків нелінійний характер статичної характеристики датчика не є шкідливим, а може бути ефективно використаний для різних завдань автоматизації. Прикладом такого роду, що широко використовуються в різних пристроях автоматизації, є датчик зі статичною характеристикою релейного типу. При зростанні вхідної величини до того, як вона досягне порогу спрацьовування, на виході датчика буде спостерігатися нульове значення вихідної величини, а як тільки вхідна величина досягне порогу спрацьовування, вихідна величина відразу ж («стрибком») досягне своєї максимальної величини, і при подальшому зростанні вхідної величини зростати більше не буде. Прикладом такого роду може служити двопозиційне регулювання температури в звичайному домашньому холодильнику. Як тільки температура всередині холодильника досягне заданої величини, датчик температури, що називається термостатом і має релейну характеристику, включить електромотор, який прокачує хладагент (фреон). При зниженні температури електромотор відключається і температура всередині холодильника перестає знижуватися.

В ряді випадків, наприклад, при вимірюванні фактичних відхилень розміру деталі від номіналу, можливе відхилення вимірюваної величини як в додатну, так і у від’ємну сторону. Вихідна величина при цьому може бути пропорційною модулю зміни вхідної величини (або ж залежної від нього нелінійно) як без гістерезису, так і з гістерезисом. Зазвичай, для порівняння при рівних умовах динамічних характеристик різних датчиків вважають, що на їх входи надходять впливи одного і того ж виду, а саме: ступінчаті. Це означає миттєве збільшення вхідної величини. Практично це відповідає, наприклад, подачі напруги на електродвигун або подачі термопари в піч для нагріву тощо.

Двигун буде набирати обертів не миттєво, а відповідно з динамічними властивостями приводу, до якого він включений. Покази термопарі також почнуть відображати температуру в печі не миттєво, а в міру розігріву спаю цієї термопарі і тощо.

Для динамічних характеристик датчиків характерні три випадки [1].

Перший випадок відповідає чистому запізненню в датчику, коли його вихідна величина просто повторює (в певному масштабі) вхідну величину, запізнюючись відносно до неї на постійну величину.

Другий випадок відповідає аперіодичному характеру перехідного процесу, коли вихідна величина поступово наближається до нового встановленого значення монотонним чином (монотонно зменшується або ж монотонно зростає).

Третій випадок відповідає коливальному характеру перехідного процесу, коли вихідна величина поступово наближається до нового сталого значення, здійснюючи за час перехідного процесу одне або декілька коливань, перевищуючи на певний час нове значення вихідної величини, а потім повертаючись до нього.

Динамічні процеси в датчиках характеризуються *показниками якості перехідного процесу*. До них належать [1]:

- час завершення перехідного процесу;
- величина перевищення протягом перехідного процесу вихідного параметра над його новим сталим значенням;
- кількість коливань вихідної величини за час завершення перехідного процесу.

Використовується також інтегральний показник якості перехідного процесу, який, зазвичай, є підінтегральною площею кривої перехідного процесу. Для датчиків параметрів технологічних процесів важливими характеристиками є також *діапазон вимірювань* та *смуга пропускання*.

Діапазон вимірювань – різниця між допустимими максимальним і мінімальним усталеними значеннями вимірюваної величини для даного датчика [1].

Смуга пропускання – різниця між максимальною і мінімальною частотами зміни вхідної величини, для роботи з якими призначений даний датчик [1]. Що стосується похибок вимірювань виробничих параметрів, які неминуче виникають у будь-яких практичних системах автоматизації, то їх класифікують таким чином [1]:

- систематичні;
- прогресуючі;
- випадкові;
- похибки застосування.

Основні типи датчиків, або чутливих елементів, перетворюють зміну вимірюваної величини у зміну будь-якого параметра, наприклад, опору, ємності, індуктивності, заряду. Часто ці параметри об'єднують терміном *імпеданс*. Імпеданс може бути як активним, так і реактивним [1]. Наприклад, імпеданс резистивних ЧЕ – звичайний опір R , ємнісних ЧЕ – $Z = 1/(2\pi fC)$, електромагнітних ЧЕ – $Z = 2\pi fL$, де f – частота струму, що протікає через ЧЕ.

Для перетворення зміни імпедансу Z ЧЕ у параметри електричного сигналу, ЧЕ включають у вимірювальну схему. Зазвичай використовують параметричні й генераторні схеми. Функція перетворення параметричної схеми: $U_{\text{вих}} = f_1(Z_{\text{че}}, Z_c)$. Функція перетворення генераторної схеми: $\omega_{\text{вих}} = -f_1(Z_{\text{че}}, Z_c)$, де Z – імпеданс ЧЕ, Z_c – імпеданс вимірювальної схеми, $\omega_{\text{вих}}$ – частота вихідного сигналу.

Контрольні питання до практичного заняття 1

1. Що таке *автоматизація*.
2. Які Ви знаєте *рівні автоматизації*. Дайте їх визначення.
3. Основні визначення та терміни автоматизації.
4. Що таке *система автоматизації виробничих процесів*.
5. Що таке *робочий цикл, робочі ходи, холостий хід*.
6. Риси, характерні для сучасного виробництва.
7. Розкрийте поняття *виробничий процес*.

8. Поняття *інтегрованої виробничої системи*.
9. Що розуміють під *сигналом вимірювальної інформації* ТЗА?
10. Дайте визначення *перетворюючому елементу* ТЗА.
11. Що таке *синтез і аналіз* ТЗА?
12. Які параметри застосовуються як сигнали вимірювальної інформації ТЗА?
13. Які операції виконують в загальному випадку з сигналами вимірювальної інформації?

Заняття 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета практичного заняття 2 – розглянути основні види характеристик перетворювачів ТЗА (статичні та динамічні характеристики перетворювачів); похибки перетворювачів.

Загальні рівняння перетворювачів ТЗА та їх основні характеристики

У загальному випадку процес перетворення інформації є динамічним і його можна описати відповідним диференціальним рівнянням, що характеризує залежність вихідної величини перетворювача від вхідної та їх похідних, а також від зовнішніх факторів, що впливають на роботу ПФВ ТЗА, тобто

$$F(y_{вих}, \dot{y}_{вих}, \ddot{y}_{вих}, \dots, y_{вих}^{(n)}, t, x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх}, \dots, x_{вх}^{(m)}, f_{в1}, f_{в2}, \dots, f_{вv}) = 0, \quad (2.1)$$

де F – в загальному випадку нелінійна функція; $\dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх}, \dots, x_{вх}^{(m)}$ – похідні від вхідної величини за часом; $f_{в1}, f_{в2}, \dots, f_{вv}$ – збурюючі фактори, які впливають на роботу перетворювача; $\dot{y}_{вих}, \ddot{y}_{вих}, \dots, y_{вих}^{(n)}$ – похідні від вхідної величини за часом.

Рівняння (2.1) – це один з різновидів математичної моделі вимірювального перетворювача.

Отже, рівнянням вимірювального перетворювача ТЗА називатимемо математичні часові залежності вихідної величини від вхідної і від збурень, що впливають на процес перетворення [1].

У деяких випадках рівняння вимірювального перетворювача, що враховує динаміку процесу перетворення, можна подати у вигляді рівняння

$$F_{вих}(y_{вих}, \dot{y}_{вих}, \ddot{y}_{вих}, \dots, y_{вих}^{(n)}, t) = F_{вх}(x_{вх}, \dot{x}_{вх}, \ddot{x}_{вх}, \dots, x_{вх}^{(m)}, f_{в1}, \dots, f_{вv}), \quad (2.2)$$

яке називають динамічним рівнянням, або динамічною моделлю, вимірювального перетворювача ТЗА [1].

Рівняння *усталеного режиму* (математична модель в усталеному режимі), яке визначає залежність вихідної величини від вхідної в усталеному режимі (при $t=\infty$) роботи перетворювача ТЗА, можна отримати з рівняння (2.2), якщо

$$\begin{aligned}\dot{y}_{вих} &= 0, \ddot{y}_{вих} = 0, \dots, y_{вих}^{(n)} = 0; \\ \dot{x}_{вх} &= 0, \ddot{x}_{вх} = 0, \dots, x_{вх}^{(m)} = 0.\end{aligned}$$

Тоді рівняння (3.2) набуває вигляду [1]

$$F_{вих}(y_{вих}) = F_{вх}(x_{вх}, f_{в1}, f_{в2} \dots, f_{в\nu}). \quad (2.3)$$

Останнє рівняння часто записують так:

$$y_{вих} = F_{вх}(x_{вх}, f_{в1}, f_{в2} \dots, f_{в\nu}). \quad (2.4)$$

Якщо вплив зовнішніх факторів зведено до допустимого мінімуму, то рівняння (2.4) можна спростити [1]:

$$y_{вих} = F_{вх}(x_{вх}). \quad (2.5)$$

Рівняння виду (2.5) називають *статичним рівнянням, градуовальною або статичною характеристикою* [1]. Статичне рівняння вимірювального перетворювача визначає залежність вихідної величини від вхідної в статичному режимі роботи.

Статичні характеристики бувають лінійні та нелінійні. Лінійною статичною характеристикою ПФВ є тоді, коли вихідний параметр лінійно залежить від вхідного. З рис. 2.1, а бачимо, що при

$$\begin{aligned}-x_{вх.т} &\leq x_{вх} \leq x_{вх.т}; \\ -y_{вих.т} &\leq y_{вих} \leq +y_{вих.т}\end{aligned} \quad (2.6)$$

виконується рівняння

$$y_{вих} = k_x x_{вх},$$

де k_x – коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача, або його чутливість.

Чутливість характеризується кутом α нахилу лінійної характеристики:

$$k_x = \frac{y_{вих}}{x_{вх}} = \operatorname{tg} \alpha = S_x.$$

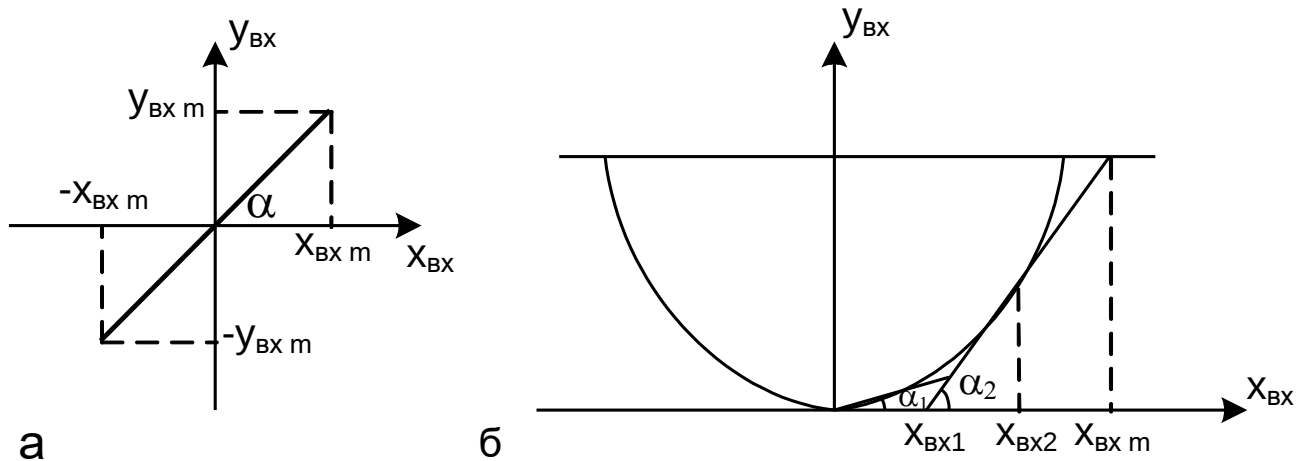


Рис. 2.1. Статична характеристика ТЗА: а – лінійна; б – нелінійна

У разі *нелінійної статичної характеристики* вимірювального перетворювача вихідна величина нелінійно залежить від вхідної (рис. 2.1, б), тобто

$$y_{вих} = y_{вих}(x_{вх}),$$

де $y_{вих}(x_{вх})$ – нелінійна функція.

Отже, *чутливість вимірювального перетворювача* є функцією вхідної величини:

$$S_x(x_{вх}) = \frac{dy_{вих}}{dx_{вх}}.$$

Наприклад, якщо (рис. 2.1, б)

$$y_{вих} = ax^2,$$

то

$$S_x(x_{вх}) = 2ax_{вх}.$$

У загальному випадку

$$y_{вих} = y_{вих}(x_{вх}, f_{в1}, f_{в2}, \dots, f_{вv}),$$

тоді

$$S_x = k_x(\dot{x}, \dot{f}_{e1}, \dot{f}_{e2}, \dots, \dot{f}_{ev}).$$

Наприклад, на практиці чутливість існуючих вимірювальних перетворювачів [1]

$$S_x = S_x(\Theta^o, P, n, \dots) = \text{var},$$

якщо змінюється будь-який з параметрів

$$\Theta^o = \text{var}, P = \text{var}, n = \text{var}.$$

Реальні вимірювальні перетворювачі мають *порог чутливості*, який характеризується найменшим значенням вхідної величини $X_{\text{вх}0}$, при якому на виході перетворювача з'являється вихідна величина (рис. 2.2).

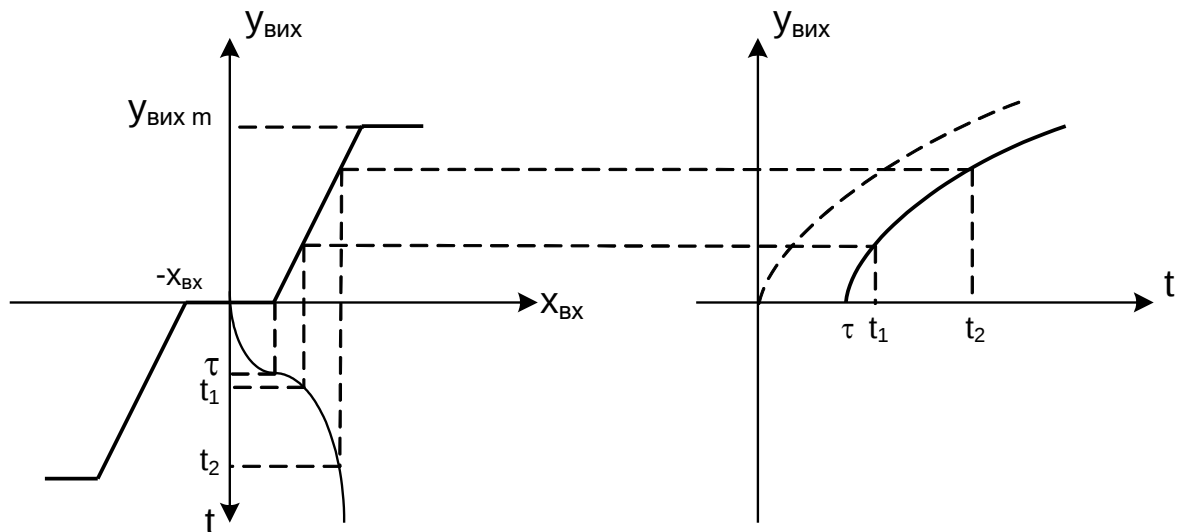


Рис. 2.2. До визначення порогу чутливості

Очевидно, що наявність у характеристиці ПФВ ТЗА порогу чутливості спричиниться до появи в процесі перетворення часового запізнювання τ . При цьому

$$y_{\text{вих}}(t) = k_x x_{\text{вх}}(t - \tau).$$

Реальні вимірювальні перетворювачі мають свої *діапазони перетворень*, які характеризують область значень вхідної величини, для якої нормовані допустимі похибки вимірювального перетворювача:

$$D = x_{\text{вх.max}} - x_{\text{вх.min}},$$

Якщо

$$\Delta y_{вих} \leq \Delta y_{вих.доп},$$

де $\Delta y_{вих.доп}$ – допустимі значення похибок вихідної величини.

У разі симетричної статичної характеристики (див. рис. 2.1, а) діапазон перетворень

$$D = x_{вх.т} - (-x_{вх.т}) = 2x_{вх.т}.$$

Загальні положення про похибки перетворювачів ТЗА

Розрізняють абсолютні похибки перетворювача за входом і за виходом.

Абсолютна похибка ПФВ ТЗА за входом – це різниця між значенням $x_{вх}^*$ вхідної величини реального перетворювача (яке називають приладним) і істинним її значенням в усталеному режимі роботи [1-5]:

$$\Delta x_{вх} = x_{вх}^* - x_{вх}.$$

При цьому приладне значення $x_{вх}^*$ обчислюють за відповідною статичною характеристикою перетворювача $y_{вих}^*(x_{вх}^*)$.

Абсолютна похибка ПФВ ТЗА за виходом є різницею (рис. 2.3) між значенням вихідної величини реального перетворювача $y_{вих}^*$ в усталеному режимі його роботи (при $t=\infty$) і її істинним значенням за відсутності похибок вхідної величини ($\Delta x_{вх} = 0$) [1-5]:

$$\Delta y_{вих} = y_{вих}^*(\infty) - y_{вих}.$$

Динамічна похибка вимірювального перетворювача ТЗА – це різниця між значенням вихідної величини $y_{вих}^*(t)$ в перехідному режимі і її значенням $y_{вих}^*(\infty)$ в усталеному режимі (рис. 2.3) [1-5]:

$$\Delta y_{вих.д}(t) = y_{вих}^*(t) - y_{вих}^*(\infty).$$

Інструментальна похибка ПФВ ТЗА – це різниця між приладним значенням вихідної величини і її істинним значенням у всіх режимах роботи [1-5]:

$$\Delta y_{вих}(t) = y_{вих}^*(t) - y_{вих}(t).$$

Очевидно, що

$$\Delta y_{вих}(t) = \Delta y_{вих.д}(t) + \Delta y_{вих.ст.}$$

При $t \rightarrow \infty \Delta y_{вих.д}(t) \rightarrow 0, \Delta y_{вих}(t) \rightarrow \Delta y_{вих.ст.}$

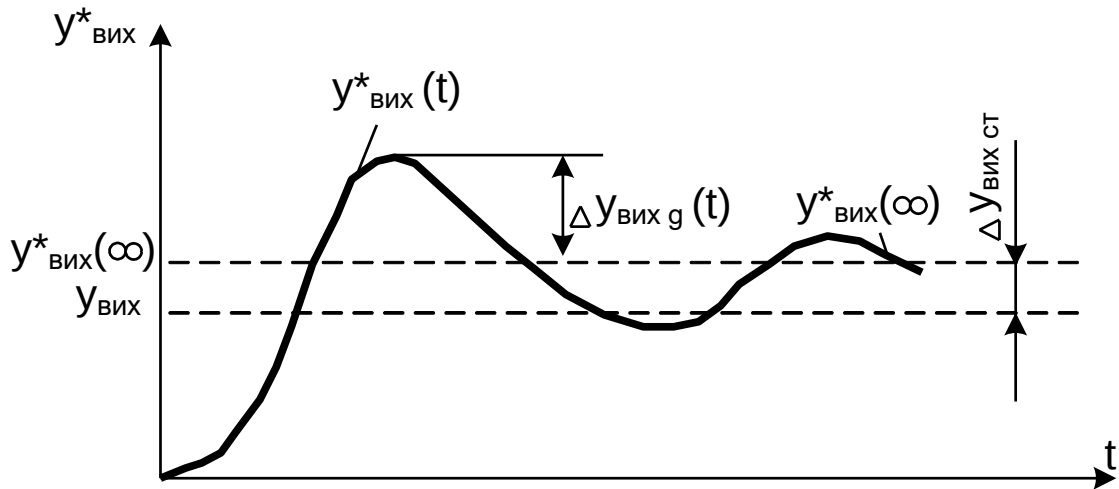


Рис. 2.3. До визначення динамічної похибки ТЗА

Контрольні питання до заняття 2

1. Сформулюйте основні вимоги до перетворюючих пристроїв приладів ТЗА.
2. Дайте визначення математичній моделі ТЗА.
3. Дайте визначення рівнянню динаміки ТЗА.
4. Дайте визначення рівнянню статички ТЗА.
5. Дайте визначення чутливості ТЗА.
6. Дайте визначення абсолютній та відносній похибкам ТЗА.

Заняття 3

ПАРАМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Мета практичного заняття 3: вивчити основні типи параметричних вимірювальних перетворювачів, ознайомитись з їх перевагами та недоліками. Навчитись проводити розрахунки лінійних, функціональних потенціометричних перетворювачів; ємнісних; індуктивних та трансформаторних перетворювачів.

ЛІНІЙНІ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ПП)

Необхідно ознайомитись з принципом дії параметричного вимірювального перетворювача: потенціометричного лінійного потенціометра та розрахувати його основні параметри.

Короткі теоретичні відомості щодо ПП

Призначення ПП: перетворення лінійних і кутових переміщень у відповідні напруги $x(\varphi) \rightarrow U$.

Конструкція ПП

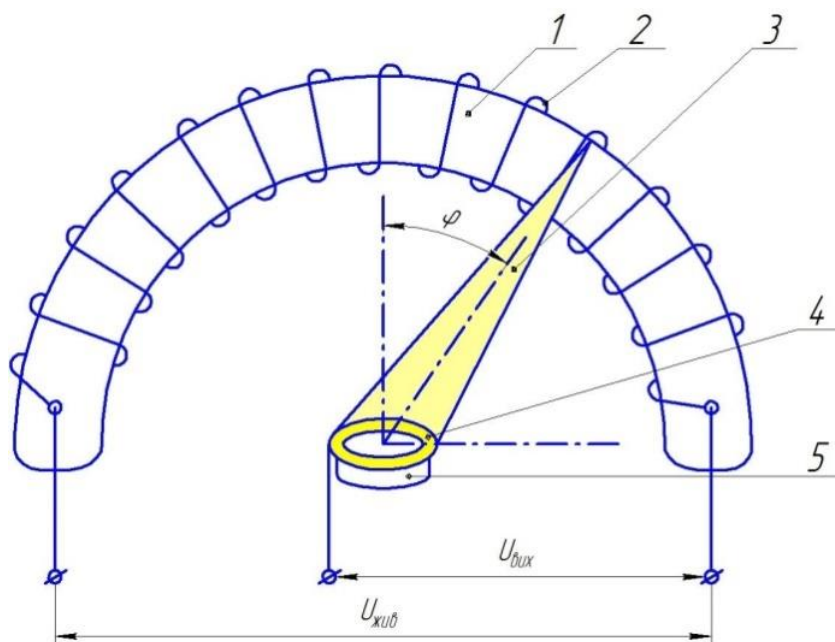


Рис. 3.1. Конструкція ПП: 1 - ізольований каркас; 2 - ізольований дріт; 3 - струмоз'ємний движок (щітка), що ковзає по спіралі; 4 - струмоз'ємне кільце; 5 - привідний валик.

Матеріали:

Спіралі обмотки: емальований або оксидований дріт високого опору

а) Для високоточних ПП - платина, золото, срібло та їх сплави.

б) Для ПП середньої точності - константан, ніхром, манганін.

Ізоляційне покриття дроту: емаль або плівка окислів товщиною 10 мкм

Каркасів:

а) Для високоточних ПП - АМГ, сплави алюмінію (Д1, Д16).

Металеві каркаси ізолюють лаками.

б) Для ПП середньої точності - текстоліт марок А, Б, В; гетинакс марок АВ; ебоніт; оргскло; пресована кераміка

Типи ПП:

1. Дротяні (обмотувальні), (одно- і багатооборотні).
2. Плівкові, в яких робочий шар напівпровідника (родію), нанесений на ізоляційний каркас зі скла.
3. З рідинним (ртутним) контактом.

Переваги ПП:

1. Працюють на постійному і змінному струмі ($=, \infty$).
2. Мала маса, габарити.
3. Відсутність впливу зовнішніх електромагнітних полів.
4. Висока точність.

Недоліки ПП:

1. Наявність контакту щітки і обмотки.
2. Наявність M_{np} ; дискретна характеристика.
3. Низька надійність (за рахунок зношення контактів).
4. Шум на виході ПП.

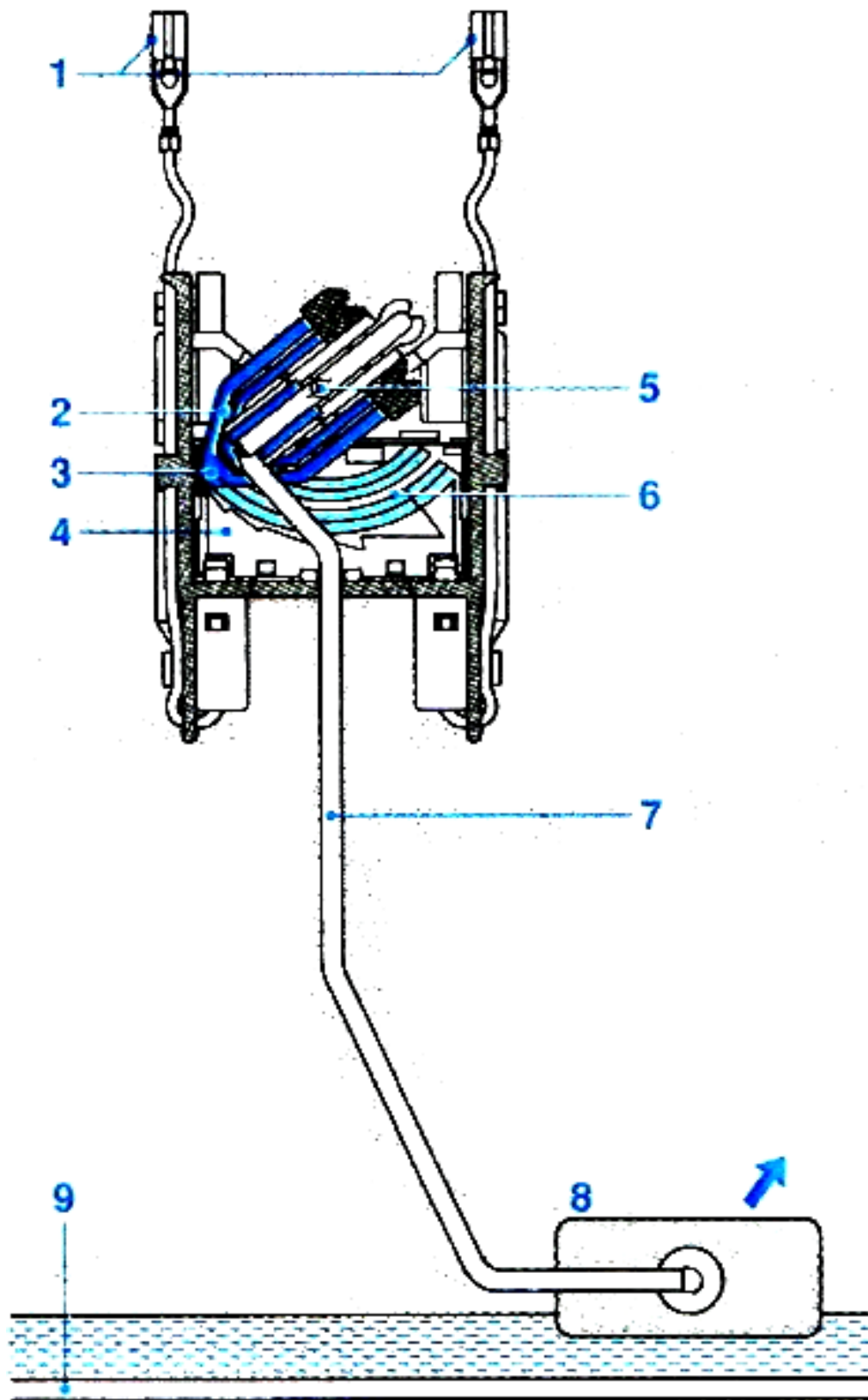


Рис. 3.2. Потенціометричний датчик рівня заповнення паливного бака:
 1 - електричні підключення; 2 - поля контактів ковзання; 3 - контактна заклепка; 4 - плата опору; 5 - штифт підшипника; 6 - подвійний контакт;
 7 - важіль поплавка; 8 - поплавок; 9 - дно паливного бака

Приклади практичного застосування ПП:

В автомобілі потенціометри широко використовуються в якості датчика:

- положення колінчастого валу та розподільного валу;
- положення дросельної заслінки (рис.3.3.);
- положення педалі акселератора;
- частоти обертання колеса;
- кута повороту рульового колеса;
- датчика положення педалі газу або модуля педалі газу для визначення бажаного моменту повороту для управління двигуном;
- об'ємного витратоміра повітря для визначення обсягу повітря, яке всмоктує двигун;
- датчика рівня заповнення паливного бака (рис.3.2.) і ін.

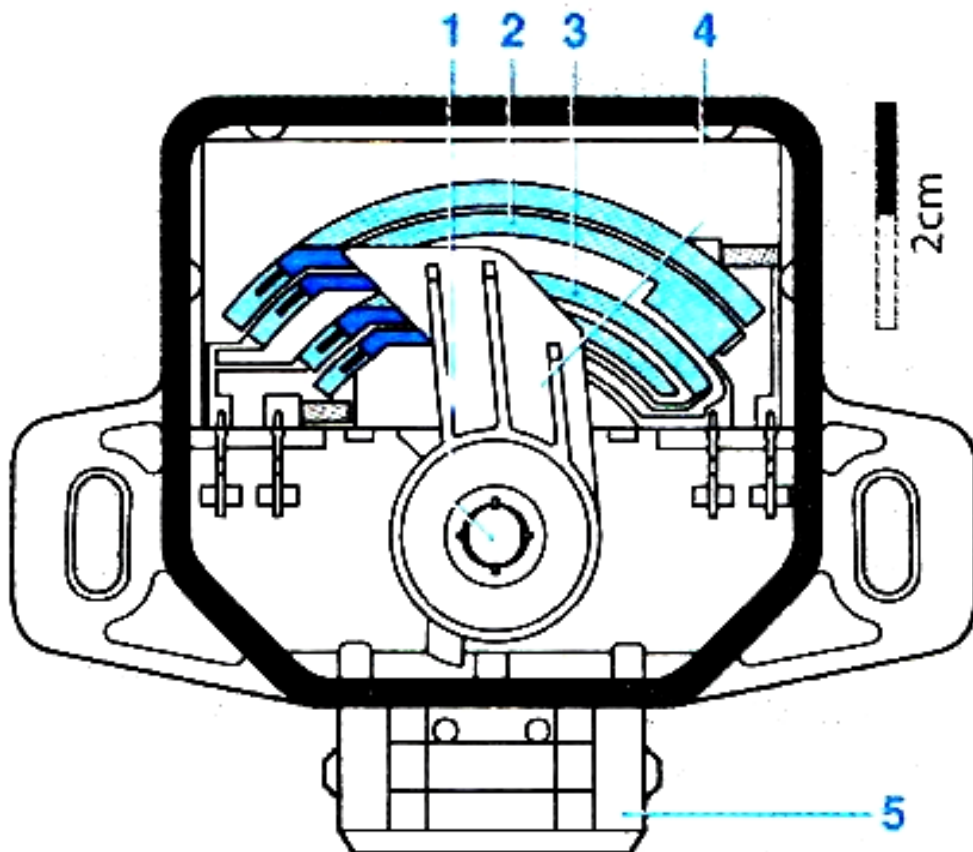


Рис. 3.3. Датчик дросельної заслінки : 1 - вал дросельної заслінки; 2 - доріжка опору 1; 3 - доріжка опору 2; 4 - цапфа ковзаючого контакту з ковзаючими контактами; 5 - електро-підключення

Приклад і варіанти розв'язання задач

Лінійний потенціометричний перетворювач

Лінійний ПП з лінійним розподілом опору вздовж каркаса потенціометра (рис. 3.4)

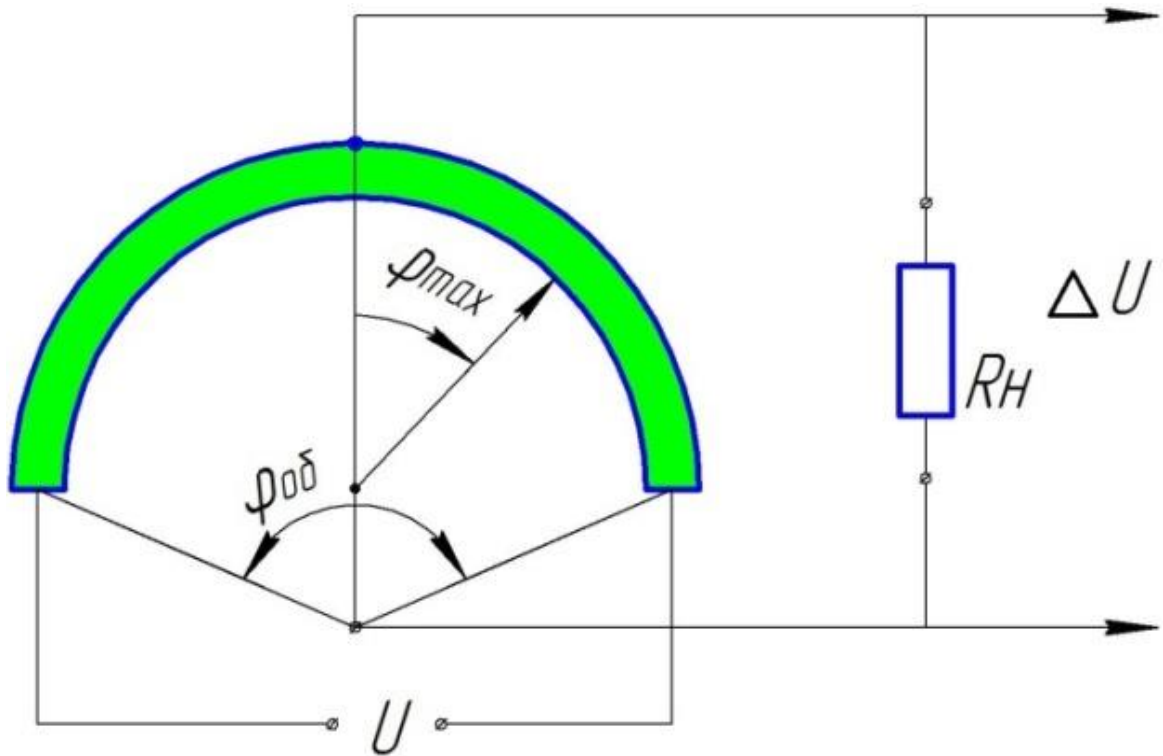


Рис. 3.4. Лінійний ПП

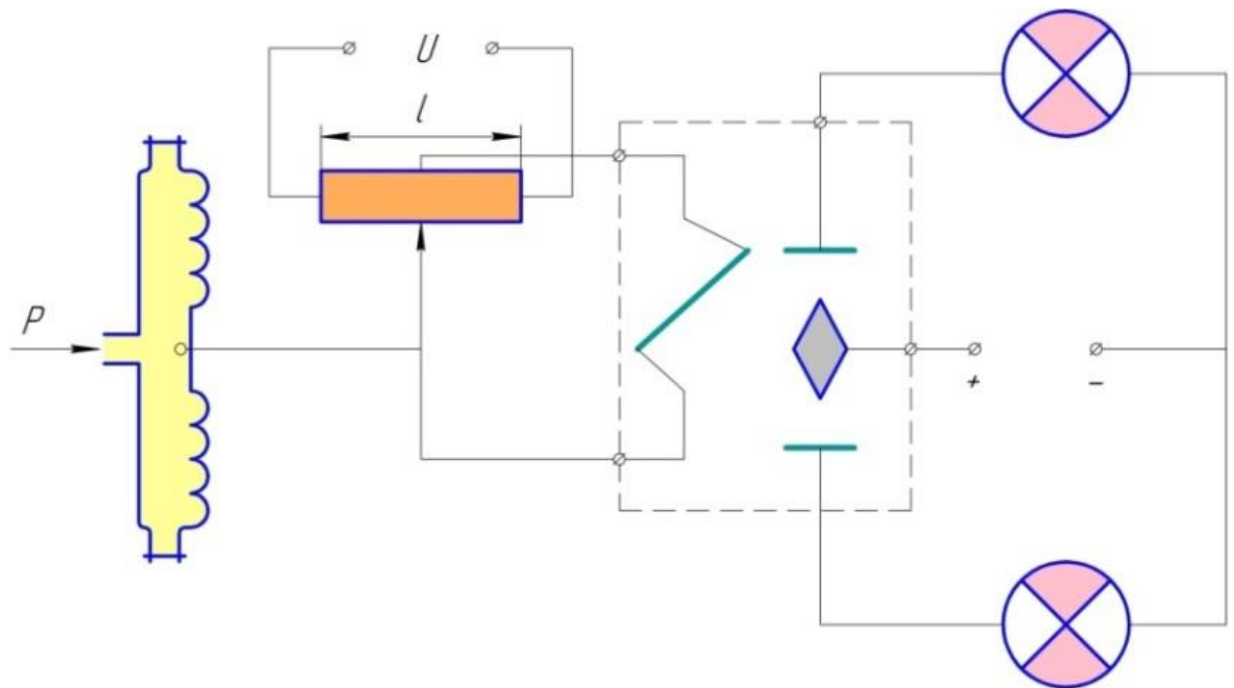


Рис. 3.5. ПП для сигналізації зміни тиску

Розрахунок лінійного потенціометричного перетворювача

Лінійним ПП називається перетворювач з лінійним розподілом опору вздовж каркаса потенціометра, тобто такий, що має лінійну статичну характеристику в режимі холостого ходу.

Розглянемо схему, зображену на рис. 3.6.

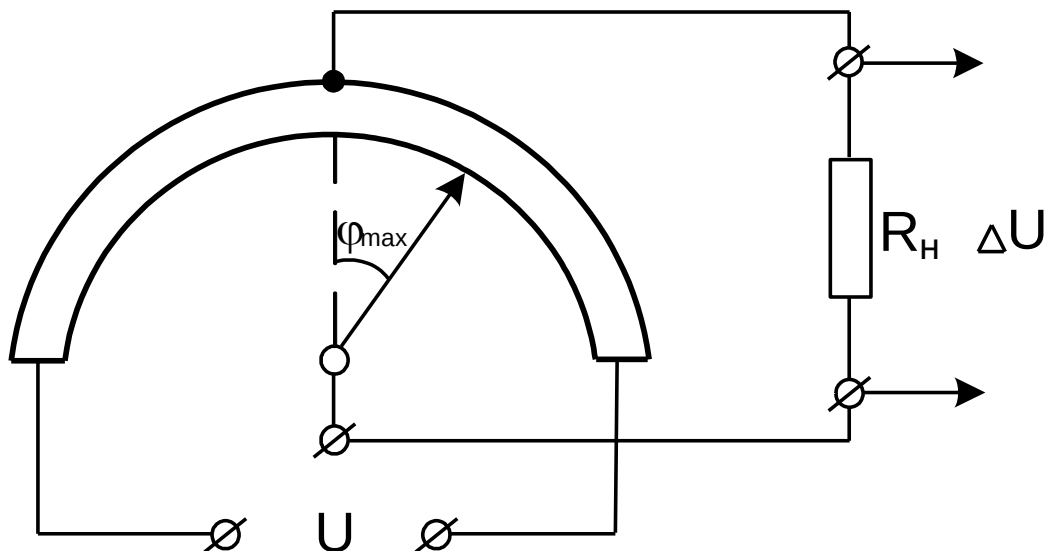


Рис. 3.6. Схема ПП для його розрахунку

Нехай задано вихідні параметри для розрахунку: напругу живлення U і максимальний кут повороту движка (щітки) $\varphi_{\max}$.

Кут обмотки ПП $\varphi_{\text{об}}$ має задовольняти співвідношенню $\varphi_{\text{об}} > 2\varphi_{\max}$. Для ПП з лінійним переміщенням движка $l > 2x$.

Чутливість ПП з кутовим переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{u}{\varphi_{\text{об}}}$. Для ПП з лінійним переміщенням движка $S = \frac{\Delta u}{\Delta l} = \frac{u}{l}$, звідки можна отримати значення крутості характеристики ПП. Опір обмотки ПП

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\omega} \cdot \omega}{q \cdot 10^3},$$

де ρ – питомий опір проводу обмотки. Ом·мм²/м; l_{ω} – середня довжина одного витка, мм; ω – число витків обмотки на каркасі; q – площа поперечного перерізу проводу обмотки, мм².

Враховуючи, що число витків обмотки

$$\omega = \frac{l}{d_{i3}},$$

де l – довжина обмотки на каркасі по дузі каркаса або по робочій доріжці, мм (рис. 3.7); d_{i3} – діаметр обмотувального проводу з ізоляцією, мм, дістаємо формулу для визначення опору обмотки у вигляді:

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\omega} \cdot l}{q \cdot d_{i3} \cdot 10^3}.$$

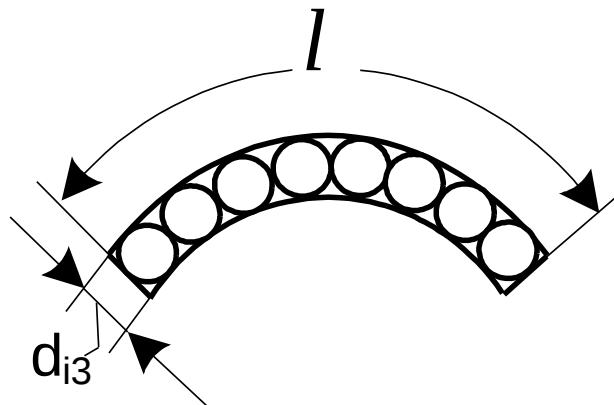


Рис. 3.7. Довжина обмотки на каркасі ПП

Довжину обмотки на каркасі по дузі каркаса або по робочій доріжці можна знайти з пропорції

$$2\pi r - 360^{\circ},$$

$$l - \varphi_{об},$$

де r – радіус кривини каркаса або робочий радіус движка, мм,

$$l = \frac{2\pi r \varphi_{об}}{360^{\circ}}.$$

Тоді вираз для опору обмотки ПП запишемо у вигляді

$$R = \frac{2\pi \cdot r \cdot \varphi_{об} \cdot \rho \cdot l_{\omega}}{360^{\circ} \cdot q \cdot d_{i3} \cdot 10^3}.$$

Для каркаса ПП прямокутного перерізу (рис. 3.8) середня довжина одного витка

$$l_{\omega} = 2(h + b) + \pi d_{i3},$$

де h – висота каркаса; b – товщина каркаса.

Для струму U/R , який проходить через ПП, необхідно виконати співвідношення $(U/R) \ll I_{\text{доп}}$, де $I_{\text{доп}}$ – максимально допустимий струм з точки зору нагрівання обмотки; $I_{\text{доп}} = q\delta$, де δ – густина струму, А/мм².

$$\text{Тоді } \frac{U}{R} \leq q\delta \text{ або } \frac{U}{q\delta} \leq R.$$

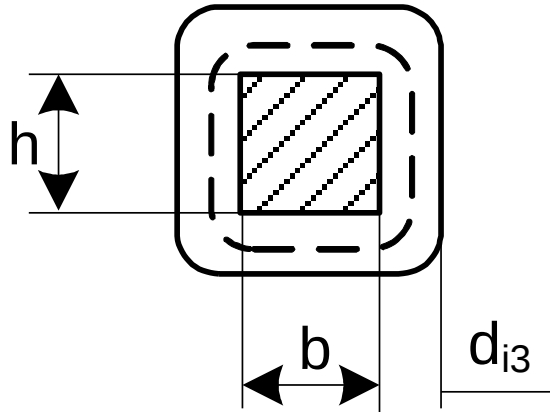


Рис. 3.8. Середня довжина одного витка

Враховуючи вираз для розрахунку опору, маємо:

$$\frac{U}{\delta} \leq \frac{2\pi \cdot r \cdot \varphi_{об} \cdot \rho \cdot l_{\omega}}{360^{\circ} \cdot d_{i3} \cdot 10^3}.$$

Здобутий вираз є основним розрахунковим співвідношенням для ПП.

Матеріал проводу, а, отже, і ρ , вибирають згідно з призначенням і загальними умовами роботи ПП.

Допустиму густину струму δ вибирають залежно від матеріалу каркасу, умов теплообміну. На практиці густина струму $\delta = 5 \dots 30$ А/мм². За умови відомого перерізу обмотувального дроту допустима густина струму визначається силою допустимого струму.

В свою чергу допустимий струм можна знайти з умови забезпечення правильного теплообміну (виключення перегріву ПП):

$$\frac{I_{\text{доп}}^2 R}{\mu S} \leq t_{\text{max nn}} - t_{\text{min nc}},$$

де μ – коефіцієнт тепловіддачі (звичайно перебуває в межах 0,12...0,14 Вт/(дм³·°С); S – площа поверхні охолодження ПП, дм²; $t_{\text{max nn}}$ – максимально

допустима температура для даної конструкції ПП; $t_{\max \text{ нс}}$ – максимальна температура навколишнього середовища.

З метою зменшення моменту зворотної дії радіус розточки каркаса (або робочу довжину движка) r по змозі слід вибирати малим.

Момент зворотної дії визначається моментом сил сухого тертя:

$$M_{\text{тер}} = Pfr ,$$

де P – сила натягу щітки ПП (величина P коливається від десятих часток грама до декількох грамів); f – коефіцієнт сил сухого тертя при русі щітки по обмотці (орієнтовно $f=0,2\dots0,4$).

Якщо в якості вихідних будуть задані інші параметри, послідовність розрахунку потрібно змінити.

Як приклад виконаємо розрахунок ПП для сигналізації зміни тиску на 0,1 ат. від нормального, що дорівнює 2 ат.

Принципову схему сигналізатора зміни тиску зображено на рис. 3.9. Мембрана використовується як чутливий елемент і дає переміщення движка $\Delta l=1$ мм при зміні тиску на 0,1 ат. ПП працює на поляризоване реле з напругою спрацьовування $\Delta U=0,5$ В. Напруга живлення ПП дорівнює $U = 26$ В. Каркас ПП квадратного перерізу ($h=b$). Опір реле $R_{\text{н}}=5000$ Ом.

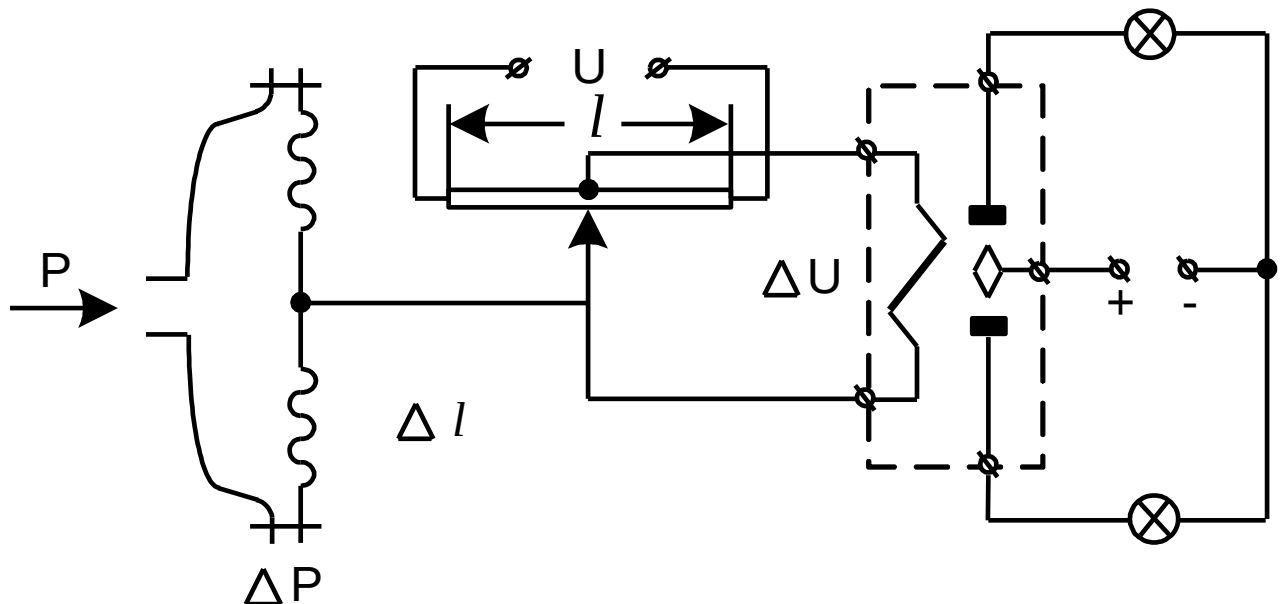


Рис. 3.9. Потенціометричний перетворювач для сигналізації зміни тиску

Оскільки опір реле досить великий і в нормальному стані движок потенціометра перебуває в нульовому положенні, то в розрахунок замість ΔU можна підставити безпосередньо напругу спрацьовування реле.

Послідовність розрахунку

1. Вибираємо, як обмотувальний провід константан марки Е-2Н16 з такими характеристиками: $d_{iz}=0,28$ мм, $q=0,0491$ мм², $\rho=0,49$ Ом·мм²/м, $\delta=3$ А/мм².

2. Загальну довжину обмотки на каркасі по дузі каркаса ПП визначаємо з співвідношення:

$$\frac{U}{l} = \frac{\Delta U}{\Delta l},$$

тобто

$$l = U \frac{\Delta l}{\Delta U} = 26 \frac{1}{0,5} = 52 \text{ мм.}$$

3. Загальне число витків

$$\omega = \frac{l}{d_{iz}} = \frac{52}{0,28} = 185.$$

4. Загальний опір

$$\omega = \frac{U}{q\delta} = \frac{26}{0,0491 \cdot 3} = 176,4 \text{ Ом.}$$

5. Середня довжина одного витка може бути знайдена з співвідношення

$$R = \frac{\rho l_{\omega} \omega}{q 10^3}.$$

Тоді

$$l_{\omega} = \frac{R q 10^3}{\rho \omega} = \frac{176,4 \cdot 0,0491 \cdot 10^3}{0,49 \cdot 185} = 93,5 \text{ мм.}$$

6. Знаючи довжину одного витка l_{ω} , потрібні габаритні розміри квадратного перерізу ПП легко визначити з формули

$$l_{\omega} = 2(h+b) + \pi d_{iz},$$

$$b = h = 23,1 \text{ мм.}$$

Для прямокутного перерізу каркаса, задавшись однією з величин (наприклад, товщиною b каркаса), визначимо інший розмір каркаса h .

7. Перевіримо відносну похибку ξ в напрузі, яка знімається з движка ПП при переміщенні його на 1 мм:

$$\xi = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{l} \left(1 - \frac{\Delta x}{l} \right) \frac{R}{R_H}} = 0,00066 = 0,066\% .$$

Це цілком допустимо, тим більше, що практично зміна напруги завжди відбувається стрибками при переміщенні движка з витка на виток.

Варіанти завдання розрахунку ПП:

У потенціометричному перетворювачі для сигналізації зміни тиску (рис. 3.5.), мембрана, використовувана як чутливий елемент, дає переміщення движка Δl при зміні тиску. ПП працює на поляризоване реле з напругою спрацювання ΔU . Напруга живлення ПП дорівнює U . Каркас квадратного перерізу. Опір реле $R_H = 5000 \text{ Ом}$. Знайти геометричні параметри каркасу.

Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

Таблиця 3.1

Вихідні дані:

<i>Умовне позначення</i>	<i>Варіанти</i>										<i>Одиниці вимірювання</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	
$U =$	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	В
$\Delta U =$	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	В
$\Delta l =$	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	мм
$\delta =$	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	А/мм ²
$d =$	0,28										мм
$q =$	0,049										мм ²
$\rho =$	0,49										Ом·мм ² /м

Відповіді до задач:

	<i>Варіанти</i>									
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
h=b	7,4	7,4	6,4	12,3	10,5					

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Необхідно ознайомитись з принципом дії функціонального потенціометричного перетворювача та розрахувати його основні параметри.

Функціональний потенціометричний перетворювач (ФПП) – це перетворювачі з нелінійним розподілом опору вздовж каркаса, тобто із змінним співвідношенням $\Delta R/\Delta x$ або $\Delta R/\Delta \varphi$. Такі ПП використовуються для компенсації власної нелінійності навантаженого ПП або нелінійності одного чи декількох елементів схеми приладу (або системи), увімкнених до чи після ПП.

Застосовуються такі методи отримання нелінійного розподілу опору по довжині потенціометра:

- 1) намотка проводу потенціометра змінним кроком;
- 2) використання обмотувального проводу з різними діаметрами або з різними питомими опорами;
- 3) створення змінної довжини витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркаса (зміна плавна або ступінчаста);
- 4) шунтування ділянок потенціометра з лінійним розподілом опору сталими опорами.

Два останніх методи найпростіші і тому застосовуються частіше за інші.

Іноді, щоб дістати нелінійну залежність, використовують спеціальні кінематичні ланки.

Виконаємо розрахунок функціонального потенціометра із змінною довжиною витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркаса (так званого профільного ПП).

Профільний потенціометр (рис. 3.10) у звичайному виконанні – це плоска ізоляційна пластинка (каркас) невеликої товщини, з одного боку прямолінійна, а з другого – вирізана по деякій кривій. На таку пластинку щільно (виток до витка) намотується дріт. До кінців ПП підводиться напруга живлення U , а з його движка знімається напруга $U_{\text{вих}}=f(x)$, функціонально залежна від переміщення x движка.

Вид залежності $U_{\text{вих}}$ від x визначається формою вирізу каркаса потенціометра, тобто залежністю його висоти h від переміщення x движка $h=\varphi(x)$.

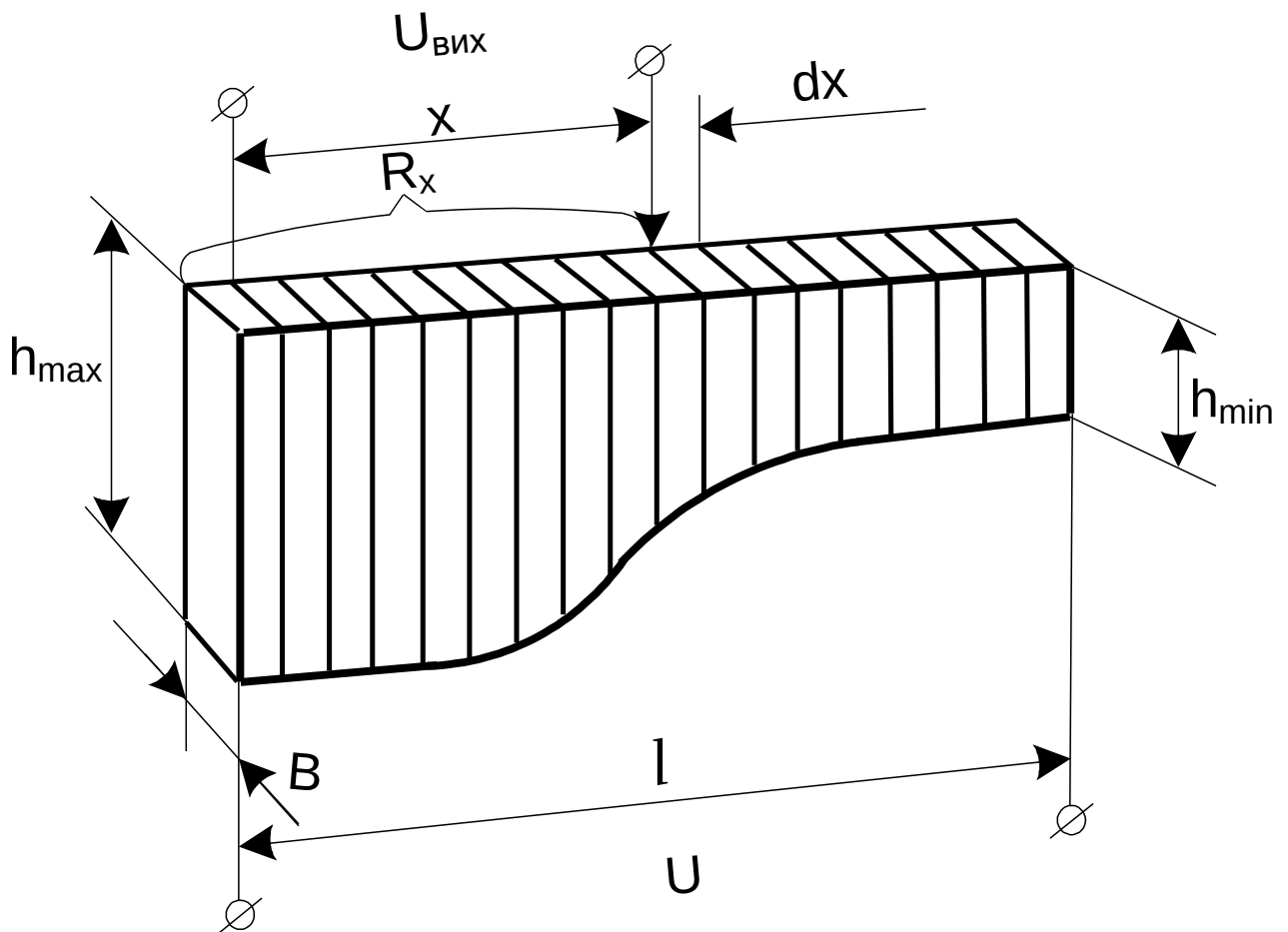


Рис. 3.10. Профільний потенціометр

Знайдемо залежність $h=\varphi(x)$, необхідну для того, щоб дістати потрібну форму рівняння $U_{\text{вих}}=f(x)$. Вважатимемо, що намотування дроту на каркасі рівномірне і ПП працює на великий опір навантаження.

Перемістимо движок потенціометра із деякого довільного положення x на невелику ділянку dx . Тоді приріст dR_x опору R_x можна записати у вигляді

$$dR_x = \rho \frac{\frac{\omega}{l} d \cdot x \cdot l_{\omega}}{q}$$

або, без урахування довжини витка на заокругленнях,

$$dR_x = \frac{\rho \cdot \omega}{l \cdot q} d \cdot x \cdot 2(h + b).$$

Величина ω/l дає числове значення кількості витків на одиницю довжини потенціометра.

При цьому приріст напруги на вихідних клеммах

$$dU_{\text{вих}} = I \cdot d \cdot R_x = \frac{U}{R} d \cdot R_x = \frac{2U\rho\omega}{lqR} (h + b) d \cdot x$$

Звідси висота каркаса

$$k = \frac{lqR}{2U\rho\omega}, \quad h = k \frac{dU_{\text{вих}}}{d \cdot x} - b,$$

де h – стала величина, не залежна від x .

Отже, потрібну форму каркаса потенціометра можна визначити, якщо продиференціювати по x задану залежність вихідної напруги від переміщення движка ПП.

Нехай, наприклад, потрібно дістати залежність $U_{\text{вих}} = cx$ (рис. 3.11).

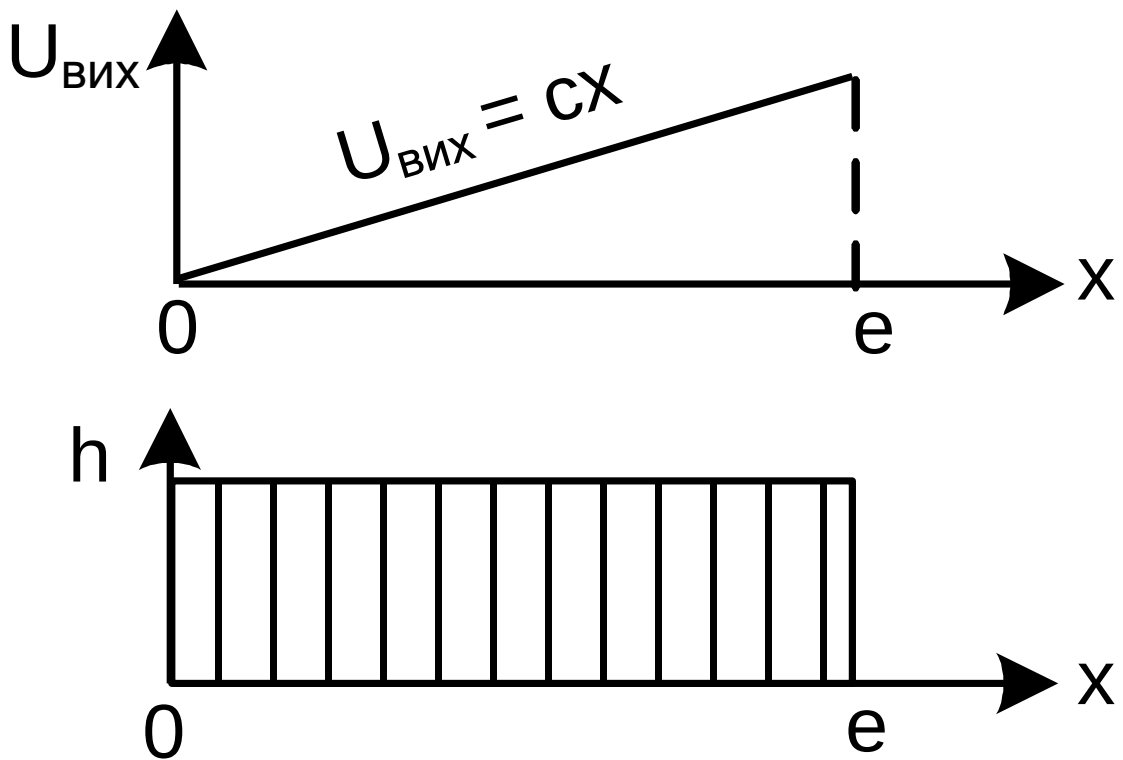


Рис. 3.11. Зміна висоти каркаса ПП з лінійною залежністю

Згідно з наведеною формулою висота каркаса

$$h = k \frac{d(cx)}{dx} - b = kc - b$$

має бути сталою.

Якщо потрібно знайти залежність $U_{\text{вих}} = cx^2$ (рис. 3.12), то висота каркаса має змінюватися залежно від x за законом

$$h = k \frac{d(cx)^2}{dx} - b = 2kcx - b,$$

тобто лінійно залежати від переміщення x .

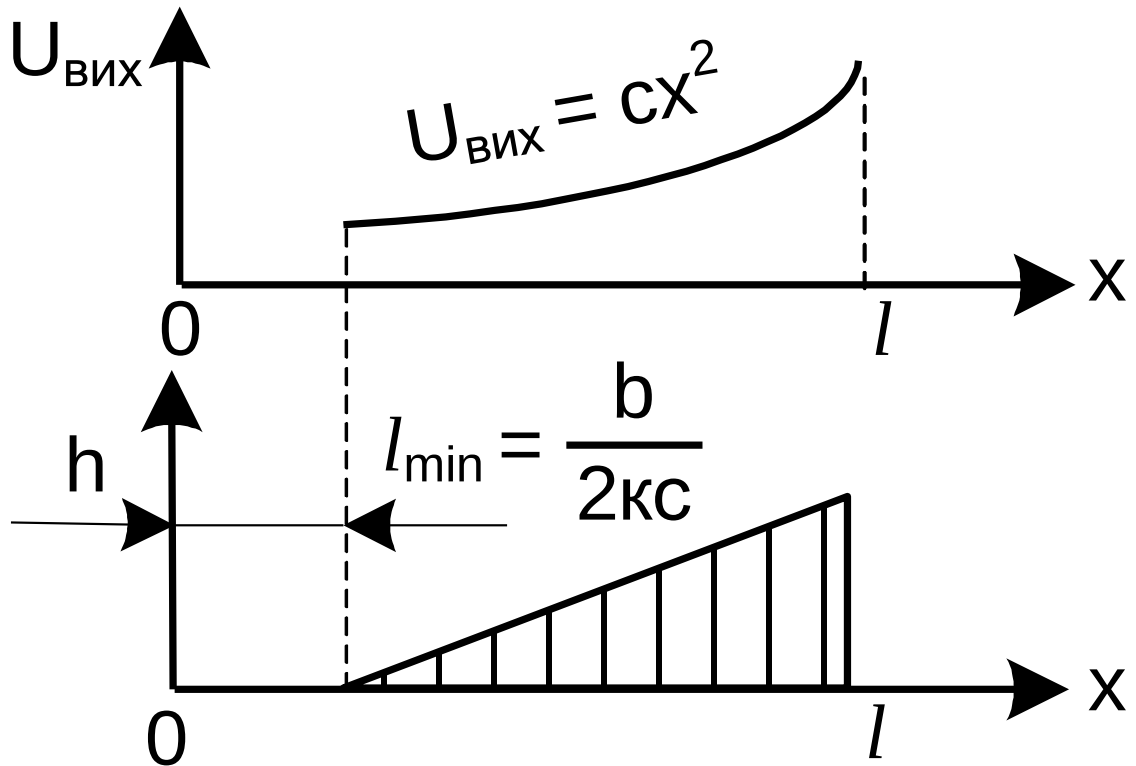


Рис. 3.12. Зміна висоти каркаса ПП з квадратичною залежністю

У цьому разі потрібний вигляд залежності $U_{вих}=f(x)$ за рахунок кінцевої товщини b каркаса можна дістати лише від деякого початкового значення x , що не дорівнює нулю при $l_{min}=b/2kc$. Якщо l_{min} вважати за початкову точку ПП, то $U_{вих}=f(x)$ починатиметься не з нульового значення.

Як інший приклад розглянемо випадок, коли переміщення движка x пропорційне квадрату вимірюваної величини (рис. 3.13) $x=ay^2$, а вихідна напруга має залежати від вимірюваної величини лінійно, тобто $U_{вих}=my$. Заданою залежністю в цьому разі буде

$$U_{вих} = \frac{m}{\sqrt{a}} \sqrt{x} = c\sqrt{x},$$

а шукану залежність $h=\varphi(x)$ дістанемо у вигляді

$$h = kc \frac{(\sqrt{x})}{dx} - b = \frac{kc}{2} \frac{1}{\sqrt{x}} - b.$$

Оскільки при $x=0$ висота каркаса прямує до нескінченності, то потрібну залежність вихідної напруги також можна знайти лише від якогось початкового значення x , що не дорівнює нулю, при $l=l_{min}$.

У ряді випадків виконання потенціометра з плавно профільованим каркасом пов'язане із значними труднощами його виготовлення та намотування проводу. Тоді користуються таким прийомом. Криву потрібної залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ розбивають так, як показано на рис. 3.14, а на ряд ділянок і утворені при цьому точки (0, 1, 2, 3,...) сполучають прямими лініями. Кількість ділянок визначається допустимою похибкою при реалізації залежності $U_{\text{вих}}=f(x)$ і має бути тим більшою, чим менша допустима похибка.

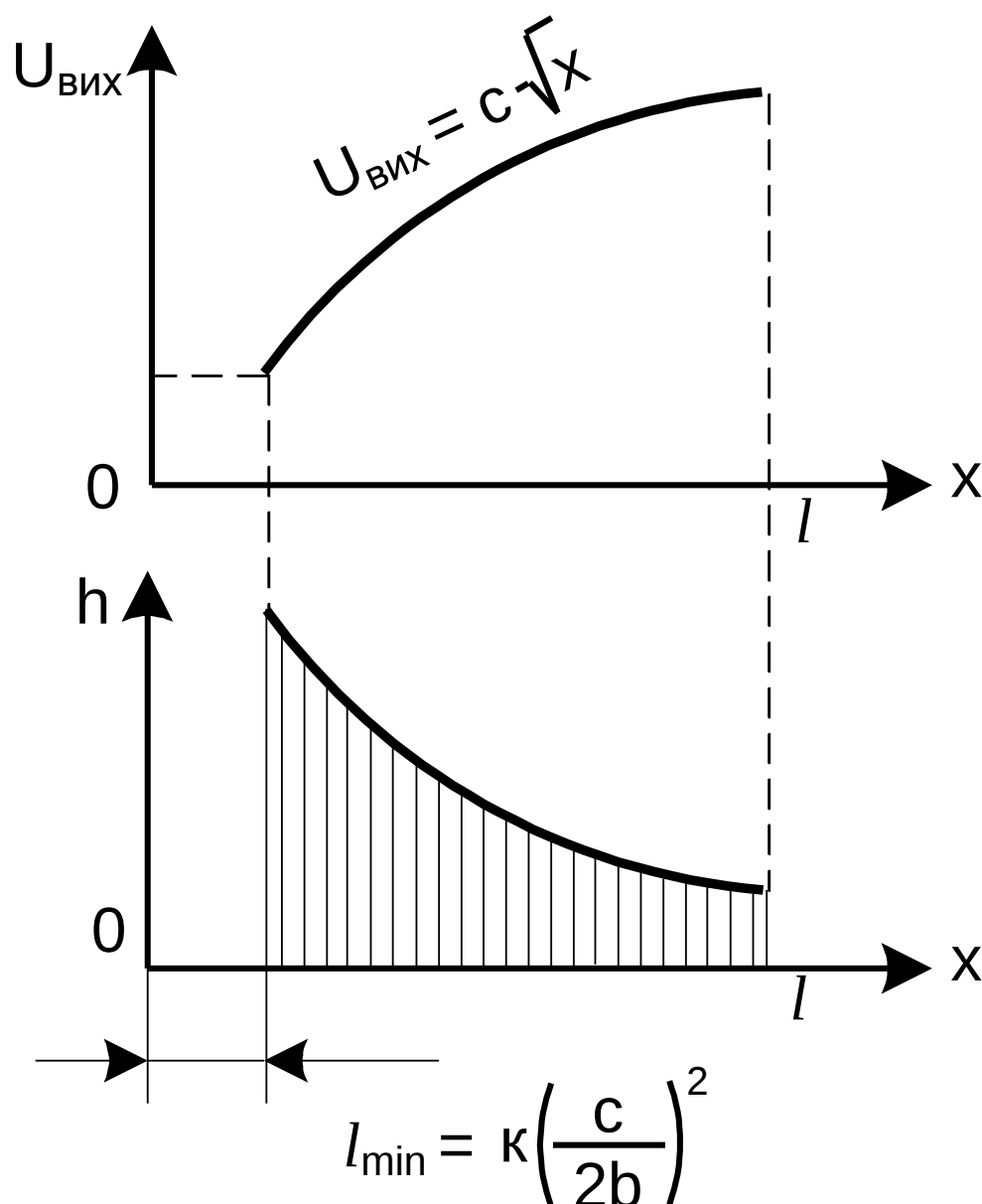


Рис. 3.13. Потенціометр з переміщенням движка, пропорційним до квадрата вимірюваної величини

Здобута таким чином ламана характеристика наближено замінює точну безперервну характеристику і може бути реалізована значно простіше за допомогою розбиття всього потенціометра на ряд ділянок з сталою висотою каркаса на кожній ділянці (рис. 3.14, б).

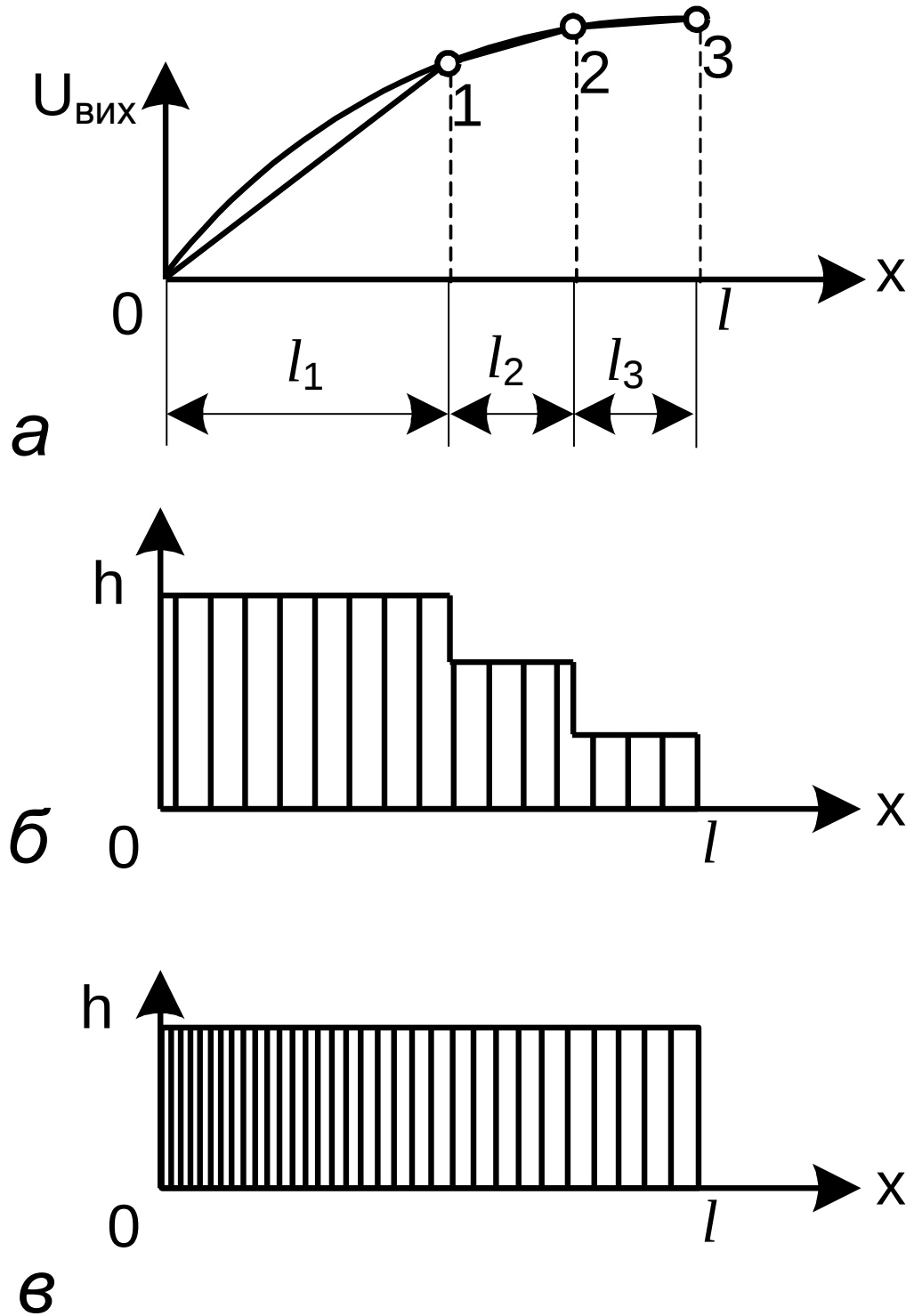


Рис. 3.14. Способи побудови функціональної залежності ПП:
a – характеристика ПП; *б* – ПП з ступінчастим каркасом;
в – ПП із змінним кроком намотки

Потрібно лише, щоб характеристика кожної ділянки потенціометра мала нахил, який точно дорівнює відповідному нахилу відрізка ламаної 0–1–2–3–... .

На рис. 3.14, в показано спосіб побудови аналогічної ламаної характеристики застосуванням на різних ділянках каркаса різних відстаней між витками (кроку намотування). Той самий результат дістанемо, якщо виконуватимемо намотування різних ділянок потенціометра проводами різних діаметрів або з різних матеріалів з неоднаковими ρ .

Метод розрахунку функціонального ПП з шунтуючими опорами розглянемо на конкретному прикладі потенціометра, вихідна напруга якого пропорційна до синуса кута переміщення движка (рис. 3.15).

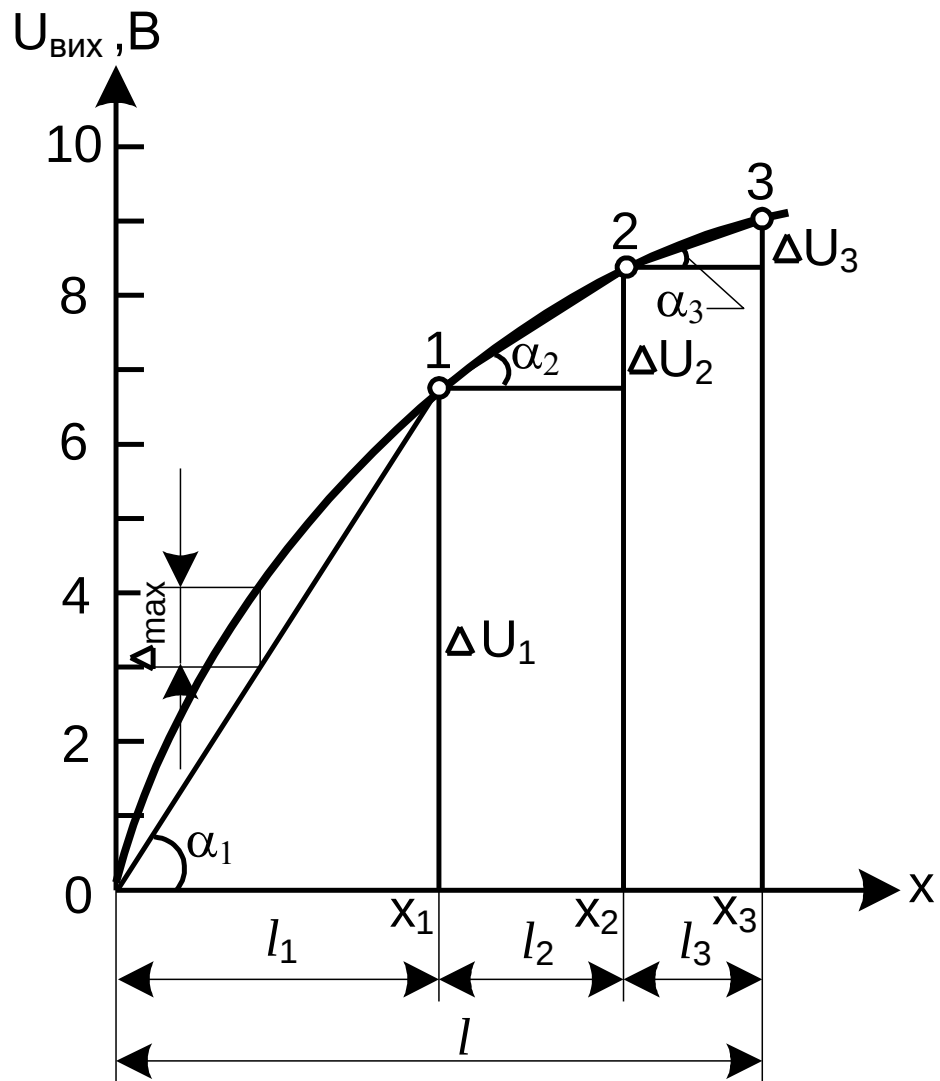


Рис. 3.15. Синусоїдна характеристика функціонального ПП

Нехай потрібно розрахувати шунтуючі опори до потенціометра довжиною $l=100$ мм і опором 100 Ом, якщо необхідна залежність вихідної напруги від переміщення движка

$$U_{вих} = U \sin \alpha ,$$

де

$$0 \leq \alpha \leq \pi / 2 ; \quad \alpha = \frac{x_{1,2,3}}{l} \pi / 2 .$$

Напруга живлення $U=10$ В. Максимально допустима похибка $\Delta_{\max}$ вихідної напруги не повинна перевищувати $3\% U$, тобто має бути меншою за $0,3$ В.

Необхідна залежність $U_{вих} = U \sin \alpha$ може бути здійснена за допомогою профільного потенціометра (рис. 3.16), висота каркаса якого змінюється за законом

$$h = k \frac{dU_{вих}}{dx} - b = kU \cos \alpha - b .$$

Для розрахунку шунтуючих опорів будуюмо криву $U_{вих} = U \sin \alpha$, показану на рис. 3.15, і розбиваємо її на три ділянки: 0-1, 1-2, 2-3. При розбитті максимальна похибка

$$\Delta = (U_{вих})_{точн} - (U_{вих})_{набл}$$

ніде не перевищує $0,3$ В, тобто вкладається у задані межі.

При цьому довжини окремих ділянок потенціометрів становлять $l_1=50$ мм, $l_2=30$ мм, $l_3=20$ мм, а опори відповідних ділянок $R_1=50$ Ом, $R_2=30$ Ом, $R_3=20$ Ом, оскільки намотка потенціометра рівномірна.

$$R_{II} = \frac{R'_2 R_2}{R'_2 + R_2} ; \quad R_{III} = \frac{R'_3 R_3}{R'_3 + R_3} ,$$

звідки

$$R'_2 = \frac{R_2 R_{II}}{R_2 - R_{II}} ; \quad R'_3 = \frac{R_3 R_{III}}{R_3 - R_{III}} .$$

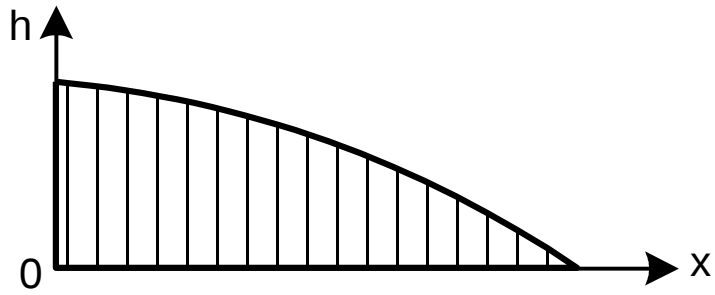


Рис. 3.16. Побудова синусоїдної залежності за рахунок використання каркаса із змінною за косинусоїдою висотою

Необхідний приріст напруги на кожній ділянці (див. рис. 3.17)

$$\Delta U_I = U \sin \alpha_1 = 7\text{В},$$

$$\Delta U_{II} = U \sin \alpha_2 - \Delta U_I = 2,5\text{В},$$

$$\Delta U_{III} = U - \Delta U_I - \Delta U_{II} = 0,5\text{В}.$$

Оскільки струм на всіх ділянках потенціометра має бути однаковим, можна скласти рівняння

$$I = \frac{\Delta U_I}{R_I} = \frac{\Delta U_{II}}{R_{II}} = \frac{\Delta U_{III}}{R_{III}},$$

звідки, зрівнявши окремо два перші та окремо два другі дроби, дістанемо

$$R_{II} = R_I \frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_I} = 50 \frac{2,5}{7} = 17,85 \text{ Ом},$$

$$R_{III} = R_{II} \frac{\Delta U_{III}}{\Delta U_{II}} = 17,85 \frac{0,5}{2,5} = 3,57 \text{ Ом}.$$

Знаючи повні опори окремих ділянок потенціометра, знаходимо значення потрібних шунтуючих опорів:

$$R'_2 = \frac{30 \cdot 17,85}{30 - 17,85} = 44,1 \text{ Ом},$$

$$R'_3 = \frac{20 \cdot 3,57}{20 - 3,57} = 4,35 \text{ Ом}.$$

Перевіримо правильність виконаного розрахунку для однієї з ділянок потенціометра, наприклад, першої. Приріст напруги на цій ділянці

$$\Delta U_I = I_1 R_1 = \frac{U R_1}{R_1 + R_{II} + R_{III}} = \frac{10 \cdot 50}{50 + 17,85 + 3,57} = 7\text{В}.$$

Здобутий приріст вихідної напруги на першій ділянці дорівнює заданому, що підтверджує правильність розрахунку. Аналогічно можна перевірити розрахунок і для інших ділянок ФПП.

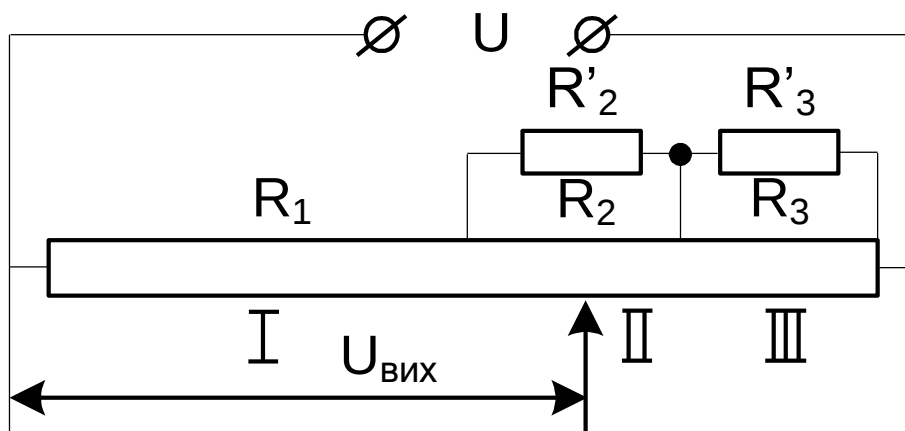


Рис. 3.17. Функціональний потенціометр з шунтуючими опорами

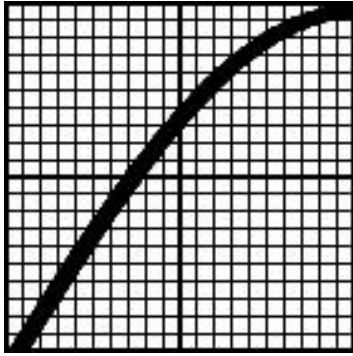
Варіанти завдання до розрахунку ФПП:

Необхідно розрахувати шунтуючі опори до потенціометра довжиною l мм і опром R Ом, якщо необхідна залежність вихідної напруги від переміщення движка $U_{вих} = U \sin \alpha$, де $\alpha \in [0 \dots \pi/2]$ (рис. 3.18.). Напруга живлення U . Криву $U_{вих} = U \sin \alpha$ розбивають на три ділянки довжинами l_1 , l_2 , l_3 , а опори цих ділянок R_1, R_2, R_3 . Ввімкнені шунтуючі опори за схемою, зображеною на рис.3.17. Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

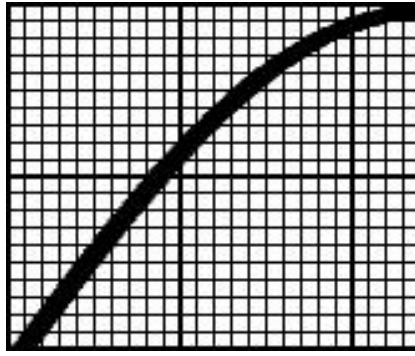
Таблиця 3.3

Вихідні дані:

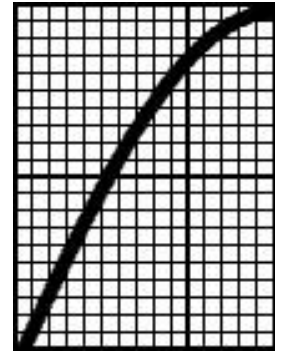
Умовне познач.	Варіанти										Одиниці вимірювання
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$l =$	100	120	150	90	80	150	110	140	160	70	мм
$U =$	20	20	20	15	15	20	15	20	20	10	В
$l_1 =$	50	60	75	45	40	75	55	70	80	35	мм
$l_2 =$	30	30	45	25	25	45	40	40	50	20	мм
$l_3 =$	20	30	30	20	15	30	15	30	30	15	мм
$R_1 =$	30	30	45	25	25	45	40	40	50	20	Ом
$R_2 =$	50	60	75	45	40	75	55	70	80	35	Ом
$R_3 =$	20	30	30	20	15	30	15	30	30	15	Ом



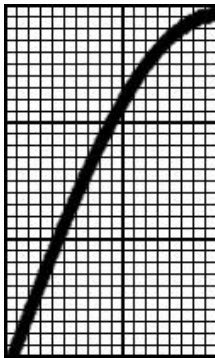
Варіант 1



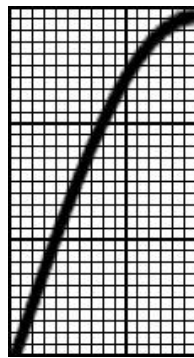
Варіант 2



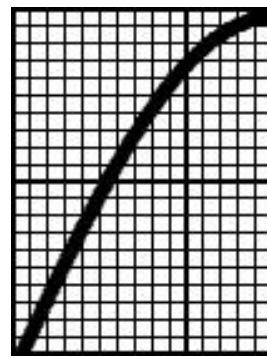
Варіант 3



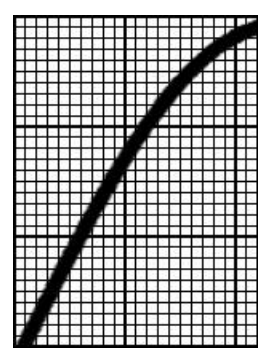
Варіант 4



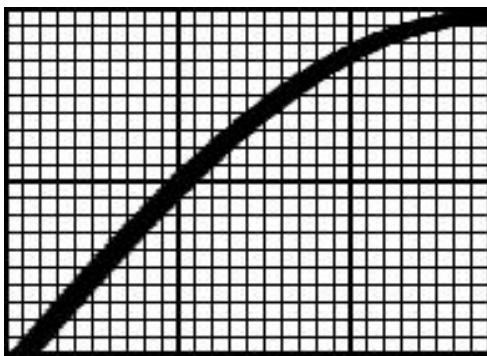
Варіант 5



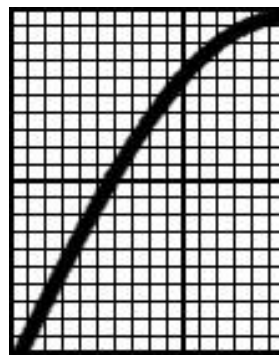
Варіант 6



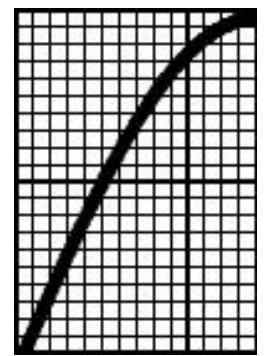
Варіант 7



Варіант 8



Варіант 9



Варіант 10

Рис. 3.18. Варіанти кривих

Приклад розв'язання:

Розбиваємо криву на рис. 3.19. на три ділянки l_1 , l_2 , l_3 так, щоб в сумі вони дорівнювали всій довжині ділянки l . Проводимо уявні лінії від осі абсцис до перетину з графіком, і проектуємо отримані точки на вісь ординат.

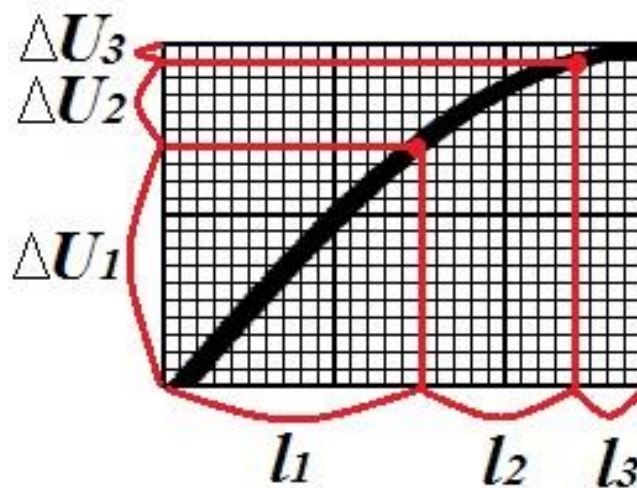


Рис. 3.19. Визначення приросту напруги графічним методом

Таким чином (графічним способом) ми отримали числові значення приросту напруг ΔU на всіх трьох ділянках.

У разі вмикання шунтуючих опорів за схемою, зображеною на рис. 3.19, повні опори окремих ділянок дорівнюють:

$$R_I = R_I, \quad R_{II} = \frac{R'_2 R_2}{R'_2 + R_2}, \quad R_{III} = \frac{R'_3 R_3}{R'_3 + R_3} \quad (3.1)$$

З формул (3.1) можемо виразити формулу для розрахунку шунтуючих опорів:

$$R'_2 = \frac{R_2 R_{II}}{R_2 - R_{II}}, \quad R'_3 = \frac{R_3 R_{III}}{R_3 - R_{III}} \quad (3.2)$$

Оскільки струм на всіх ділянках потенціометра має бути однаковим, можна скласти рівність:

$$I = \frac{\Delta U_I}{R_I} = \frac{\Delta U_{II}}{R_{II}} = \frac{\Delta U_{III}}{R_{III}} \quad (3.3)$$

Звідки, зрівнявши окремо два перші та окремо два другі дроби отримаємо:

$$R_{II} = R_I \frac{\Delta U_{II}}{\Delta U_I}$$

$$R_{III} = R_{II} \frac{\Delta U_{III}}{\Delta U_{II}}$$

Оскільки $R_1 = R_I$, а значення ΔU ми визначили графічним способом, можемо розрахувати R_{II} та R_{III} .

Знаючи повні опори окремих ділянок потенціометра, знаходимо значення потрібних шунтуючих опорів R'_2 , R'_3 за формулами (3.2).

ЄМНІСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ (ЄП)

Короткі теоретичні відомості щодо ЄП

Ємнісні вимірювальні перетворювачі використовуються для перетворення лінійних бо кутових переміщень (тисків, прискорень, вібрацій, рівнів рідини) в електричний сигнал.

Переваги ЄП:

1. Висока чутливість;
2. Відносно малі вага, габарити;
3. Мала величина моменту зворотного впливу

Недоліки ЄП:

1. Висока $R_{внутр.}$ ЄП, що робить його малопотужним, сильно схильним до впливу перешкод - наведень;
2. Відносно невисока стабільність крутизни характеристики в зв'язку зі зміною геометричних розмірів ЄП при дії температури, а діелектричної проникності - при дії вологості;
3. Сильний вплив паразитних ємностей, зокрема, ємності екранованого проводу;
4. Необхідність працювати на порівняно високій частоті (від одиниць кГц і вище), що змушує застосовувати спеціальне джерело живлення ЄП, стабілізований по напрузі і частоті;
5. Для зняття сигналу з ЄП необхідно мати високочутливий вторинний перетворювач з великим $R_{виходом}$

Різновиди ЄП:

Ємність будь якого перетворювача C залежить від трьох основних параметрів: площі пластини S , відстані δ між пластинами і діелектричної проникності середовища ε між обкладинками.

$$C = \frac{\varepsilon S}{\delta}$$

де, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф / м}$ - абсолютна діелектрична проникливість вакууму

ε_r - відносна діелектрична проникливість середовища

Із наведеної формули бачимо, що зміни ємності можна досягти, змінивши значення однієї з величин S , δ або ε .

1. Зі змінним зазором (рис. 3.20)

$$S = \text{const}, \quad \varepsilon = \text{const}; \quad \frac{\Delta C}{C_0} \approx - \frac{\Delta \delta}{\delta_0}; \quad C = \frac{\varepsilon S}{\delta_0 \pm \Delta}$$

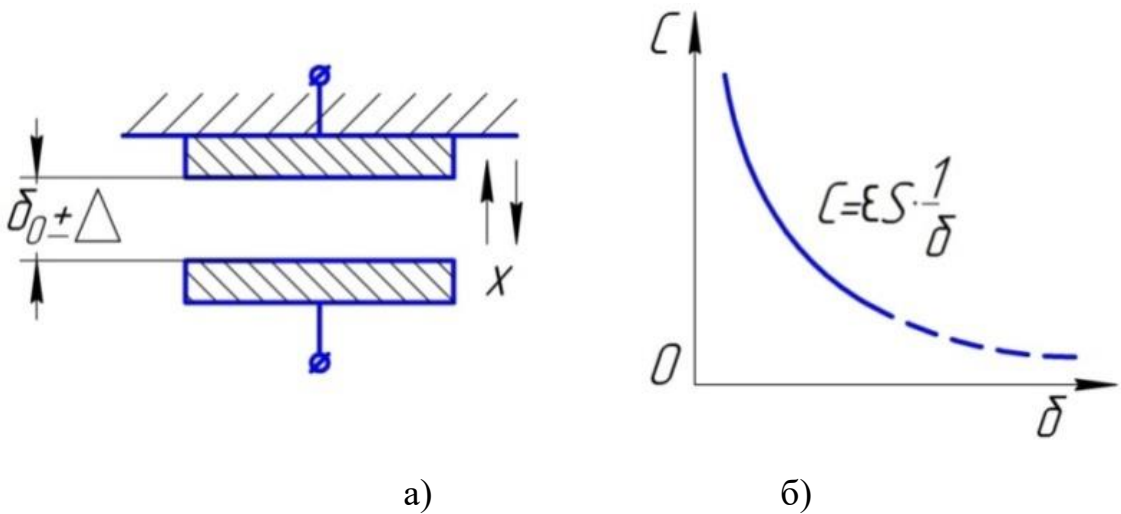


Рис.3.20. Ємнісний перетворювач зі змінним зазором:

а) конструкція; б) характеристика

2. Зі змінною площею (рис. 3.21)

$$\varepsilon = \text{const}, \quad \delta = \text{const}; \quad \frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta S}{S_0}; \quad C = \frac{\varepsilon (S_0 \pm \Delta)}{\delta}$$

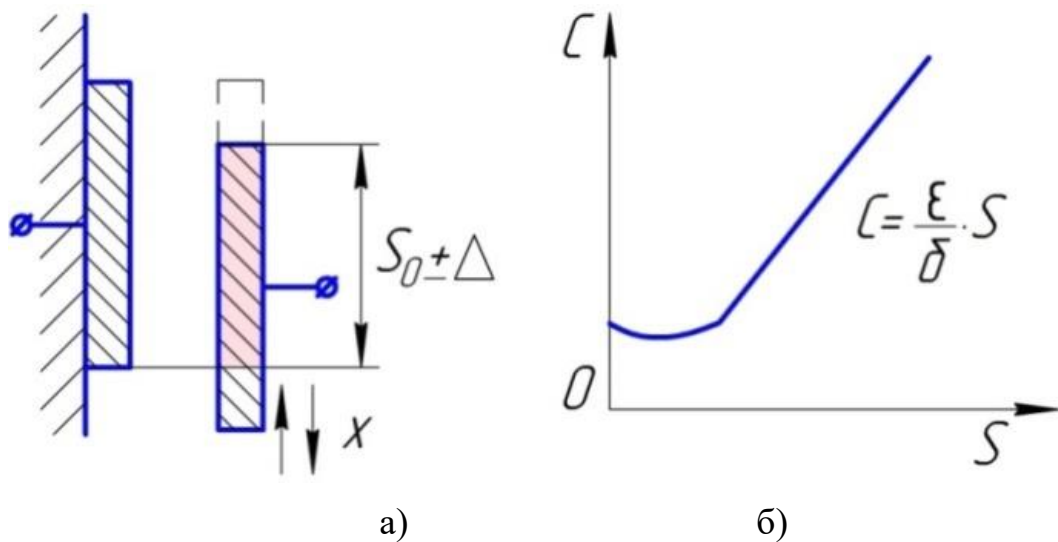


Рис.3.21. Ємнісний перетворювач зі змінною площею:
а) конструкція; б) характеристика

3. Зі змінною діелектричною проникливістю (рис. 3.22)

$$\delta = \text{const}, \quad S = \text{const}; \quad \frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad C = (\varepsilon_0 \pm \Delta \varepsilon) \frac{S}{\delta}$$

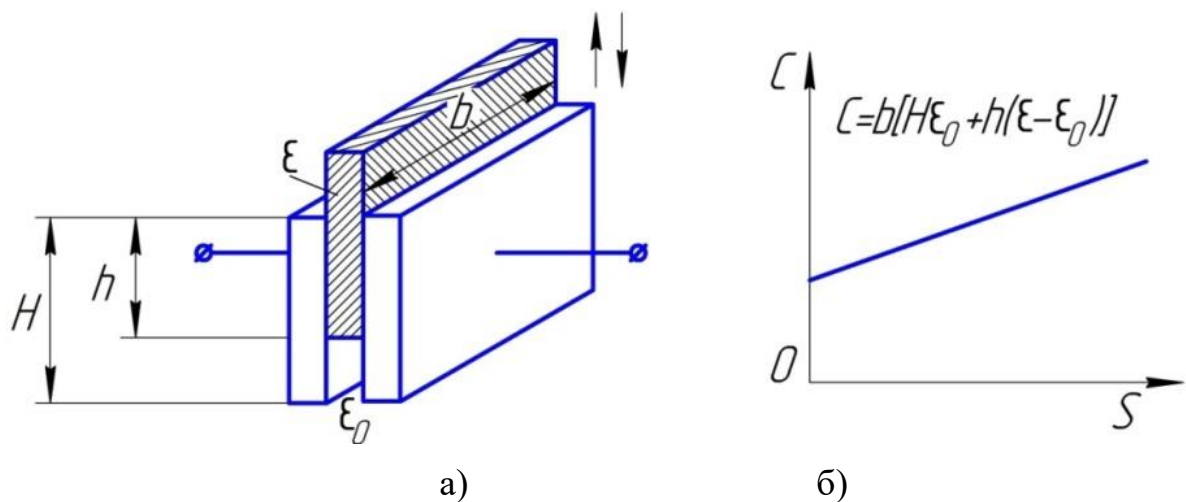


Рис.3.22. Ємнісний перетворювач зі змінною діелектричною проникністю середовища: а) конструкція; б) характеристика

Щоб збільшити ємність вдаються до паралельного з'єднання ЄП з

однойменно зарядженими обкладками:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

Для зменшення ємності – послідовне з'єднання з різнойменно

зарядженими обкладками:  $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$

Основні схеми ввімкнення ЄП

Для перетворення зміни ємності у відповідні зміни сили струму, напруги або частоти найчастіше застосовують мостову схему вмикання ЄП.

Мостову схему ввімкнення зображено на рис. 3.23. За середнього положення рухомої пластини, коли $C_{12}=C_{13}$, тобто приріст $\Delta=0$, міст збалансований і напруга на його виході дорівнює нулю.

Опір ЄП з ємністю $C=100$ пФ $=100 \cdot 10^{-12}$ Ф на промисловій частоті $f=50$ Гц визначається як

$$R = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 30 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

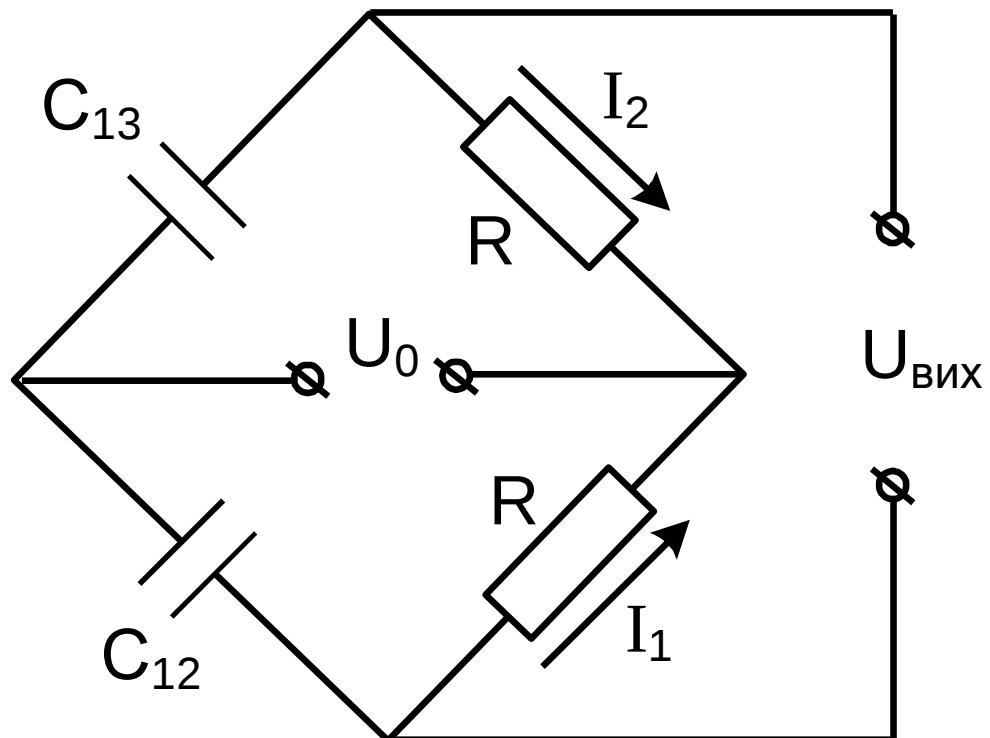


Рис. 3.23. Мостова схема ввімкнення ЄП

Таке велике значення опору ЄП виключає можливість його практичного застосування для вимірювальних цілей через сильний вплив паразитних параметрів (витікання тощо).

Потужність, що споживається при цьому ЄП,

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{100^2}{30 \cdot 10^6} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

де U – напруга живлення, взята такою, що дорівнює 100 В.

Величина зворотного впливу ЄП визначається силою електростатичного притягання між пластинами, Н або Гн,

$$F_e = \frac{dW_e}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU_0^2}{2} \right) = \frac{U_0^2}{2} \frac{dC}{d\delta},$$

де W_e – енергія електростатичного поля, Дж; δ – зазор, м; C – ємність, Ф; U_0 – напруга джерела живлення, В.

При $C, \delta = \text{const}$ $F_e = U^2/2 \cdot C/\delta$.

Приклади практичного застосування ЄП

Для перетворення лінійних або кутових переміщень, тисків, вібрацій, прискорень, рівнів рідини в електричний сигнал, у випадках, коли потрібно мінімальне навантаження переміщуваних деталей або відсутні механічні зв'язки. Ємнісні перетворювачі із змінним повітряним зазором використовують для вимірювання малих переміщень (від часток мікрометра до часток міліметра), для вимірювання сили, тиску за наявності проміжних перетворювачів сили і тиску в переміщення. Ємнісні перетворювачі застосовують також для контролю складу речовин і, зокрема, для контролю вологості матеріалів. В автомобілі ємнісні перетворювачі широко використовуються в якості датчика: аварійних манекенів; контролю зазорів при збірці корпусу; виготовлення вітрового скла; аналіз зношення тормозного диску барабана та інш.

Приклад розрахунку ЄП

Потрібно розрахувати ЄП за таких даних: частота джерела живлення $f=4000$ Гц; напруга джерела живлення $U=115$ В; площа поверхні пластини

$S=20 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; відстань між пластинами $\delta=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; середовище між обкладками ЄП – вакуум.

Розв'язання

1. Визначимо ємність:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{\delta},$$

де ε – діелектрична проникність вакууму;

$$\varepsilon = \frac{1}{36 \cdot 10^9 \cdot \pi} \text{ Ф/м}$$

Тоді

$$C = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^9 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 35,4 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 35,4 \text{ пФ}.$$

2. Знайдемо кутову частоту напруги живлення:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 4000 = 2,52 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

3. Обчислимо активний опір, що забезпечує максимальну чутливість схеми:

$$R = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2,52 \cdot 10^4 \cdot 35,4 \cdot 10^{-12}} = 1,12 \cdot 10^6 \text{ Ом} = 1,12 \text{ Ом}.$$

4. Визначимо потужність, що розсіюється на активному опорі:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{115^2}{1,12 \cdot 10^6} = 0,0012 \text{ Вт}.$$

5. Обчислимо силу зворотного впливу:

$$F = \frac{d}{d\delta} \left(\frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\delta} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{C}{\delta} = \frac{115^2}{2} \cdot \frac{35,4 \cdot 10^{-12}}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

Варіанти завдання розрахунків ЄП:

Розрахувати ємнісний перетворювач (знайти потужність та силу електростатичного притягання між пластинами), якщо відомі частота джерела живлення f , напруга джерела живлення U , площа поверхні пластини S , відстань між пластинами δ . Середовище між обкладками ЄП – вакуум (ε_0).

Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

Таблиця 3.4

Вихідні дані:

Умовне позначення	Варіанти					Одиниці вимірювання
	1	2	3	4	5	
$f=$	3000	3100	3200	3200	3300	Гц
$U=$	100	100	100	110	110	В
$S=$	$10 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4}$	$16 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$	м ²
$\delta=$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	мм ² /Вт
$\varepsilon_0=$	$8,85 \cdot 10^{-12}$					мм

Умовне позначення	Варіанти					Одиниці вимірювання
	6	7	8	9	10	
$f=$	3400	3500	3600	4000	4000	Гц
$U=$	115	120	125	130	140	В
$S=$	$20 \cdot 10^{-4}$	$22 \cdot 10^{-4}$	$24 \cdot 10^{-4}$	$26 \cdot 10^{-4}$	$28 \cdot 10^{-4}$	м ²
$\delta=$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	мм ² /Вт
$\varepsilon_0=$	$8,85 \cdot 10^{-12}$					мм

ІНДУКТИВНІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Необхідно ознайомитись з принципом дії індуктивних та трансформаторних параметричних вимірювальних перетворювачів та розрахувати їх основні параметри.

Короткі теоретичні відомості

Індуктивний перетворювач (ІП) - ненасичений магнітний дросель, індуктивність якого змінюється при переміщенні якоря

Переваги ІП:

1. Надійність і простота конструкції;
2. Відсутність ковзних контактів;
3. Велика величина $U_{вих}$;
4. Можливість роботи на змінному струмі промислової частоти;
5. Висока крутизна характеристики;
6. Відносно мала зона нечутливості.

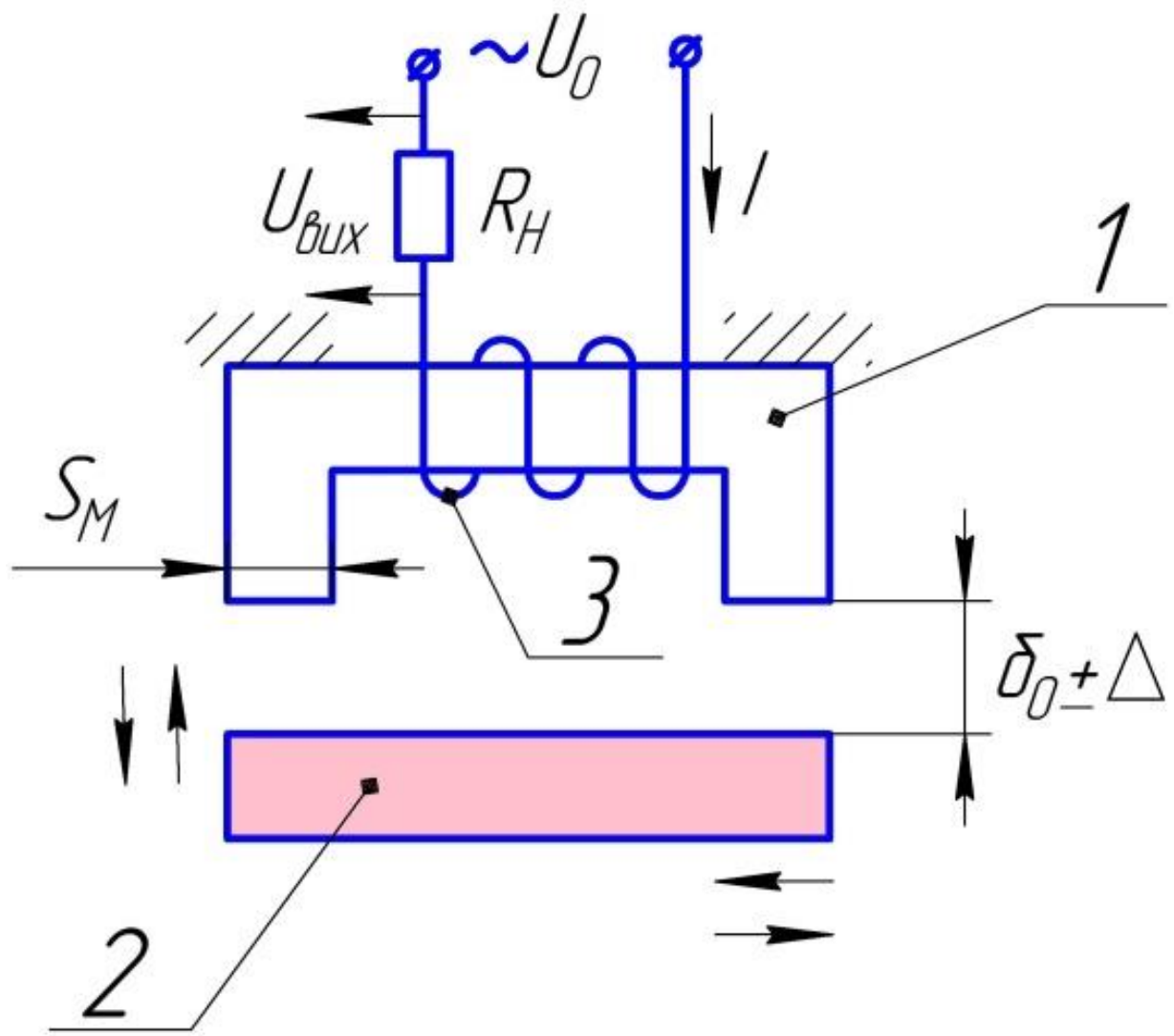


Рис. 3.24. Принципова схема ІІІ

- 1 - ярмо з шихтованого магнітом'якого матеріалу;
2 - яркір; 3 - обмотка

Недоліки ІІІ:

1. Сильна залежність характеристики від частоти $U_{\text{живлення}}$;
2. Наявність $M_{\text{зв.дй}}$ $\Rightarrow$ переміщенню рухомого елемента ВП.
3. Контролює тільки металічні об'єкти.
4. Температурна похибка.
5. Похибка від впливу інших електромагнітних полів.

Матеріали ІІІ:

Ярмо і яркір - з шихтованого магнітом'якого матеріалу.

Обмотка намотується мідним дротом з малим активним опором.

Приклади практичного застосування індуктивних та трансформаторних перетворювачів

Індуктивний датчик переміщення відіграє важливу роль для механізмів, які відстежують зміну місця розташування металевих деталей. Зустріти подібні пристрої ви можете в автомобільних конвеєрах.

Індукційна плита (рис. 3.25) - той же самий трансформатор. Поверхня плити - склокерамічна. Під нею знаходиться індукційна котушка, під якою тече електрострум з частотою 20-60 кГц. Індукційна котушка є первинною обмоткою, а посуд, яку ставлять на плиту - вторинною обмоткою. В її днище подаються струми індукції. Нагрівається посуд, а значить, і продукти, які в ній знаходяться.

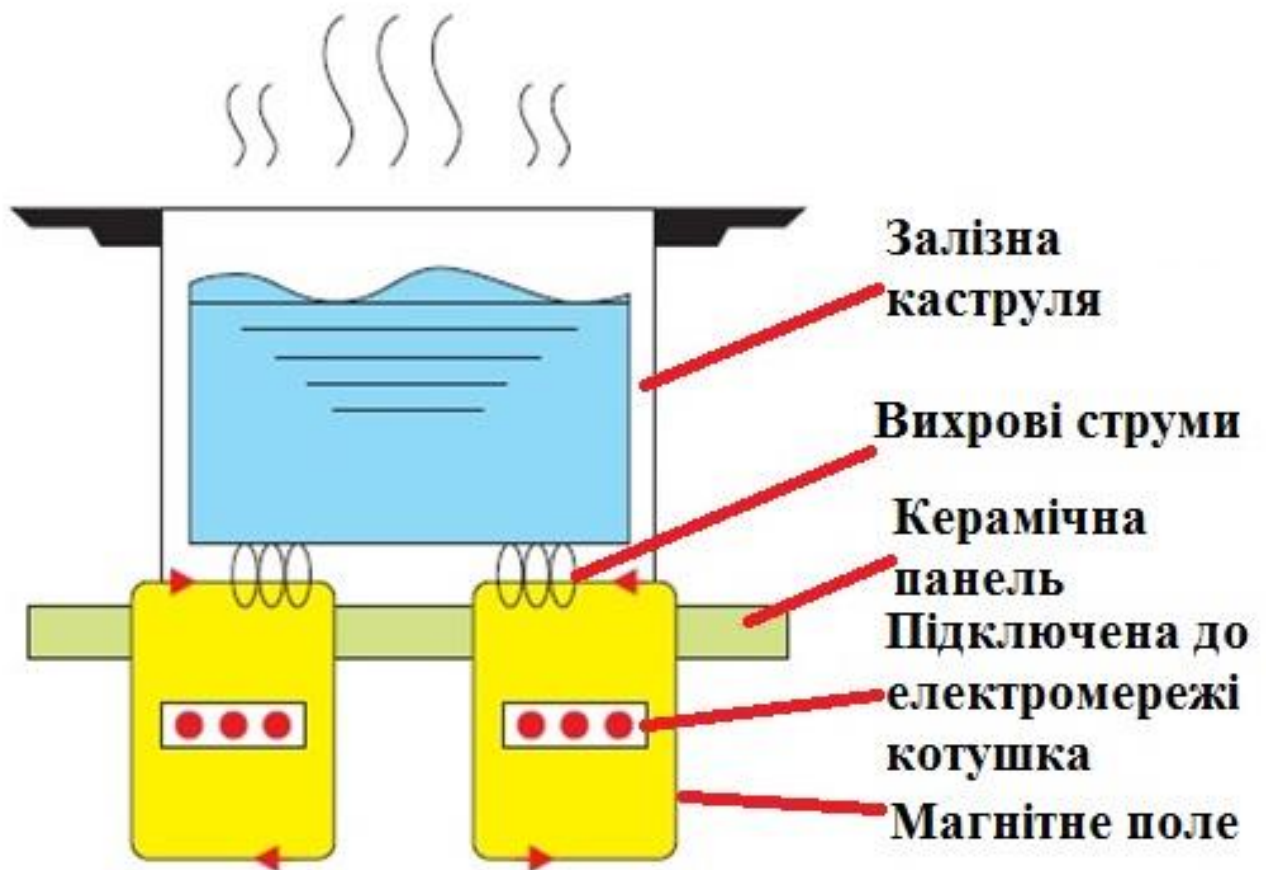


Рис. 3.25. Індукційна плита

Приклад і варіанти розв'язання задач

Варіанти завдання:

Визначимо індуктивність датчика, ескіз магнітної системи якого показаний на рис. 3.26. Вибираючи в якості матеріалу магнітної системи

електротехнічну сталь Е42, а значення $B = 0,3$ тл. З таблиць обираємо для дроту ПЕ $d = 0,1$ мм значення коефіцієнту заповнення обмотки $f = 0,42$. Магнітна проникність вакууму дорівнює $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

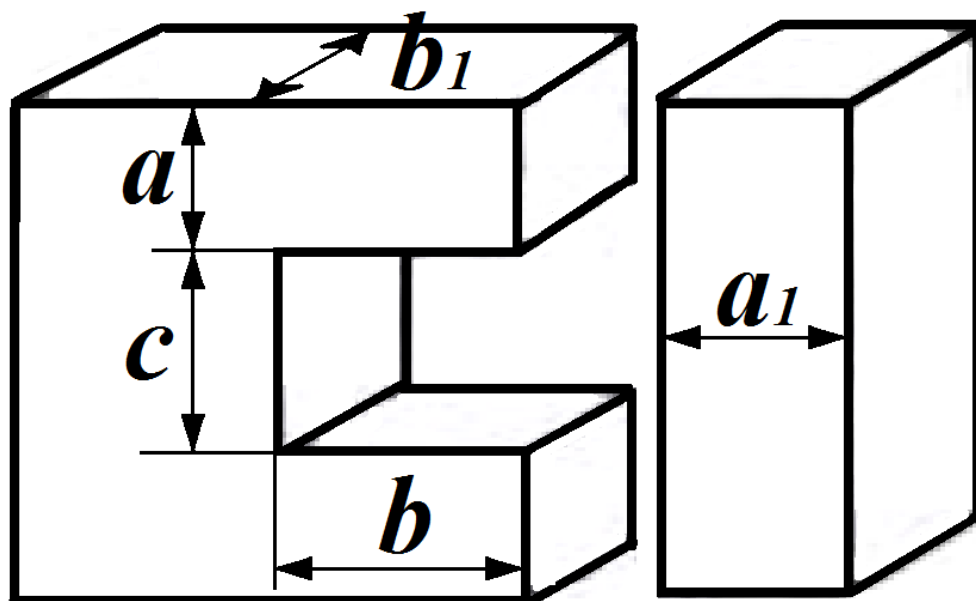


Рис. 3.26. Ескіз магнітної системи датчика

Таблиця 3.5

Вихідні дані для розрахунку ІІІ:

Умовне позн.	Варіанти										Одиниці вимірювання
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a	1,1	1	1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	см
a_1	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	см
b	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2	см
b_1	1	1,1	1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	см
c	1	1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	см
δ	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	мм
B_0	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	
H_0	60										
$H_{\text{Я}}$	110										
f	0,42										
d	0,1										мм

Приклад розв'язання задачі розрахунку ІІІ:

Індуктивність датчика дорівнює:

$$L = \frac{w\Phi}{I} [\Gamma_n], \quad (3.3)$$

де Φ – магнітний потік, Вб; I – струм у котушці, А.

$$\Phi = \frac{Iw}{R_{оя} + R_{п}}, \quad (3.4)$$

де $R_{оя}$ – опір осердя та якоря; $R_{п}$ – опір повітряних зазорів.

Отже, підставляючи (3.4) в (3.3) отримаємо:

$$L = \frac{w^2}{R_{оя} + R_{п}} [\Gamma_n]. \quad (3.5)$$

Магнітний опір осердя та якоря знаходимо за формулою:

$$R_{оя} = \frac{l_o}{\mu_0 \mu_o S_o} + \frac{l_{я}}{\mu_0 \mu_{я} S_{я}}, \quad (3.6)$$

де $l_o = 2b + c + \frac{\pi a}{2}$ – середня довжина магнітних силових ліній в осерді;

$S_o = ab_1$ – поперечний перетин осердя.

$l_{я} = c + \frac{\pi a_1}{2}$ – середня довжина магнітних ліній в якорі;

$S_{я} = a_1 b_1$ – поперечний переріз якоря.

Значення μ – магнітної проникності в магнітопроводі залежить від величини індукції B знаходимо магнітну проникність осердя:

$$\mu_o = \frac{B_o}{H_o \mu_0}.$$

Індукція в якорі дорівнює:

$$B_{я} = \frac{B_o S_o}{S_{я}}.$$

Отже, магнітну проникність в якорі відповідає:

$$\mu_{я} = \frac{B_{я}}{H_{я} \mu_0}$$

Таким чином, знаходимо $R_{оя}$ за формулою (3.6).

Опір повітряних зазорів розраховується за формулою:

$$R_{\Pi} = \frac{2\delta}{\mu_0 S_{\Pi}}, \quad (3.7)$$

де $S_{\Pi} = b_1 \cdot a$ - поперечний переріз повітряного зазору.

δ – довжина повітряного зазору.

Площа вікна намотування дроту дорівнює $Q = b \cdot c$.

Число витків знаходимо з виразу:

$$w = \frac{Qf}{q},$$

де q - площа поперечного перерізу проводу:

$$q = \frac{\pi d^2}{4}.$$

f - коефіцієнт заповнення (визначається з таблиць для різних q).

Всі невідомі обраховані, тепер підставляємо значення і по формулі (3.5) знаходимо значення індуктивності L .

Таблиця 3.6

Відповіді до задач:

	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L	21,1	16,4	13,7	18,4	21,1	32,7	27,1	40,8	35,1	44,8

Трансформаторні перетворювачі

Загальна характеристика ТрП

У трансформаторних перетворювачах (ТрП) зміна положення рухомого органу, який сприймає вимірюване переміщення, спричиняє зміну взаємної індукції (коефіцієнта взаємоіндукції) між двома системами обмоток. До однієї з них підводиться змінна напруга живлення U , а з іншої знімається індукована в ній напруга $U_{\text{вих}}$, залежна від коефіцієнта взаємоіндукції і, зрештою, від вимірюваного переміщення.

У ТрП, показаному на рис. 3.27, а, змінна напруга U підводиться до котушок 1, які називають первинними, або обмотками збудження. Напруга $U_{\text{вих}}$, що залежить від переміщення якоря 4 відносно осердя 3, знімається з

котушок 2, які називаються вторинними, або сигнальними. При середньому положенні якоря напруга $U_{\text{вих}}=0$.

Насправді при середньому положенні якоря схема повністю не зрівноважена і є залишкова напруга розбалансу $U_{\text{вих}} \neq 0$, яка складається з основної та вищих гармонік. Величина основної гармоніки залежить від ступеня ідентичності обмоточних даних котушки 1, несиметричності магнітопроводу, яка практично завжди спостерігається через неточність його виготовлення, та неоднорідності магнітних властивостей його матеріалу. При переміщенні якоря 4 симетрія зазорів порушується, і в котушці 2 виникає напруга, пропорційна до переміщення якоря.

На рис. 3.27, б показано схему ТрП, який складається з трьох котушок і рухомого осердя, яке сприймає вимірюване переміщення, спричинене, наприклад, вібрацією, прискоренням тощо. За відсутності вібрації осердя перебуватиме в середньому положенні і струму в котушці не буде. При переміщенні осердя в котушці 2 виникає напруга $U_{\text{вих}}$ залежна від величини і напрямку цього переміщення. Котушки 1 і 2 можна поміняти місцями: живлення підводити до котушки 2, а сумарну напругу знімати з котушок 1, ввімкнених зустрічно.

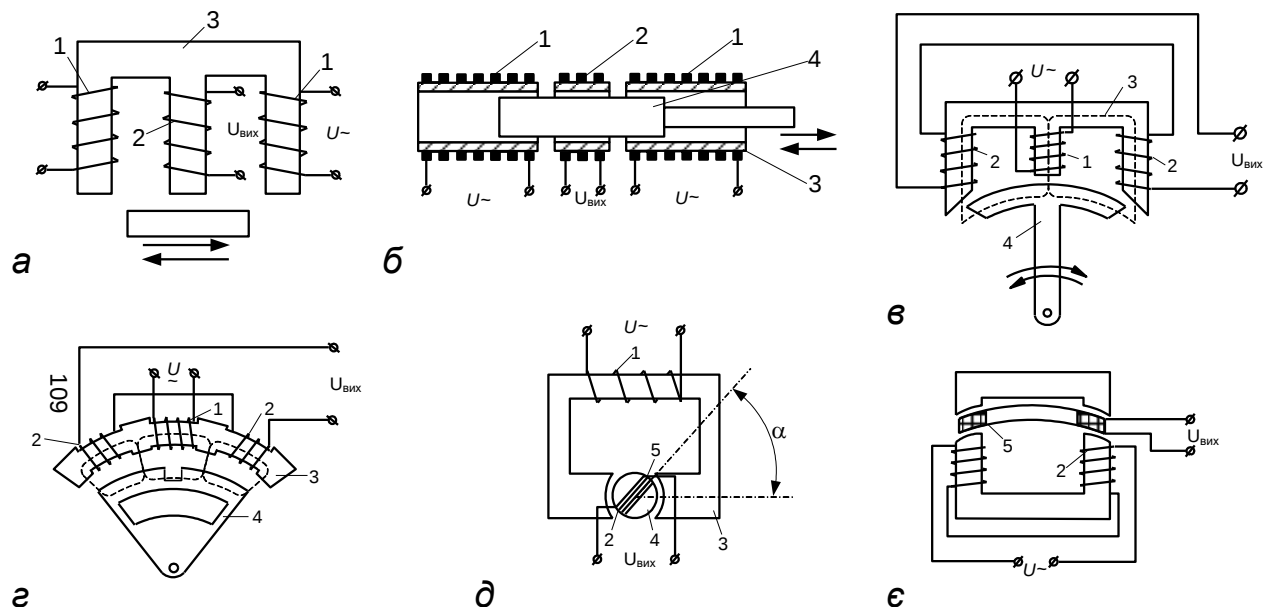


Рис. 3.27. Трансформаторні перетворювачі:

а – з двома обмотками збудження; б – соленоїдного типу; в – з одною обмоткою збудження і двома секціями вихідної обмотки; г – з кутовим переміщенням якоря; д – з обертовим ротором; е – з рухомою рамкою

На рис. 3.27, в зображено схему, в якій обмотки увімкнені саме таким чином. За нейтрального положення якоря напруга $U_{\text{вих}}$ дорівнює нулю. При зміщенні якоря взаємоіндукції обмоток 1 і 2 стають неоднаковими і на виході виникає напруга $U_{\text{вих}}$, фаза та значення якої залежать від напрямку зміщення якоря. За такою самою схемою працює і ТрП, показаний на рис. 3.27, г. ТрП, побудовані за принциповими схемами рис. 3.27, в, г, набули значного поширення в сучасних гіроскопічних авіаційних приладах для перетворення в електричний сигнал невеликих кутових переміщень порядку кількох хвилин і більше. Амплітуда вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$ дорівнює різниці ЕРС, індукованих у обмотці 2, а фаза напруги залежить від напрямку повороту якоря. Якщо цю напругу подати на вихід фазочутливої системи, то магнітоелектричний прилад, увімкнений у діагональ мосту, показуватиме величину і напрям зміщення якоря.

На рис. 3.27, д зображена схема ТрП з поворотною рамкою, розміщеною у стабільному радіальному полі, що створюється обмоткою 1 в зазорі між полюсами та циліндричним осердям 4. За однакової ширини повітряного зазору потік, що пронизує рамку, практично пропорційний до кута α і ТрП має лінійну характеристику в широкому діапазоні зміни вхідної величини α .

На рис. 3.27, є показано інший варіант конструкції ТрП з поворотною рамкою. До котушок збудження 2 підводиться змінний струм. Напруга $U_{\text{вих}}$ дорівнює різниці ЕРС, індукованих у сторонах рамки 5, які розміщені в робочих зазорах. За нейтрального положення рамки $U_{\text{вих}} = 0$. При повороті рамки від нейтрального положення фаза і значення $U_{\text{вих}}$ залежать від напрямку та кута повороту рамки. Велика перевага даного ТрП порівняно з ТрП, зображеним на рис. 3.27, в, полягає в тому, що в ньому не створюється реактивний момент; використаний, наприклад, у гіроскопічних приладах для вимірювання кутових переміщень, цей ТрП не буде, як це робить електромагніт (рис. 3.27, в), чинити зворотний вплив на рамки кардана.

Розрахунок магнітного кола

Контур, по якому замикається магнітний потік, називають магнітним колом. Розрахунок ІП, ТрП, електромагнітних реле, різних

електровимірювальних приладів пов'язаний з розрахунками магнітного кола. Задача розрахунку магнітного кола полягає в тому, щоб обчислити магнітні потоки в різних частинах магнітної системи, які зумовлені наявністю магніторушійної сили F , що створюється струмом котушки або постійним магнітом.

У деяких випадках доводиться розв'язувати й обернену задачу: визначати магніторушійну силу котушки, потрібну для створення в системі магнітних потоків заданої величини. В основу розрахунку магнітного кола покладено закони, які за формою аналогічні законам електричного кола. До них належать закони Ома для магнітних кіл, перший та другий закони Кірхгофа. Завдяки аналогії між законами для електричних і магнітних кіл прийоми розрахунку магнітних кіл повністю збігаються з прийомами розрахунку електричних кіл, мета якого – визначити струм у кожній гілці кола.

Розраховуючи складні розгалужені магнітопроводи, складають еквівалентну схему, або схему заміщення магнітного кола, зображення якої аналогічно схемам електричного кола. Джерелу ЕРС та електричному опору кола в схемі заміщення магнітного кола відповідає джерело магніторушійної сили F і магнітний опір R_m . Величини і напрями потоків магнітного кола відповідають величинам і напрямкам струмів електричного кола.

Розглянемо приклади побудови схем заміщення магнітного кола.

Приклад 3.1. На рис. 3.28, а зображено *схему нерозгалуженого магнітного кола з повітряним зазором*. Магнітний потік для такого кола, якщо знехтувати його розсіянням, буде (див. 7.2, 7.5) дорівнювати, Вб:

$$\Phi = \frac{I w}{R_{ж} + R_{п}} = \frac{I w}{\frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{\delta}{\mu_0 S_{п}}}. \quad (3.8)$$

На рис. 3.28, б показано схему заміщення такого кола. В процесі розрахунку складних розгалужених магнітних кіл за допомогою проміжних перетворень схему заміщення зрештою приводять до вигляду, показаного на рис. 3.28, б.

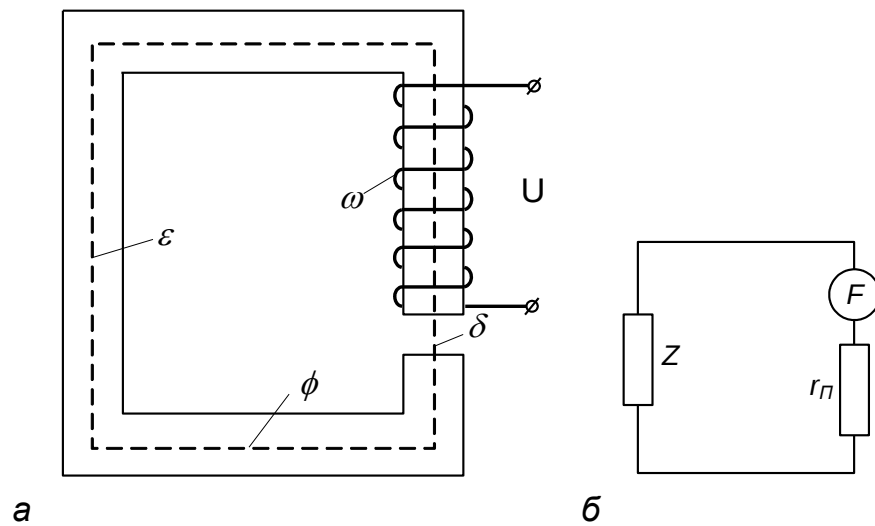


Рис. 3.28. Схема нерозгалуженого магнітного кола (а) і еквівалентна схема заміщення такого кола (б)

Приклад 3.2. На рис. 3.29, а показано *схему диференціального трансформаторного перетворювача* і на рис. 3.28, б – *схему заміщення його магнітного кола*. Подібний елемент застосовують, наприклад, у датчику вібрацій. Магнітне коло ІІ є розгалуженим і містить кілька повітряних проміжків, опори яких на схемі зміщення позначені r_n ; опори магнітопроводу осердя та якоря позначені z , опори потокам розсіяння (витікання) – r_b .

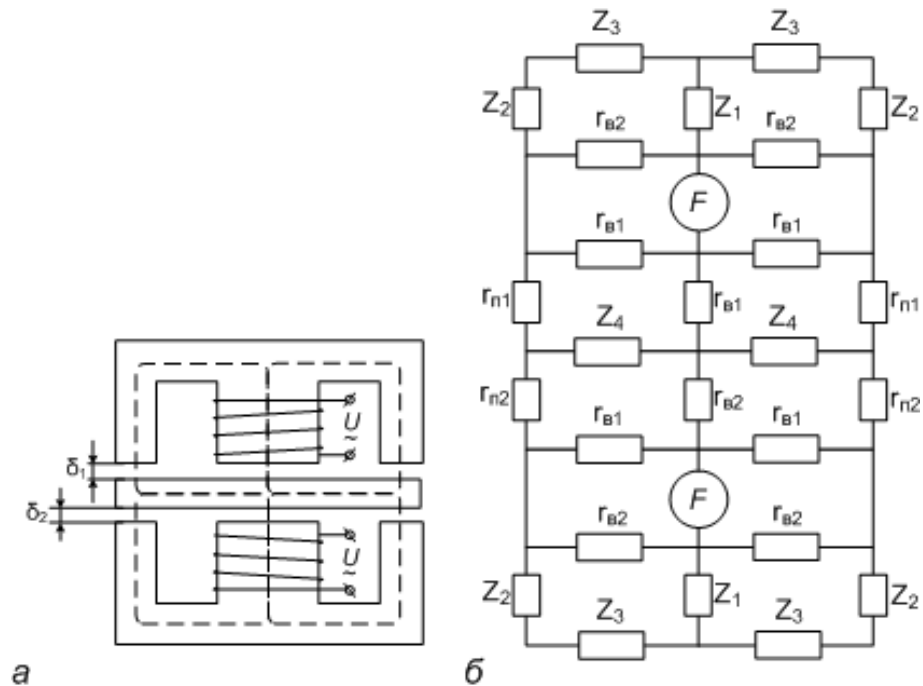


Рис. 3.29. Схема диференціального чутливого елемента (а) і схема заміщення його магнітного кола (б)

Приклад 3.3. На рис. 3.30, а, б зображено схему трансформаторного перетворювача і спрощену схему розміщення магнітного кола, в якому враховано лише провідності G_I , G_{II} , G_{III} повітряних проміжків між полюсами (кінцями) стрижнів I, II, III осердя 3 та якоря 4.

За схемами заміщення, користуючись законами Ома та Кірхгофа для магнітних кіл, можна скласти ряд рівнянь, за якими визначають величини потоків у різних частинах магнітної системи при заданій магніторушійній силі котушки.

Розв'язують також обернену задачу – визначають потрібну магніторушійну силу котушки при заданих значеннях робочих потоків у зазорах. Розв'язування задачі дещо ускладнюється через те, що значення магнітного опору магнітопроводу не стало, а закон його зміни – нелінійний. Тому для повного розв'язання задачі доводиться додатково використовувати криві намагнічування матеріалу.

Магнітне коло на змінному струмі розраховують також за допомогою схеми заміщення, але при цьому ділянки магнітопроводу замінюють комплексними опорами.

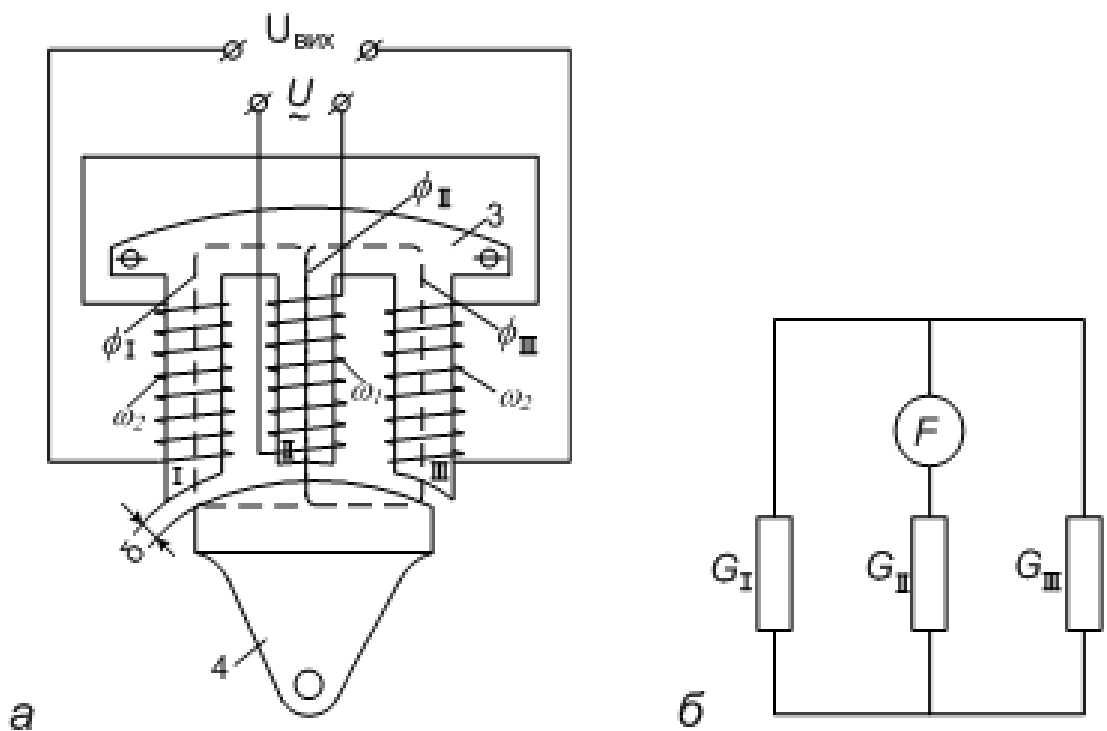


Рис. 3.30. Схема ТрП (а) і спрощена схема заміщення магнітного кола (б)

Потоки і напруги розглядаються як комплексні величини. Тому схема заміщення магнітного кола розраховується так само, як схема електричного кола з комплексними параметрами.

Магнітна провідність повітряних ділянок магнітного кола

Часто магнітні кола з достатньою для практичних цілей точністю можна розрахувати, нехтуючи магнітним опором матеріалу магнітопроводу, оскільки $R_{ж} \ll R_{п}$. В схемах заміщення в такому разі опори Z , відсутні. Для найпростішого випадку рівномірного повітряного зазору між двома паралельними площинами (рис. 3.31, а) всю провідність, коли $a/\delta > 10$ і $b/\delta > 10$, звичайно визначають за наближеною формулою

$$G_{п} = (ab/\delta)\mu_0. \quad (3.9)$$

При значеннях a/δ і b/δ , менших від вказаного, істотно впливають на магнітну провідність, спричиняючи її зменшення, потоки розсіювання Φ_p , які замикаються в повітрі між бічними поверхнями полюсів магнітопроводу.

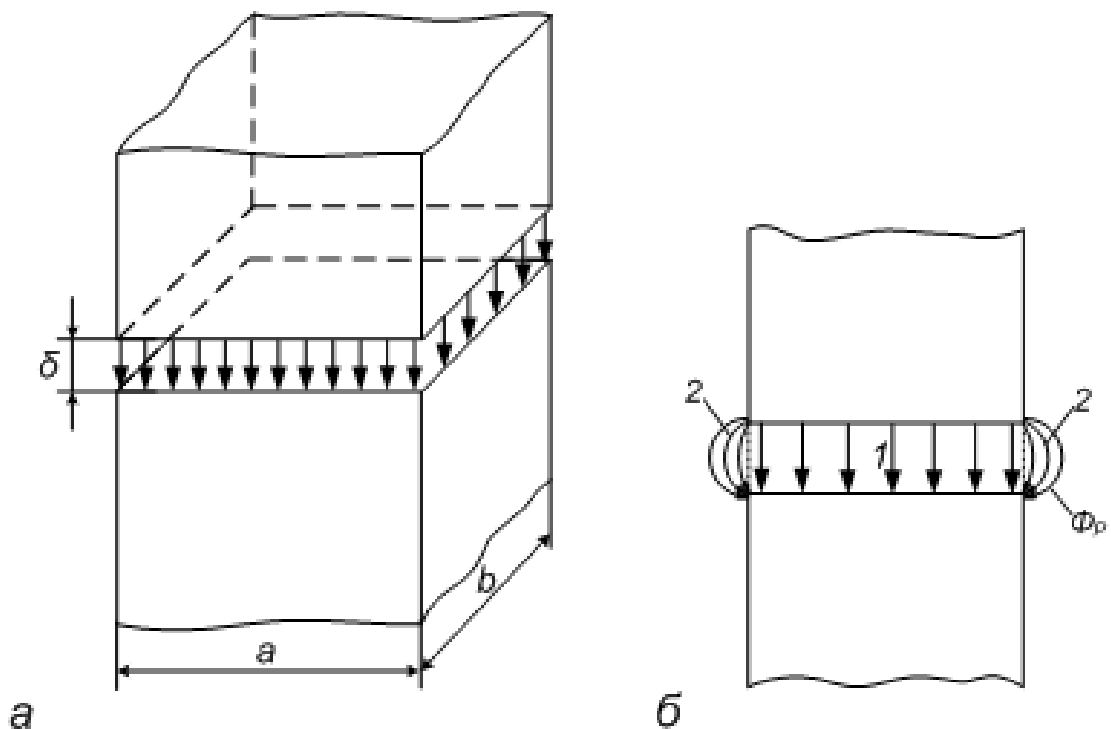


Рис. 3.31. До розрахунку магнітної провідності повітряної ділянки магнітного кола для рівномірного повітряного зазору (а); поле між паралельними полюсами (б)

В цьому разі поле між паралельними полюсами (рис. 3.30, б) можна вважати таким, що складається з двох частин: однорідного поля 1 і поля 2, яке визначається пучністю ліній індукції. Потік 2 називають крайовим потоком, або потоком розсіяння.

Графічний метод визначення провідностей

У разі складної конфігурації повітряних ділянок магнітного кола та потреби розрахувати провідність з великою точністю звичайно застосовують графічний метод визначення провідності. Покажемо на прикладі перетворювача, зображеного на рис. 3.28, а, побудову картини поля біля кінця (полюса) одного з його стрижнів та якоря. Скористаємося методикою побудови картини поля, викладеною, в працях А.Я. Буйлова, Б.С. Сотскова, М.А. Бібікова, А.Г. Сливинської (Буйлов А.Я. Основы электротехники. – М.: Госэнергоиздат, 1946; Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.: Госэнергоиздат, 1956; Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.; Госэнергоиздат, 1960).

Оскільки поворот якоря відбувається в площині креслення, то поле є плоско-паралельним. Поверхні полюсів, що обмежують повітряні проміжки, вважаються поверхнями однакового магнітного потенціалу, або екіпотенціальними поверхнями.

Для випадку плоско-паралельного поля (рис. 3.32) скористаємося поняттям екіпотенціальних ліній (у даному разі лінії 1–1, 1–2, 3–3, 3–4, 3–5).

Нехай цим екіпотенціальним лініям відповідають магнітні потенціали u_{m1} , u_{m2} , u_{m3} , u_{m4} , u_{m5} . Поле між ділянками полюсів осердя та якоря, що взаємно перекривають одна одну, однорідне, магнітні силові лінії в ньому паралельні. Поділимо це поле трьома екіпотенціальними лініями на чотири рівні частини. Проведемо на око середню екіпотенціальну лінію AB , що поділяє різницю потенціалів $\Delta u = u_{m3} - u_{m2}$ навпіл. З обох боків лінії AB будуюмо елементарні криволінійні чотирикутники так, щоб силові лінії, які їх обмежують, виходили під прямим кутом до поверхні полюсів, а в утворених між екіпотенціальними та силовими лініями криволінійних чотирикутників середня ширина дорівнювала середній довжині, тобто $a=b$, $a'=b'$ і т. д. Коли

силові лінії, що обмежують сторони відповідних чотирикутників (наприклад, kl і ln), не є продовженням одна одної, то це означає, що середня еквіпотенціальна лінія була проведена неточно і її потрібно змістити у відповідному напрямі. Щоб уточнити картину поля, особливо біля країв полюсів, слід провести проміжні еквіпотенціальні лінії, які поділяють різницю потенціалів ΔU на $1/4$, $1/8$, $1/16$ і т.п. частки.

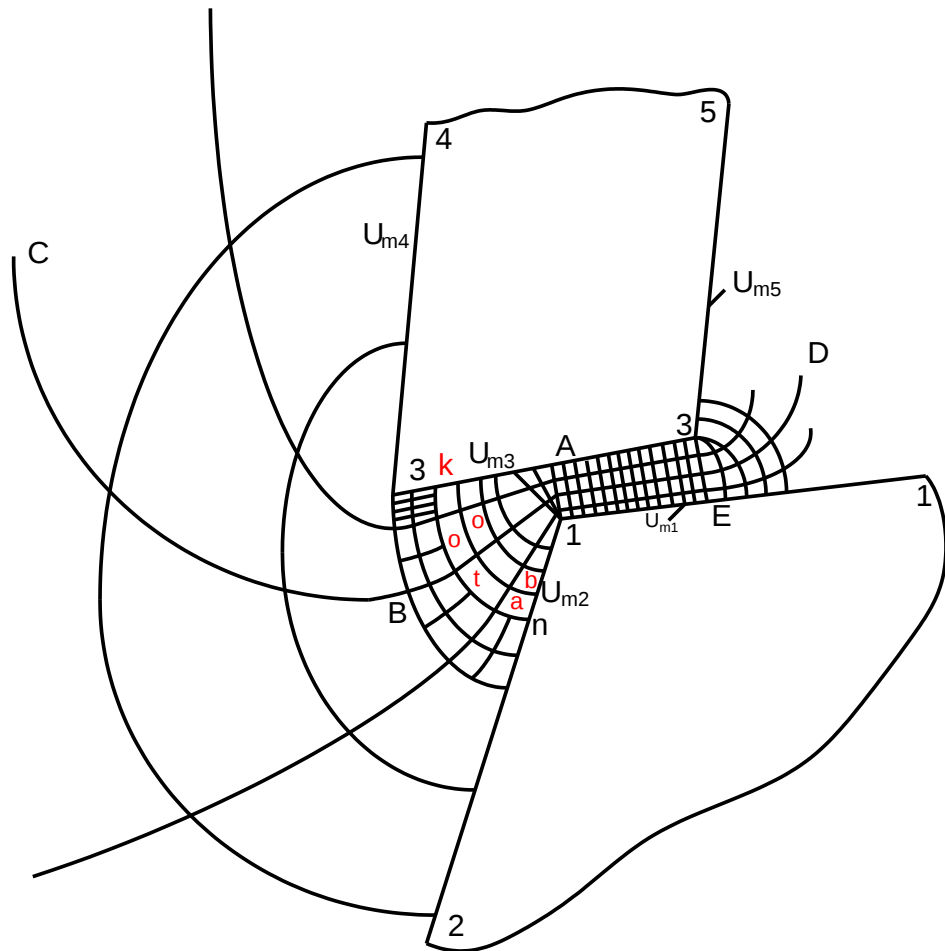


Рис. 3.32. Картина плоско-паралельного поля

На рис. 3.31 для уточнення картини поля біля лівого краю полюса 1 показано три еквіпотенціальні та силові лінії, які обмежують елементарні «квадрати», а також середні еквіпотенціальні лінії BC і ED , проведені відповідно між еквіпотенціальними лініями з потенціалами U_{m2} , U_{m4} , U_{m3} , U_{m5} . Там же показано розміщення силових ліній. Якщо поле складається з m паралельних силових трубок і в кожній з них міститься n елементарних

«квадратів», то при товщині поля h , м, повна геометрична провідність, м, дорівнює:

$$G = \frac{m}{n} h. \quad (3.10)$$

Магнітну провідність G у повітрі можна далі обчислити за формулою, Гн:

$$G_B = \mu G, \quad (3.11)$$

де $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Один з поширених методів визначення магнітної провідності повітряного зазору – метод розбиття поля на прості фігури, суть якого полягає ось у чому. Все поле в повітряному зазорі між полюсами розбивають трубками індукції на ряд потоків, причому так, щоб ці трубки індукції мали форму простих геометричних фігур, наприклад циліндрів, півциліндрів тощо. Провідність кожної трубки визначають як відношення середнього перерізу трубки до середньої її довжини. Повна провідність дорівнює сумі провідностей окремих трубок, якщо прикладена до кінців різниця магнітних потенціалів лишається для всіх трубок однаковою. На рис. 3.33 показано приклад такого розбиття. Розглядається поле між двома полюсами A та B , причому розміри полюса B (у плані) в кілька разів більші від розмірів полюса A . Все поле розбивають на такі трубки індукції:

2 – прямокутна призма з розмірами a , b ;

δ – відповідає повітряному зазору;

4 – чверть кругового циліндра з радіусом, що дорівнює δ .

6 – чверть порожнистого кругового циліндра з внутрішнім радіусом, що дорівнює δ , і зовнішнім, що дорівнює $\delta + m$, де m – деяка довільна величина, взята, звичайно, за дослідними даними, $m = (1 \dots 2)\delta$;

8 – половина кульового квадранта;

10 – половина квадранта кульової оболонки.

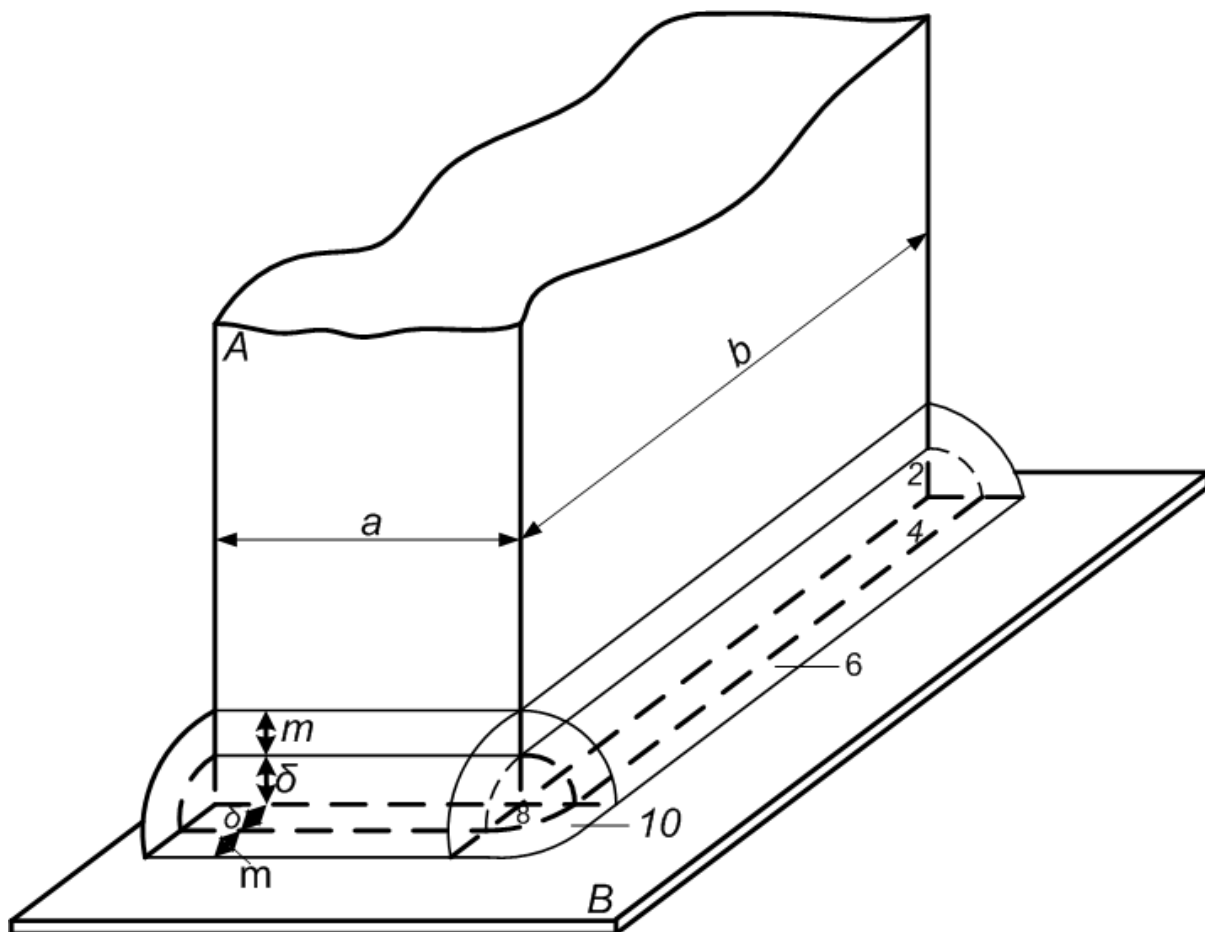


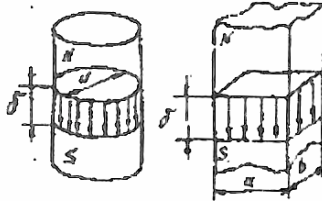
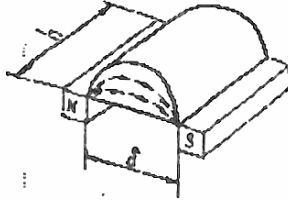
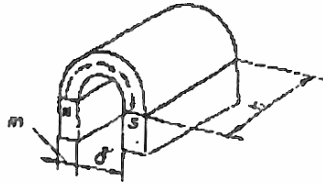
Рис. 3.33. Приклад розбиття до визначення провідності

В табл. 3.7 наведено формули для обчислення магнітних провідностей повітряних шляхів різної конфігурації. Нумери перелічених на рис. 3.33 форм відповідають позначенням табл. 3.7.

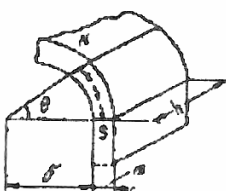
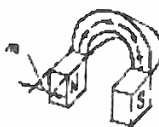
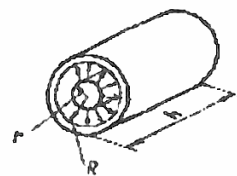
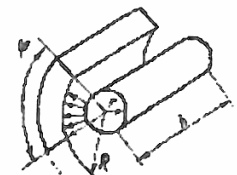
Приклад 3.4. *Визначити ефективне значення ЕРС $U_{вих}$ на затискачах вторинної (сигнальної) обмотки w_2 трансформаторного перетворювача, зображеного на рис. 7.9, за такими даними: напруга змінного струму $U=36$ В при частоті 400 Гц; розміри осердя та якоря відповідають даним рис. 3.34; матеріал осердя та якоря – сталь Э4АА; число витків первинної обмотки (обмотки збудження) $w_1=1500$; опір обмотки w_1 $R_1=250$ Ом; число витків вторинної (сигнальної) обмотки $w_2=1200$; робочий кут повороту якоря від середнього положення дорівнює $+5$.*

Таблиця 3.7

Магнітні провідності трубок простої геометричної конфігурації

Номер форми трубки	Форма трубки потоку	Ескіз трубки	Провідність σ , м
1	2	3	4
1 2	Круговий прямий циліндр Прямокутна призма		$G_1 = \frac{\pi d^2}{4 \delta}$ $G_2 = \frac{a b}{\delta}$
3 4	Половина кругового циліндра (трубка поля між ребрами) Чверть кругового циліндра (трубка поля між ребром і гранню)		$G_3 = 0,26 h$ $G_4 = 0,52 h$
5	Півкільце (трубка поля між гранями, що лежать в одній площині)		При $\delta \geq 3 m$ $G_5 = \frac{2 h}{\pi (1 + \delta / m)}$ При $\delta < 3 m$ $G_5 = \frac{h}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2 m}{\delta} \right)$

Закінчення табл. 3.7

1	2	3	4
6	Частина кільця (трубка поля між гранями, нахиленими одна до одної під кутом θ)		При $\delta \geq 3 m$ $G_6 = \frac{2 h}{\left(\frac{2 \delta}{m} + 1\right) \theta}$ θ — в рад. При $\delta < 3 m$ $G_6 = \frac{h}{\theta} \ln \left(1 + \frac{m}{\delta}\right)$
7	Кульовий квадрант (трубка поля між кутами)		$G_7 = 0,077 \delta$
8	Квадрант кульової оболонки (трубка поля між ребрами)		$G_8 = 0,25 m$
9	Порожнистий циліндр (трубка поля між коаксіальними циліндрами)		$G_9 = h \frac{2 \pi}{\ln \frac{R}{r}}$
10	Частина порожнистого циліндра (частина трубки поля між коаксіальними циліндрами)		$G_{10} = h \frac{\Psi}{\ln \frac{R}{r}}$

Розв'язання. 1. *Визначимо магнітні провідності повітряного проміжку, враховуючи і не враховуючи випучування силових ліній біля полюсів (кінців) стержнів осердя. Магнітними опорами осердя та якоря нехтуємо через мале значення цих опорів порівняно з магнітним опором повітряного проміжку. На рис. 3.32 було показано картини поля біля одного з полюсів такого проміжку. Для спрощення розрахунку побудуємо біля полюсів наближену картину поля, складеного з трубок 1–12 простої геометричної форми (рис. 3.34, а).*

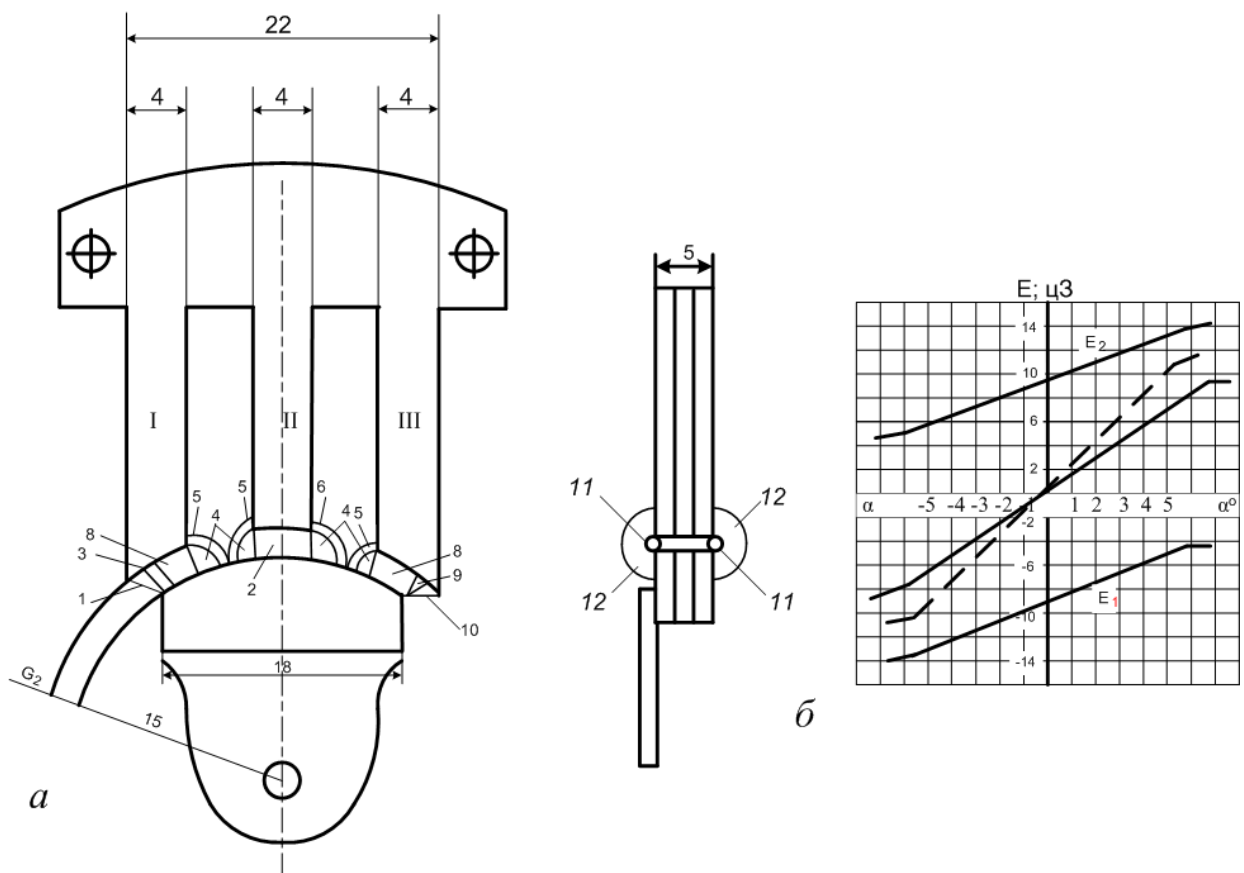


Рис. 3.34. Приклад розрахунку трансформаторного вимірювального перетворювача:

а – спрощена картина поля біля полюсів;

б – характеристики перетворювача за даними розрахунку

Згідно з позначеннями рис. 3.34 сумарні геометричні провідності G_I , G_{II} , G_{III} для відповідного полюса та якоря можна обчислити за формулами

$$G_I = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + 2(G_{11II} + G_{12I}) \quad (3.12)$$

де $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_{11I}, G_{12I}$ – геометричні провідності силових трубок, причому G_{11I}, G_{12I} – провідності між бічними поверхнями полюсів стержнів та якоря за аналогією із силовими трубками 11, 12, показаними на рис. 3.34, а, для полюса II та якоря.

Відповідно для провідностей G_{II} і G_{III} дістанемо

$$G_{II} = 2(G_4 + G_6 + G_{11II} + G_{12II}) + G_1 \quad (3.13)$$

$$G_{III} = G_4 + G_5 + G_8 + G_9 + G_{10} + 2(G_{11III} + G_{12III}). \quad (3.14)$$

За відповідними формулами табл. 3.7 знайдемо провідність кожної силових трубки, а потім сумарні геометричні провідності G_I, G_{II}, G_{III} при середньому положенні якоря та при відхиленні якоря від середнього положення на кути $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$. Результати обчислень зведемо в табл. 3.8.

2. Обчислимо потік Φ_{II} , що створюється обмоткою збудження. Згідно зі спрощеною схемою заміщення (див. рис. 3.30, б), яка враховує лише провідності повітряних проміжків, можна записати

$$\begin{aligned} \Phi_{II} &= \frac{Iw_1}{R_{II} + \frac{R_I R_{III}}{R_I + R_{III}}} = \frac{Iw_1}{\frac{1}{\mu_0 G_{II}} + \frac{1}{\frac{1}{\mu_0 G_I} + \frac{1}{\mu_0 G_{III}}}} = \\ &= \frac{Iw_1}{1/\mu_0 G_{II} + 1/\mu_0 (G_I + G_{II} + G_{III})} = \frac{Iw_1 G_{II} (G_I + G_{III}) \mu_0}{G_I + G_{II} + G_{III}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Аналізуючи дані табл. 7.2, можна встановити, що поряд із зміною провідностей G_I і G_{III} при повороті якоря сума їх $G_I + G_{III}$ за відсутності навантаження практично лишається сталою (максимальне відхилення суми $G_I + G_{III}$ від середнього її значення в даному разі становить 0,17%). Отже, практично незмінними будуть ефективні значення потоку Φ_{II} обмотки збудження та струм I , що протікає по ній (див. також формулу (7.18)), якщо значення ефективної напруги U незмінне. При середньому положенні якоря $G_I = G_{III}$ потік становить, Вб:

$$\Phi_{II} = Iw_1 \frac{2G_I G_{II} \mu_0}{2G_I + G_{II}} = 1500 \frac{2 \cdot 0,08555 \cdot 0,118 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,08555 + 0,118} I = 1,315 \cdot 10^{-4} I.$$

Сила струму

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}.$$

Згідно з формулою (7.1) можна записати для індуктивності

$$L = \frac{w_1 \Phi_{II}}{I} = 1500 \cdot 1.315 \cdot 10^{-4} = 0,197 \text{ Гн.}$$

Отже, струм буде

$$I = \frac{36}{\sqrt{250^2 + (2\pi \cdot 400 \cdot 0,197)^2}} = 0,066 \text{ А} = 66 \text{ мА.}$$

Потік

$$\Phi_{II} = 1,315 \cdot 10^{-4} I = 1,315 \cdot 10^{-4} \cdot 0,066 = 868 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

3. Знайдемо потоки Φ_I і Φ_{III} . Згідно з схемою заміщення

$$\Phi_{II} = \Phi_I + \Phi_{III}; \quad \frac{\Phi_I}{\Phi_{III}} = \frac{G_I}{G_{III}}.$$

Спільне розв'язування цієї системи рівнянь дає

$$\Phi_I = \Phi_{II} \frac{G_I}{G_I + G_{III}}; \quad \Phi_{III} = \Phi_{II} \frac{G_{III}}{G_I + G_{III}}. \quad (3.16)$$

За наведеними формулами обчислюємо значення потоків Φ_I і Φ_{III} при різних положеннях якоря, здобуті дані заносимо в таблицю.

4. Визначимо ефективні значення ЕРС E_I і E_{III} . В, індуковані в кожній із вторинних (сигнальних) обмоток, та напругу $U_{вих}$ на виході:

$$E_I = 4,44 w_2 f \Phi_I B; \quad E_{II} = 4,44 w_2 f \Phi_{III} B; \quad U_{вих} = E_{II} - E_I. \quad (3.17)$$

Згідно з даними $w_1=1200$, $f=400$ Гц та обчисленими значеннями потоків обчислимо значення E_I , E_{II} , $U_{вих}$. Результати розрахунків занесемо в табл. 3.8 і потім побудуємо графік залежності E_I , E_{II} , $U_{вих}$ як функції кута α повороту якоря від середнього положення.

5. Обчислимо значення E_I , E_{II} , $U_{вих}$ без урахування випучування потоку. У цьому разі формула (3.15) набере вигляду

$$\Phi_{II} = I w_1 \frac{2G_3 G_1 \mu_0}{2G_3 + G_7} = 1500 \frac{2 \cdot 0,0593 \cdot 0,0988 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,593 + 0,0988} I = 1,015 \cdot 10^{-4} I.$$

Індуктивність

$$L = \frac{w_1 \Phi_{II}}{I} = 1,015 \cdot 10^{-4} \cdot 1500 = 0,152 \text{ Гн.}$$

Сила струму

$$I = \frac{36}{\sqrt{250^2 + (2 \cdot 400 \cdot 0,152)^2}} = 0,079 \text{ A} = 79 \text{ mA}.$$

Потік

$$\Phi_{II} = 1,015 \cdot 10^{-4} \cdot 0,079 = 802 \cdot 10^{-8} \text{ Вб}.$$

Таблиця 3.8

До прикладу розрахунку трансформаторного перетворювача

Кут α повороту якоря від середнього положення, градусів		0	1	2	3	4	5
З врахуванням випучування потоку біля полюсів							
Геометричні провідності, м	σ_I	0,0855	0,0792	0,0726	0,0662	0,0598	0,0535
	σ_{II}	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118
	σ_{III}	0,0855	0,0917	0,0981	0,1044	0,1107	0,1169
Електрорушійна сила, В	E_I	9,24	8,56	7,86	7,15	6,49	6,79
	E_{II}	9,24	9,93	10,63	11,33	11,99	12,7
	$U_{\text{вих}}$	0	1,37	2,77	4,18	5,5	6,91
Без врахування випучування потоку біля полюсів							
Геометричні провідності, м	σ_3	0,0593	0,0288	0,0462	0,0397	0,0332	0,0267
	σ_7	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988	0,0988
	σ_8	0,0593	0,0657	0,0722	0,0787	0,0852	0,0917
Електрорушійна сила, В	E_I	8,44	7,6	6,66	5,72	4,78	3,86
	E_{II}	8,44	9,48	10,42	11,36	12,3	13,22
	$U_{\text{вих}}$	0	1,88	3,76	5,64	7,52	9,36

Формули (7.19) для потоків Φ_I і Φ_{III} набирають такого вигляду

$$\Phi_I = \Phi_{II} \frac{G_3}{G_3 + G_8}; \quad \Phi_{III} = \Phi_{II} - \Phi_I.$$

За цими формулами для кожного кута повороту якоря обчислимо значення Φ_I і Φ_{III} , а потім за формулами (3.17) – значення E_I , E_{II} , $U_{\text{вих}}$. Здобуті результати зведемо в табл. 3.8. На рис. 3.34, б пунктирною лінією показано графік залежності $U_{\text{вих}}$ як функції кута α повороту якоря від середнього положення для даного випадку. Як впливає із здобутих даних, максимальний розбіг значень напруг $U'_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вих}}$, обчислених з врахуванням випучування потоку біля полюсів і без врахування такого випучування для перетворювача заданих розмірів становить 35 %:

$$((9,36 - 6,91)/6,91) \times 100\% = 35\%.$$

Контрольні питання до практичного заняття 3

1. Потенціометричний перетворювач (ПП) ТЗА. Чутливість ПП.
2. Основні конструктивні різновиди ПП ТЗА. Класифікація ПП ТЗА. Способи компоновки ПП.
3. Розрахунок лінійних потенціометричних перетворювачів. Чутливість ПП.
4. Статична характеристика потенціометричного перетворювача. Похибки не лінійності потенціометричних перетворювачів. Методи усунення похибок не лінійності.
5. Визначення температурних і початкових напруг, виникаючих у потенціометричних перетворювачах. Визначення зносу щітки.
6. Синусно-косинусні потенціометричні перетворювачі.
7. Різновиди ПП ТЗА. Переваги та недоліки. Застосування.
8. Схеми включення потенціометричних перетворювачів. Переваги і недоліки.
9. Основні характеристики потенціометричних перетворювачів ТЗА.
10. Основні конструктивні різновиди потенціометричних перетворювачів ТЗА у залежності від способу переміщення повзуна. Приклади.
11. Метод розрахунку функціонального потенціометричного перетворювача з шунтуючими опорами. Розрахунок.
12. Функціональні потенціометричні перетворювачі ТЗА. Визначення. Застосування. Способи здійснення функціональної залежності.
13. Розрахунок функціонального потенціометричного перетворювача ТЗА зі змінною довжиною витка за рахунок змінного периметра поперечного перерізу каркасу.
14. Індуктивні перетворювачі. Застосування.
15. Конструктивні різновиди ІП.
16. Принцип дії ІП. Переваги і недоліки. Область застосування. Розрахунок.

17. Диференційні індуктивні перетворювачі. Основні розрахункові співвідношення.
18. Трансформаторні перетворювачі (ТрП). Застосування.
19. Принцип дії ТрП. Призначення. Переваги і недоліки.
20. Основні конструктивні різновиди ТрП.
21. Трансформаторні перетворювачі. Основні розрахункові співвідношення.
22. Трансформаторні перетворювачі з переміщуваним ротором. Переваги і недоліки. Принцип дії. Конструктивні різновиди схем.
23. Трансформаторні перетворювачі з переміщуваним якорем. Переваги і недоліки. Приклади схем.

Заняття 4

ГЕНЕРАТОРНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Мета практичного заняття 4 - вивчити основні типи генераторних вимірювальних перетворювачів, їх переваги та недоліки. Навчитися проводити розрахунки генераторних вимірювальних перетворювачів. Зробити висновки.

ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ТП)

Необхідно ознайомитись з теорією роботи ТП, основними конструктивними різновидами ТП, матеріалами елементів конструкції, перевагами та недоліками ТП, методикою розрахунку ТП.

Короткі теоретичні відомості щодо ТП

ТП засновані на використанні зміни електричного опору провідних матеріалів при їх деформації (розтягу чи стиску) в межах пружних деформацій.

Матеріали ТП:

дроту: константан, ніхром, манганин, вісмут
електроізоляційних підкладок: цигарковий папір, лакова плівка, цемент.

Скріплюються клеєм, лаком або цементом.

Переваги ТП:

1. Малі вага і габарити;
2. Можливість вимірювання постійних і змінних деформацій
3. Можливість розміщення важкодоступних місцях
4. Простота конструкції і дешевизна виконання

Недоліки ТП:

1. Наявність поперечної тензочутливості (у дротяних 0,25-1%, у фольгових і ненаклеюваних - 0)
2. Мала потужність вихідного сигналу.

Різновиди ТП:

- Провідникові (дротяні і фольгові),
- Напівпровідникові,
- Плівкові.

Особливість приклеювальних ТП (рис. 4.1) - це перетворювачі разової дії.

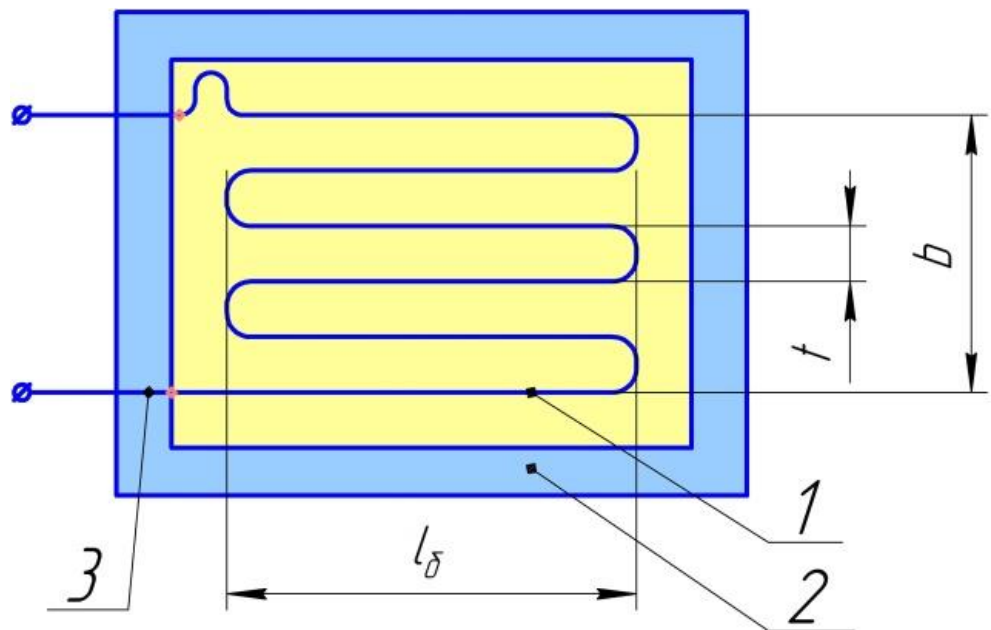


Рис.4.1. Приклеювальні ТП

Ненаклеювальні (вільні) ТП (рис.4.2) - для багаторазового вимірювання. Виконується у вигляді одного або ряду тензочутливих дротів, закріплених кінцями на дві загальні струмоізолювані планки, які кріпляться до випробуваної деталі, деформація якої вимірюється.

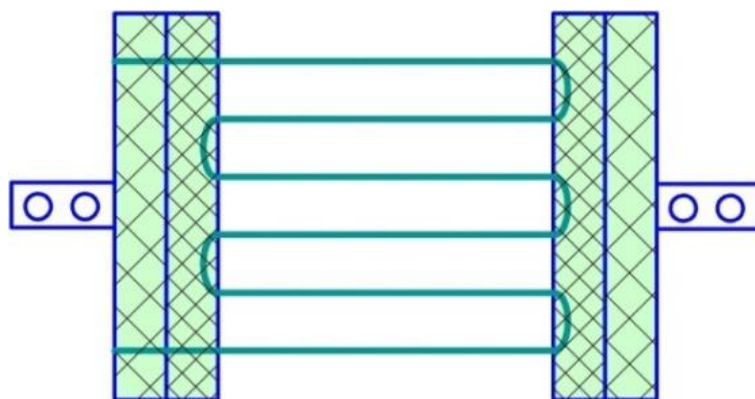


Рис. 4.2. Ненаклеювальні (вільні) ТП

Переваги: відсутність поперечної тензочутливості та повзучості

Недолік: складно використовувати для вимірювань у важкодоступних місцях

Фольгові перетворювачі (рис. 4.3.): тонка стрічка (0,01 мм) з фольги, на якій частина металу травленням вибрана так, що решта утворює решітку з виводами

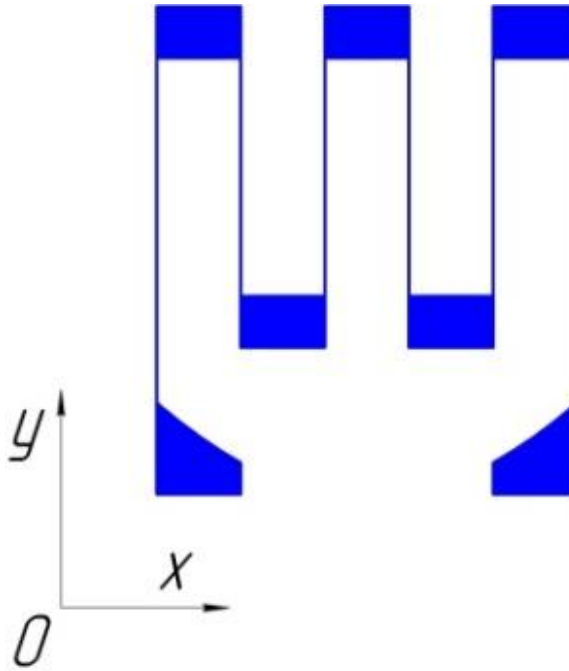


Рис. 4.3. Фольгові перетворювачі

Недоліки:

1. Малої потужності вихідний сигнал
2. $R \leq 50 \Omega$

Переваги:

- Відсутність поперечної тензочутливості,
- Менші, ніж у дротяних, габарити і вага,
- Кращі умови охолодження,
- Безінерціальність,
- Краща якість приклеювання,
- Можливість розміщення в важкодоступних місцях
- Простота конструкції і дешевизна виготовлення

Напівпровідникові ТП (рис.4.4.) - тонкі стрижні 1 з напівпровідникових матеріалів, до кінців яких кріплять металеві виводи 3 (2 - контактний клей)

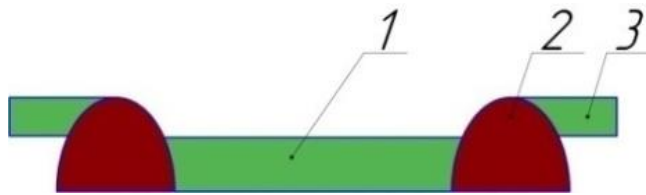


Рис.4.4. Напівпровідникові ТП

Переваги: висока чутливість (кілька сотень одиниць)

Недоліки: низька механічна міцність, значний гістерезис, нестабільність характеристики.

Матеріали НПП: (Напівпровідники) германій, кремній, сур'янистий індій та «тензоліти»: графіт з тонким кварцовим піском і смолою, графіт з крейдою і каніфоллю

Приклади практичного застосування тензометричних перетворювачів

Застосування: вимір малих переміщень, деформацій, зусиль

У сучасних автоматизованих протезів, щоб поліпшити їх характеристики впроваджують в їх конструкцію плівкові тензодатчики для керування силою стиснення пальців руки-протеза.

Розрахунок тензометричного перетворювача

Основні етапи розрахунку ТП: вибір конструкції, матеріалу; розрахунок геометричних розмірів; розрахунок чутливості та похибки.

Вихідними даними для розрахунку є вимоги технічного завдання (ТЗ) на розробку ТП.

Згідно з вимогами ТЗ конструкцію і матеріал ТП вибирають, зважаючи на межі вимірювання, умови встановлення ТП на об'єкті вимірювання (матеріал об'єкта вимірювання, розміри, кривизна та стан місця під встановлення ТП, можливість виконання термообробки); температурний діапазон роботи і точність. Частіше застосовують дротяні ТП, оскільки вони забезпечують вимірювання деформації в широких амплітудному і

температурному діапазонах з достатньою точністю. Якщо вимірювання виконують при від'ємних температурах, перевагу надають плівковим (лаковим) ТП, при високих температурах – цементним.

Малі деформації у вузькому температурному діапазоні вимірюють за допомогою напівпровідникових ТП завдяки їх високій чутливості.

Для розрахунку геометричних розмірів ТП визначальними є вимоги щодо живлення вимірювального кола.

Допустимий струм живлення наклеюваного дротяного ТП може бути розрахований за формулою [51]:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{7,3 \cdot 10^{10} \cdot d^3},$$

де d – діаметр дроту, м (вибирають мінімально можливим).

Для плівкових і фольгових ТП допустимий струм $I_{\text{доп}}$ значно більший, оскільки в цих ТП умови охолодження кращі, ніж в дротяних. Величина $I_{\text{доп}}$ цих ТП залежить від співвідношення ширини m до товщини z смужки ТП. Так, при співвідношенні $m/z=10$, $I_{\text{доп}}=1,4 I_{\text{доп}}$ дротяного ТП того ж самого перерізу. При $m/z=40$ $I_{\text{доп}}=1,95 I_{\text{доп}}$.

Допустимий струм напівпровідникових ТП можна брати таким, що дорівнює допустимому струму фольгових ТП, а вільних ТП – d 1,5 рази нижчий, ніж наклеюваних.

За даною напругою живлення і залежно від вибраного вимірювального кола обчислюють опір ТП.

Базу і ширину дротяного ТП визначають з таких передумов.

Для зменшення габаритних розмірів датчика потрібно зменшувати базу тензорезистора. Проте при заданому опорі в матеріалі ТП це спричинює збільшення ширини і все більша частина дроту виявляється неробочою, через що знижується коефіцієнт чутливості. Тому відношення розміру бази l_0 , ТП до його ширини b має бути в межах 2...5, тобто

$$l_0/b = n = 2 \dots 5.$$

Зменшити ширину ТП можна за рахунок скорочення відстані між окремими дротиками. Проте надмірне зменшення цієї відстані спричиняє температурний вплив одного боку петлі ТП на другий, що потребує

зниження допустимого струму, і, крім того, обмежене технологічними можливостями намотки ТП. Крок намотки $t \gg 2l$. Практично відстань між витками вибирають у 10...20 раз більшою за діаметр дроту.

Враховуючи, що відношення розміру бази ТП до його ширини $n=l_6/b$, знаходимо число витків ТП

$$W = \frac{l}{2l_6} = \frac{l}{2b \cdot n},$$

де $l = \pi R d^2 / 4 \rho$ – довжина тензодроту; R – опір ТП; d – діаметр дроту; ρ – питомий опір ТП.

Ширина ТП може бути виражена через число витків та крок намотки: $b = (2W - 1)t$.

Динамічні властивості ТП визначаються динамічними властивостями об'єкта вимірювання, верхня гранична частота вимірювання деформації ТП становить 100 кГц; амплітудний діапазон ТП визначається межею міцності тензочутливого матеріалу і для найпоширеніших дротяних ТП на паперовій основі, плівкових та фольгових ТП становить 0,005–2%.

Потужність, яка розвивається в ТП, дорівнює

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Питома площа поверхні охолодження не повинна бути нижчою за норму $\delta \geq \delta_{\text{доп}}$, яка для ТП, наклеєних на метал, приблизно дорівнює 2 см/Вт, а для ТП, наклеєних на пластмасу, – 5 см/Вт.

Оскільки площа поверхні охолодження $S = (2bl_6)4$, для чотирьох тензодатчиків мостової схеми, мають виконуватися умови

$$\sigma = \frac{S}{P} \geq \sigma_{\text{доп}},$$

$$\frac{8b \cdot l_6}{U^2 / R} \geq \sigma_{\text{доп}},$$

$$8b \cdot l_6 \cdot R \geq \sigma_{\text{доп}} \cdot U^2,$$

$$U \leq \sqrt{\frac{8b \cdot l_6 \cdot R}{\sigma_{\text{доп}}}}.$$

Похибка ТП характеризується такими складовими: повзучістю, гістерезисом, нелінійністю, температурною похибкою нуля та чутливості, похибкою від розкиду тензочутливості тощо.

Основна похибка вимірювального кола δ може бути значно меншою і зумовлена в основному стабільністю й точністю напруги живлення δ_T та елементів вимірювального кола δ_K . Формулу для розрахунку основної похибки ТП можна подати у вигляді

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_K^2}.$$

Найважливіші характеристики ТП – чутливість, основна похибка, напруга живлення, опір.

Способи ввімкнення ТП

Тензометричні перетворювачі вмикаються за мостовою схемою в одне, два або чотири плеча. При цьому в два протилежних плеча вмикаються перетворювачі, що реагують на одну й ту ж саму деформацію (наприклад, розміщені поруч), а в два інших плеча – ті, що реагують на ту ж саму деформацію, але протилежного знака (наприклад, розміщені з іншого боку пластини, що згинається). Міст з двома, чотирма ТП має чутливість відповідно у 2 і 4 рази більшу, ніж міст з одним ТП.

Для компенсації температурної похибки ТП використовують, наприклад, такий спосіб. Два однакових перетворювачі розміщують на місці вимірювання (один – на деталі, що деформується, другий – на деталі, яка не зазнає деформації) і вмикають їх як два суміжні плеча мостової схеми.

Тоді прирости опорів ТП за рахунок температури однакові в обох плечах мосту і не впливають на результат вимірювання.

Мостову схему ввімкнення ТП зображено на рис. 4.5.

Із чотирьох відібраних тензоперетворювачів у плечі r_1 та r_3 вмикаються перетворювачі з найбільшим опором. Тоді за допомогою змінного резистора, який ввімкнено в плече r_4 , і який має опір одного порядку з розкидом значень перетворювачів r_1 , r_2 , r_3 та r_4 , можна встановити міст у стан рівноваги за

відсутності деформації. За наявності деформації на виході у режимі холостого ходу буде напруга

$$U_{вих} = U \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{(r_2 + r_3)(r_1 + r_4)}.$$

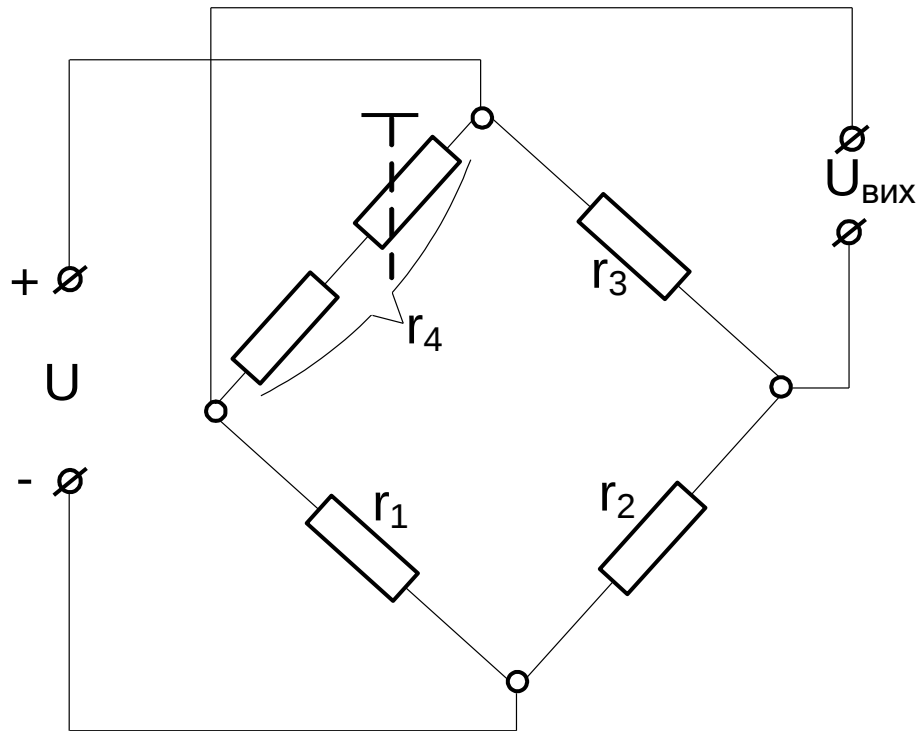


Рис. 4.5.. Мостова схема ввімкнення тензоперетворювачів

У разі одного активного ТП, увімкненого в плече r_1 ,

$$r_1 = r_D \text{ і } r_2 = r_3 = r_4 = r_0$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{2(r_D + r_0)}.$$

У разі двох активних ТП, ввімкнених в плечі r_1 і r_3 ,

$$r_1 = r_3 = r_D,$$

$$r_2 = r_4 = r_0$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{r_D + r_0}.$$

У разі чотирьох активних ТП $r_1=r_3=r_{д1}$ та $r_2=r_4=r_{д2}$ (якщо наклеюємо два ТП згори, а два інших ТП знизу і беремо в них приріст довжини з різними знаками)

$$U_{вих} = U \frac{r_{д1} - r_{д2}}{r_{д1} + r_{д2}}.$$

Приклад розрахунку ТП

Опір навантаження $r_n=3000$ Ом; кількість ТП у схемі мосту – 1; база $l_6=20$ мм; ширина $b=10$ мм; ТП клеїться на метал; питома допустима площа поверхні охолодження $\sigma_{доп}=2 \cdot 10^2$ мм²/Вт. Потрібно розрахувати ТП.

Розв'язання

Вибираємо дрiт з константану. Діаметр дроту $d=0,025$ мм. Питомий опір матеріалу дроту $\rho=0,45 \cdot 10^{-3}$ Ом·мм.

Обчислимо крок $t \geq 2d=0,05$ мм. Виберемо $t=0,07$ мм. Визначимо число петель ТП за формулою $2W - 1 = b/t = 10/0,07 = 143$, звідки $W=72$.

Знайдемо вихідний внутрішній опір r мосту за формулою $r=r_0+r_n$ взявши до уваги, що

$$r_0 = \frac{4 \cdot \rho \cdot l_\delta}{\pi \cdot d^2}, \quad r_n = \frac{4 \cdot \rho \cdot b}{\pi \cdot d^2},$$

де

$$q = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Тоді $r=r_0+r_n=2890$ Ом. Розраховане значення $r < r_n=3000$ Ом, тобто розрахунок виконано не за оптимальним варіантом, але близьким до нього.

Напруга на вході ТП

$$U = \sqrt{\frac{8 \cdot b \cdot l_\delta \cdot r}{\sigma_{доп}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 2890}{2 \cdot 10^2}} = 152 \text{ В.}$$

Потужність, споживана в ТП,

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{152^2}{2890} = 8 \text{ Вт.}$$

Варіанти завдання розрахунку ТП:

Розрахувати дротяний тензометричний перетворювач (знайти напругу живлення та потужність), якщо відомі його база l_0 , ширина b , питома та допустима площа поверхні охолодження σ_{don} . Перетворювачі підключені в мостову схему (кількістю 4 шт). Матеріал дроту – константан.

Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

Таблиця 4.1

Вихідні дані до розрахунку ТП:

Умовне позначення	Варіанти										Одиниці вимірювання
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$l_0=$	20	20	20	20	18	18	18	16	15	21	мм
$b=$	10	8	6	5	9	8	6	4	5	7	мм
$\sigma_{don}=$	200										мм ² /Вт
$d=$	0,025										мм
$\rho=$	0,49·10 ⁻³										Ом·мм

П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Короткі теоретичні відомості щодо п'єзоелектричного перетворювача

П'єзоефект полягає в тому, що при стиску або розтягу пластини, виготовленої з кристала з п'єзоелектричними властивостями, на гранях виникає електричний заряд Q , пропорційний до діючої сили F .

$$Q = k_1 F_x \quad - \text{поздовжній п'єзоефект,}$$

$$Q = -k_1 \frac{S_x}{S_y} F_y \quad - \text{поперечний п'єзоефект.}$$

Знак «-» означає, що при дії деформованого зусилля вздовж осі у-у знак заряду буде протилежним у порівнянні з випадком, коли деформаційне зусилля діє вздовж осі х-х.

$$k_1 = 2.1 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н} \text{ п'єзоелектрична стала}$$

Для однієї окремо взятої пластини:

напруга

$$U = \frac{Q}{C}$$

де Q - заряд, Кл; C - власна ємність п'єзопластини

$$C = \frac{\varepsilon S_x}{d}$$

де S_x - площа поверхні пластини; d - товщина пластини

$$\varepsilon = \varepsilon_k \cdot \varepsilon_{\text{вак}}$$

$$\varepsilon_{\text{вак}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$$

$\varepsilon_k = 3,5$ - діелектрична постійна для кварцу

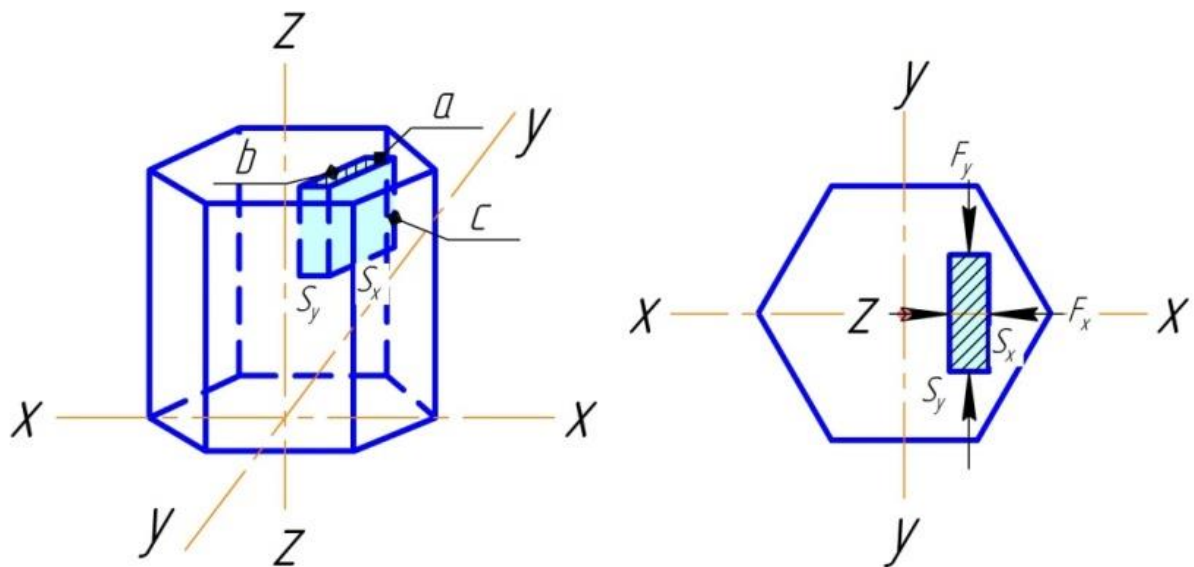


Рис. 4.6. x - x - електрична вісь;

y - y - механічна вісь;

z - z - оптична вісь

Матеріали п'єзоелектричного перетворювача

Сегнетова сіль (тах чутливість, але залежить від температури); кварц (механічна і електрична міцність, лінійні характеристики, не залежить від температури); фосфат амонію, кераміка, титанат барію

Переваги п'єзоелектричного перетворювача

1. Висока жорсткість (незначна деформація при навантаженні)
2. ПП дозволяють конструювати прилади малих розмірів.

3. Низька ціна.
4. Проста конструкція.

Недолік п'єзоелектричного перетворювача (ПеП)

У звичайному виконанні їх не можна застосовувати для вимірювання статичних і повільно мінливих зусиль через безперервне падіння напруги в часі через витік заряду з пластин

Приклади практичного застосування п'єзоелектричних перетворювачів

В радіоелектроніці, пристроях автоматики і ВТ, в вимірювальній техніці (п'єзоелектронні джерела високих і низьких напруг, п'єзопровідні пристрої, п'єзокерамічні матриці і ЗУ, прилади вимірювання тиску і вібрації).

Датчики прискорення.

П'єзоелектричні елементи, що працюють на вигин, годяться в якості датчиків прискорення для систем укладання і натягу ременів безпеки для спрацьовування натяжителя стрічки ременів безпеки і подушок безпеки. Основою датчика прискорення є елемент, що працює на вигин («траверса»), що складається з двох протилежно поляризованих п'єзоелектричних шарів, склеєних між собою («біморфного»). Прискорення, що впливає на них, викликає в одному з шарів механічне напруження розтягу, а в другому з шарів напруга стиснення (рис. 4.7).

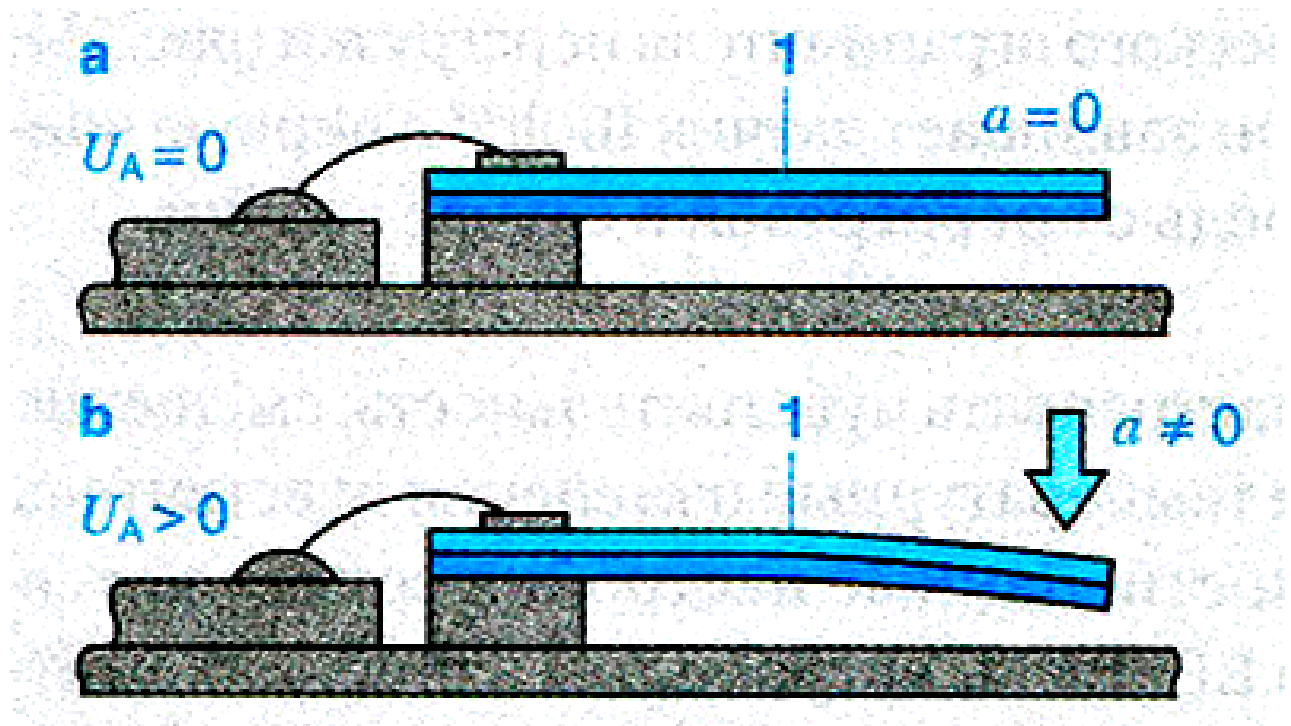


Рис. 4.7. Елемент, що працює на вигин, п'єзоелектричного датчика прискорення: а) у стані спокою; б) у момент прискорення: a ; 1 - п'єзокерамічний біморфний елемент, що працює на вигин; U_A - вимірювана напруга

Датчики тиску

За допомогою датчиків тиску вимірюється тиск у впускному колекторі, тиск палива в системі уприскування, тиск в шинах, тиск робочої рідини в гальмівній системі, тиску масла в системі змащення. Для оцінки тиску застосовується п'єзореzystивного ефект, який полягає в зміні опору тензорезистора при механічному розтягуванні діафрагми.

Датчик детонації

Оцінює вібрацію двигуна, яка супроводжує неконтрольоване займання паливно-повітряної суміші. Датчик являє собою п'єзоелектричний елемент, який при вібрації генерує електричний сигнал.

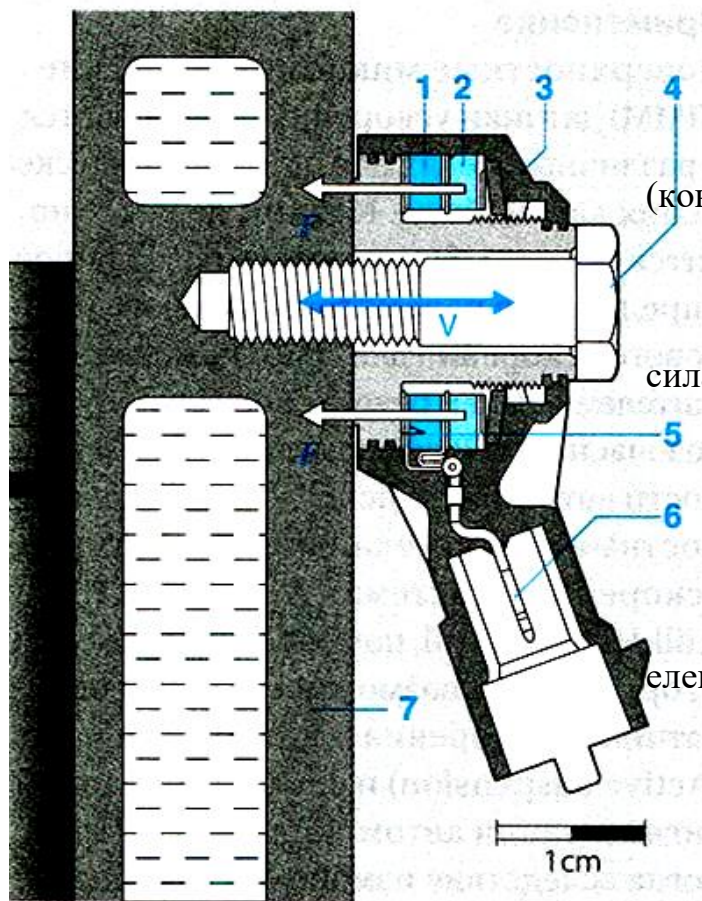


Рис. 4.8. Датчик детонації
(конструкція і установка):

- 1 – п'єзокераміка;
- 2 – сейсмічна маса з
силами стиснення F ;
- 3 – корпус,
- 4 – болт,
- 5 – контакт,
- 6 – підключення до
електромережі,
- 7 – блок двигуна,
- V – вібрація

Маса (рис. 4.8., поз. 2) в силу своєї інертності створює сили стиснення в ритмі коливань збудження, що впливають на п'єзокераміку, виконану у формі кола (1). Ці сили всередині кераміки викликають перенос заряду. Між зовнішньою і внутрішньою сторонами кераміки виникає електрична напруга, яке реєструється контактними дисками (5) і обробляється в блоці управління.

«Розумна» дорога

При русі автомобілів, поїздів або пішоходів, частина їх енергії витрачається на деформацію дорожнього покриття. В результаті деформації покриття нагрівається, тепло розсіюється і енергія втрачається безповоротно. Якщо вмонтувати в дорожнє покриття, тротуар або залізничне полотно п'єзоелементи, частина її можна повернути в справу. Причому досить відчутну частину.

Так, експерименти показали, що кілометрову ділянку автостради, по якому проїжджає 600 автомобілів на годину, здатний виробляти 400 кіловат-годин електроенергії. Дорожня мережа Ізраїлю може виробляти до 160 мегават-годин. Це близько 2% енергоспоживання країни. Не дуже багато, але

цілком достатньо для того, щоб від цієї енергії живилася вся придорожня інфраструктура. А ще така система перетворює звичайну дорогу в "розумну", яка збирає статистику по кількості проїхавших автомобілів, їх швидкості і вазі.

Innowatech пропонує схоже рішення і для залізниці - спеціальні п'єзоелектричні прокладки між рейками і шпалами. Інші варіанти використання - важке промислове устаткування на кшталт пресів і ковальських молотів або злітно-посадочної смуги аеродромів.

Компанія стверджує, що використання п'єзогенераторів лише незначно здорожує будівництво дороги. Вони не зменшують корисну площу дороги або тротуару та не містять рухомих частин, а термін їх служби - близько 30 років.

Розрахунок п'єзоелектричного перетворювача

Кількість електрики, що виникла на площинах пластини при прикладенні однорідної розтягуючої (стискаючої) сили, знаходять за таких умов.

1. Сила F направлена вздовж електричної осі:

$$Q = k_1 F_x. \quad (4.1)$$

2. Сила F_x направлена вздовж механічної осі:

$$Q = -k_1 \frac{S_x}{S_y} F_y, \quad (4.2)$$

де Q – електричний заряд, Кл; F_x, F_y – сили, що діють перпендикулярно до оптичної осі пластини, Н; S_x, S_y – площі поверхонь, перпендикулярних до відповідних осей; k_1 – п'єзоелектрична стала (для кварцу $2,14 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н).

В п'єзоелектричних приладах звичайно вимірюють не заряд Q , а напругу U , яка розвивається на ємності, що утворена обкладками пластини:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (4.4)$$

де C – власна ємність п'єзопластини;

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S_x}{d}; \quad (4.5)$$

$\varepsilon = \varepsilon_k \varepsilon_0$, де $\varepsilon_k = 3,5$ – діелектрична стала для кварцу; S_x, d – відповідно площа та товщина-поверхні пластини; ε_0 – діелектрична стала вакууму ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Підставивши в формулу (4.4) значення C і Q (з формул (4.1) і (4.5)), дістанемо значення напруги, яка виникає в пластині в момент прикладення сили:

$$U = \frac{k_1 d F_x}{\varepsilon \cdot S_x}. \quad (4.6)$$

В реальних умовах перетворювач вмикають в спеціальні вимірювальні схеми, а тому паралельно його власній ємності C будуть ввімкнені ємності, наприклад, вхідного кола підсилювача $C_{вх}$, з'єднувального кабелю C_k . В цьому разі напруга, яку розвиває перетворювач, зменшиться і згідно з формулою (8.4) становитиме

$$U = \frac{Q}{C + C_{вх} + C_k}. \quad (4.7)$$

З (4.7) випливає: щоб отримати максимальну напругу і найбільшу чутливість, слід прагнути до того, щоб кожна з складових сумарної ємності була якомога меншою.

Основна трудність при вимірюванні напруги – її безперервний спад у часі через витікання заряду з пластин. Розглянемо це явище, дослідивши принципову схему п'єзоелектричного приладу для вимірювання сил (рис. 4.9, а). Через електроди, заряджені від'ємним зарядом, грані з'єднуються з підсилювачем.

Ємність C_Σ між частиною перетворювача, що несе заряд, і землею містить такі складові:

- ємність між гранями кварцової пластини C ;
- ємність з'єднувального кабелю C_k ;
- вхідна ємність підсилювача $C_{вх}$.

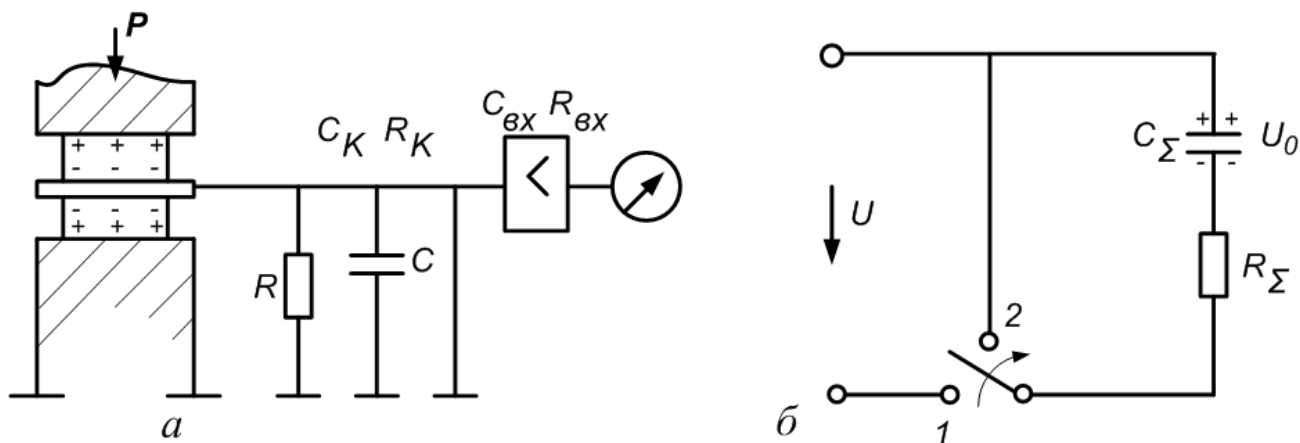


Рис. 4.9. Принципова (а) та еквівалентна (б) схеми п'єзоелектричного приладу для вимірювання сили

Опір R_{Σ} складається з таких компонентів:

- поверхневий та об'ємний опори кварцу R ;
- опір ізоляції з'єднувального кабелю R_K ;
- вхідний опір підсилювача $R_{вх}$.

Зазначену схему можна звести до еквівалентної схеми (рис. 4.9., б), що складається з конденсатора C_{Σ} , розряд якого через опір R_{Σ} можна розглядати як витік заряду пластини п'єзоперетворювача.

Приклад 8.1. Визначити напругу між обкладками кварцового п'єзоелектричного перетворювача, якщо діє сила $F=1$ кгс=9,81 Н, площа пластини $S_x=5$ см²=5·10⁻⁴ м², а її товщина $d=0,5$ см=0,005 м.

Розв'язання. Ємність п'єзоелектричного перетворювача

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S_x}{d} = \frac{3,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Необхідна напруга

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF_x}{C} = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81}{3,1 \cdot 10^{-12}} = 6,8 \text{ В.}$$

Проте ця напруга не може бути безпосередньо виміряна приладом, який споживає потужність, оскільки він розряджатиме п'єзоелемент навіть в процесі створення зарядів. Тому напруга, що знімається з п'єзоперетворювача, звичайно подається на спеціальну електронну лампу з малою вхідною ємністю і надзвичайно великим вхідним опором. Принципову схему такого підключення показано на рис. 4.10. Зі схеми бачимо, що

паралельно пластині п'єзоперетворювача приєднано ємність вимірювальної схеми C_{cx} , яка складається з ємності з'єднувального дроту (відносно заземленої схеми) і вхідної ємності підсилювача.

З врахуванням шунтуючого впливу ємності C_{cx} напруга, яка знімається з п'єзоперетворювача, буде дорівнювати

$$U = \frac{Q}{C + C_{cx}} = \frac{kF_x}{C + C_{cx}}. \quad (4.11)$$

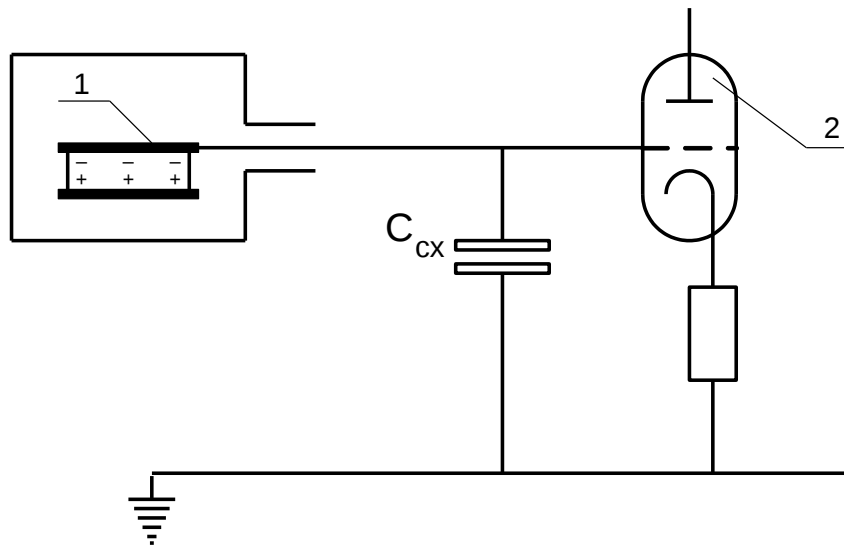


Рис. 4.10. З'єднання п'єзоперетворювача з входом підсилювача

Приклад 8.2. Визначити напругу, що знімається з п'єзоперетворювача, за даними, наведеними в прикладі 8.1, якщо ємність схеми $C_{cx} = 4 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Розв'язання.

$$U = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81}{3,1 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12}} = 2,96 \text{ В.}$$

Наявність шунтуючої ємності приводить до значного зниження сигналу, що знімається з п'єзоелемента.

Приклад 8.3. Визначити напругу, що виникає між обкладками п'єзоелектричного перетворювача з розмірами, наведеними в прикладі 8.1, за такої умови: тиск F_x , який діє на його гранях, дорівнює $10 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ для випадку $C_{cx} = 0$. Обчислити значення C_{cx} , при якому напруга, що знімається з п'єзоперетворювача і подається на вхід підсилювача, не перевищує 8 В.

Розв'язання. При $C_{cx} = 0$ напруга

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF_x S_x}{C} = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{3,1 \cdot 10^{-12}} = 339 \text{ В.}$$

Необхідне значення C_{cx} при $U=8$ В визначимо з (8.11):

$$C_{cx} = \frac{Q}{U} - C = \frac{2,14 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{8} - 3,1 \cdot 10^{-12} = 128 \text{ нФ.}$$

Варіанти завдання розрахунку п'єзоелектричного перетворювача

Визначити напругу, що виникає між обкладинками п'єзоелектричного кварцового перетворювача, площа пластинки якого S_x , а її товщина d . Тиск, який діє на гранях перетворювача дорівнює F_x для випадку $C_{cx}=0$.

Обчислити значення C_{cx} , при якому напруга, що знімається з п'єзоперетворювача і подається на вхід підсилювача не перевищує U .

Студентам потрібно обрати свій варіант розрахунку із таблиці і зробити розрахунки згідно послідовності, що наведено вище.

Таблиця 4.2

Вихідні дані

Ум. позн.	Варіанти										Одиниці вимір.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
S_x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	см ²
d	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	см
F_x	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	Н
U	6	2	3	4	3,5	5	5,5	4	3	2	В
ε_k	3,5										
ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$										Ф/м
k	$2,14 \cdot 10^{-12}$										Кл/Н

Таблиця 4.3

Відповіді до задач розрахунку п'єзоелектричного перетворювача

	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, \text{ В}$	13,56	6,78	4,52	6,78	5,42	6,77	7,25	6,35	5,64	5,08
$C_{cx}, \text{ нФ}$	1,95	7,4	2,35	2,15	2,13	1,65	1,38	2,91	4,91	9,53

Контрольні питання до практичного заняття 4

1. Тензоперетворювачі (ТП) ТЗА. Визначення, призначення, переваги і недоліки. Застосування. Принцип дії.
2. Основні конструктивні різновиди ТП ТЗА. Переваги і недоліки. Способи підключення ТП. Розрахунок ТП.
3. Вираз повного опору тензоперетворювача ТЗА. Відносна тензочутливість.
4. Вираз чутливості ТП ТЗА.
5. Різновиди тензоперетворювачів ТЗА. Переваги і недоліки. Застосування. Чутливість тензоперетворювача.
6. П'єзоелектричні перетворювачі ТЗА. Призначення ПеП.
7. Визначення, переваги і недоліки ПеП. Особливості.
8. П'єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії. Основні розрахункові співвідношення. Конструктивні різновиди. Приклади застосування.
9. Схеми включення ПеП ТЗА.
10. Дайте визначення прямому і зворотньому п'єзоефектам.
11. Дайте визначення основним вимірювальним осям п'єзокристала.
12. Дайте визначення повздовжньому і поперечному п'єзоефекту.
13. Дайте приклади використання ПеП у вимірювальних приладах.
14. Чи можна використовувати ПеП у звичайному виконанні для вимірювання постійних або повільно змінюючихся сигналів.

Заняття 5

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Мета практичного заняття 5 - розглянути конструктивне виконання, технічні характеристики, розрахунки параметрів оптичних та оптико-електронних перетворювачів.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Оптико-електричні перетворювачі (ОП) широко застосовуються в сучасних високоточних вимірювальних системах завдяки таким основним перевагам: відсутність моментів зворотної дії і будь-яких механічних контактів між рухомою та нерухомою частинами перетворювача; висока чутливість схем.

Функціональні можливості ОП та сфера їх застосування значно розширилися в зв'язку з досягненнями оптоелектронної техніки, зокрема в зв'язку з створенням оптичних квантових генераторів, світлодіодів та ін.

Тепер ОП широко використовуються як датчики переміщення, кута повороту, моменту тощо.

Провідні організації, що займаються питаннями проектування та дослідження характеристик оптичних перетворювачів: в Києві – Інститут напівпровідників АН України, виробниче об'єднання "Арсенал" та ін.

Основні властивості оптичних випромінювань

Принцип дії ОП

В основу принципу дії ОП покладена залежність параметрів потоку оптичного випромінювання від значення перетворюваної величини.

Оптичний перетворювач є перетворювачем вимірюваної величини x (x_1 або x_2) у вихідну електричну величину Y .

Конструкція ОП

Конструкцію оптичного перетворювача в загальному вигляді умовно можна зобразити так, як показано на рис. 5.1. ОП складається з джерела випромінювання, оптичного каналу та приймача випромінювання.

Вхідна величина x може впливати на потік випромінювання Φ_2 двома шляхами.

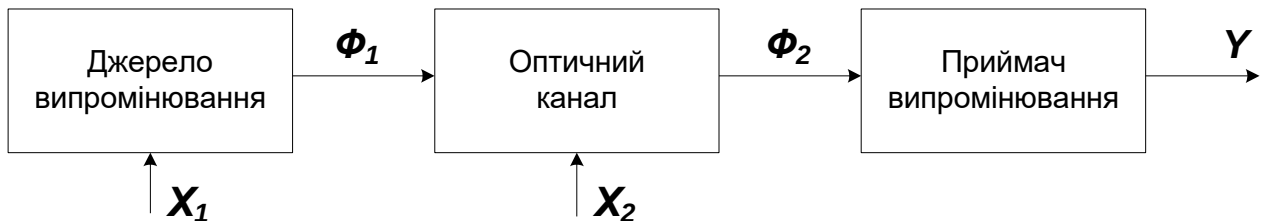


Рис. 5.1. Структурна схема оптичного перетворювача

1. Вимірювана величина x_1 (рис. 5.1) діє безпосередньо на джерело випромінювання і змінює той чи інший параметр випромінюваного потоку Φ_1 .

2. Вимірювана величина x_2 модулює відповідний параметр потоку Φ_2 в процесі його поширення по оптичному каналу.

Вихідна величина Y формується в результаті взаємодії потоку Φ_2 з речовиною приймача випромінювання.

Закони поширення оптичних випромінювань

Розглянемо основні закони поширення оптичних випромінювань.

Оптичний діапазон спектра випромінювань (рис. 5.2) згідно з визначенням Міжнародної комісії з освітлення становлять електромагнітні хвилі, довжина яких λ лежить в межах 1мм...1нм, що відповідає частотам $10^{12}...10^{17}$ Гц [1-4].

Всередині оптичного діапазону вирізняють:

- інфрачервону область випромінювання ($\lambda > 0,78$ мкм), здатного викликати теплове відчуття;
- видиму область випромінювання ($0,38 \leq \lambda \leq 0,78$ мкм), яке викликає зорове, кольорове відчуття;
- невидиму – ультрафіолетову ($\lambda < 0,38$ мкм).

Довгохвильовий край оптичного діапазону (0,1...1мм) належить до субміліметрових радіохвиль, а короткохвильовий (1...10 нм) – до м'якого γ -випромінювання.

Швидкість поширення електромагнітного випромінювання, в тому числі оптичного, в середовищі [1-5]

$$V = \frac{c}{n},$$

де $c=2,998 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі (фундаментальна фізична константа); n – оптична густина середовища, показник заломлення; для повітря $n=1,003$.

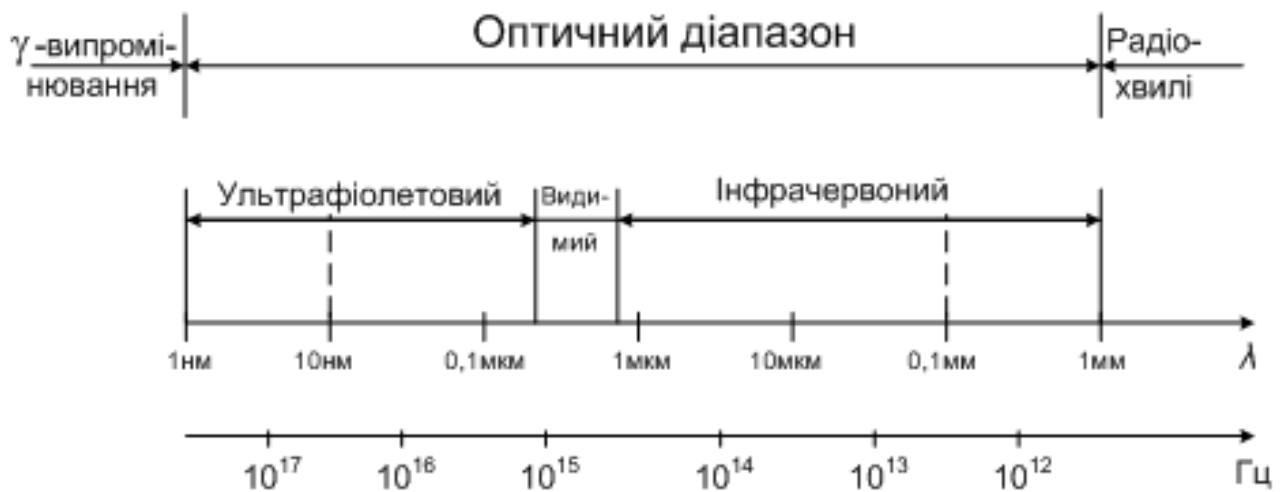


Рис. 5.2. Оптичний діапазон електромагнітних хвиль [1-5]

Під час проходження оптичного випромінювання через речовину спостерігається як поглинання, так і розсіювання. При цьому інтенсивність пучка паралельних променів в процесі проходження через речовину на глибину x спадає внаслідок поглинання за законом [1-5]

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-k_\lambda x},$$

де k_λ – коефіцієнт поглинання; він залежить від довжини хвилі λ і становить для прозорих речовин у видимій області спектра від 10^{-3} м^{-1} для повітря до 1 м^{-1} для скла.

Оптичне випромінювання генерується збудженням атомів і молекул речовини в результаті нагрівання (теплове випромінювання) або прямим перетворенням атомами чи молекулами інших видів енергії. В останньому випадку маємо холодне, або люмінесцентне, випромінювання.

Інтенсивність потоку оптичного випромінювання характеризується потужністю P , Вт, всіх довжин хвиль, що містяться в цьому потоці.

Випромінювальні властивості тіла характеризуються енергетичною світністю R , Вт/м², тобто потоком, що випромінюється одиницею поверхні.

Спектральною густиною потоку ρ_λ , Вт/м, називають інтенсивність потоку, віднесену до одиничного інтервалу довжин хвиль.

Спектральною світністю R_λ , Вт/м³, називають відношення світності до одиничного інтервалу довжин хвиль.

Деяке гіпотетичне тіло, яке здатне повністю поглинати випромінювання довільної довжини хвилі, що падає на нього, називають абсолютно чорним тілом (АЧТ).

Спектральна світність АЧТ визначається його абсолютною температурою T за формулою Планка [1-5]:

$$R_\lambda^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{KT\lambda}} - 1},$$

де h – стала Планка; k – стала Больцмана.

На рис. 5.3 показано криві спектральної світності АЧТ для різних температур.

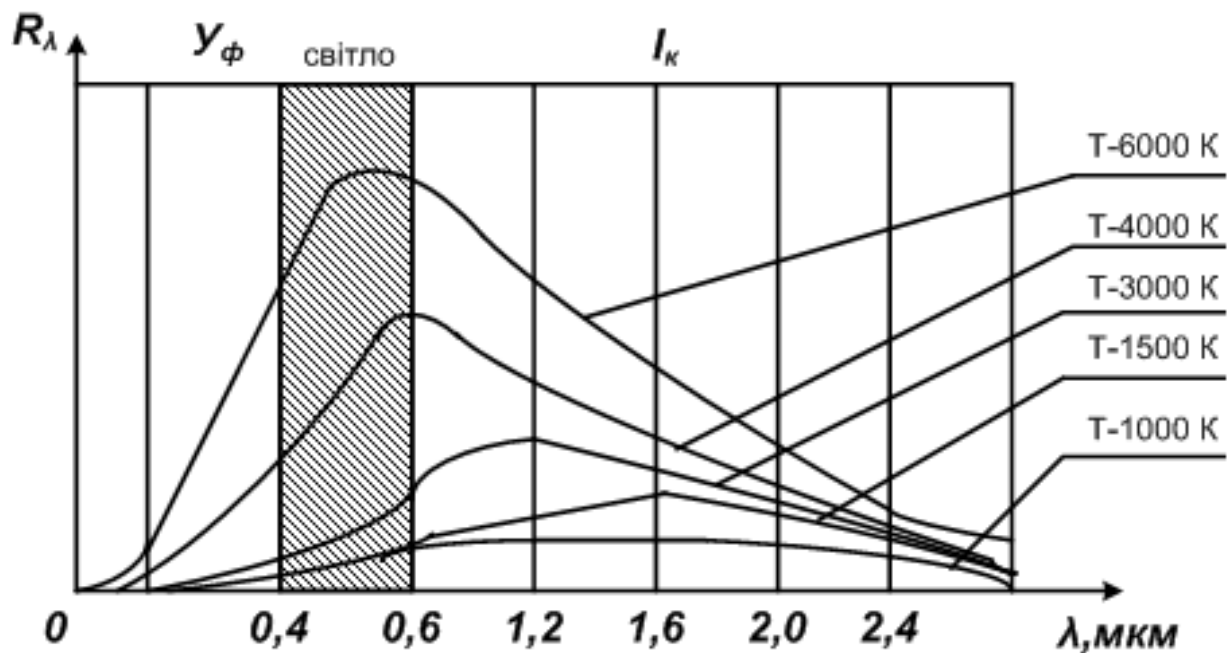


Рис. 5.3. До спектральної світності абсолютно чорного тіла [1-5]

Максимальна спектральна світність для даної абсолютної температури T АЧТ

$$R_{\lambda \max}^* = 1,301 \cdot 10^{-5} T^5,$$

причому припадає вона на довжину хвилі, мкм:

$$\lambda_{\max} = 2886 / T;$$

інтегральна світність АЧТ, тобто площа, обмежена відповідною кривою на рис. 5.3

$$R^* = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4.$$

Застосування. Наведені фундаментальні залежності дозволяють використовувати оптичні методи для безконтактного вимірювання температури АЧТ, а за відомого коефіцієнта поглинання тіла K_λ – також для вимірювання температури будь-якого реального тіла, оскільки згідно з законом Кірхгофа спектральна світність будь-якого тіла $R_\lambda = K_\lambda R_\lambda^*$.

Джерела оптичних випромінювань

Коротка характеристика основних джерел оптичних випромінювань

Джерела оптичного випромінювання поділяються на теплові та люмінесцентні. До теплових належать лампи розжарювання, до люмінесцентних – газорозрядні лампи, електролюмінофори, оптичні квантові генератори і світлодіоди.

Лампи розжарювання

Лампи розжарювання мають тіло розжарювання звичайно у вигляді тонкої спіралі. Спектр випромінювання складний. Спектральний розподіл енергії випромінювання та інтегральна світність ламп розжарювання дуже залежать від температури тіла розжарювання і, отже, від режиму живлення.

До ламп розжарювання, що застосовуються в оптоелектронних перетворювачах, ставляться підвищені вимоги щодо якості скла балонів, форми та відносного розміщення тіла розжарювання.

Лампи розжарювання – високоінерційні джерела світла, тому їх використовують в режимі постійного світіння. Основні різновиди та технічні параметри ламп розжарювання наведені в [55].

Газорозрядні джерела світла

Світіння газорозрядних джерел світла виникає в результаті проходження електричного струму через газ або через пару.

Розрізняють газорозрядні джерела дугового, тліючого та імпульсного розрядів, а залежно від величини тиску в колбі – лампи низького, високого та надвисокого тиску.

Для досягнення великої яскравості світіння використовують ртутно-кварцові лампи надвисокого тиску. Випромінювання ртутно-кварцових ламп має лінійчастий спектр.

Широко застосовуються в оптоелектроніці електролюмінесцентні джерела.

Світіння електролюмінофорів може збуджуватися або електричним полем, що прикладається до електролюмінесцентного конденсатора, або силою струму, який протікає через електролюмінесцентну комірку.

Електролюмінесцентний конденсатор

Електролюмінесцентний конденсатор (рис. 5.4) складається з підкладки 1, на яку наноситься провідний шар 2 (електрод), шару електролюмінофору 3, захисного шару 4, а також другого електроду 5.

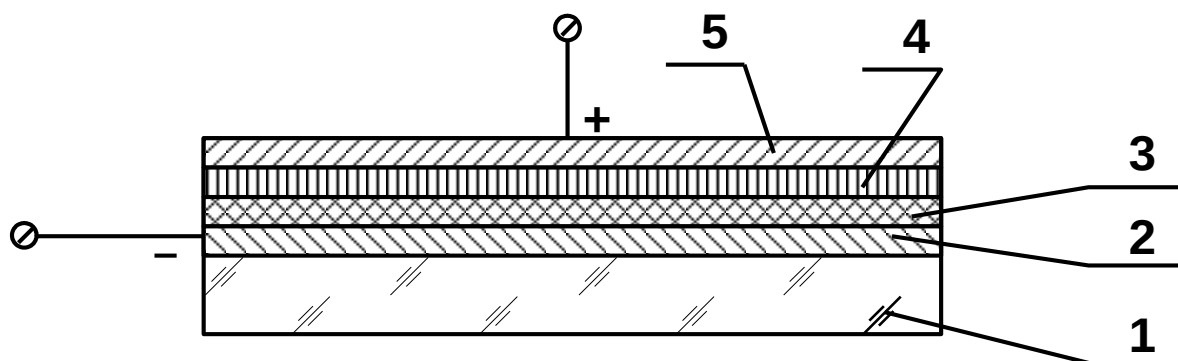


Рис. 5.4. Електролюмінесцентний конденсатор [1-4]

Електролюмінесценція спостерігатиметься за наявності різниці електричних потенціалів між електродами.

Якщо світло виходить з боку підкладки, то остання виконується прозорою.

Як провідне покриття найчастіше використовують оксиди різних металів.

Матеріали електролюмінофорів – монокристалічні сполуки другої та шостої груп періодичної системи елементів (сполуки цинку та кадмію з сіркою і селеном), активовані різними домішками.

Спектральні характеристики найпоширеніших електролюмінофорів розміщені в діапазоні довжин хвиль близько 0,4...0,6 мкм.

Випромінювання джерел характеризується вузькою спрямованістю з півшириною спектрів порядку 0,05...0,1 мкм [1-4].

Інжекційні світлодіоди

Інжекційні світлодіоди (рис. 5.5) – це випромінювальний *p-n* перехід, світіння якого зумовлене інтенсивною рекомбінацією в ньому носіїв струму при зміщенні переходу в прямому напрямі.

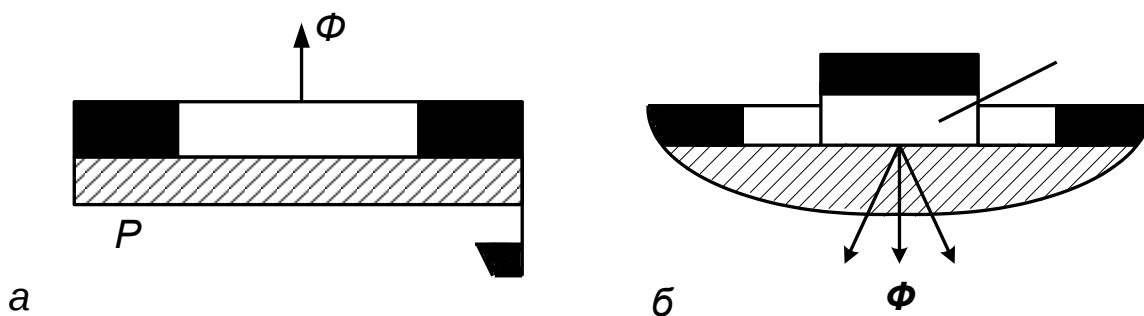


Рис. 5.5. Конструкції інжекційних світлодіодів [1-4]

Матеріали для цих джерел – арсенід галію, фосфід галію, карбід кремнію тощо.

Світло в інжекційних діодах генерується поблизу поверхні *p-n* переходу, звідки воно поширюється практично прямолінійно в усіх напрямках.

Найпростішою є плоска конструкція (рис. 5.5,а). Вона дає змогу виготовляти діоди з відносно великою поверхнею (кілька квадратних міліметрів), але з порівняно невисокими ККД.

Перевага надається півсферичним світлодіодам (рис. 5.5,б), ефективність світіння яких на порядок вища, ніж плоских.

Основні характеристики світлодіодів, що випускаються серійно, наведені в [1-4].

Оптичні квантові генератори (лазери)

Оптичні квантові генератори (лазери) дають змогу отримувати інтенсивне направлене когерентне випромінювання.

Для генерації когерентного випромінювання в активній речовині потрібно створити інверсну населеність рівнів, тобто такий різкий неврівноважений стан, при якому концентрація електронів на вищому енергетичному рівні більша за їх концентрацію на нижчому рівні. Інверсія населеності може бути створена в результаті таких зовнішніх впливів, як розряд в газах, збудження світлом або електронним пучком, інжекція носіїв заряду p - n переходом.

Для того щоб систему перетворити в генератор, потрібно створити додатний зворотний зв'язок, тобто частину підсиленого вихідного оптичного сигналу подати на вхід. З цією метою використовуються різні резонатори.

Типовий оптичний резонатор складається з двох дзеркал, що забезпечують багаторазове проходження світлової хвилі через активну речовину.

Для виведення випромінювання дзеркала виконують прозорими.

Основні характеристики лазерів: потужність випромінювання $P_{\text{випр}}$, поріг генерації, ККД, довжина хвилі λ , ширина спектральної лінії $\Delta\lambda$, кут розходження променя.

Найпоширенішими є три типи лазерів: газові, твердотільні, напівпровідникові.

Малопотужні газові лазери ЛГ-18, ЛГ-55, ЛГ-56 з активною речовиною у вигляді гелієво-неонової суміші мають такі характеристики: довжина хвилі випромінювання 632,8 нм, потужність випромінювання від 0,5 мВт (ЛГ-18) до 2 мВт (ЛГ-56), площа перерізу пучка 1...4 мм, кут розходження пучка не більш як 10'.

В твердотільних лазерах як активна речовина використовується кристалічний або аморфний діелектрик, наприклад рубін, що містить центри люмінесценції.

Основні переваги твердотільних лазерів порівняно з газовими: велика потужність випромінювання (особливо в імпульсному режимі), високий ККД, відносно малі габаритні розміри (одиниці та десяті частки сантиметра).

До недоліків таких лазерів слід віднести необхідність використовувати оптичне збудження, низьку довговічність.

В напівпровідникових лазерах активними речовинами звичайно є арсенід галію, фосфід галію, арсенід індію, кремній з домішкою індію. Інверсії населеності енергетичних рівнів можна досягти інжекцією носіїв заряду *p-n* переходом.

Основні переваги оптичних генераторів на напівпровідникових матеріалах – малі габаритні розміри, високий ККД, зручність збудження, висока швидкодія, можливість генерувати потрібну спектральну лінію, технологічна сумісність з елементами оптичних інтегральних схем [4].

Приймачі оптичних випромінювань

Коротка характеристика приймачів оптичних випромінювань (теплових і фотоелектричних)

Приймачі оптичного випромінювання можна поділити на теплові та фотоелектричні.

Принцип роботи теплових приймачів ґрунтується на попередньому перетворенні енергії випромінювання в теплову та наступному її перетворенні в електричний сигнал.

До теплових належать термоелементи та болометри.

Фотоелектричні приймачі – це перетворювачі, принцип роботи яких ґрунтується на використанні явища зовнішнього або внутрішнього фотоефекту.

Принцип дії фотоелементів із зовнішнім фотоефектом полягає в тому, що кванти світла, досягаючи чутливої поверхні фотокатода, спричиняють

емісію фотоелектронів, які під дією зовнішнього електричного поля створюють фотострум.

Внутрішній фотоефект, що супроводжується переходами електронів і дірок всередині напівпровідника із зв'язаних станів у вільні має два прояви.

Перший з них полягає в тому, що в результаті появи вільних носіїв заряду змінюється опір напівпровідника. Фотоприймачі, які працюють на цьому принципі, називають фоторезисторами.

Другий прояв полягає у виникненні фото ЕРС на межі двох матеріалів, що контактують. Фотоприймачі, які ґрунтуються на цьому явищі, називають вентильними (фотогальванічними) фотоелементами, що є генераторними перетворювачами.

Теплові приймачі. Основні різновиди. Принцип дії

Тепловий приймач – це тонкий металевий диск 2 із зачорненою поверхнею 1, до якого дотикається гарячий спай термоелектричного перетворювача температури 3 (рис. 5.6).

Коли на зачорнену поверхню диска потрапляє промениста енергія, він нагрівається до температури, при якій спостерігатиметься тепловий баланс між кількістю поглиненої теплоти і теплоти, розсіяної диском у навколишній простір шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання.

ЕРС термопари буде мірою випромінювання, що падає на приймальну площадку. Оскільки коефіцієнт поглинання зачорненої поверхні практично дорівнює одиниці в діапазоні від ультрафіолетового до інфрачервоного випромінювання, вихідна величина такого приймача буде пропорційна до інтегральної потужності випромінювання, що падає на приймальну площадку, і не залежатиме від спектрального складу випромінювання.

Тепловий перетворювач може також бути виконаний у вигляді тонкої смужки з провідникового або напівпровідникового матеріалу, який змінює свій опір залежно від температури. Перетворювачі із змінюваним опором називають болометрами.

Поріг чутливості за потужністю випромінювання, при якій вихідна напруга дорівнює ефективній напрузі шумів, для найчутливіших

перетворювачів випромінювання становить $10^{-8} \dots 10^{-10}$ Вт. Найменша стала часу перетворювачів 0,5...5 мс.

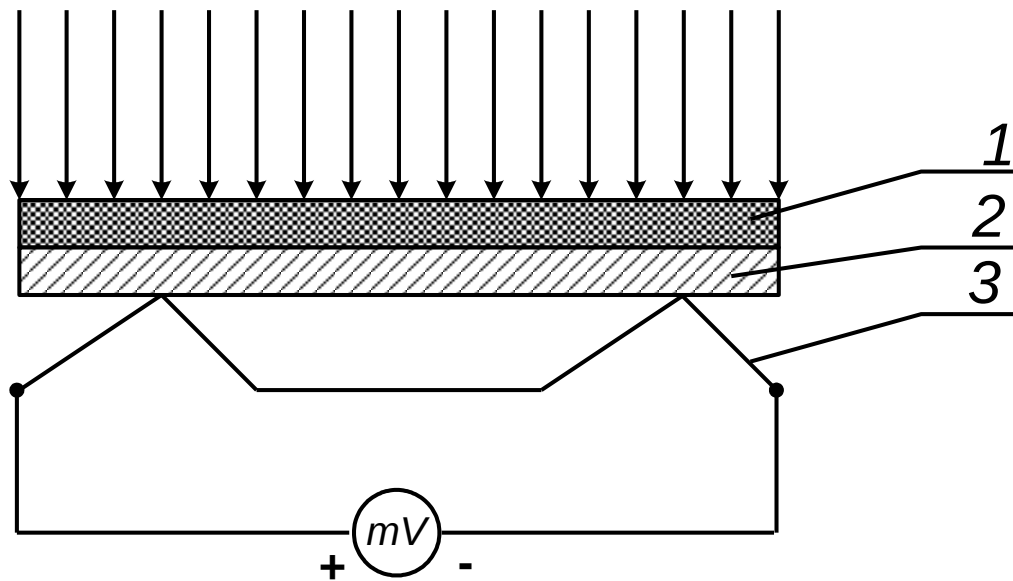


Рис. 5.6. Конструкція теплового приймача [1-4]

Фотоелектричні приймачі (ФП).

Основні характеристики ФП

Фотоелектричні приймачі є селективними перетворювачами, вихідний сигнал яких визначається не лише інтенсивністю випромінювання, що падає на них, а і його спектральним складом.

Основні характеристики фотоелементів: світлова, спектральна, статична, вольт-амперна і частотна.

Світлова характеристика виражає залежність фотоструму від світлового потоку $I_{\Phi} = f(\Phi)$, що падає на фотоелемент, при сталій напрузі між електродами $U = \text{const}$.

Спектральною чутливістю фотоелемента, вираженою в мкА/Вт, називають відношення приросту фотоструму до зміни монохроматичного променистого потоку з довжиною хвилі λ_i :

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta I_{\Phi}}{\Delta P_{\lambda}}.$$

Спектральна характеристика визначає залежність спектральної чутливості фотоелемента від довжини хвилі світлового потоку ($S_\lambda = f(\lambda)$) при незмінній напрузі між електродами. За цією характеристикою знаходять максимальну спектральну чутливість фотоелементів і ширину спектральної області, в якій вони придатні для роботи.

Залежність $S_\lambda = f(\lambda)$ називають абсолютною спектральною характеристикою, а відношення $\gamma_\lambda = S_\lambda / S_{\lambda \max}$ – відносною спектральною характеристикою фотоелемента.

Важливий параметр фотоелемента – його інтегральна чутливість

$$S_p = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta P} = \frac{S_{\lambda \max} \int_0^\infty P_\lambda \gamma_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda d\lambda},$$

значення якої залежить від ступеня перекривання функцій відносної спектральної чутливості фотоелемента γ_λ і спектральної густини ρ_λ променистого потоку (рис. 5.7) при номінальній зовнішній напрузі.

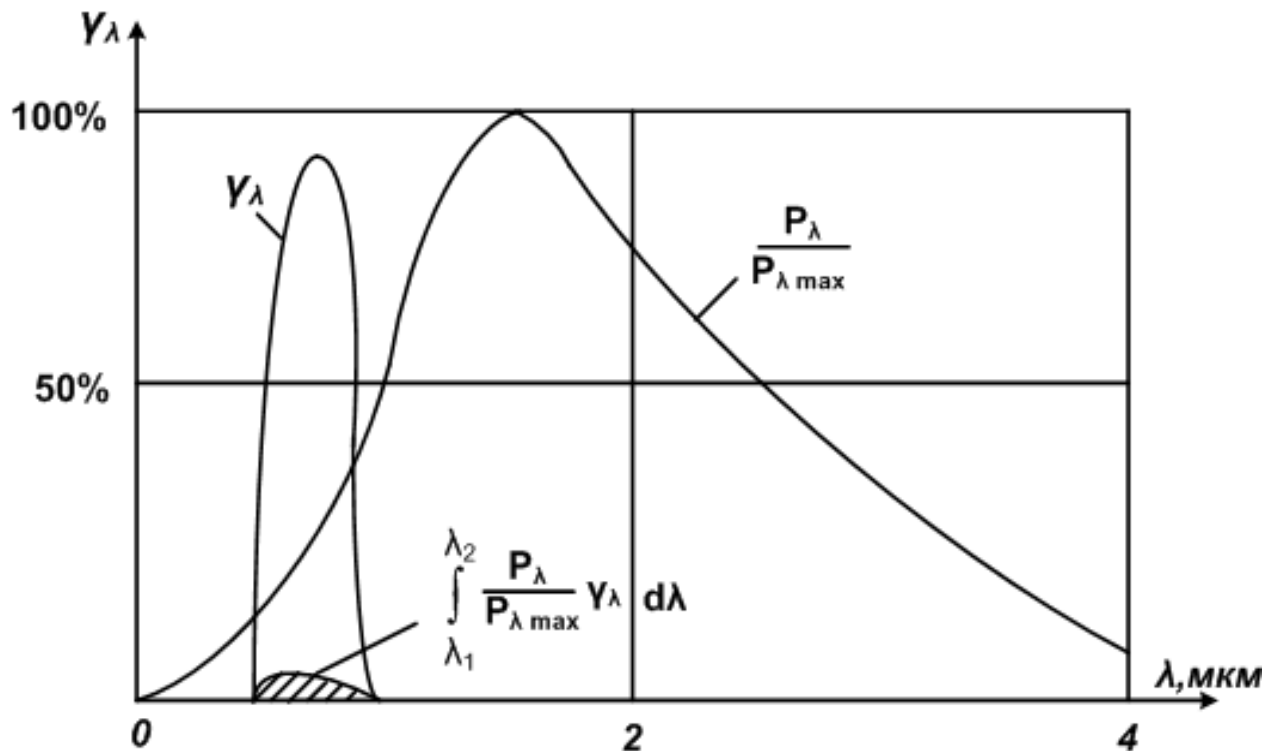


Рис. 5.7. До поняття інтегральної чутливості фотоперетворювача [1-4]

Інтегральні чутливості, що наводяться в паспортних даних, визначені при використанні стандартних джерел випромінювання типу *A* ($T=2848\text{ K}$) – для фотоелементів із зовнішнім фотоефектом і типів *B* ($T=2500\text{ K}$) та *B* ($T=2360\text{ K}$) – для фотоелементів з внутрішнім фотоефектом.

Статична вольт-амперна характеристика показує залежність фотоструму в колі фотоелемента від напруги, прикладеної до його електродів ($I_f=f(U)$) при сталому значенні світлового потоку незмінного спектрального складу $\Phi_\lambda=\text{const}$.

Частотна характеристика визначає залежність амплітуди фотоструму в колі фотоелемента (або його фотоЕРС) від частоти пульсуючого з сталою амплітудою потоку випромінювання.

Основні різновиди ФП

Фотоелементи мають різноманітне конструктивне виконання. Розрізняють вакуумні, іонні фотоелементи; фотоелектронні помножувачі; фоторезистори.

Вакуумні фотоелементи. Конструкція. Переваги, недоліки, характеристики

Вакуумні фотоелементи конструктивно оформляються у вигляді скляного балона (рис. 5.8), на внутрішню поверхню якого наноситься світлочутливий шар з лужних металів, що утворюють фотокатод *K*.

Катод займає близько половини внутрішньої поверхні балона, а вся інша прозора її частина є вхідним світловим вікном. Анод *A* фотоелемента виконують у вигляді металевого стрижня, кільця або сітки з нікелевого дроту і розміщують в центрі балона. Всередині балона створюється вакуум до $0,01\dots 0,001$. Під впливом світлового потоку фотокатод випромінює потік електронів, які за наявності між катодом і анодом сталої напруги створюють фотострум.

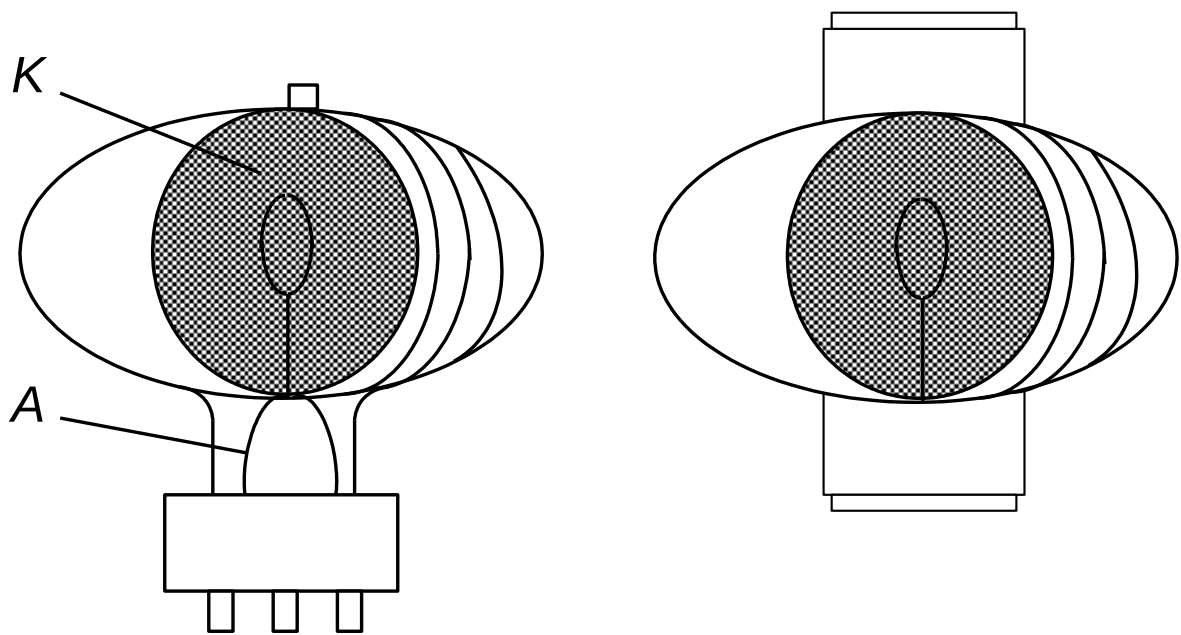


Рис. 5.8. Загальний вигляд вакуумних фотоперетворювачів [1-4]

На рис. 5.9,а показано статичні вольт-амперні характеристики вакуумних фотоелементів. Нижня характеристика відповідає темному струму (в абсолютній темноті). Світлові характеристики вакуумних фотоелементів зображені на рис. 5.9,б.

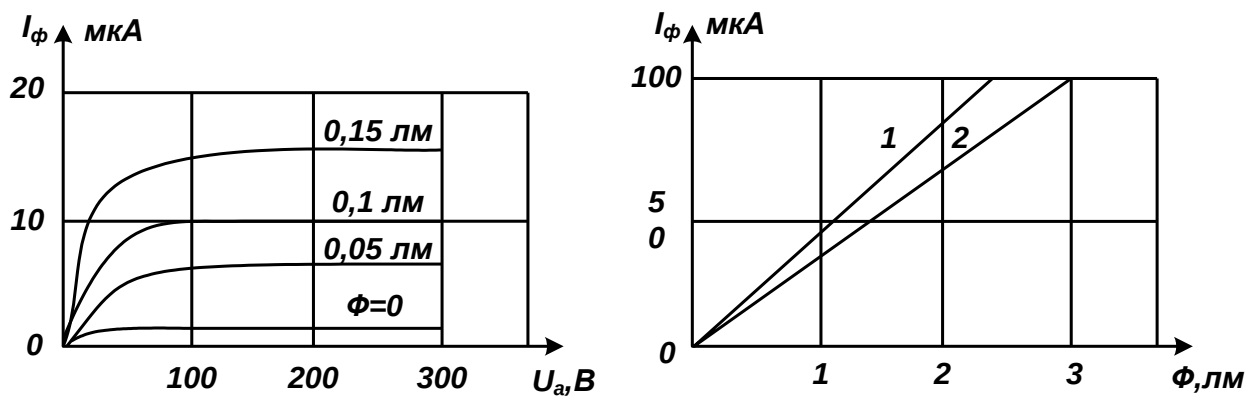


Рис. 5.9. Статичні вольт-амперні характеристики вакуумних фотоелементів [1-4]

Характеристика 1 відноситься до сурм'яно-цезієвих фотоелементів з металевою підкладкою, а характеристика 2 – до киснево-цезієвих (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Основні параметри деяких типів фотоелементів [1-4]

Тип фотоелемента	Тип фотокатода, наповнення	Номінальна напруга, В	Інтегральна чутливість, мкА/лм	Область спектральної чутливості, А°	Темновий струм при $T=300\text{K}$, мкА
ЦВ-3	Киснево-цезієвий,	240	20	4000...12000	0,1
ЦВ-4	вакуумний	240	20		0,1
СЦВ-3	Сурм'яно-	240	80...100	4000...6000	0,01
СЦВ-4	цезієвий,	240	80...100		0,01
СЦВ-5	вакуумний	240	80...100		0,01
ЦГ-1		240	75...150	4000...12000	0,1
ЦГ-3	Киснево-	240	100...250		0,1
ЦГ-4	цезієвий,	240	100...250		0,1
	газонаповнений				

Перетворювання світлового потоку в струм у вакуумних фотоелементах практично безінерційне ($\approx 10^{-9}$), проте слід враховувати велику інерційність кола, зумовлену внутрішнім опором і ємністю фотоелемента, а також підключених до нього зовнішніх пристроїв. Чутливість вакуумних фотоелементів $\approx 10\text{...}100$ мкА/лм, вихідні струми не перевищують кількох мікроампер.

Недоліки електровакуумних фотоелементів – їх низька інтегральна чутливість ($S_p \approx 0,002\text{...}0,1$ мкА/мкВт) і значні габаритні розміри.

Іонні фотоелементи

Іонні фотоелементи конструктивно аналогічні вакуумним. Відмітна особливість їх полягає в тому, що балони таких перетворювачів наповнені інертним газом, наприклад аргоном (називаються іноді газонаповненими елементами).

За наявності фотоелектронної емісії та електричного поля в просторі між анодом і катодом відбувається іонізація газу, за рахунок чого зростає загальний потік електронів.

Інтегральна чутливість іонних фотоелементів у кілька разів вища, ніж вакуумних. Істотні недоліки іонних фотоелементів порівняно з вакуумними – вищий рівень власних шумів, значна інерційність, виникнення самотійного (тобто некерованого світловим потоком) дугового електричного розряду в газі в разі перевищення робочої напруги. Світлова характеристика (рис. 5.10 а) за малих світлових потоків зберігає лінійну залежність, а за великих світлових потоків лінійність порушується.

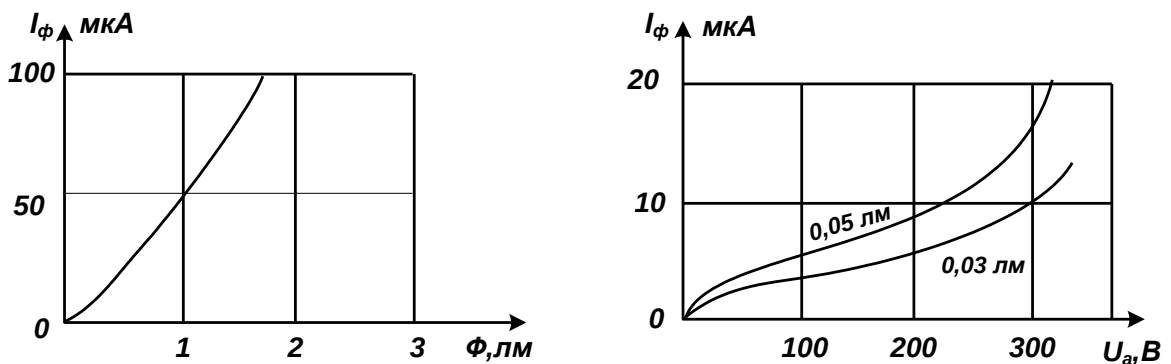


Рис. 5.10. Світлова та вольт-амперна характеристики іонних фотоелементів [1-4]

Вольт-амперні характеристики (рис. 5.10,б) іонних фотоелементів істотно відрізняються від характеристик вакуумних фотоелементів. Оскільки іонні фотоелементи через те, що іонізація газу безперервно збільшується, не мають режиму насичення, їх вольт-амперні характеристики не містять горизонтальних ділянок.

Газонаповнені фотоелементи дають змогу отримувати струми, в кілька разів більші, ніж струми від вакуумних фотоелементів. Чутливість таких фотоелементів становить 100...250 мкА/лм. З наведених вольт-амперних характеристик випливає, що чутливість газових фотоелементів істотно залежить від напруги живлення, яка має стабілізуватися і не перевищувати 100...240 В, адже вище цих значень починається область самотійного розряду.

В газових фотоелементах максимальна амплітуда фотоструму досягається лише через деякий час після початку освітлення (в міру розвитку газового розряду), тому газові фотоелементи застосовуються для реєстрації світлових потоків з частотами, які не перевищують кількох сотен герц.

Фотоелектронні помножувачі (ФЕП)

Різновид електровакуумних фотоелементів – фотоелектронні помножувачі – комбіновані фотоелементи, в яких використовують первинну фотоелектронну і вторинну електронну емісію. При цьому вторинна електронна емісія спричиняється тим, що вторинні катоди, які перебувають під вищими потенціалами, бомбардуються потоком первинних електронів. Коефіцієнт вторинної емісії залежно від матеріалу і властивостей поверхні емітера, швидкості електронів може становити 2,5...4. Загальний коефіцієнт підсилення може досягати сотні тисяч і навіть кількох мільйонів.

Завдяки великому коефіцієнту підсилення та порівняно низькому рівню власних шумів фотоелектронні помножувачі успішно застосовують для реєстрації дуже слабких світлових сигналів, значення яких можуть становити одиниці фотонів. Фотоелектронні помножувачі використовуються, наприклад, у спектроскопії, товщиномірах, рівнемірах тощо.

Конструктивно фотопомножувач – це циліндричний скляний балон з розміщеною всередині системою електродів і системою фокусування електронного пучка, а також контактними виводами, розміщеними на цоколі перетворювача. Система електродів складається з катода K , анода A і вторинних катодів емітерів ε (рис. 5.11). Напруга живлення підводиться до всіх катодів і анодів через резистивний подільник $R1-R7$.

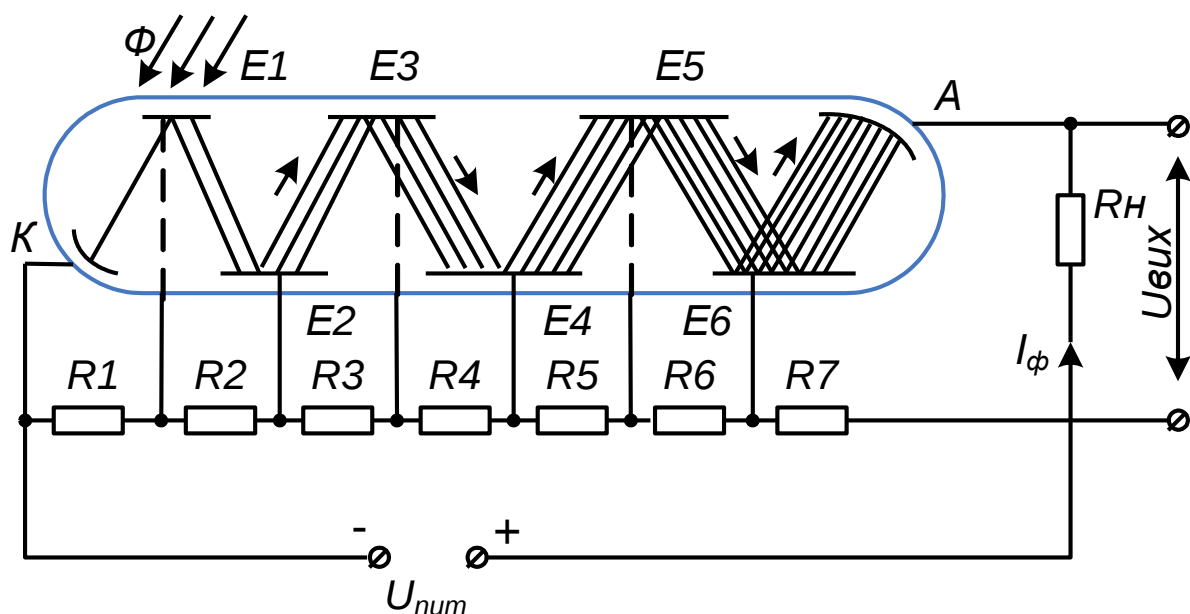


Рис. 5.11. До принципу дії фотоелектронного помножувача [1-4]

Фотоелектронні помножувачі майже безінерційні, їх світлова характеристика лінійна в широкому діапазоні зміни світлового потоку, внутрішній опір досягає 10^4 МОм, поріг чутливості дорівнює $10^{-9} \dots 10^{-12}$ лм, область спектральної чутливості для різних типів помножувачів становить приблизно $3000 \dots 8000 \text{Å}$ [36], деякі інші їх параметри наведено в табл. 5.2.

Конструктивно фотопомножувачі виготовляють в мініатюрному (ФЗУ-60), малогабаритному (Ф9У-62) і звичайному (ФЗУ-19) виконанні.

Таблиця 5.2

Основні параметри деяких типів фотопомножувачів [1-4]

Тип ФЕП (ФЕУ)	Тип первинного фотокатода	Число каскадів підсилення	Анодна напруга, В	Інтегральна чутливість, А/лм	Найбільший вихідний струм, мкА	Темновий струм, мкА
ФЭУ-17	Сурм'яно-цезієвий	13	800	1..10	100	0,03
ФЭУ-22	Киснево-срібно-цезієвий	13	1250...1400	1...3	300	0,05
ФЭУ-53	Сурм'яно-цезієвий	14	1800...2200	15	10000	0,1
ФЭУ-60	Сурм'яно-цезієвий	10	1600	30	620	0,005

Фоторезистори

Фоторезисторами називають світлочутливі напівпровідникові перетворювачі з фоторезисторним ефектом, які збільшують свою електропровідність під дією світлового потоку.

Найчастіше фоторезистор – це однорідна напівпровідникова пластина з омічними контактами, яка при освітленні зменшує свій опір в результаті внутрішнього фотоефекту, тобто внаслідок створення додаткових пар "електрон-дірка" за рахунок енергії падаючих фотонів.

Конструктивне оформлення фоторезисторів і їх світлочутливі матеріали різноманітні.

В одних фоторезисторах напівпровідниковий світлочутливий матеріал нанесено методом напилення у вакуумі або хімічним осадженням на ізоляційну пластинку, розміщену в пластмасовій або металічній оправі з віконцем для пропускання світла.

В інших резисторів, наприклад ФС-К, світлочутливий елемент виготовлено методом пресування з порошкоподібного матеріалу у вигляді прямокутних або кільцевих пластинок з наступним наклеюванням на ізоляційну підкладку. Світлочутливий елемент фоторезисторів ФСК-М виготовлено з монокристала кадмію. Світлочутливий шар всіх фоторезисторів покрито захисною лаковою плівкою.

Як приклад розглянемо одну з поширених конструкцій фоторезисторів (рис. 5.12) [48].

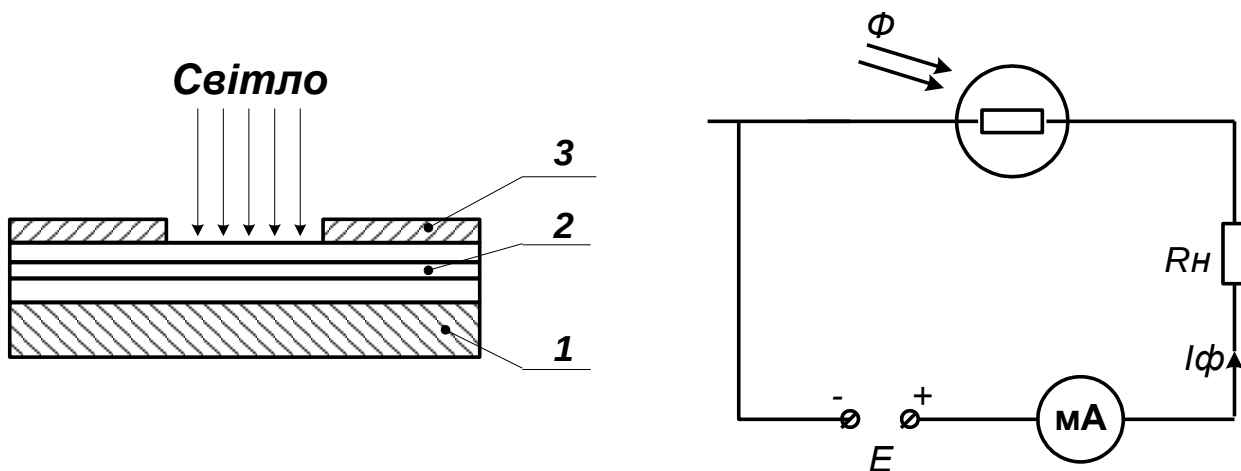


Рис. 5.12. Конструкція фоторезистора [1-4]

На ізолюючу підкладку 1 методом випаровування у вакуумі наноситься тонкий шар напівпровідника 2. Як напівпровідниковий матеріал використовують селен, телюїд, сірчистий кадмій тощо. По краях напівпровідникового шару також випаровуванням у вакуумі наносять металеві електроди 3. Пластинку вміщують у ебонітову або пластмасову оправу з віконцем. Електроди з'єднують з двома вивідними клемми, за допомогою яких фоторезистор вмикається в коло.

Коли фоторезистор розміщено в темноті, то через нього тече струм, який називають темповим I_t . Якщо фоторезистор освітлений, то через нього тече світловий струм I_c . Різницю між світловим і темновим струмами дає фотострум I_f .

Переваги фоторезистора: практично необмежений термін служби, висока чутливість, малі габаритні розміри (діаметр порядку 4...8 мм, товщина 1...3 мм).

Одна з основних характеристик фоторезисторів – кратність зміни опору

$$n = \frac{R_{\text{темн}}}{R_{\text{світ}}},$$

де $R_{\text{темн}}$ – темновий опір; $R_{\text{світ}}$ – опір освітленого фотоперетворювача. Значення коефіцієнта n для різних фоторезисторів лежать у межах від одиниць до кількох десятків тисяч. Вольт-амперні характеристики цих перетворювачів лінійні в межах допустимої потужності розсіювання (0,01...0,1 Вт), світлова характеристика має вигляд $I_f = k\Phi^m$, де $m=1...0,5$. Ця характеристика лінійна за малих освітленостей.

Поріг чутливості фоторезисторів, як і для звичайних резисторів, визначається тепловими шумами. Щоб знизити рівень шумів, при вимірюванні слабких сигналів резистори охолоджують.

Всі характеристики фоторезисторів істотно залежать від температури. Проте допустимий температурний діапазон більшості фоторезисторів становить $-60...+60^\circ\text{C}$.

Істотний недолік, що обмежує частотний діапазон, – інерційність фоторезисторів, яка досягає для деяких їх типів 0,01...0,1 с (табл. 5.3).

Основні параметри деяких типів фоторезисторів [1-4]

Параметри	ФС-А1 ФСА-Г1	ФС-К1 ФСК-Г1	ФСК-Г2	ФС-К6	СФЗ-1
1	2	3	4	5	6
Площа світлочутливої поверхні, мм ²	28	29	58	125	0,45
Темновий опір. Ом	10 ⁴ ...10 ⁶	3,3·10 ⁶	1,6·10 ⁶	3·10 ⁶	10 ⁶
Питома чутливість, мкА/лм·В	500	3000... 10000	10000	10000	60000
Стала часу, с	4·10 ⁻⁵	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	2·10 ⁻²	6·10 ⁻³
Темновий струм, мкА	100	15...30	20	20	0,5
Допустима потужність, Вт	0,002... 0,01	0,2	0,3	0,3	0,05
Кратність зміни опору (при E=100...20 лк, t=20°C)	1...2	100...400	100...8000	100...400	1500... 150000
Фотострум (при E = 200 лк), мА	0,1	2	3...4	2	1,5
Межі робочої напруги, В	10...60	50...400	50...250	50...220	3...15

Фоторезистори можуть мати найрізноманітніші конструктивні вирішення: герметизовані, з жорсткими та м'якими виводами, кільцевої форми тощо.

Диференціальні фоторезистори мають три виводи і можуть безпосередньо вмикатися в диференціальні вимірювальні кола.

Останнім часом випускаються, крім того, так звані позиційно-чутливі фоторезистори, що виконують роль безконтактних реохордів і подільників струму, що керуються переміщенням світлової плями.

Генераторні фотоелементи

В генераторних фотоелементах, як і в фоторезисторах, використовується внутрішній фотоефект у напівпровідниках.

Проте в них створюються умови, які приводять до просторового відокремлення збуджуваних світлом носіїв струму (електронів і дірок) і, отже, до утворення фотоЕРС на затискачах фотоелементів.

Практичне застосування мають методи відокремлення за допомогою магнітного поля, а також запірних шарів p - n переходів.

Відповідно слід розрізняти гальваномагнітні та вентильні (запірні) фотоелементи.

Гальваномагнітний фотоелемент (рис. 5.13) складається з напівпровідникового монокристала 1, розміщеного між полюсними наконечниками 2 постійного магніту.

Потік випромінювання, що поглинається поверхнею кристала, створює поблизу неї підвищену концентрацію електронно-діркових пар, які дифундують у глибину кристала. Рухомі електрони та дірки відхиляються магнітним полем в різні боки, а між електродами 3 і 4 встановлюється різниця потенціалів. Якщо замкнути ці електроди на малий зовнішній опір, то в колі виникне фотострум, пропорційний до світлового потоку.

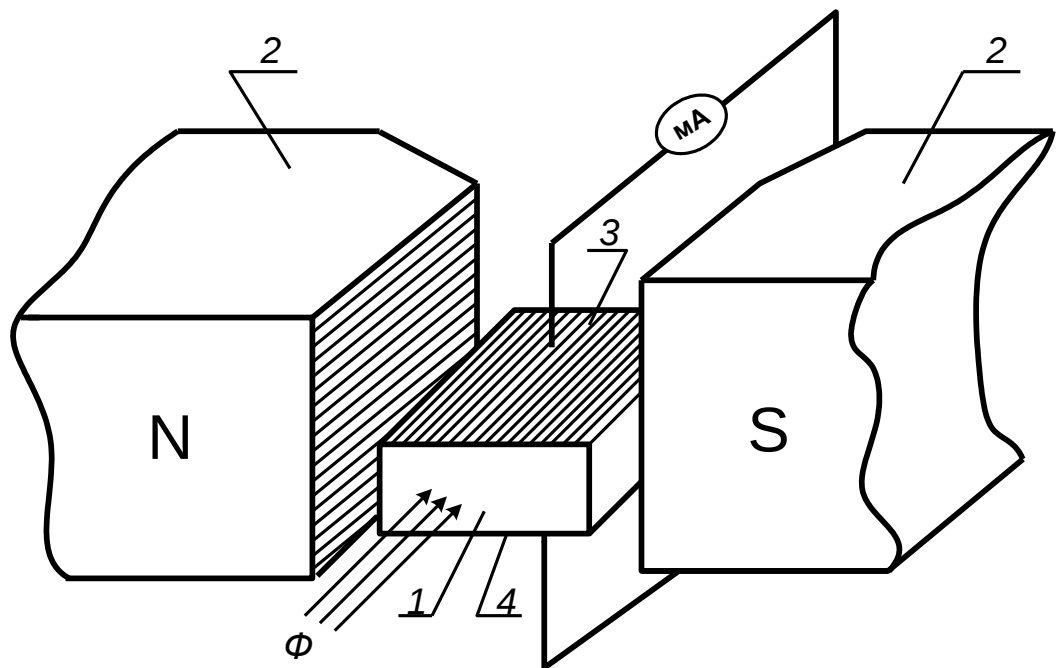


Рис. 5.13. Конструкція гальваномагнітного фотоперетворювача [1-4]

Основна перевага гальваномагнітних фотоелементів – можливість вимірювати інфрачервоні випромінювання (максимум чутливості при $\lambda=6,2$) за досить малої інерційності, яка не перевищує 0,2 мкс. Цієї властивості не мають інші термочутливі та фотоелементи, які звичайно використовують для вимірювання інфрачервоних випромінювань.

В практичних конструкціях гальваномагнітних фотоелементів як чутливий елемент використовуються монокристали сурм'янистого індію високої частоти об'ємом 1...2 мм.

Фотоелемент розміщується в циліндричному корпусі, що є одночасно магнітною системою, індукція в зазорі якої становить 0,8 Тл. Коли загальна маса фотоелемента 100 г, енергетична чутливість характеризується 1 В/Вт або приблизно 30 мА/Вт.

Вентильний фотоелемент – це напівпровідниковий діод (рис. 5.14,а), чутливим елементом якого є напівпровідник p типу; над ним спеціальною обробкою створено тонкий шар напівпровідника n типу та найтонший запірний шар, який їх відокремлює і називається p - n переходом.

Зверху напівпровідник вкрито напівпрозорим металевим шаром (або сіткою 1 з срібла, золота або платини), який є верхнім електродом. Нижнім електродом є металева основа 2.

Під дією світлового потоку, що проникає через напівпрозорий електрод 1 і тонкий шар n -напівпровідника, внаслідок фотоефекту в p -напівпровіднику створюється підвищена концентрація електронно-діркових пар.

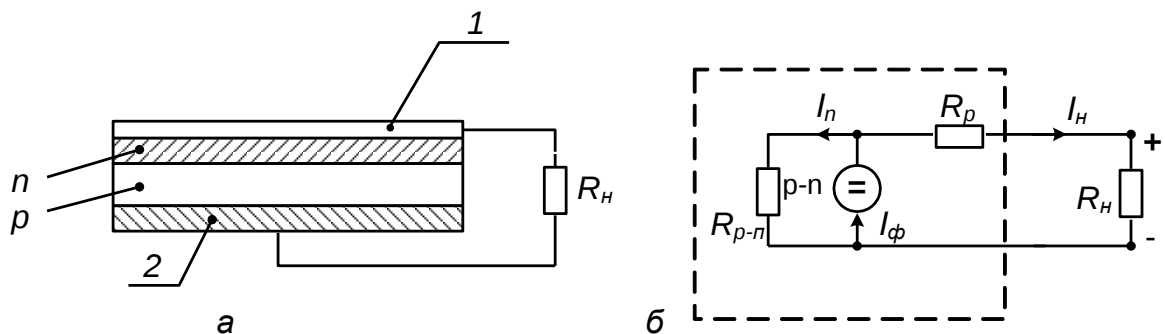


Рис. 5.14. Вентильний фотоперетворювач і його еквівалентна схема [1-4]

Електрони захоплюються потенціальним бар'єром на межі p - n переходу і без перешкод проникають в шар n -напівпровідника, заряджаючи його негативно, а дірки, що залишилися в p -напівпровіднику, заряджають його позитивно.

В результаті цього процесу між електродами виникає різниця потенціалів, яка залежить від інтенсивності світлового потоку та інтегральної чутливості фотоелемента.

Опір p - n переходу в зворотному напрямі R_{pn} становить десятки кілоом, тому надлишок основних носіїв (дірок) змушений текти через менший опір R_p шару p та опір навантаження R_n .

Опір R_n різко зменшується з ростом Φ , оскільки висота потенціального бар'єру знижується на значення фотоЕРС (спад напруги на $R_p + R_n$).

Звідси випливає, що фотоЕРС не може перевищувати потенціального бар'єра 0,1...0,2 В.

Якщо до електродів освітленого вентильного фотоелемента підключити опір навантаження R_n , то під дією фотоЕРС в колі потече електричний струм, який, як це впливає з еквівалентної схеми фотогенератора (рис. 17,14, б), буде дорівнювати [1-4]:

$$I_n = I_\Phi \frac{R_{pn}(\Phi)}{R_{pn}(\Phi) + R_p + R_n} = \frac{k\Phi}{1 + \frac{R_p + R_n}{R_{pn}(\Phi)}},$$

де $I_\Phi = k\Phi$ – первинний фотострум, збуджуваний у фотогенераторі (вентильному фотоелементі); $R_{pn}(\Phi)$ – внутрішній опір p - n переходу, що є функцією світлового потоку; R_p – опір шару P ; R_n – опір навантаження.

При малих значеннях потоку і малих опорах навантаження $R_n \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ Ом}$; $R_p + R_n < R_n(\Phi)$ і струм у навантаженні буде лінійною функцією світлового потоку.

При великих світлових потоках світлові характеристики нелінійні (навіть в режимі короткого замикання), оскільки в цьому разі $R_n(\Phi) < R_p$.

Основні технічні характеристики деяких типів вентильних фотоелементів наведено в табл. 5.4 і показано на рис. 5.15.

Вентильні фотоелементи мають велику інерційність, через що їх можна використовувати лише за сталих світлових потоків.

Фотодіодами називають вентильні фотоелементи, що застосовуються переважно в діодному режимі роботи, тобто із зовнішніми джерелами напруги (10...30В), підключеними до фотоелемента в зворотному напрямі.

За такого вмикання потенціальний бар'єр зростає і визначається зовнішньою напругою.

Таблиця 5.4

Основні параметри деяких типів вентильних фотоелементів [1-4]

Тип фотоелемента	Інтегральна чутливість, мкА/лм	Внутрішній темповий опір, Ом	Максимальна частота, Гц	ФотоЕРС, мВ
К-5 (селеновий)	250...500	$10^3 \dots 5 \cdot 10^4$	50...100	—
ФЗСС-2 (сірнисто-срібний)	3500...8000	1500...3000	5...10	60...150
Фотодіод ФД-1	20000	$5 \cdot 10^5$	105	—
ФД-2	10000...20000	$2 \cdot 10^5 \dots 10^6$	105	—
ФД-3	3000	$6,6 \cdot 10^6$	105	—

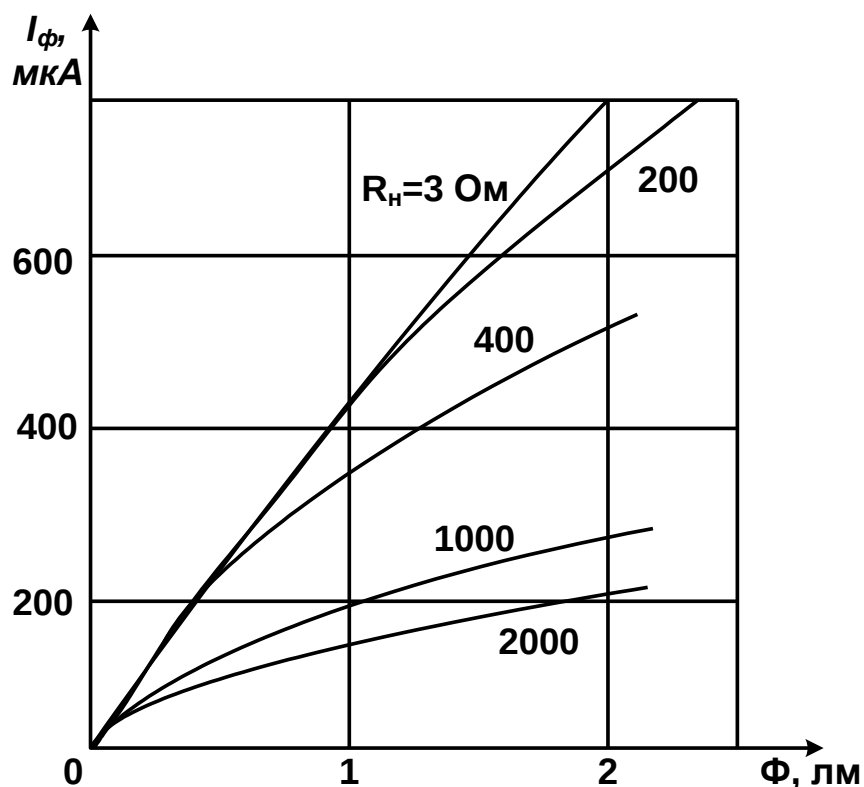


Рис. 5.15. Світлові характеристики селенових вентильних фотоперетворювачів [1-4]

Умови проникнення неосновних носіїв з освітленої зони через p - n перехід істотно полегшується, а зворотний опір цього переходу R_{pn} різко зростає.

В результаті зростає чутливість, а світлові характеристики стають строго лінійними в широкому діапазоні світлових потоків.

Під час роботи у фотодіодному режимі струм, що протікає через навантаження, здатний створити на ньому спад напруги того самого порядку, що і напруга джерела живлення. При цьому сила струму мало залежить від напруги живлення.

Найпоширенішими є кремнієві та германієві фотодіоди ФД і ФДК (табл. 5.4). Кремнієві фотодіоди найчутливіші до інфрачервоного випромінювання, але з їх допомогою можна реєструвати і видиме випромінювання.

Інерційність фотодіодів мала (10^{-5} ... 10^{-6} с). Чутливість їх не залежить від температури. Темновий струм, навпаки, із зміною температури значно змінюється. Фотодіоди мають значну інтегральну чутливість (10 мА/лм) і малі габаритні розміри, стійкі до механічних навантажень, мають тривалий термін служби (500...5000 г).

Характеристики фотодіодів наведені в [47].

Використовуючи підсилювальні властивості комбінованих *p-n-p* або *n-p-n* переходів (напівпровідникових транзисторів), можна в десятки разів підсилювати фотострум.

Зовнішній вигляд та умовне позначення фотодіодів показані на рис. 5.16,а, б [48]. Фотодіоди характеризуються високою чутливістю (порядку 20 мА/лм). Вони можуть працювати в двох режимах – фотогальванічному та фотодіодному [48]. В фотогальванічному режимі фотодіод є джерелом електричної енергії. Схему ввімкнення зображено на рис. 5.16,в. В фотодіодному режимі фотодіод працює як споживач енергії, тобто як опір. Схему ввімкнення показано на рис. 5.16,г, в цій схемі обов'язкова наявність джерела енергії.

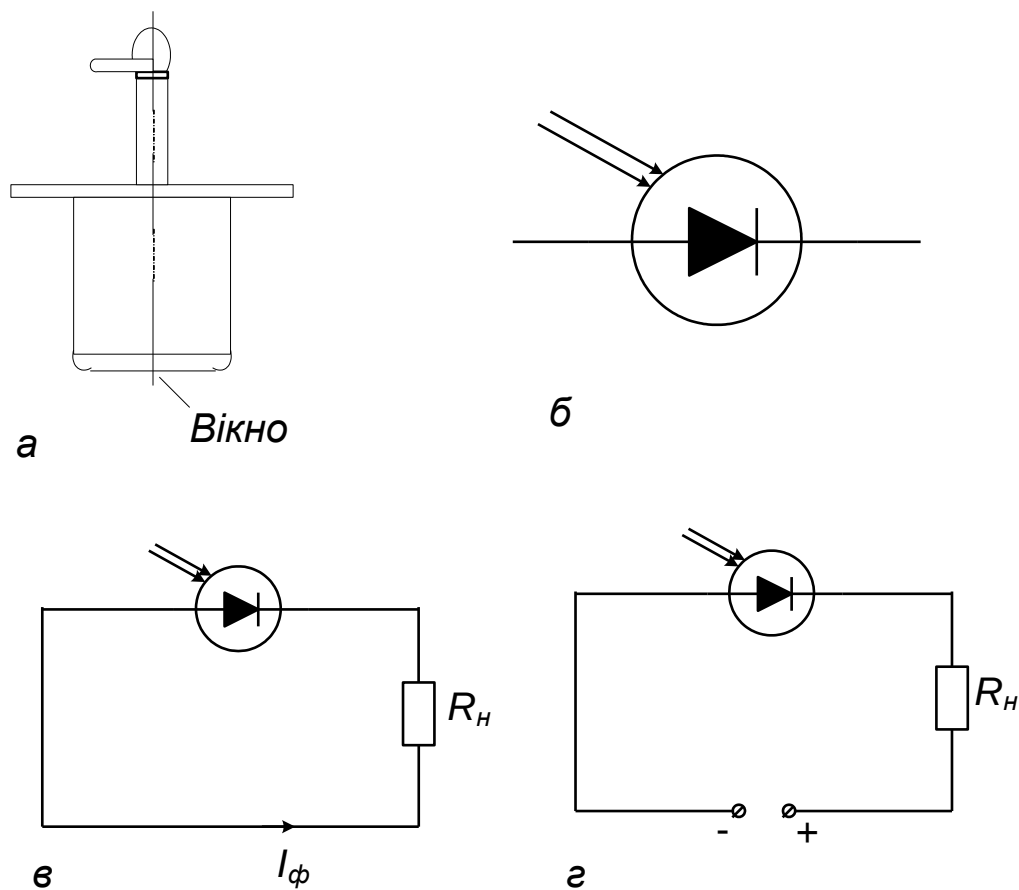


Рис. 5.16. Фотодіод [1-4]:

а – зовнішній вигляд; б – умовне позначення;

в, г – схеми включення

Датчики на основі приладів із зарядовим зв'язком

Цей тип датчиків використовується в системах міжопераційного контролю технологічного процесу з метою забезпечення відповідного рівня якості продукції (геометричних розмірів з граничними допусками, однорідності, якості поверхні тощо).

Основними конструктивними елементами датчика на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) є кремнієві МОП-конденсатори та МОП-фотодіоди, з'єднані в послідовний ряд або за матричною схемою.

В однокоординатних датчиках зображення на основі ПЗЗ фотоселементи розташовані послідовно. Наприклад, датчик ТН7803 складається з 1728 елементів, загальна довжина лінійки 17,28 мм з оптичною роздільною здатністю 50 ліній на 1 мм.

Як фотоелементи в ПЗЗ використовуються пасивні фотодіоди *n-p*-типу, кожному з яких відповідає окремий МОП-конденсатор як елемент пам'яті. Таке конструктивне виконання забезпечує високу чутливість у порівнянні з ПЗЗ на основі МОП-фотоконденсаторів.

Рядок фотоелементів відокремлено від обох зсуваючих регістрів відповідними затворами. При їх відкритті накопичений заряд в паралельному режимі переноситься в регістри зсуву. Останні розташовані по обидва боки від рядка фотоелементів датчика і приймають парні або непарні заряди, посуваючи їх до виходу.

Регістри надлишкових зарядів призначені для ізоляції зсувних регістрів відносно зовнішнього поля та приглушення із-за нього електричних завад (темновий струм, шуми).

Виходи обох зсувних регістрів підключені до діода, що в мультиплексному режимі сприймає заряди від обох регістрів і перетворює їх у відповідну напругу. Імпульси напруги з виходу діода подаються на підсилювач зі схемою дискретизації та запам'ятовування відліків. Відеосигнал на виході підсилювача відображає розподілення сили освітлення вздовж рядку, що аналізується.

Схема внутрішньої керуючої логіки датчика генерує тактові імпульси скидання в нуль і імпульси сканування. Це дозволяє керувати датчиком зображення лише двома зовнішніми тактовими імпульсами, а саме імпульсами передачі.

Спектральна чутливість такого датчика поширюється на діапазон від 400 нм до 1000 нм, тобто на весь діапазон видимого випромінювання.

Оптрони. Конструкція. Використання. Принцип дії.

Переваги та недоліки. Режим роботи оптрона

Останнім часом оптрони стали поширеними. Оптроном називають оптоелектронний перетворювач, який являє собою конструктивно об'єднані в одному корпусі узгоджені за спектральними характеристиками та іншими властивостями джерело 1 і приймач 2 випромінювання. Між ними існує оптичний зв'язок через оптичне середовище 3 (рис. 5.17,*a*).

Як джерела випромінювання в оптронах найчастіше використовують світлодіоди, а як приймачі – здебільшого фоторезистори, фотодіоди.

Ступінь погодження спектральних характеристик випромінювача та приймача оцінюється коефіцієнтом погодження

$$k_{\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{P_{\max}S_{\max}},$$

де $P(\lambda)$, $S(\lambda)$, $P_{\max}$ і $S_{\max}$ – відповідно спектральні характеристики випромінювача і фотоприймача та їх максимальні значення.

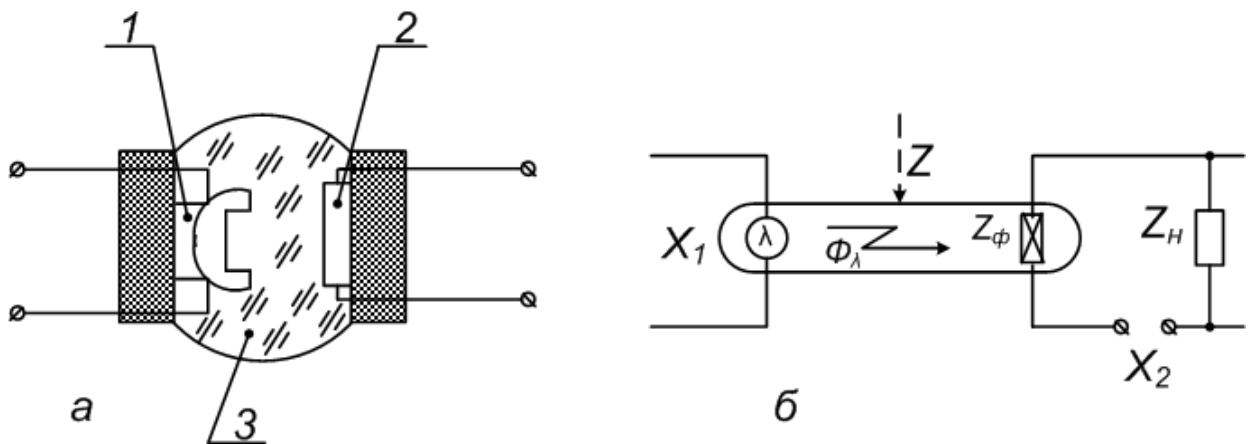


Рис. 5.17. Структура та принципова схема оптрона як функціонального елемента [1-4]

В добре погоджених пар випромінювач-приймач коефіцієнт $k_{\lambda} > 0,9$.

Існують численні конструктивні різновиди оптронів [44]. Проте найпоширенішими є оптрони з прямим оптичним зв'язком, їх використовують як керуючі безконтактні опори, імпульсні модулятори та трансформатори, підсилювачі напруги, аналогові елементи лічильно-розв'язувальної техніки в режимі перемноження, ділення, підсумовування, інтегрування тощо, вони є основними структурними елементами логічних систем цифрових пристроїв.

Принцип роботи оптрона як функціонального перетворювача пояснює схема, показана на рис. 5.17,б.

Кероване джерело випромінювання λ перетворює вхідний електричний сигнал $x_1((U_1, I_1))$ у світловий $\Phi\lambda(x_1)$.

Потік $\Phi\lambda$, проходячи через оптичний канал, може зазнавати впливу сигналу Z і змінити свої параметри (інтенсивність, довжину хвилі тощо).

Отже, оптичний сигнал, який діє на фотоприймач, є в загальному випадку функцією вхідної електричної величини x_1 і вхідної оптичної величини Z

Як перетворювачі інформації за входом Z (за оптичним входом) можуть бути використані різні магнітооптичні ефекти, які дають змогу керувати через оптичне середовище параметрами світлового потоку $\Phi\lambda$.

Імпеданс Z_ϕ фотоприймача (за інших однакових умов) залежить не лише від потоку $\Phi\lambda$, а і від значення параметрів сигналу $x_2(U_2, I_2)$ отже, в загальному випадку

$$Z_\phi = f(x_1, Z, x_2),$$

а вихідний сигнал оптрона буде функцією трьох незалежних сигналів

$$Y_{\text{вих}} = F(x_2, Z_\phi) = F(x_1, z, x_2),$$

що дає змогу незалежно керувати оптроном за кожним з його входів.

Розглянемо роботу оптрона, який складається з пари світлодіод-резистор, в режимі аналогового перетворювача.

Фотоприймач такого оптрона може працювати як еквівалентний генератор струму (рис. 5.18,а), який розвиває незалежно від параметрів навантаження силу струму ΔI_ϕ , що дорівнює $S_i \Delta \Phi_\lambda$ (тут S_i – чутливість фоторезистора за струмом; $\Delta \Phi_\lambda$ – приріст світлового потоку), або як еквівалентний генератор напруги (рис. 5.18,б), що розвиває незалежно від навантаження ЕРС

$$\Delta e_\phi = S_i R_i \Delta \Phi_\lambda,$$

і має внутрішній опір R_i .

За малого вхідного сигналу зміна вихідної напруги під час роботи оптрона в режимі генератора струму

$$\Delta U_H = \Delta I_H R_H = S_i \Delta \Phi_\lambda \frac{R_i R_H}{R_i + R_H},$$

а в режимі генератора напруги

$$\Delta U_H = \frac{\Delta e_\phi}{R_i + R_H} R_H = S_i \Delta \Phi_\lambda \frac{R_i R_H}{R_i + R_H}.$$

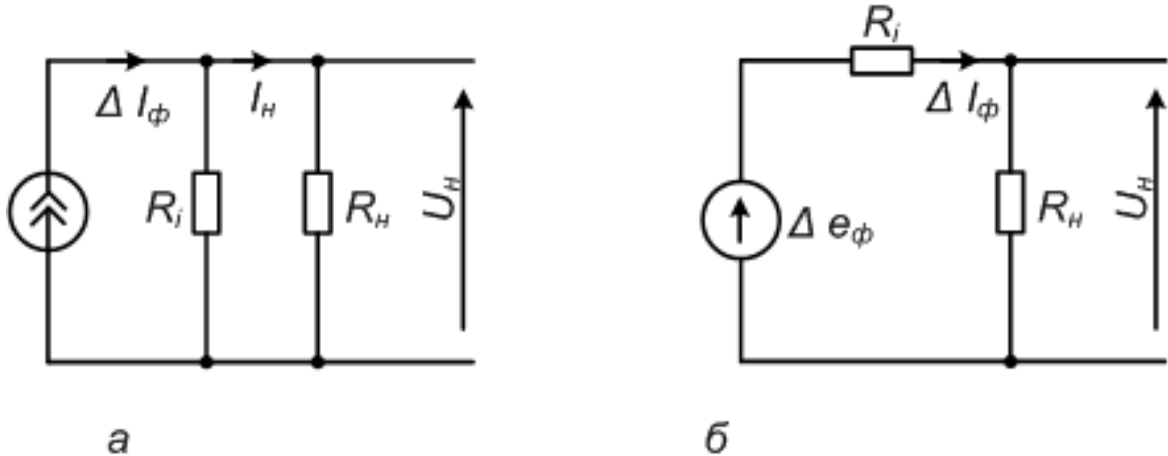


Рис. 5.18. Фоторезистор як еквівалентний генератор [1-4]

Отже, обидві схеми щодо вихідного сигналу рівнозначні.

Як приклад використання оптрона в режимі аналогового перетворювача на рис. 5.19,а,б, показано два можливих варіанти схем керованих подільників напруги.

Використавши обидва функціональні входи оптрона (див. рис. 5.17,б) можна отримати оптронний перемножувач.

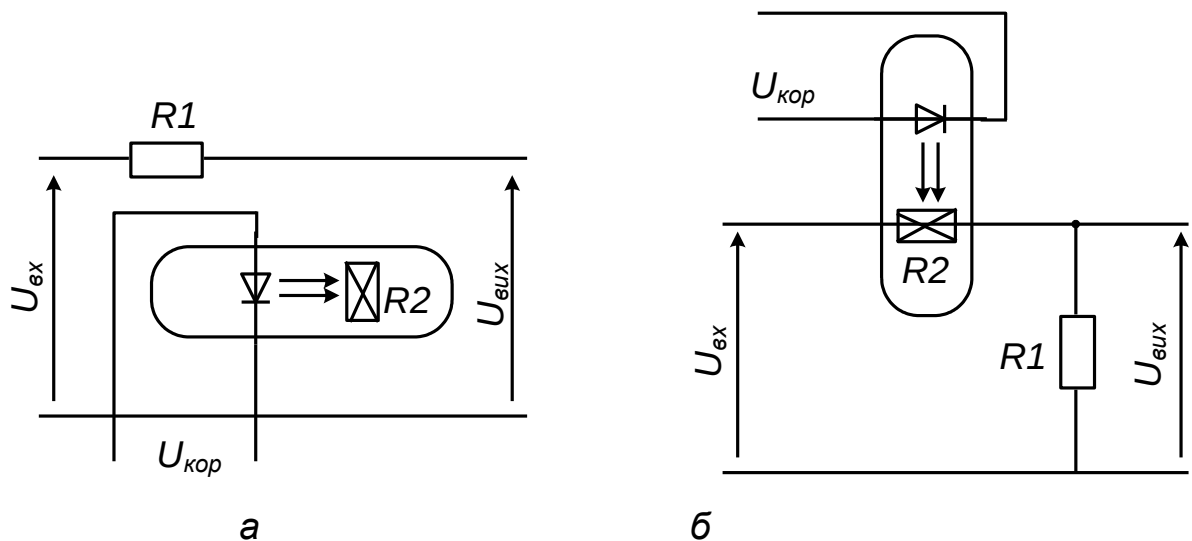


Рис. 5.19. Схеми оптронних керованих подільників напруги [1-4]

Для побудови пристрою подільника сигналів можна скористатися двома оптронними парами, ввімкненими за схемою, зображеною на рис. 5.20 (де оптрон 2 живиться від джерела струму I_0). Тоді

$$U_2 = I_0 R_2 \approx \frac{1}{I_2}.$$

Оскільки U_2 відіграє роль керуючої напруги за другим входом оптрона 1, то $U_{\text{вих}} \sim I_1 U_2$, отже, $U_{\text{вих}} \sim I_1 / I_2$.

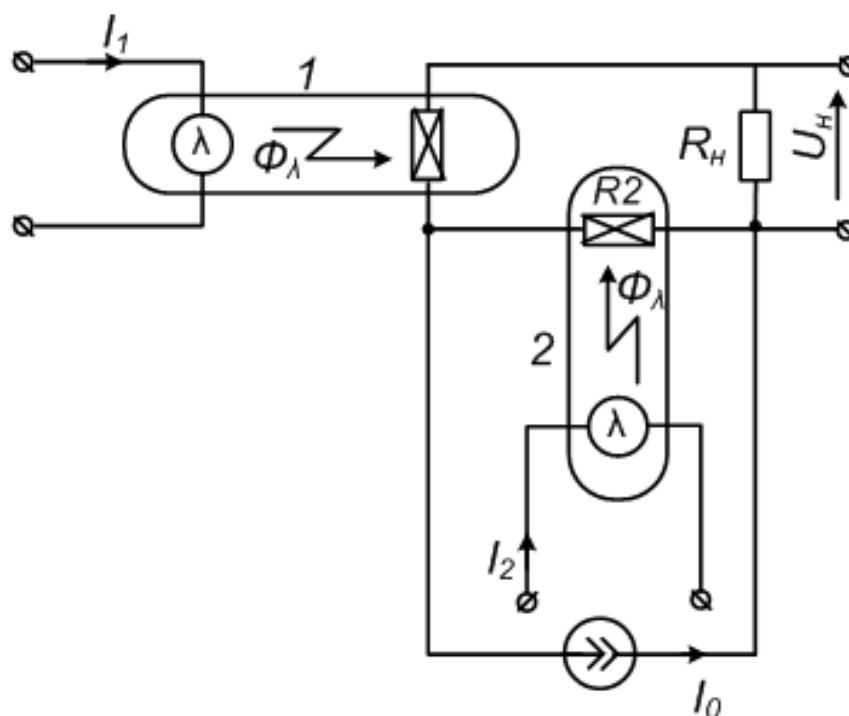


Рис. 5.20. Опторонний подільник сигналів [1-4]

Якщо джерелом 1 є світлодіод, а приймачем 2 – плівковий фоторезистор, то оптрон можна розглядати як надмініатюрний керований електричним струмом резистор, причому кола регулювання і керування є гальванічне розв'язаними, а саме керування – малоінерційним; може застосовуватися опір від 10^8 Ом (при $I=0$) до 10^4 Ом (при $I=10$ мА).

До недоліків оптронів належать значна нелінійність їх характеристик і залежність параметрів від температури, через що похибка перетворення досягає 5–8 %.

Для зменшення таких похибок застосовують складні, зокрема мостові, схеми [5].

Вимірювальні кола оптичних перетворювачів

Одноканальне вимірювальне коло

Вимірювальні кола оптичних перетворювачів виконують одноканальними лише тоді, коли об'єкт вимірювання сам є джерелом випромінювання, наприклад у оптичних пірометрах – для вимірювання температури [67], люксметрах і фотоекспонетрах – для вимірювання освітленості.

Двоканальне або диференціальне вимірювальне коло

Якщо на потік випромінювання доводиться впливати на шляху його поширення від випромінювача до фотоприймача, оптичне вимірювальне коло виконують здебільшого двоканальним (рис. 5.21). При цьому світло від джерела випромінювання 1 дзеркалами 2 поділяється на два пучки. Один з пучків регулюється діафрагмою із змінним отвором або оптичним клином 4 і за допомогою лінз 3 та 6 спрямовується у фотоприймач 7, а другий пучок проходить через об'єкт вимірювання 5 і потрапляє у фотоприймач 8. Фотоприймачі 7 і 8 вмикаються у диференціальне електричне вимірювальне коло, і покази відлічуються за показником цього кола (режим прямого перетворення) або за положенням клина (або діафрагми) 4, що відповідає нульовому показу показника (режим врівноважувального перетворення).

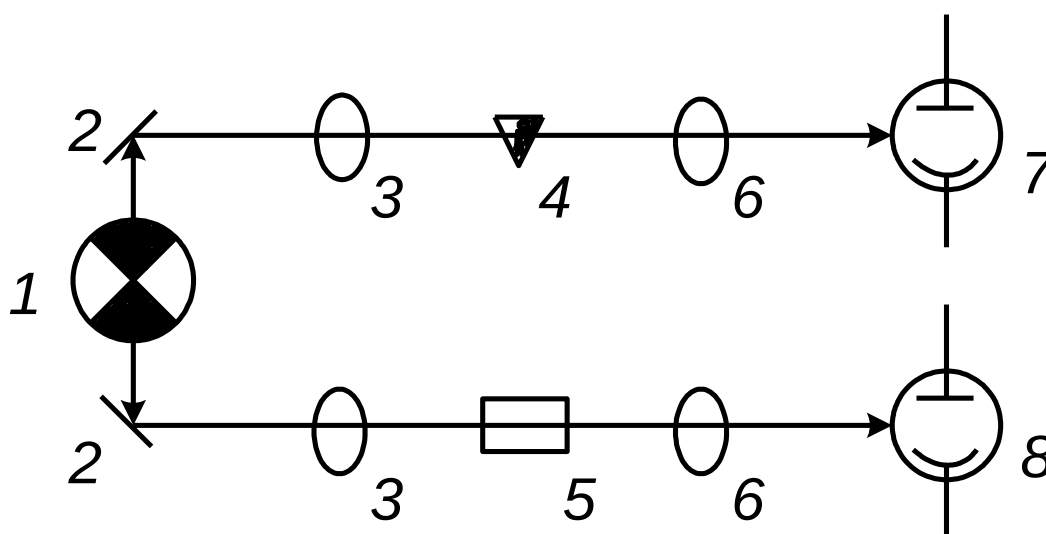


Рис. 5.21. Двоканальне оптичне вимірювальне коло [1-4]

Використання спільного джерела випромінювання за режиму врівноважування виключає похибку від нестабільності потоку випромінювання, що дуже істотно залежить від напруги живлення джерела випромінювання. Проте лишається істотною похибка від неідентичного змінювання в часі темнового струму та чутливості двох фотоприймачів 7 і 8.

Тому для досягнення вищої точності використовують схему оптичного кола, показану на рис. 5.22, де кожний з пучків світла по черзі перекривається зубцями диска, який обертається синхронним двигуном 8, а спільний фотоприймач 7 освітлюється світлом то одного, то другого пучка.

Якщо світлові потоки пучків однакові, освітлення приймача лишається сталим, а якщо не однакові, то виникає змінна складова фотоструму, яку можна легко підсилити носієм змінного струму.

Такий прилад можна зробити самозрівноважувальним, якщо оптичний клин переміщувати від двигуна, що живиться підсилювачем фотоструму. Такі вимірювальні кола чутливі до амплітуди світлового потоку, застосовуються для сприймання модульованих за фазою потоків випромінювання.

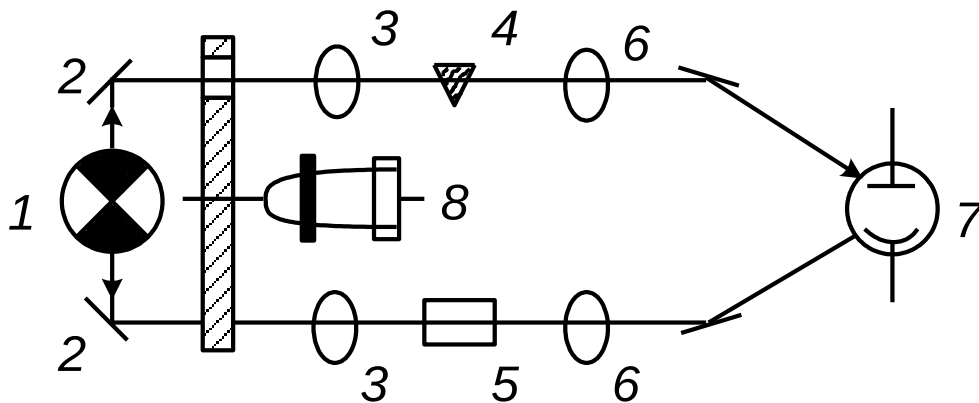


Рис. 5.22. Оптичне вимірювальне коло з почерговим перекриванням пучків світла [1-4]

Використовуючи пристрої додавання двох чи більше потоків однакової частоти, але таких, що різняться за фазою, так звані інтерферометри (рис. 5.23), отримують результуючий потік, що змінюється за амплітудою, а далі коло приладу будують на основі одного з описаних методів.

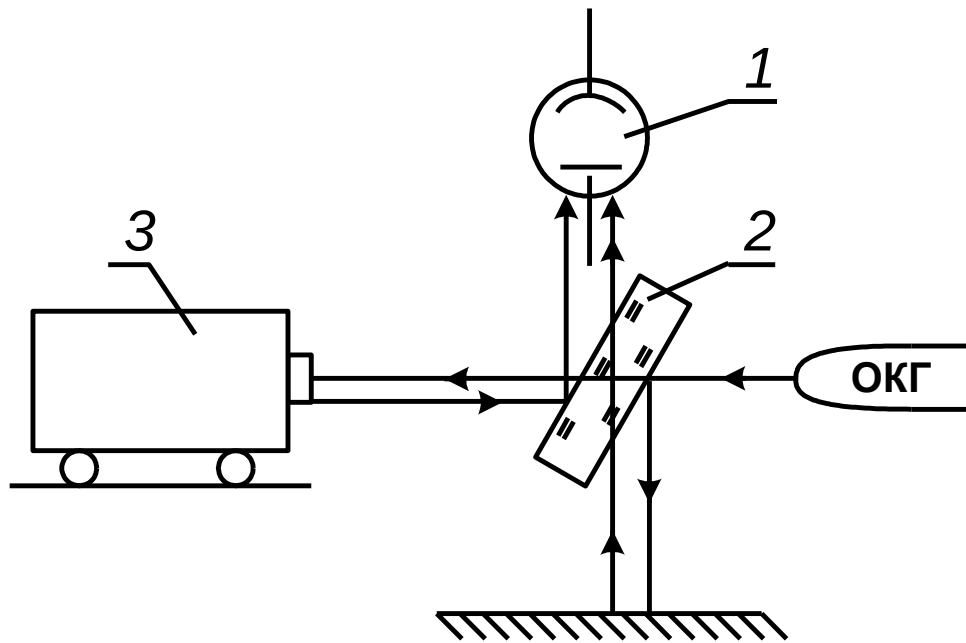


Рис. 5.23. Інтерференційний перетворювач

В практичних конструкціях інтерферометрів (рис. 5.23), призначених для вимірювання відрізків довжин або переміщень, два когерентні потоки, які надходять у фотоприймач 1, створюються за рахунок поділу світлового потоку одного джерела (ОКГ) на дві частини, наприклад за допомогою похилого напівпрозорого дзеркала 2, причому різниця фаз між ними утворюється за рахунок того, що один з потоків двічі проходить вимірювану відстань до об'єкта 3.

Сутність роботи інтерференційних перетворювачів полягає в тому, що при додаванні двох когерентних світлових потоків вони можуть послаблювати або підсилювати один одного залежно від різниці фаз між ними.

Основні елементи розрахунку оптичних перетворювачів

Для вимірювання кута площини поляризації на шляху потоку ставлять поляроїдну пластинку, яка пропускає (або не пропускає) світло залежно від її положення відносно площини поляризації потоку.

Обертаючи цю пластинку (навколо осі потоку), отримують потік, що пульсує за амплітудою. Фаза цих пульсацій і визначає кут площини поляризації потоку.

Для того щоб за відомими характеристиками фотоприймача розрахувати його фотострум, потрібно визначити світловий потік, який падає на нього.

В загальному випадку (рис. 5.24) світна поверхня джерела S_1 з яскравістю світіння B_1 утворює на приймачі з площею S_2 світловий потік

$$\Phi = \frac{B_1 S_2 S_1}{r^2} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2,$$

де r – відстань між центрами S_1 і S_2 , φ_1 і φ_2 – кути між лінією, що сполучає центри площ поверхонь S_1 та S_2 , і нормалями до цих поверхонь.

Якщо джерело світла точкове, то $B_1 S_1 = I$ – його сила світла, а $\cos \varphi_1 = 1$ і $\Phi = (I S_2 \cos \varphi_2) / r^2$.

Якщо $\varphi_2 = 0$, то освітленість на відстані r від джерела буде $E = I / r^2$ і світловий потік $\Phi = E S_2$.

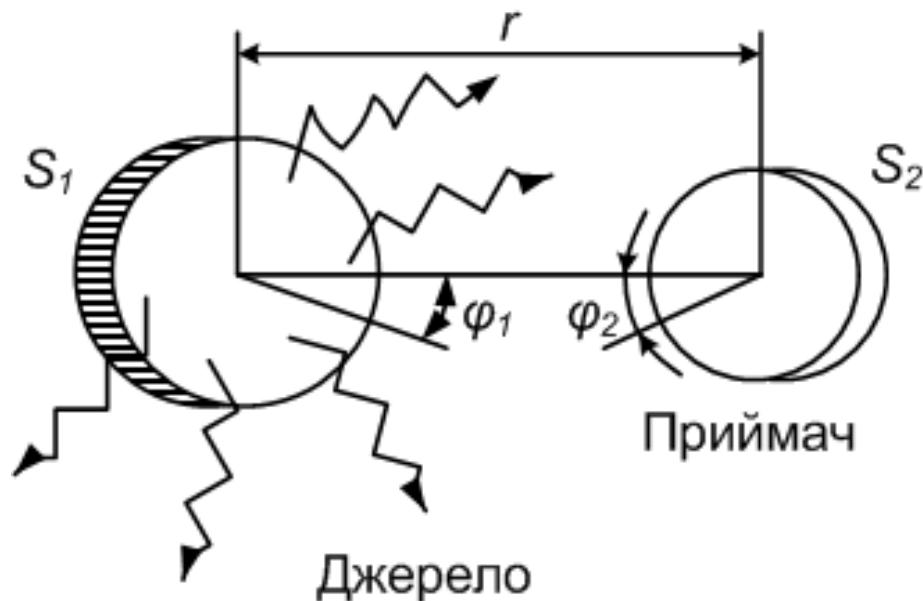


Рис. 5.24. До визначення характеристик фотоприймача [1-4]

Приклади практичного застосування оптичних перетворювачів

До оптоелектричних належать такі прилади, в схемі яких як перетворювачі використовуються фотоелементи.

Практичного застосування в приладах для автоматичного контролю набули оптоелектричні перетворювачі, завдання яких – фіксувати наявність або відсутність потоку випромінювання, тобто оптореле. В таких приладах оптоелектричний перетворювач звичайно поставлений в кінці вимірювальної схеми і відіграє роль виконавчо-командного пристрою приладу.

Як первинні збільшуючі передачі у вимірювальній схемі оптоелектричного приладу широко використовують пружинні механізми та растрові сполучення.

Іноді, щоб дістати дискретний сигнал-команду, фотоелектричний перетворювач встановлюють на виході пневматичного або індуктивного приладу.

Вітчизняна промисловість серійно випускає високоточні оптоелектричні пружинні перетворювачі, призначені для побудови контрольних сортувальних автоматів (модель ПСФ) і засобів активного контролю (ПФП).

Водночас застосовуються вимірювальні схеми, де за допомогою оптоелемента вимірюється потік випромінювання, функціонально пов'язаний з розміром контрольованого параметра.

Оптоелектричні прилади для вимірювання лінійних розмірів

На рис. 5.25 показано принципову схему приладу, де вимірюється світловий потік, що несе інформацію про розмір деталі. Світловий потік від джерела 1 через оптичну систему 2 та щілинну діафрагму 3 падає на фотоелемент 4. Щілинна діафрагма частково закрита контрольованою деталлю 6. Отже, потік випромінювання, що падає на фотоелемент, визначається розміром деталі і спричиняє певну силу струму в мікроамперметрі 5.

Низька точність приладів, побудованих за цією схемою, пояснюється тим, що на результати вимірювання впливають коливання яскравості

джерела випромінювання, напруги живлення, температури тощо. Ця схема також чутлива і до стороннього випромінювання, що падає на фотоеlement.

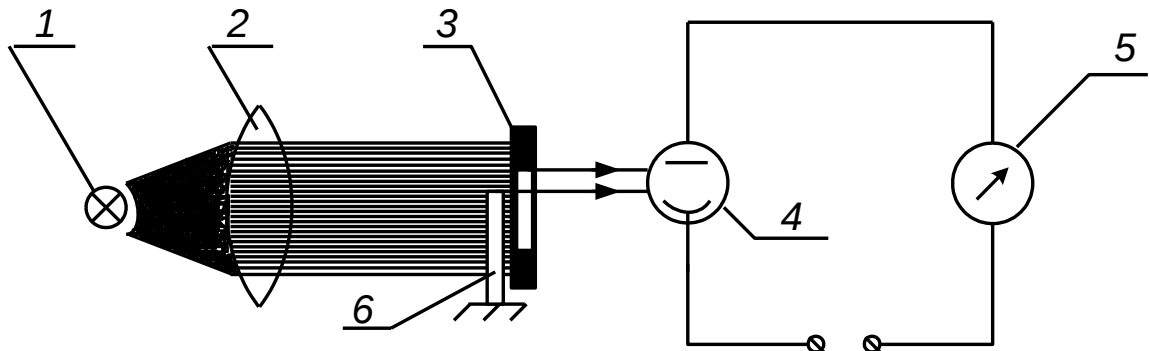


Рис. 5.25. Найпростіша схема оптикоелектричного приладу [1-4]

Щоб зменшити або повністю усунути вплив зазначених параметрів на результати вимірювання, застосовують диференціальні або компенсаційні схеми.

Розглянемо дві схеми оптоелектричних датчиків кута [48].

Оптоелектричні прилади для вимірювання кутових розмірів

Оптоелектричний датчик кута із заслінкою

Датчик із заслінкою (рис. 5.26) складається з джерела світла 1, фотоеlementa 3, розміщених на корпусі приладу, і заслінки 2, пов'язаної з його чутливим елементом.

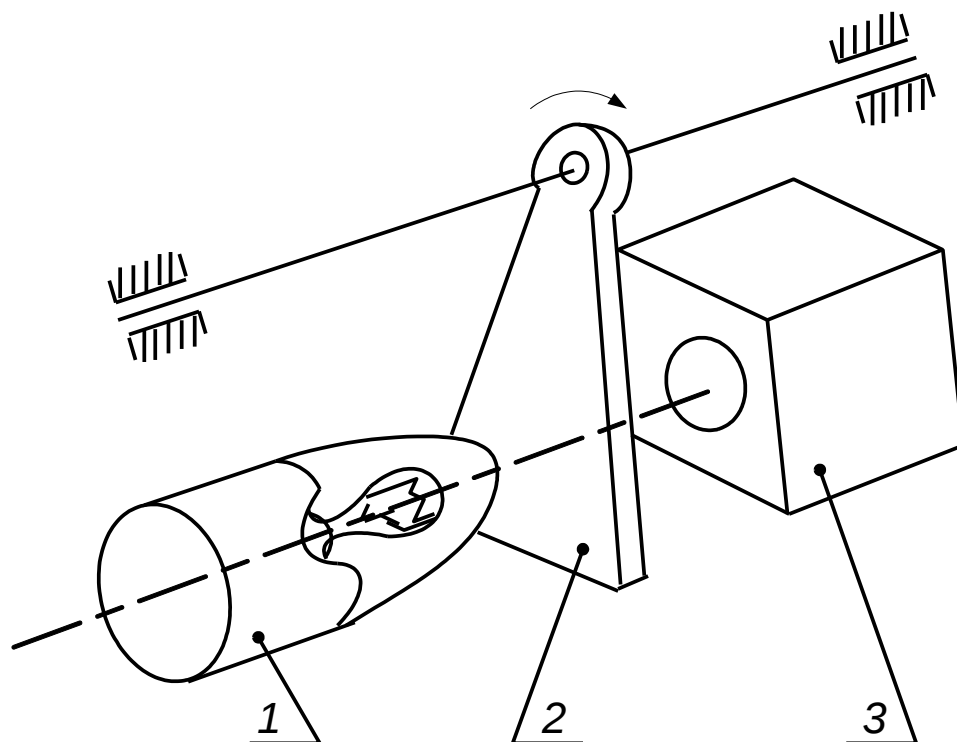


Рис. 5.26. Схема датчика кута із заслінкою [1-4]

При кутових відхиленнях чутливого елемента разом з ним відхиляється заслінка, змінюючи інтенсивність освітлення фотоелемента, в результаті чого в електричному колі фотоелемента змінюється фотострум I_f , який залежить від кута відхилення заслінки і є вихідним параметром датчика.

Оптоелектричний датчик кута з дзеркалом

Датчик з дзеркалом (рис. 5.27) складається з джерела світла 1, фокусуєної системи 2 і фотоелемента 4, розміщених на корпусі приладу, і дзеркала 3, розміщеного на чутливому елементі приладу.

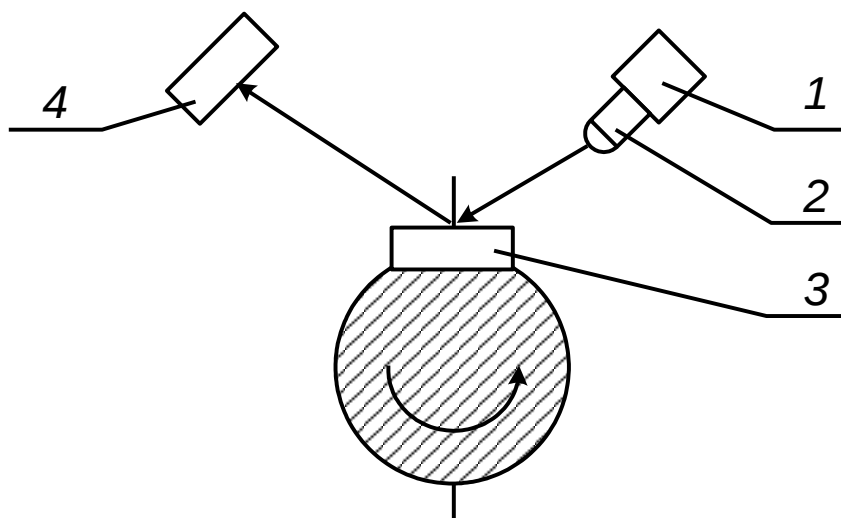


Рис. 5.27. Схема датчика кута з відбиваючим дзеркалом [1-4]

Коли відхиляється чутливий елемент, разом з ним відхиляється дзеркало, і відбиті від нього світлові промені падають на світлочутливу поверхню фотоелемента, спричиняючи або змінюючи фотострум у його електричному колі.

Основний недолік фотоелектричних датчиків кута – нестабільність у часі вихідних характеристик датчика (крутості нульового сигналу), велика залежність цих параметрів від температури, інерційність фотоелементів.

В ряді гіроскопічних приладів, де датчик фіксує відносно повільні повороти рам карданового підвісу, останній недолік, як правило, не істотний.

Як фотоелементи в оптодатчиках кута часто застосовують фоторезистори та оптодіоди.

Оптоперетворювачі "кут (переміщення) – код"

В зв'язку з безсумнівною перспективністю використання ЦОМ в інерціальних навігаційних системах важливого значення набуває проблема поєднання ЦОМ з усією системою, тобто проблема перетворення безперервної вхідної інформації, яка надходить у ЦОМ, з аналогової форми в цифрову, і проблема зворотного перетворення інформації, що виходить з ЦОМ і надходить у блок інерціальних елементів. Такі перетворення виконують за допомогою вхідних і вихідних перетворювачів.

Інформація, яку потрібно ввести у ЦОМ з блока інерціальних елементів, буває, як правило, подана у вигляді кутових переміщень або електричних сигналів (напруг або струмів).

Тому основними типами вхідних перетворювачів, які використовуються в інерціальних навігаційних системах для введення інформації у ЦОМ, є перетворювачі типу "кут-код" і "напруга-код".

Один з таких перетворювачів (оптоелектричний) використовується для перетворення кутів, що визначають положення блока інерційних елементів, і згадується в літературі під назвою "оптосин" [22].

Взагалі вимоги до точності перетворювачів типу "кут-код" визначаються такими причинами:

– заданою точністю інерціальної навігаційної системи в цілому;

– способом побудови інерціальної навігаційної системи, тобто кінематикою блока інерціальних елементів;

– кінематикою зв'язку цього блока з пристроями зовнішньої корекції.

В тому разі, коли сталість кутів між осями інерціальних елементів (а також і пристроїв корекції) забезпечується самою кінематикою блока згаданих елементів, вимоги до точності перетворювачів порівняно невисокі.

Якщо сталість цих кутів забезпечується за допомогою спеціальних слідкуючих систем, як це відбувається в системах, подібних до астроінерціального орієнтатора, що ґрунтується на вимірюванні висот двох світил, то вимоги до точності перетворювачів "кут-код" досить жорсткі.

Перетворювачі "кут-код", встановлювані по осях блока інерціальних елементів, також мають задовольняти деяким специфічним конструктивним вимогам:

– малий момент опору на вхідній осі перетворювача;

– невеликі маса та габаритні розміри.

Питання щодо перетворювачів інформації для ЦОМ всебічно висвітлені в спеціальній вітчизняній та зарубіжній літературі.

В перетворювачах кутових і лінійних переміщень в цифровий код звичайно застосовують два методи перетворення: послідовної лічби і зчитування.

Перетворювачі послідовної лічби поділяють на накопичувальні та з проміжним перетворенням переміщення в іншу аналогову величину.

Накопичувальні перетворювачі виконують алгебраїчний підрахунок числа однакових елементарних переміщень, з яких складається реальне переміщення. Число елементарних приростів є цифровим еквівалентом переміщення.

Перетворювачі накопичувального типу характеризуються великою швидкістю, оскільки в них час, за який переміщення перетворюється в код, дорівнює часу знімання показів з лічильника.

Основний недолік перетворювачів цього типу – низька завадозахищеність: переривання подавання сигналів про елементарні

прирости до лічильника і зброї у процесі підрахунку приростів, через що виникає систематична похибка.

Перетворювачі з проміжним перетворенням в аналогові величини (наприклад, кут – фаза – часовий інтервал – код) характеризуються циклічністю роботи, тобто коли зафіксовано цифровий еквівалент переміщення в даний момент часу, процес перетворення повторюють, щоб отримати цифровий еквівалент переміщення у наступний момент.

В таких перетворювачах поява короткочасної завади може призвести до спотворення цифрового коду переміщення, проте в наступному циклі помилка виключатиметься.

Перетворювачі зчитування мають кодову шкалу, яка переміщується пропорційно до вимірюваної величини, і нерухомі чутливі елементи. Початок відліку за кодовою шкалою збігається з початковим положенням рухомих деталей пристрою. Кодова шкала містить набір цифрових еквівалентів переміщення, які зчитуються за допомогою чутливих елементів.

В результаті опитування чутливих елементів на їх виводах утворюються сигнали, комбінації яких дають цифрові еквіваленти положення кодової шкали і, отже, перетворюваного переміщення.

Як приклад на рис. 5.28 показано кругову чотирирозрядну шкалу, яка дає змогу відлічувати кут повороту валу з дискретністю $1/16$ оберту шкали.

При цьому переміщення кодується в двійковому коді. Коду нуля відповідають заштриховані ділянки, коду одиниці – світлі.

Чутливі елементи розміщуються по радіусу. Істотний недолік перетворювачів з двійковими кодовими шкалами – невизначеність зчитування коду на межі світлої та заштрихованої ділянок всіх розрядів, зумовлена неточністю виготовлення кодових шкал, встановлення чутливих елементів тощо.

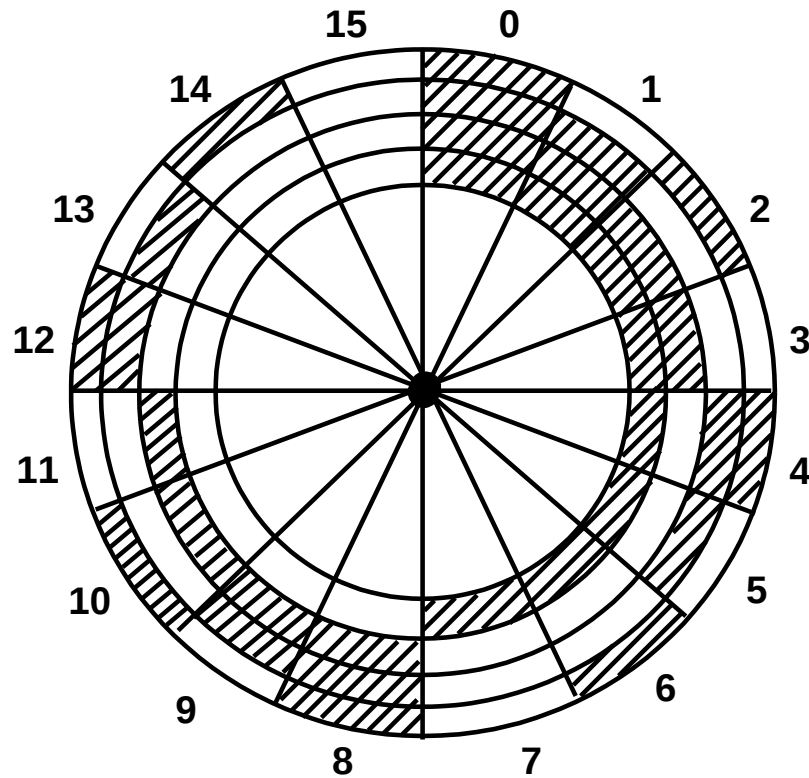


Рис. 5.28. Двійкова кодова шкала [1-4]

Невизначеність зчитування коду може спричинити похибку відліку, що дорівнює одиниці старшого розряду.

Щоб зменшити похибку зчитування показів з кодової шкали до значення, яке дорівнює одиниці молодшого розряду коду, застосовують кодові шкали з масками спеціальних кодів (наприклад, Грея, Беркера).

Фізичні явища, що використовуються в перетворювачах зчитування, визначають спосіб знімання цифрових еквівалентів переміщення.

Згідно з цим розрізняють оптоелектричний, трансформаторний, ємнісний, трансфлюкційний і електромеханічний способи знімання інформації.

Оптоелектричні перетворювачі, як було зазначено, мають ряд переваг порівняно з іншими: високу розподільчу здатність, велику швидкодію, безконтактне знімання інформації.

Фотоелектрична система зчитування складається з чутливих елементів – фотоприймачів (фотодіодів, фототріодів, фотоопорів тощо), джерел світла і допоміжних елементів [40].

Принцип дії оптоелектричного перетворювача "кут-код" [20] показано на рис. 5.29 [22].

Одна з найвідповідальніших деталей цього перетворювача – скляний диск 2 з нанесеними на ньому кодовими доріжками, число яких дорівнює числу розрядів і визначає його точність.

Щоб зменшити похибку при зчитуванні, кути повороту скляного диска кодують у кодї Грея [20].

Кодова комбінація (із прозорих і непрозорих ділянок), яка відповідає поточному значенню кута повороту диска, зчитується за допомогою оптоелектричної системи, що складається з імпульсної лампи 1, щілинної діафрагми 3 і групи фоточутливих приймачів 4.

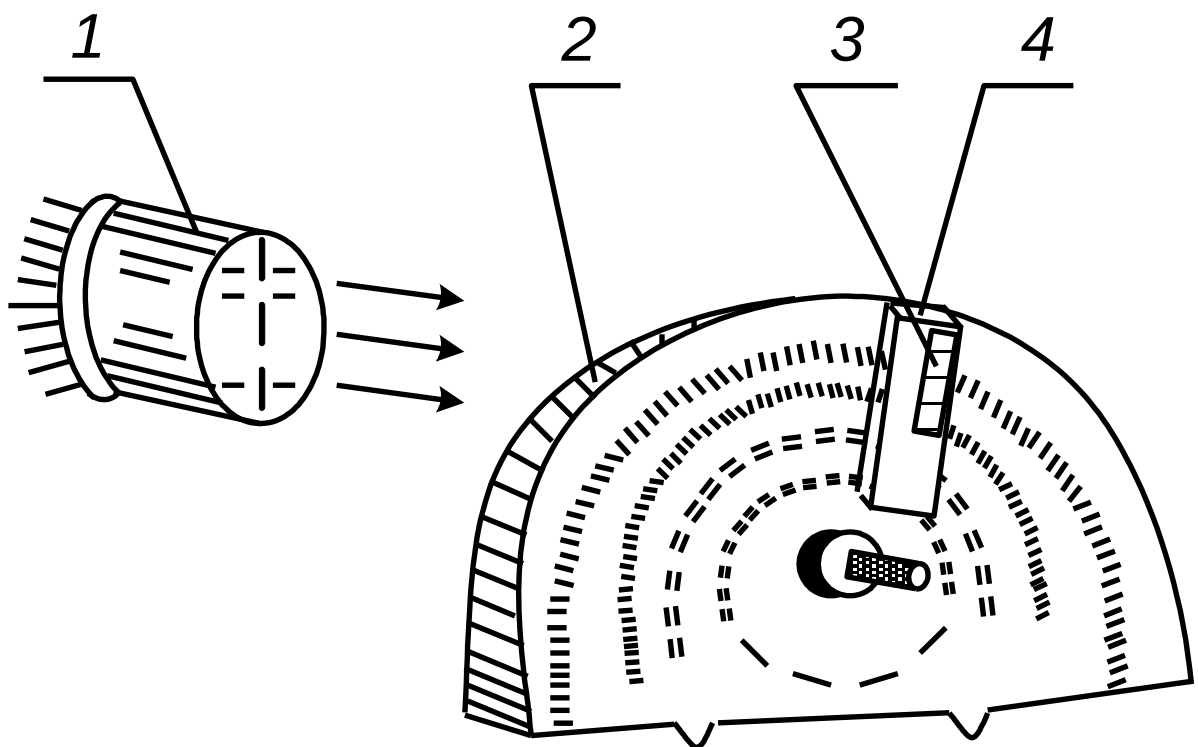


Рис. 5.29. Оптоелектричний перетворювач "кут-код" [1-4]

Сучасні оптоелектричні одношкальні перетворювачі "кут-код" характеризуються похибкою перетворення порядку $(1,5 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ (у кутовій мірі це становить $(20 \dots 70)''$, що відповідає 14–16 двійковим розрядам відліку). Таку точність отримують за допомогою кодової шкали діаметром ~ 240 мм. Далі підвищувати точність за рахунок збільшення розрядності кодової шкали при збереженні прийнятих габаритних розмірів важко ось чому:

- обмеженою є розподільча здатність оптичної системи (з огляду на зменшення ширини молодшого розряду кодової шкали);
- збільшується вплив помилок світлонепроникних елементів (штрихів);
- ставиться вимога точного юстування фотоприймачів.

Оптовимірювач кутових переміщень і кутових швидкостей на основі цифрової відеокамери

Структурну схему пристрою зображено на рис. 5.30. Пристрій містить насадку 1 на валу 2, що обертається, пристрій 3 формування цифрових відеозображень, а також обчислювальний пристрій 4 (цифрову електронну обчислювальну машину). Насадка 1 має форму кола і жорстко закріплена на валу 2. На насадці 1 нанесена радіальна лінія 5, яскравість якої значно відрізняється від яскравості фону. Насадка 1 і пристрій 3 формування цифрових відеозображень оптично пов'язані між собою. Вихід пристрою 3 формування цифрових відеозображень підключений до входу обчислювального пристрою 4.

Підвищена точність вимірювань та завадостійкість даного пристрою забезпечується за рахунок алгоритмічної обробки цифрових відеозображень в обчислювальному пристрої (цифровій електронній обчислювальній машині). Ця обробка включає попередню фільтрацію шумів на цифровому відеозображенні та виконання процедури лінійної апроксимації за методом найменших квадратів для визначення кута нахилу радіальної лінії. Початкові дані для процедури лінійної апроксимації – це координати точок цифрового відеозображення, що належать радіальній лінії.

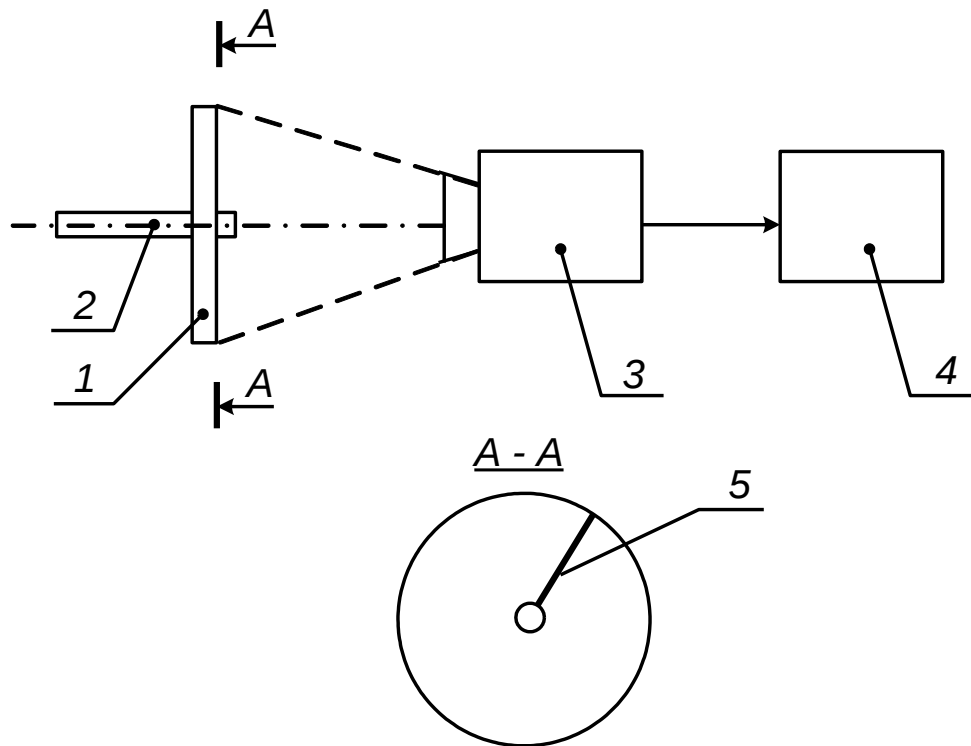


Рис. 5.30. Структурна схема оптовимірювача кутових переміщень і кутових швидкостей на основі цифрової відеокамери [1-4]

Пристрій для вимірювання кутової швидкості працює наступним чином. Оптичне зображення насадки 1 за допомогою пристрою 3 формування цифрових відеозображень перетворюється в цифрове відеозображення. Таке перетворення відбувається в фіксовані моменти часу і в результаті отримуємо послідовність цифрових відеозображень, які відстоять одне від одного на певний фіксований інтервал часу T . В результаті обертання валу 2 радіальна лінія 5 на насадці протягом часу змінює кут нахилу від α_i до α_j відносно нерухомої системи координат xOy (рис. 5.31). Величина зміни кута нахилу $\Delta\alpha$ пропорційна кутовій швидкості обертання валу 2. Поточні значення кута нахилу визначаються в результаті обробки в обчислювальному пристрої 4 (цифровій електронній обчислювальній машині) послідовності цифрових відеозображень, яка складається з окремих цифрових відеозображень (кадрів).

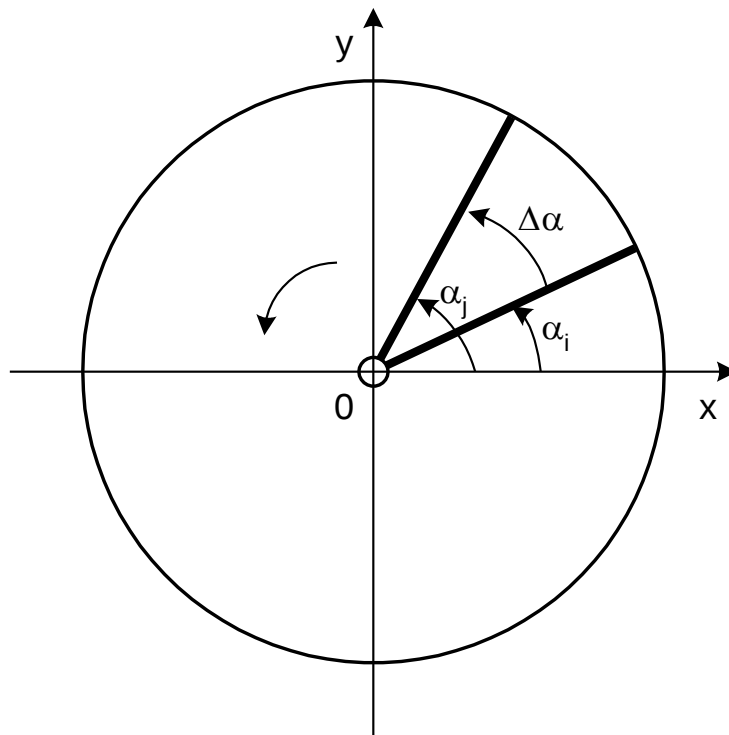


Рис. 5.31. Схема вимірювань кутового положення мітки [1-4]

Процедура визначення кутів нахилу виконується наступним чином. Радіальна лінія 5 на кожному цифровому відеозображенні описується рівнянням $y = a_i x + b_i$, де a_i і b_i – коефіцієнти, що характеризують поточне розташування радіальної лінії 5 відносно нерухомої системи координат xOy .

Кут нахилу радіальної лінії 5: $\alpha_i = \arctg(a_i)$. Для визначення коефіцієнту a_i виконується процедура лінійної апроксимації за методом найменших квадратів. Початкові дані для процедури лінійної апроксимації – це координати точок цифрового відеозображення, що належать радіальній лінії 5. Зрозуміло, що координати окремих точок радіальної лінії 5 містять похибки, пов'язані з шумами і викривленнями, що мають місце на сформованому цифровому відеозображенні. Але лінійна апроксимація за методом найменших квадратів в силу своїх властивостей суттєво зменшує ці похибки, що приводить до підвищення точності вимірювань.

Результат вимірювань кутової швидкості отримується в обчислювальному пристрої 4 (цифровій електронній обчислювальній машині) за формулою [1-4]:

$$n = \frac{\alpha_j - \alpha_i}{(k_j - k_i) \cdot T} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \quad N = \frac{30 \cdot n}{\pi} \left[\frac{\text{обертів}}{\text{хвилину}} \right],$$

де k_j та k_i – номери кадрів у послідовності цифрових відеозображень, для яких обчислено кути α_j та α_i відповідно.

З метою перевірки працездатності пристрою для вимірювання кутової швидкості було створено його діючий макет. В макеті використовувалися насадка 1 діаметром 240 мм з фоном білого кольору і радіальною лінією 5 чорного кольору товщиною 5 мм, пристрій 3 формування цифрових відеозображень (цифрова відеокамера) Sony DCR-TRV940 і обчислювальний пристрій 4 (цифрова електронна обчислювальна машина) Pentium 4 – 1,7 ГГц. Вал 2 і насадка 1 оберталися за допомогою електричного двигуна і редуктора. Діапазон вимірюємих кутових швидкостей складав (6,28...78,50) рад/с, тобто (60...750) обертів/хвилину. Частота кадрів у цифровій відеокамері складала 25 кадрів/с, тобто $T = 0,04$ с. Розмір цифрового відеозображення дорівнював 768x576 дискретних точок.

Обчислення кута нахилу радіальної лінії 5 на кожному відеозображенні виконувалося на основі процедури лінійної лінійної апроксимації за методом найменших квадратів на основі координат 180 дискретних точок, що утворюють вісь радіальної лінії 5, яка має товщину 5 мм. Для цього в кожному рядку відеозображення визначалися координати точок, що належать лівому і правому контуру радіальної лінії 5, а потім визначалися координати середньої точки (по товщині радіальної лінії 5).

Величина зміни кута нахилу радіальної лінії 5 між двома сусідніми цифровими відеозображеннями складала: $\Delta\alpha=(14...180)^\circ$. Максимальна похибка визначення кута нахилу радіальної лінії 5 складала $0,05^\circ$. Значення цієї похибки було обчислено з урахуванням використання процедури лінійної апроксимації за методом найменших квадратів. Максимальна похибка визначення кутової швидкості складала 0,06 рад/с або 1,4%. Для підвищення точності вимірювань необхідно використовувати більш досконалий пристрій 3 формування цифрових відеозображень.

За допомогою даного пристрою можливо вимірювання і більш низьких кутових швидкостей. Для цього потрібно збільшити інтервал часу між моментами формування двох цифрових відеозображень, що використовуються для визначення кутів нахилу радіальної лінії α_i та α_j . Для вимірювання більш високих кутових швидкостей необхідно використовувати спеціалізовану цифрову відеокамеру з підвищеною частотою кадрів (декілька тисяч кадрів за секунду).

Оптоелектричні растрові перетворювачі

Останнім часом почала ширше використовуватися растрова вимірювальна техніка [1-4] у поєднанні з оптоелектричними перетворювачами. В растрових вимірювальних системах закладено принцип використання двох шкал (рухомої і нерухомої) для здобуття усередненої інформації про їх взаємне положення.

Застосовуючи растри як міри, можна побудувати автоматичні вимірювальні системи з похибкою не більш як $\pm(0,3...0,5)$ мкм на довжині 1...2 м і до $\pm 0,2''$ для кутових вимірювань з великою швидкістю (100 і більше відліків за секунду).

В цих системах растрове спряження використовується як початковий вимірювальний механізм, що дає високе передаточне відношення, а оптоелектричний пристрій призначено для перетворення світлових смуг растрів у електричні імпульси. Ці імпульси спеціальними електричними пристроями зрештою перетворюються у вимірювальну інформацію, яка може бути подана у вигляді цифрового відліку або перетворена в потрібні сигнали для систем з числовим програмним керуванням верстатами.

Вимірювальне растрове спряження складається з двох растрів: вимірювального та індикаторного. Вимірювальний растр (рис. 5.32,а) – це сукупність темних штрихів, нанесених на поверхню прозорого матеріалу з кроком t_1 . Найчастіше застосовують растри, в яких ширина штрихів b і ширина проміжку a однакові. Довжина вимірювального растра має бути дещо більшою за діапазон вимірювань.

Індикаторний растр аналогічний вимірювальному, але значно меншої довжини. Крок цього растра t_2 (рис. 5.32,б) дорівнює кроку вимірювального растра або дещо відрізняється від нього. Для високоточних вимірювань застосовують растри з кроком 0,05...0,01 мм.

Якщо кроки рівні і нульовим є кут нахилу штрихів обох решіток, виникає обтюрційний комбінований растр.

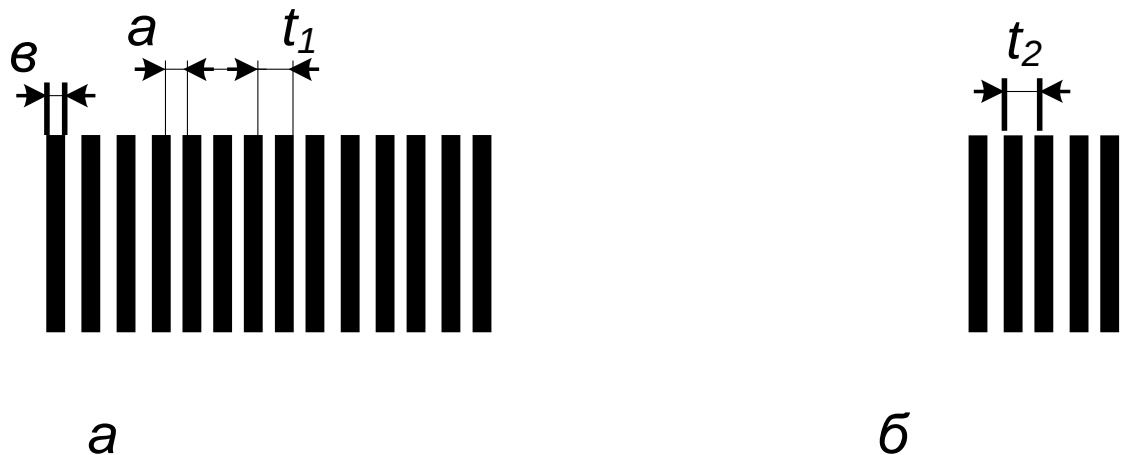


Рис. 5.32. Елементи растрового спряження [1-4]

Під час відносного переміщення решіток відбувається часткове або повне накладення штрихів однієї решітки на світлопровідні ділянки іншої, внаслідок чого змінюється світловий потік, який проходить від джерела світла до фотоприймача.

Повний цикл зміни світлового потоку від максимуму до мінімуму при взаємному переміщенні решіток на один крок повторюватиметься на наступних кроках.

Залежно від кроку штрихів (відстань між двома сусідніми штрихами) решітки можна поділити на крупні та дрібні (дифракційні).

Крупні решітки пропускають світло, практично не викликаючи ефекту дифракції (густина нанесення штрихів не більша за 20 на 1 мм).

Якщо індикаторний растр накласти на вимірювальний так, щоб між ними був зазор (звичайно зазор не повинен перевищувати зониці растра) і лінії індикаторного растра розмістилися під деяким кутом φ до ліній вимірювального растра (рис. 5.33), то можна спостерігати муарові

комбінаційні смуги, тобто світлі та темні смуги, що йдуть перпендикулярно до бісектриси кута з кроком $T > t$, тобто маємо комбінаційний растр.

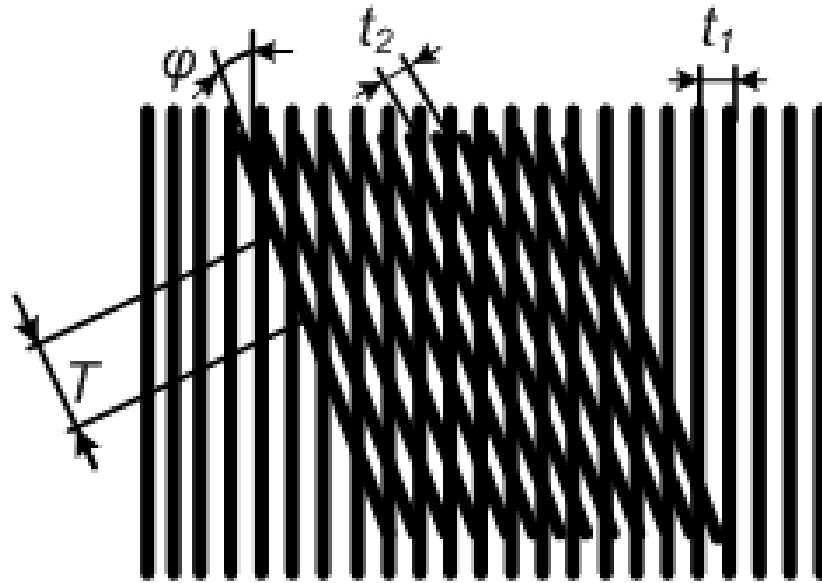


Рис. 5.33. Спряження паралельного лінійного растра [1-4]

Комбінаційні смуги утворюються внаслідок того, що на окремих ділянках растрового поля проміжки одного з растрів затемнюються штрихами іншого растра, а там, де проміжки обох растрів збігаються, ділянки залишаються незатемненими.

Ширина смуг муару насамперед залежить від величини кута нахилу штрихів решіток. При зменшенні цього кута смуги муару стають ширшими. Коли кут стає більшим за 30° , муар зникає, тобто комбінаційні смуги спостерігаються при $\varphi < 30^\circ$.

Якщо один з растрів переміститься відносно іншого на крок t , то комбінаційні муарові смуги зсунуться на крок T . Крім того, при переміщенні індикаторного растра (він розміщений зверху) праворуч комбінаційні смуги переміщуються згори вниз, а при переміщенні ліворуч – у зворотному напрямі. В результаті відносного переміщення растрів на один крок t штрихів муарові комбінаційні смуги пересуваються на один крок T .

Ефект переміщення муарових смуг характеризується коефіцієнтом збільшення переміщення [1-4]

$$k = \frac{T}{t} = \frac{1}{2 \sin \frac{\varphi}{2}},$$

Якщо на растрове поле накласти непрозору діафрагму з щілинами (рис. 5.34), крок яких дорівнює кроку комбінаційного растра, то під час руху комбінаційних смуг відносно цих щілин світловий потік на площі щілин різко змінюватиметься.

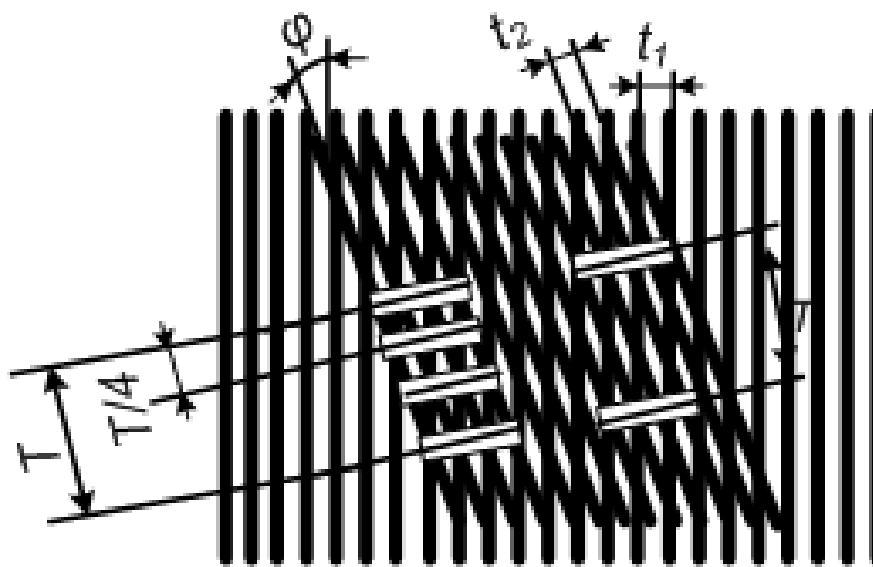


Рис. 5.34. Схема розміщення щілин діафрагми оптичної системи [1-4]

Світлові імпульси (один імпульс при відносному переміщенні растрів на крок t) є джерелами інформації про контрольоване переміщення.

Для визначення напрямку переміщення використовують додаткові сигнали від растрової ланки, зсунуті один відносно одного на деяку фазу.

Це досягається відповідним розміщенням діафрагм – щілин відносно комбінаційних смуг.

На рис. 5.34 на одному кроці комбінаційного растра розміщені чотири щілини, зсунені на $1/4$ відносно одна одної, що відповідає зсуву фази сигналу пропорційно до $\pi/2$.

Якщо використовувати реверсивний лічильник імпульсів у відліковому пристрої, то електричні сигнали, які надходять в певному порядку від

чотирьох фотоелектричних пристроїв, додаватимуться лічильником при прямому переміщенні комбінаційних смуг і відніматимуться при їх зворотному переміщенні.

Комбінаційний растр можна отримати і при $\varphi = 0$, але тоді кроки мають дещо відрізнятися один від одного.

Такий комбінаційний растр (5.35,а) називають ноніусним.

Щоб отримати зсув фази, застосовують решітки із зсувом растрових штрихів (рис. 5.35,б), тоді при спряженні з іншим растром, що не має зсуву штрихів, утворюється комбінаційний растр із зсувом комбінаційних смуг (рис. 5.35,в).

Крок ноніусних смуг комбінаційного растра (рис. 5.35,в)

$$T_n = \frac{t_1 t_2}{\Delta t},$$

де Δt – абсолютна різниця між кроками t_1 і t_2 .

Крок комбінаційних смуг, утворений лінійними растрами (див. рис. 5.34) при $t_1=t_2=t$ та кутом φ між ними

$$T_n = \frac{t}{2 \sin \frac{\varphi}{2}},$$

якщо $t_1 \neq t_2$ (див. рис. 5.33), то

$$T_n = \frac{t_1 t_2}{\sqrt{(t_1 + t_2)^2 - 4 t_1 t_2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}}}.$$

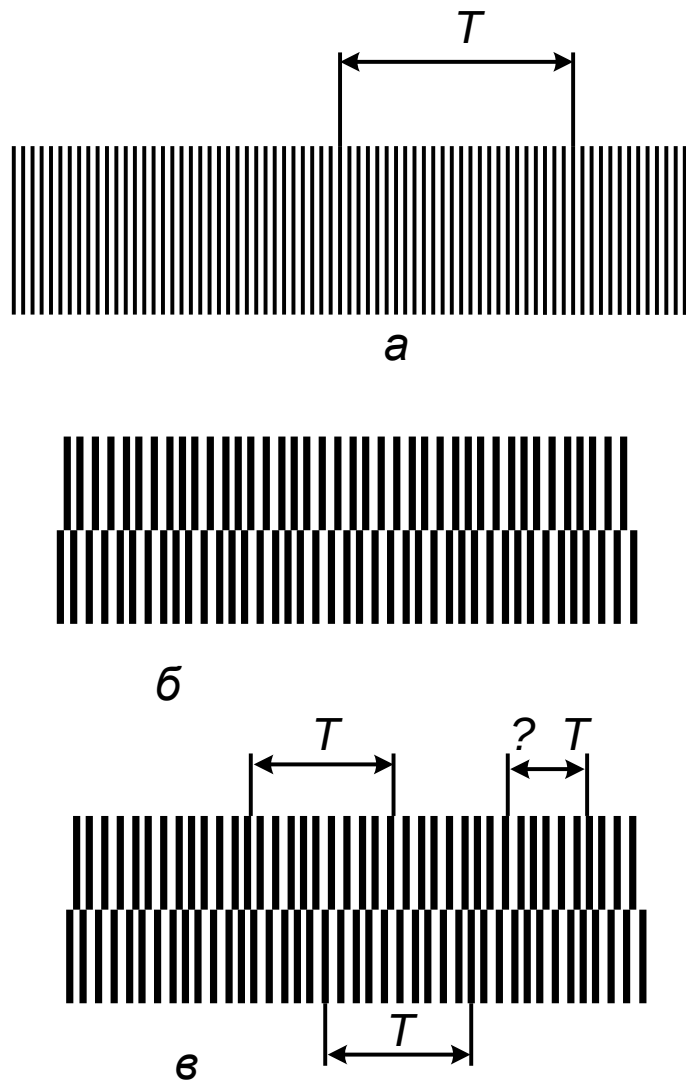


Рис. 5.35. Ноніусне спряження растрів [1-4]

Похибка растрових спряжень в основному залежить від похибки кроку штрихів растра [42], яка впливає на форму та положення комбінаційних смуг растрового спряження. За значенням похибки кроку здебільшого роблять висновок про якість растрової міри.

Для вимірювання кутів штрихи растра наносять на диски, причому штрихи нерухомого диска є дотичними до кола деякого малого радіуса.

Дві радіальні растрові решітки сполучаються з суміщенням їх центрів. При освітленні растрів утворюються муарові смуги – темні та світлі концентричні кола.

Спочатку муаровий ефект використовувався для підрахунку цілого числа муарових смуг. Тому, щоб отримати високу точність, застосовували

дифракційні решітки з кроком, який дорівнює потрібному розрізненню, а це значно ускладнювало конструкцію оптичної частини перетворювача. Крім того, сам метод нагромадження приросту має низьку заводозахищеність. Розподільча здатність методу підрахунку цілого числа смуг дорівнює 1...2,5 мкм. Вищої розподільчої здатності можна досягти, скориставшись методом визначення муарової смуги в межах кроку, тобто інтерполюванням. В цьому разі можна одночасно просвічувати десятки і навіть сотні штрихів решіток.

Сумарний світловий потік, що надходить на фотоприймачі, збільшується, тому вимоги до оптичної системи визначення положення муарової смуги знижуються, а як растри можна застосовувати крупні решітки, технологічніші порівняно з дифракційними.

Завдяки ефекту багатощілинного зчитування дістають сумарний світловий потік фотоприймача – згладжену інформацію про взаємне положення решіток. Тоді вплив випадкових і дрібноперіодичних помилок положення штрихів на точність растрового відліку практично виключається.

Положення муарової смуги може визначатися растровою системою, яка містить:

- рухому растрову решітку на вимірювальній пластині;
- нерухому пластину зчитування з другою індикаторною решіткою, щілинами зчитування;
- фотоелектричний блок (освітлювач, фотоприймач, логічна схема обробки інформації фотоприймачів).

Пристрої з растровими системами, що реалізують метод інтерполювання, за принципом дії можна поділити на амплітудні та фазові растрові інтерполятори.

Амплітудні растрові інтерполятори визначають положення муарової смуги за амплітудами сигналів фотоприймачів, розміщених за напрямом її пересування в межах кроку.

Кількість фотоприймачів, у межах муарової смуги

$$n = \frac{T}{t},$$

де T – крок комбінаційних смуг; t – крок растра.

В фазових растрових інтерполяторах просторова фаза муарової смуги перетворюється в часову фазу. Часовий інтервал, що відповідає часовій фазі, вимірюється заповненням його імпульсами високої частоти і їх підрахунком. В фазових системах зчитування часовий фазовий зсув електричного сигналу лінійно залежить від просторової фази муарової смуги.

Експериментальні дослідження фазової системи зчитування показують, що фазова система забезпечує розподільчу величину не менш як $1/128$ кроку растра, коли цей крок становить 0,1 мм.

Інтерполяційні растрові системи зчитування визначають переміщення вимірювальної растрової решітки за положенням муарової смуги в межах кроку растра.

Щоб підвищити точність відліку переміщень, можна скористатися растровою системою як точним відліком у перетворювачах з кодовими шкалами. В такому разі крок растра має дорівнювати кроку штрихової кодової шкали перетворювача в розряді, з яким сполучується растрова система. Грубим ступенем буде кодова шкала перетворювача "кут (переміщення) – код".

Такі оптико-механічні перетворювачі "кут-код" з грубим і точним відліком дають змогу отримати точність вимірювання кутів, що відповідає 19–20 розрядам двійкового числа, що становить $(1,5...2,5)''$ в разі кутових вимірювань.

Контрольні питання до практичного заняття 5

1. Основні властивості оптичних випромінювань. Принцип дії ОП. Конструкція ОП. Закони поширення оптичних випромінювань.
2. Джерела оптичних випромінювань. Типи оптичних випромінювачів. Принцип дії.
3. Приймачі оптичних випромінювань. Типи оптичних приймачів. Принцип дії.
4. Основні різновиди фотоелектричних приймачів.
5. Приклади практичного застосування оптичних перетворювачів.
6. Вимірювальні ланцюги ОП.

7. Оптрон. Принцип дії. Застосування.
8. Оптосин. Принцип дії. Застосування.
9. Растрові вимірювальні ОП.
10. Основні елементи розрахунку оптичних перетворювачів.

Заняття 6

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Мета практичного заняття 6 - розглянути інформаційні та виконавчі електричні мікромашини. Принципи роботи електричних мікромашин постійного і змінного струму.

Інформаційні електричні мікромашини

Класифікація мікромашин

Електричні машини класифікують за їх призначенням, потужністю, частотою обертання і родом струму.

За призначенням електричні машини поділяють на генератори, двигуни, електромашинні та електромеханічні перетворювачі; за потужністю – на мікромашини (менш як 0,5 кВт), машини малої (0,5...10 кВт), середньої (10...100 кВт) і великої (понад 100 кВт) потужності; за частотою обертання – на тихохідні (до 300 об/хв), середньої швидкохідності (300...1500 об/хв), швидкохідні (1500...6000 об/хв) і надшвидкохідні (понад 6000 об/хв); за родом струму – на машини постійного і змінного струму. Останні залежно від властивостей електромагнітної системи, в свою чергу, підрозділяють на асинхронні, синхронні, колекторні машини, а також трансформатори.

В сучасних пристроях автоматики, вимірювальної та обчислювальної техніки застосовують всі перелічені види машин із значним переважанням мікромашин і машин малої потужності.

Мікромашини використовують в пристроях автоматики, вимірювальної та обчислювальної техніки як перетворювачі, органи порівняння і регулювання тощо. За функціональним призначенням виділяють такі основні групи мікромашин [5]:

- а) виконавчі двигуни, які перетворюють електричну енергію входу в обертальний рух валу;
- б) тахогенератори, які перетворюють частоту обертання валу в пропорційну їй вихідну напругу;

в) поворотні трансформатори, які перетворюють кут повороту валу (або його функцію) в пропорційну вихідну напругу;

г) машини синхронного зв'язку, які виконують синхронний та синфазний поворот (обертання) двох механічно не пов'язаних між собою осей (електричний вал);

д) мікродвигуни загального призначення, які виконують функції привода різних малопотужних механізмів (зокрема, самописуючих приладів).

Загальні питання теорії та конструювання

Принцип дії електричних машин

Принцип дії будь-якої електричної машини ґрунтується на використанні двох законів електротехніки – закону електромагнітної індукції та закону взаємодії провідника з струмом і магнітного поля. Закон, що узагальнює обидва ці закони, встановив Ленц.

Механічне обертання витка провідника (якоря машини) в магнітному полі приводить до індукування в ньому змінної ЕРС, напрям якої визначається за правилом правої руки (рис. 6.1,а).

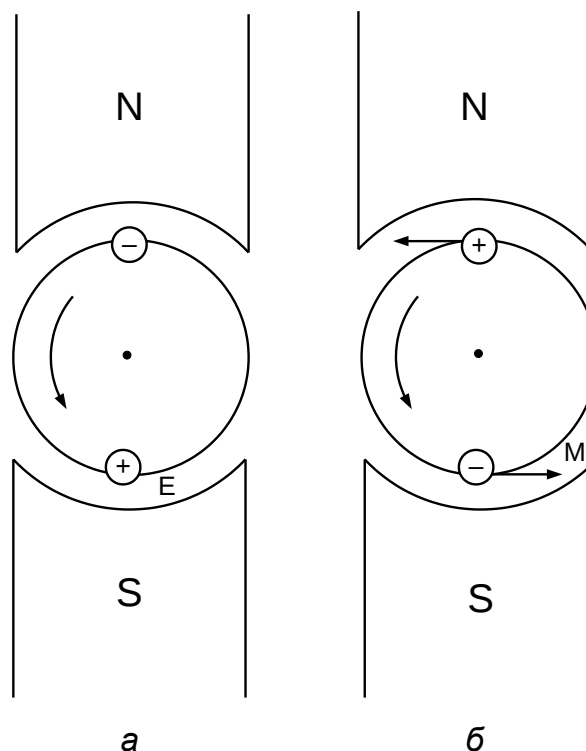


Рис. 6.1. Генераторний (а) і двигунний (б) режими електричної машини [5]

Підключення до такого витка зовнішнього кола зумовлює появу в ньому струму. Інакше кажучи, механічна енергія обертання перетворюється в електричну енергію виходу (генераторний режим роботи машини).

В цьому разі механічна енергія $P_{\text{мех}}$, яка підводиться, має бути більшою за ту електричну енергію P_e , яка знімається з виходу, на величину втрат енергії P_v в машині. Ці втрати визначаються механічним опором обертанню якоря, втратами в сталі та тепловими втратами. Отже,

$$P_{\text{мех}} = P_e + P_v$$

Зворотна картина спостерігається у випадку підключення витка до зовнішнього джерела електричної енергії. Струм, протікаючи в витку, взаємодіє з полем, в результаті чого виникає обертаючий момент, напрям якого відповідає правилу лівої руки (рис. 6.1, б).

Електрична енергія перетворюється в механічну енергію обертання якоря (двигунний режим роботи машини). При цьому електрична потужність, що споживається з мережі, має в сумі дорівнювати потужності, що знімається з валу машини, і потужності втрат в цій машині [5]:

$$P_e = P_{\text{мех}} + P_v.$$

Оборотність електричної машини, тобто здатність її працювати як у генераторному, так і в двигунному режимі, переходити з одного режиму в інший, впливає із закону Ленца.

В загальному випадку в машині діють напруга зовнішньої мережі U та ЕРС, індукована за рахунок обертання витка в магнітному полі E .

Для генераторного режиму $E > U$, для двигунного, навпаки, $E < U$.

Генераторний і двигунний режими роботи можна визначити і за напрямом зовнішнього моменту. В першому випадку напрям моменту збігається з напрямом обертання, в другому – протилежний йому.

В загальному випадку якір електричної машини – це певний набір з'єднаних відповідним чином окремих витків, а статор – електромагніт, що створює силове магнітне поле (поле збудження).

В деяких машинах на статорі замість електромагнітів використовують постійні магніти.

Характеристика електричної машини, її економічність (ККД) і вплив на зовнішнє коло ($\cos\varphi$) досить істотно залежать від величини магнітного потоку і кривої намагнічування машини (тобто залежності потоку від струму в обмотці).

Як правило, всі електричні машини багатополюсні, в зв'язку з чим їх магнітне коло досить складне, а витки якоря за один оберт перетинають магнітне поле 2ρ разів, де ρ – число пар полюсів.

Рід струму накладає певний відбиток на конструкцію машини і відповідно на її механічну і регульовальну характеристики.

В більшості машин змінного струму ротор і статор виконують шихтованими, тобто такими, що складаються з ізольованих одна від одної пластин, зібраних в загальний пакет. Пакети, як ротора, так і статора мають пропили (пази) по всій довжині, в які і укладають обмотки.

На відміну від машин змінного струму машини постійного струму мають подібну конструкцію ротора та статор з явно вираженими полюсами, на яких розміщують котушки, що створюють потік збудження.

Частина полюса, яка обернена до ротора, виконують розширеною (полюсні наконечники), що забезпечує закріплення котушки та кращий розподіл магнітного потоку в зазорі.

Машини постійного струму обов'язково мають колектор.

Деякі синхронні машини (машини з явно вираженими полюсами) мають таку конструкцію статора, як машина постійного струму.

В машинах постійного струму корпус машини є частиною магнітопроводу і обов'язково виконується з феромагнітного матеріалу, тоді як в машин змінного струму (в зв'язку з тим, що потік по корпусу не замикається) він може виконуватися і з легких алюмінієвих сплавів.

Підшипникові щити в мікромашинах малої потужності виготовляють, як правило, незалежно від роду струму з алюмінієвих сплавів.

Основні характеристики і параметри мікродвигунів

Механічна характеристика

Механічна характеристика – це залежність кутової швидкості вала двигуна від моменту, що розвивається: $n=n(M)$ [5].

Оскільки двигун в усталеному режимі розвиває момент M , що дорівнює моменту навантаження M_n на валу, механічна характеристика показує ступінь зміни кутової швидкості при зміні навантаження.

Механічну характеристику, здобуту при номінальному значенні напруги живлення та нормальній схемі вмикання, називають природною; характеристику, здобуту за умов, відмінних від номінальних, – штучною.

Якість механічної характеристики оцінюється її жорсткістю: $\alpha=-\Delta M/\Delta n$ [5].

Залежно від жорсткості механічної характеристики всі двигуни поділяють на три групи [5]:

- з абсолютно жорсткою характеристикою, для якої на робочій ділянці $\alpha=\infty$ (рис. 10.2, пряма 1); кутова швидкість таких двигунів не залежить від моменту навантаження M_n на валу;
- з жорсткою характеристикою (рис. 10.1, пряма 2): кутова швидкість таких двигунів при зміні M_n змінюється незначно;
- з м'якою характеристикою (рис. 10.1, пряма 3); такі двигуни мають велике падіння кутової швидкості із збільшенням моменту навантаження.

Номінальна кутова швидкість, кутова швидкість холостого ходу

Номінальну кутову швидкість $n_{\text{ном}}$ двигун розвиває, коли номінальним є момент навантаження $M_{n.\text{ном}}$.

Кутової швидкості холостого ходу n_0 двигун набуває за відсутності навантаження, тобто коли $M_n=0$.

В двигунів з абсолютно жорсткою механічною характеристикою на робочій ділянці кутова швидкість незмінна і, отже, $n_{\text{ном}} = n_0$.

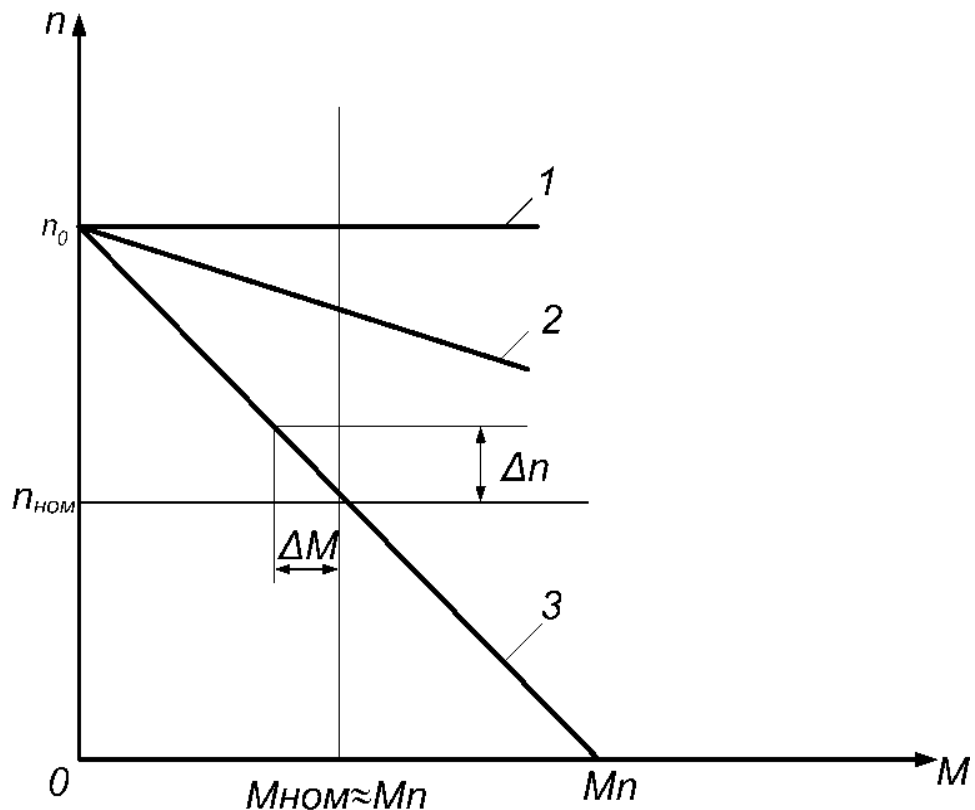


Рис. 10.1. Механічні характеристики двигунів [5]

Номінальний і пусковий моменти двигуна

Номінальний момент $M_{\text{ном}}$ двигун розвиває в усталеному режимі при номінальному моменті навантаження $M_{\text{н.ном}}$.

В момент вмикання двигуна, тобто коли $n = 0$, він розвиває пусковий момент $M_{\text{п}}$. Очевидно, для нормальної роботи двигуна необхідно, щоб виконувалась умова $M_{\text{п}} > M_{\text{н}}$.

Відношення максимального моменту двигуна $M_{\text{мах}}$ до номінального $M_{\text{ном}}$ характеризує його перевантажувальну здатність.

Регулювальні характеристики

Це залежності кутової швидкості n від значення (або фази) напруги керування U при сталих моменті напруги на валу і напрузі збудження: $n=n(U_k)$ при $M_H=\text{const}$, $U_3=\text{const}$ [5].

Регулювати кутову швидкість потрібно для виконавчих двигунів, що працюють в слідкуючих системах.

Досить бажаною є лінійність регулювальних характеристик, тобто пряма пропорційність кутової швидкості n напрузі керування U_k . Тому показник якості регулювальних характеристик – їх нелінійність.

Потужність, коефіцієнт корисної дії

Розрізняють потужність вхідну $P_{\text{вх}}=P_{\text{ж}}$, яку споживають обмотки двигуна з мережі живлення, і вихідну $P=P_{\text{мех}}$ – корисну механічну потужність на валу двигуна [5].

Коефіцієнт корисної дії (ККД) електродвигунів визначається як відношення $\eta=P/P_{\text{вх}}$.

Номінальна потужність виконавчих двигунів – це потужність при номінальному значенні сигналу керування.

Номінальною потужністю нерегульованих двигунів називають потужність при номінальному значенні моменту навантаження (або при номінальному значенні кутової швидкості вала двигуна).

Потужністю керування регульованих двигунів називають потужність, яку споживає мережа керування.

Напруга рушання

Напруга рушання виконавчих двигунів – це напруга керування, при якій починається обертання вала двигуна.

АСИНХРОННІ ТАХОГЕНЕРАТОРИ

Для вимірювання числа обертів вала ротора, а також вироблення керуючих сигналів використовують тахогенератори, призначені для

стабілізації слідкуючих систем і виконання лічильно-розв'язувальних функцій.

Основна вимога, що ставиться до тахогенераторів, – забезпечення строго пропорційної залежності вихідної напруги від числа обертів n (частоти обертання) валу $E_{\text{вих}}=f(n)$ [5].

Цю залежність називають вихідною характеристикою тахогенератора.

В якості асинхронного тахогенератора застосовують мікромашину, подібну за конструкцією до виконавчого двообмоткового двигуна з порожнистим немагнітним ротором. Одна з обмоток цієї машини підключається до мережі (обмотка збудження), інша є вихідною (генераторна обмотка) (рис. 6.10).

Ротор – це тонкостінний алюмінієвий циліндр, всередині якого для зменшення магнітного опору розміщується внутрішній статор, що набирається з листів електротехнічної сталі. Під час обертання порожнистого циліндра в магнітному полі в ньому індукується ЕРС e , направлена по дотичній, яку можна розглядати як елементарний провідник довжиною l_x .

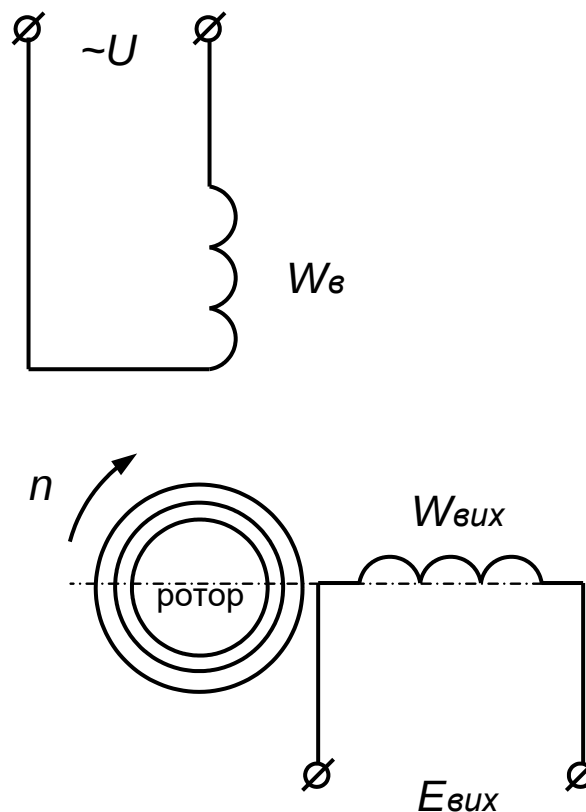


Рис. 6.10. Асинхронний тахогенератор [5]

В двохобмоткових асинхронних машинах розрізняють дві взаємно перпендикулярні осі: поздовжню, яка збігається з віссю обмотки збудження, та поперечну, яка збігається з віссю вихідної обмотки. Відповідно і потоки, які збігаються із цими осями, називають поздовжнім і поперечним.

Оскільки потік Φ_p пропорційний до ЕРС E , яка в свою чергу пропорційна до кутової (колової) швидкості обертання ротора $v = \pi \cdot D_p \cdot n / 60$ (D_p – діаметр ротора; n – число обертів вала ротора), то виявляється, що діюче значення ЕРС виходу пропорційне до числа n обертів вала ротора $E_{\text{вих}} = kn$, де k – коефіцієнт пропорційності, який буде сталим, коли знехтувати індуктивним опором ротора і взяти сталий магнітний опір машини по поперечній осі.

Очевидно, що частота зміни вихідної ЕРС $E_{\text{вих}}$ дорівнює частоті f зміни ЕРС e у роторі, яка незалежно від швидкості обертання дорівнює частоті збудження f (частоті напруги живлення). Незалежність частоти вихідної ЕРС від швидкості – цінна властивість асинхронного тахогенератора.

Вихідна характеристика асинхронного тахогенератора при зроблених припущеннях являтиме собою пряму лінію (рис. 6.11).

В реальних умовах коефіцієнт пропорційності k не є сталою величиною, в результаті чого характеристика (пунктирна лінія на рис. 6.11) відхиляється від лінійної, тобто виникає певна амплітудна похибка.

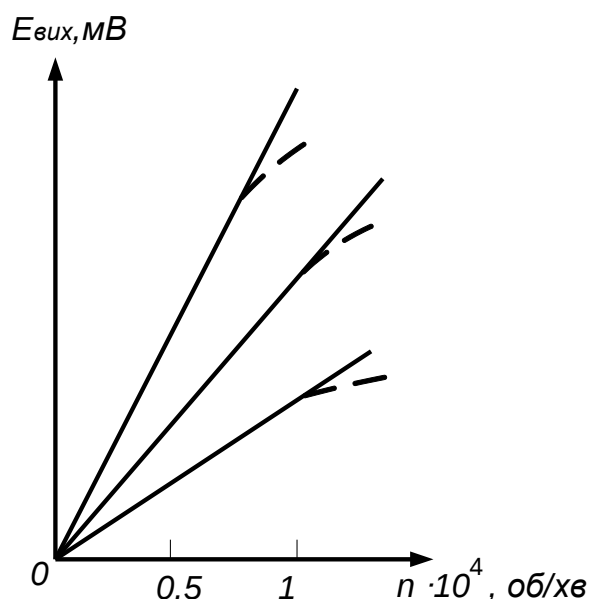


Рис. 6.11. Вихідні характеристики тахогенератора [5]

Залежно від призначення тахогенератора вимоги, що ставляться до точності, різні: від 1–2,5% при зміні частоти обертання до 0,5% в разі застосування тахогенератора в слідкуючих системах і менше, якщо його використовують як диференціюючу ланку в обчислювальних пристроях.

Високі вимоги до точності зумовлюють такі самі вимоги до рівня технології виготовлення тахогенераторів.

Основні причини похибок тахогенераторів:

1. Відхилення обмоток статора від взаємно перпендикулярного положення через технологічні неточності, а також неточності в дотриманні товщини порожнистого ротора та величини повітряного зазору, що приводить до появи сигналу – ЕРС виходу в разі нерухомого ротора.

2. Зменшення поздовжнього потоку із збільшенням швидкості машини та зміна вихідного струму (навантаження). Таке зменшення відбувається за рахунок появи додаткової поздовжньої МРС – наслідок ЕРС, індукованої в роторі поперечним потоком. Підвищення сили струму у вихідній обмотці приводить до збільшення спаду напруги в обмотці і, крім того, до збільшення зустрічно направленої МРС по поздовжній осі;

3. Зміна опору машини при її нагріванні під час роботи. Правильний вибір матеріалів і відповідна технологія дають змогу забезпечити в спеціальних машинах амплітудну похибку до 0,05%, фазову похибку не більш як $0,1^\circ$, крутість вихідної характеристики до 10 мВ об/хв і нульовий сигнал, який не перевищує 25...50мВ.

Якщо за вхідну величину тахогенератора взяти швидкість обертання його валу, а за вихідну – напругу $U_{вих}$, то поведінка тахогенератора з достатньою точністю описується рівнянням статики, отже, передаточна функція [5]

$$w(p) = \frac{U_{вих}(p)}{v(p)} = k,$$

тобто тахогенератор характеризується властивостями підсилювальної ланки.

Взявши за вхідну величину кут повороту валу якоря (ротора), а за вихідну – напругу, отримуємо передаточну функцію тахогенератора у вигляді [5]:

$$w(p) = \frac{U_{вих}(p)}{\varphi(p)} = kp,$$

оскільки існує зв'язок $v = d\varphi/dt$.

Отже, в першому випадку тахогенератор описується як ідеальна підсилювальна ланка, в другому – як ідеальна диференціююча ланка.

Принципову конструктивну схему тахогенератора зображено на рис. 6.12.

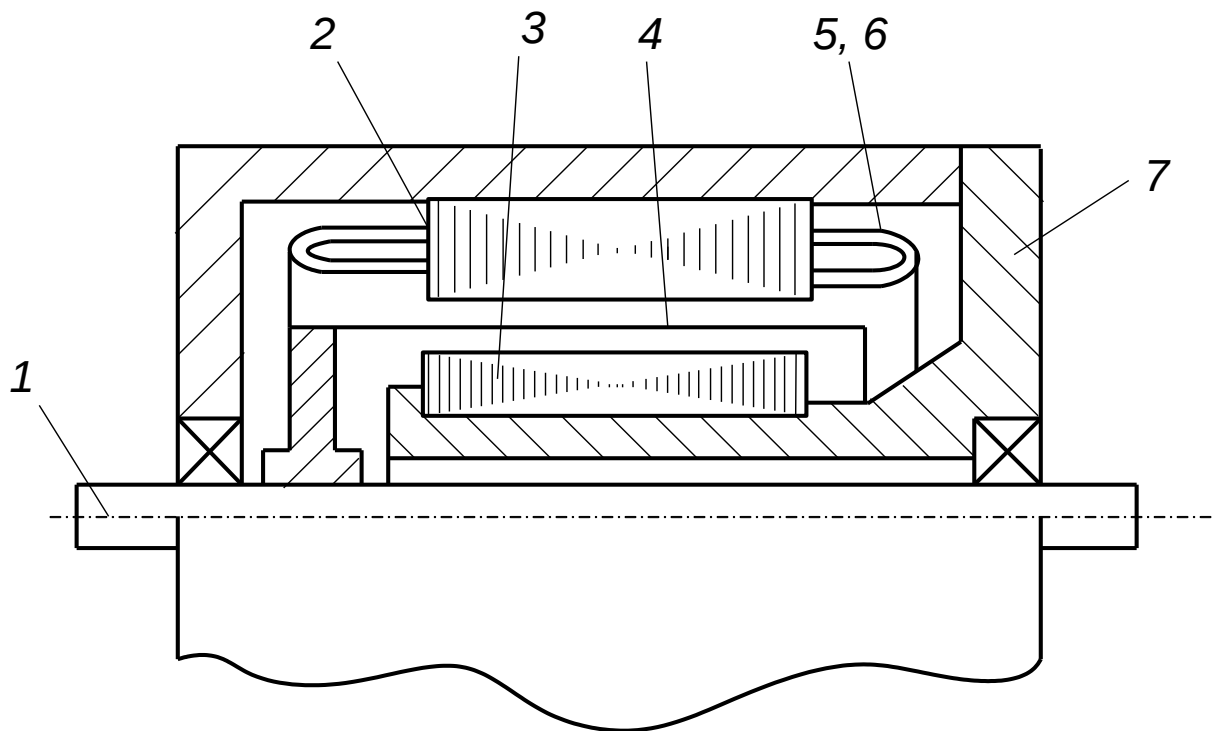


Рис. 6.12. Принципова конструктивна схема тахогенератора [5]

- 1 – вал ротора; 2 – зовнішній магнітопровід;
- 3 – внутрішній магнітопровід, виконаний з листового пермалюю;
- 4 – порожнистий немагнітний ротор; 5 – обмотка збудження;
- 6 – генераторна обмотка (обидві обмотки 5 і 6 розміщуються на зовнішньому магнітопроводі); 7 – втулка, на якій кріпиться внутрішній магнітопровід;
- через неї проходить вал ротора 1

Обертові трансформатори

Обертовий (поворотний) трансформатор – це асинхронна мікромашина з фазним ротором, призначена для перетворення кута повороту ротора (або його функції) в напругу виходу.

Як на статорі, так і на роторі розміщено по дві обмотки, зсунуті в просторі відносно одна одної на 90° . Одну з обмоток статора w_3 називають обмоткою збудження, а другу w_k - компенсаційною (або квадратурною); відповідно обмотки ротора називають синусною w_s і косинусною w_c .

Принципову схему обертового трансформатора наведено на рис. 6.13.

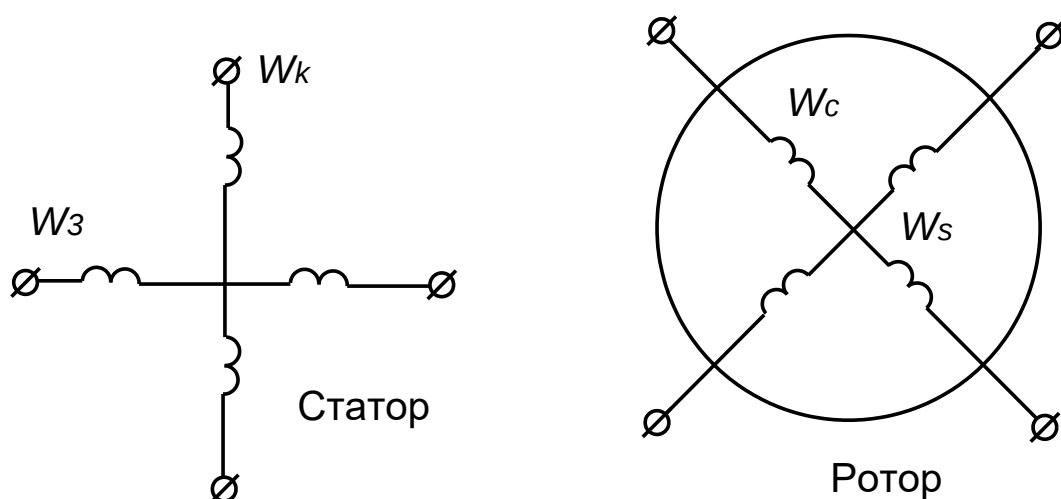


Рис. 6.13. Принципова схема обертового трансформатора [5]

Трансформатор може працювати в режимі повороту ротора на певний кут α і в режимі безперервного обертання, коли обмотки для зменшення числа ковзних контактів міняють місцями: на роторі розміщують обмотки збудження та компенсаційну, на статорі – синусну і косинусну.

Якщо підключити обмотку збудження w_3 до мережі змінного струму, поздовжній потік індукуватиме в обмотках ротора ЕРС, що змінюється з частотою мережі та з діючим значенням, що залежить від положення обмоток відносно поздовжньої осі (від положення ротора відносно статора).

Максимальна величина потоку, зчепленого з обмоткою, вісь якої збігається з поздовжньою віссю машини [5]:

$$\Phi_m = B_m l \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \cos \frac{\pi x}{\tau} dx \Big|_{x=0} = \frac{2}{\pi} B_m \tau l;$$

де l – активна довжина провідника, розміщеного в основному магнітному потоці; τ – полюсна поділка (довжина дуги, що відповідає одному полюсу); x – відстань від осі обмотки.

В тому разі, коли вісь обмотки відхилена на кут $\alpha = \pi x / \tau$, максимальна величина потоку, зчепленого з обмоткою, дорівнює:

$$\Phi_{m\alpha} = B_m l \int_{-\tau/2+\alpha}^{\tau/2+\alpha} \cos \frac{\pi x}{\tau} dx = \frac{2}{\pi} B_m l \cos \alpha = \Phi_m \cos \alpha.$$

Отже, в обмотці ротора, вісь якої збігається з поздовжньою віссю, індукуватиметься ЕРС

$$E = 4,44 f w k_0 \Phi_m,$$

а в обмотці, вісь якої відхилена на кут α , ЕРС

$$E_\alpha = 4,44 f w_\alpha k_{0\alpha} \Phi_m \cos \alpha.$$

Оскільки обмоткою, вісь якої завжди збігається з поздовжньою віссю, є косинусна обмотка, то

$$E_c = 4,44 f w_c k_{oc} \Phi_m \cos \alpha.$$

Синусна обмотка ротора w_s зсунута відносно косинусної обмотки ротора w_c на кут $\pi/2$, тому вихідна ЕРС синусної обмотки

$$E_s = 4,44 f w_s k_{os} \Phi_m \cos(\alpha - \pi/2).$$

Якщо виконуються рівняння $w_c = w_s$ і $k_{oc} = k_{os}$, то

$$E_c = k E_{eux} \cos \alpha; \quad E_s = k E_{eux} \sin \alpha.$$

Отже, в обмотках ротора індукуються ЕРС, пропорційні до синуса кута повороту ротора відносно осі обмотки збудження, ввімкненої в мережу.

Компенсаційна обмотка w_k використовується для компенсації поперечних потоків, які створюються обмотками ротора за рахунок струмів навантаження, що протікають по них і порушують тригонометричні залежності напруги виходу від кута повороту, тобто спричиняють появу певних похибок.

Зменшення поперечного потоку досягається замиканням компенсаційної обмотки накоротко (або на невеликий опір z_k). Оскільки у цьому разі компенсаційна обмотка являє собою замкнену накоротко відносно поперечного потоку вторинну обмотку трансформатора (рис. 6.14,а), то

результуюча МРС поперечного поля буде значно меншою, а отже, зменшиться і похибка.

Зменшення похибок обертового трансформатора компенсацією поперечного потоку ротора називають симетруванням трансформатора.

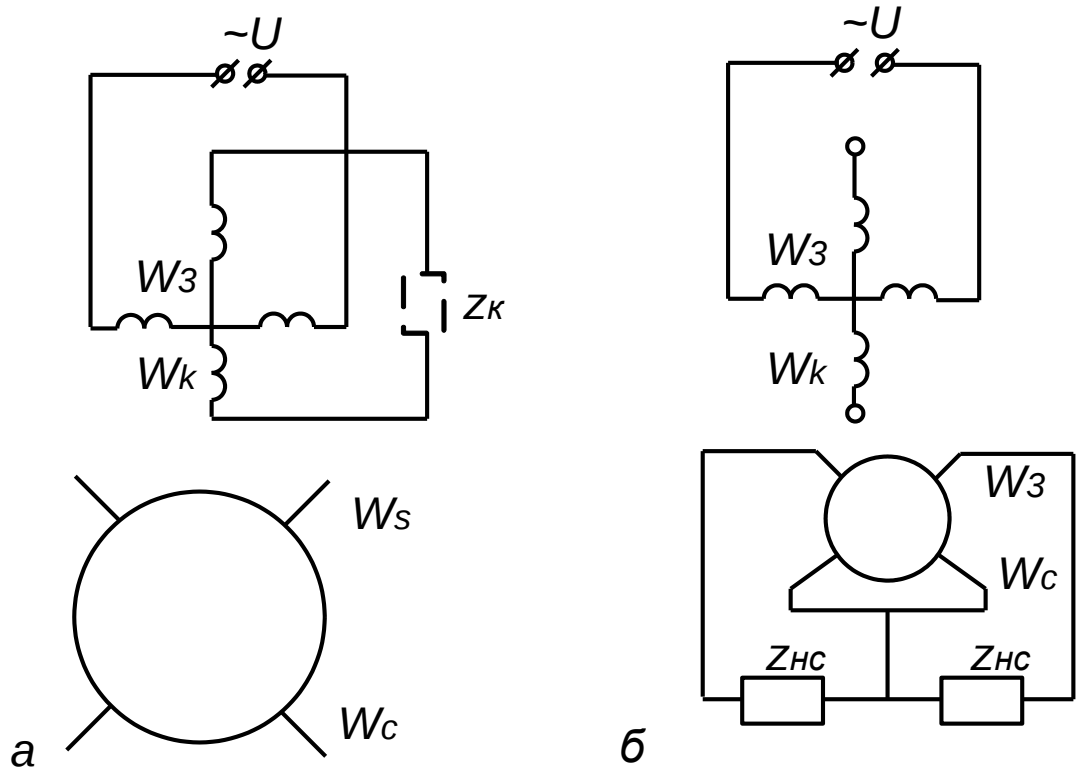


Рис. 6.14. Схеми симетрування для обертового трансформатора [5]: а – первинного; б – вторинного

Розглянутий випадок симетрування з боку статора є первинним. Крім того, застосовується і вторинне симетрування з боку ротора (рис. 6.14,б), при якому повна компенсація досягається тоді, коли результуючі (повні) опори обох фаз ротора дорівнюють один одному.

Перевага первинного симетрування – незалежність його від зміни навантаження, а вторинного – незалежність від кута повороту. Тому на практиці звичайно застосовують одночасно первинне та вторинне симетрування, завдяки чому вдається звести похибку до мінімуму.

Змінюючи схеми симетрування синусно-косинусного обертового трансформатора, можна отримати так званий лінійний поворотний трансформатор, в якому вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ є лінійною функцією α (рис. 6.15).

Зображені на рис. 6.15 схеми дають змогу отримати залежність виду

$$U_{\text{вих}} = c \frac{\sin \alpha}{1 + k \cos \alpha},$$

яка при $k=0,52\dots0,56$ має відхилення від лінійної функції порядку 0,1 %, коли кут α змінюється від -55° до $+55^\circ$.

На рис. 6.15,а показано схему первинного симетрування і послідовного з'єднання косинусної обмотки з обмоткою збудження. Напруга на виході $U_{\text{вих}}=f(\alpha)$ знімається з синусної обмотки.

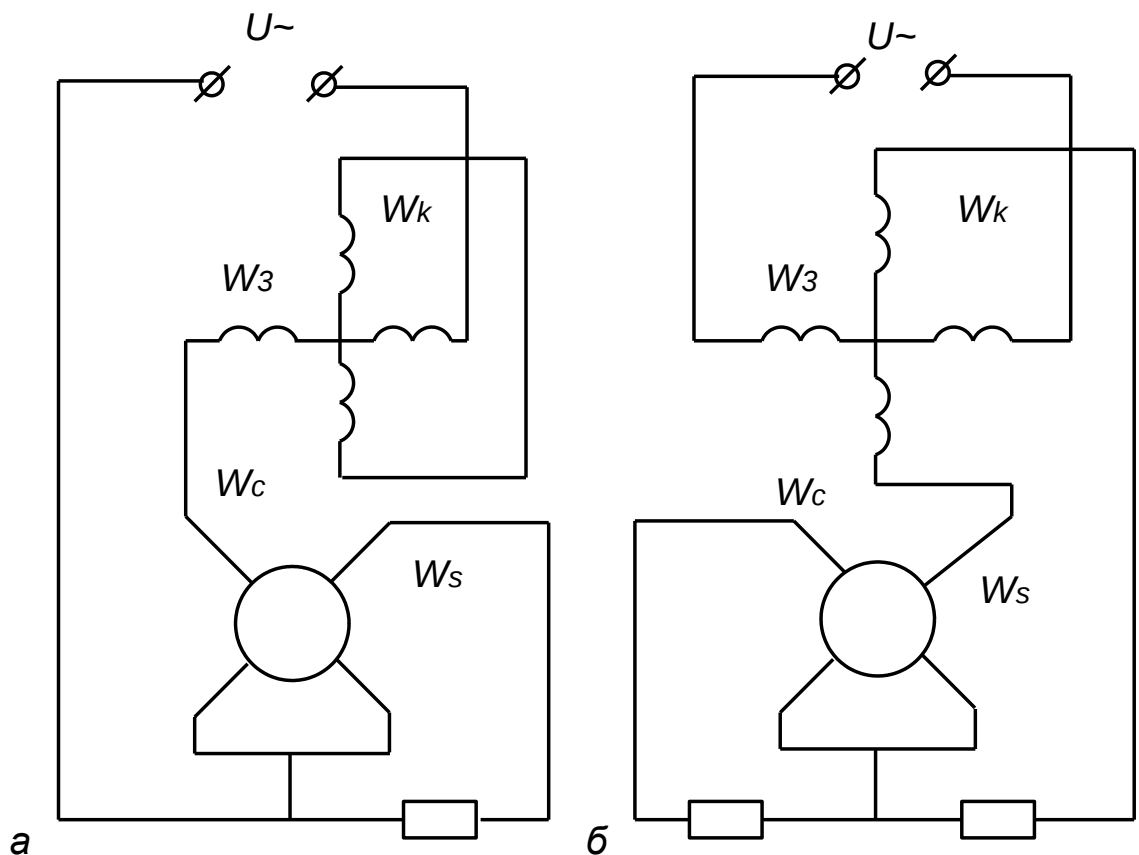


Рис. 6.15. Схеми симетрування для лінійного поворотного трансформатора [5]: а – первинного; б – вторинного

В схемі на рис. 6.15,б косинусна обмотка використовується для вторинного симетрування, а вихідна напруга знімається з послідовно з'єднаних синусної та компенсаційної обмоток.

Точність обертових трансформаторів в основному визначається ретельністю виготовлення. Залежно від допустимих максимальних похибок вони поділяються на чотири класи: 0, 1, 2, 3. Номер класу (за винятком 0)

показує максимальну помилку в десятих частках процента (1 – 0,1%, 2 – 0,2%, 3 – 0,3%). Максимально допустима помилка для нульового класу дорівнює 0,05%.

Проте зазначені точності можна отримати лише в разі використання схем, які забезпечують сталість вихідного опору (схеми з вторинним симетруванням), а також стабілізації напруги і частоти живлення і застосування термокомпенсації.

Сельсини

Сельсинами називають електричні мікромашини, призначені для синхронного і синфазного поворотів кількох механічно не пов'язаних між собою осей.

Одну з машин, механічно з'єднану із задаючим валом, називають датчиком, другу машину, яка відпрацьовує заданий кут, – приймачем.

Конструктивно датчик і приймач не відрізняються один від одного. Вони являють собою індукційну машину [51–53], що має дві обмотки: збудження w_z (первинну) та синхронізації w_c (вторинну).

Залежно від числа фаз обмотки збудження (одна або три) розрізняють однофазні та трифазні сельсини. Синхронізуючі обмотки, як в однофазних, так і в трифазних сельсинах звичайно виконують трифазними.

Розглянемо роботу однофазного сельсина, який використовується в системах автоматики.

Однофазний сельсин – це асинхронна машина, яка має обмотку збудження, розміщену на роторі, та обмотки синхронізації – на статорі. Хоча принцип дії сельсина не залежить від того, яка з обмоток розміщена на статорі, а яка – на роторі, завдяки розміщенню на роторі обмотки збудження вдається підвищити надійність і точність сельсина.

Пульсуючий магнітний потік, що створюється ввімкненою на змінну напругу обмоткою збудження сельсина-датчика, індукує ЕРС у фазах обмотки синхронізації.

Залежно від значення моменту опору на валу сельсина-приймача розрізняють два режими роботи: індикаторний, коли момент на вихідному

валу малий, і трансформаторний, коли на вихідному валу потрібний значний вихідний момент.

Схеми з'єднання сельсинів для індикаторного і трансформаторного режимів зображені на рис. 6.16.

В разі індикаторного режиму обмотки збудження сельсинів приймача і датчика ввімкнені в загальну однофазну мережу змінного струму, а обмотки синхронізації датчика з'єднані з відповідними обмотками приймача лініями зв'язку.

За однакового кутового положення роторів обох машин ЕРС, які індукуються в обмотках синхронізації датчика та приймача, зрівноважуються, і струми в лініях зв'язку відсутні.

Якщо між роторами датчика і приймача утвориться деякий кут непогодження, то по обмотках синхронізації потечуть струми, які, взаємодіючи з потоком збудження, створять в обох сельсинах синхронізуючі моменти, які будуть намагатися звести до нуля кут непогодження.

Синхронізуючі моменти датчика та приймача направлені в протилежні боки, тому, коли ротор датчика не був би загальмований, то кут непогодження довелося б компенсувати за рахунок повороту обох роторів.

Оскільки звичайно ротор сельсина-датчика загальмований і його синхронізуючий момент врівноважується моментом опору, який повертає і утримує ведучу вісь в заданому положенні, то кут непогодження відпрацьовується лише за рахунок повороту ротора приймача.

Синхронізуючий момент залежно від кута непогодження змінюється за синусоїдальним законом

$$M_c = M_{ct} \sin \alpha,$$

де $M_{ct} = c \Phi_{zt} F_{ct} \sin \varphi$; c – стала; Φ_{zt} – максимальне значення потоку збудження; F_{ct} – максимальне значення МРС, що створюється однією фазою синхронізуючої обмотки; $F_{ct} = 0,9 I_{ct} w_c k_{oc}$; $I_{ct} = E_{ct} / z_{заг}$; $E_{ct} = 4,44 f w_c k_{oc} \Phi_{zt}$; $z_{заг}$ – загальний опір послідовно ввімкнених обмоток датчика та приймача в лініях зв'язку.

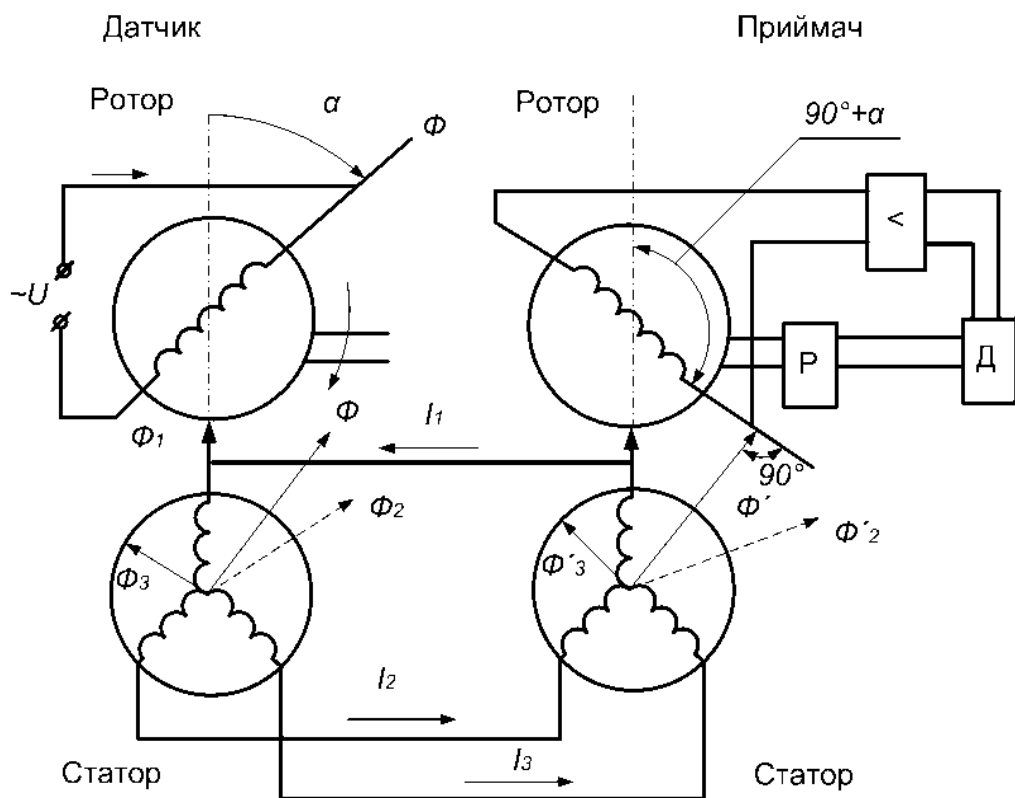
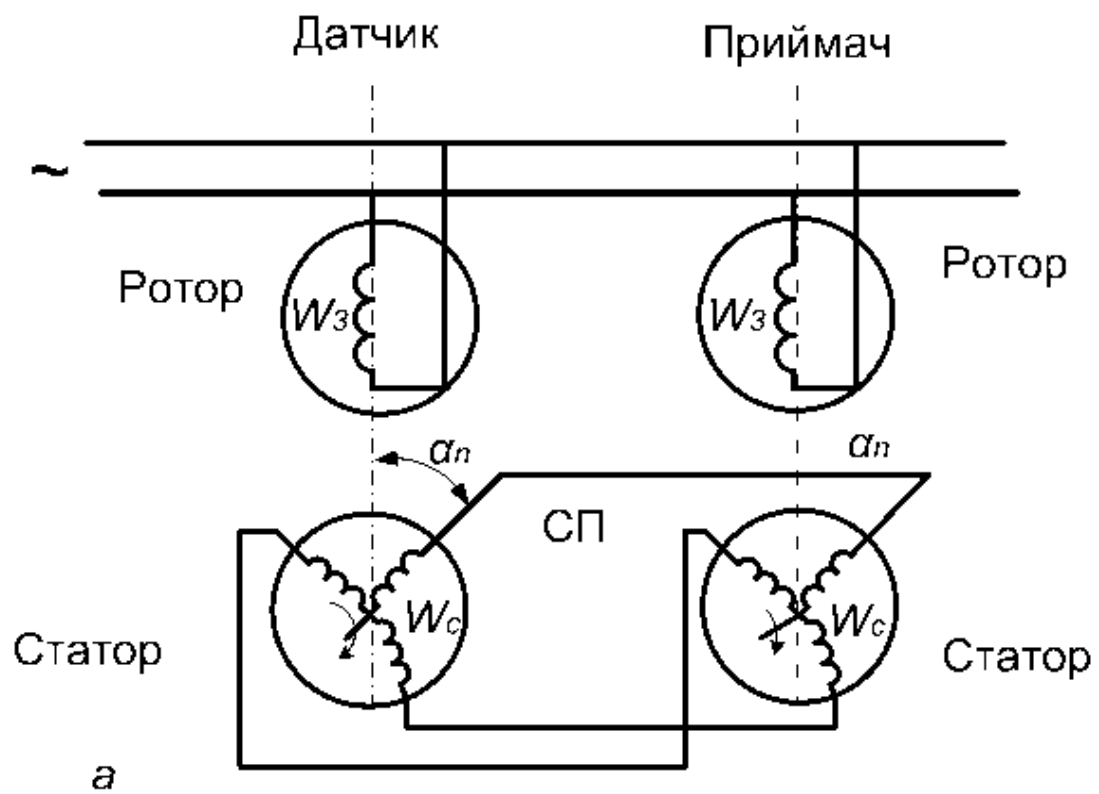


Рис. 6.16. Схеми з'єднання сельсинів для індикаторного (а) і трансформаторного (б) режимів [5]

Один з параметрів, що характеризують індикаторний режим роботи сельсина, – це питомий синхронізуючий момент (момент на один градус кута непогодження) [5]

$$M_{\text{пит}} = M_{\text{ст}} \sin 1^\circ = 0,0175 M_{\text{ст}}.$$

Для сельсинів різної потужності питомий синхронізуючий момент дорівнює $(0,1 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ Н·м/град, а максимальний – $(5 \dots 30) \cdot 10^{-3}$ Н·м/град.

Для трансформаторного режиму сельсин-датчик і сельсин-приймач складаються з двох частин: нерухомої – статора та рухомої – ротора.

Статори сельсина-датчика та сельсина-приймача мають трифазну обмотку, з'єднану в зірку.

Ротор сельсина-датчика містить однофазну обмотку, яка підключається до однофазної мережі, ротор сельсина-приймача також має однофазну обмотку.

В разі підключення обмотки ротора датчика до однофазної мережі змінного струму (див. рис. 6.16,б), в ній протікає змінний струм I і в магнітній системі датчика виникає пульсуючий магнітний потік Φ , магнітна вісь якого збігається з віссю обмотки ротора. Потік Φ наводить в фазах обмотки статора ЕРС, пропорційні до проекцій потоку Φ на осі кожної з фаз обмотки статора [5]:

$$\begin{aligned} e_1 &= k w_1 \Phi \cos \alpha, & e_2 &= k w_2 \Phi \cos(120^\circ + \alpha), \\ e_3 &= k w_3 \Phi \cos(240^\circ + \alpha) \end{aligned}$$

При з'єднанні фаз обмотки статора датчика з фазами обмотки статора приймача в них протікають струми I_1, I_2, I_3 , пропорційні до відповідних ЕРС фаз. Внаслідок протікання фазових струмів в трифазній симетричній системі статора датчика та статора приймача в фазах останнього виникають магнітні потоки, пропорційні до потоків в фазах статора датчика $\Phi'_1, \Phi'_2, \Phi'_3$.

При геометричному додаванні фазових складових магнітного потоку в системі приймача отримуємо результуючий потік Φ' , пропорційний за величиною до потоку Φ в системі датчика і повернутий на той самий кут відносно першої фази.

Пульсуючий магнітний потік приймача Φ' наводить в обмотці ротора приймача ЕРС, яка має максимальне значення тоді, коли вісь обмотки ротора паралельна магнітному потоку Φ' приймача. Для взаємно перпендикулярного розміщення осі обмотки ротора приймача та магнітного потоку Φ' ЕРС теоретично має нульове значення. Практично в цьому разі ЕРС на роторі має значення, яке може досягати близько 0,5% максимального її значення, що зумовлюється здебільшого інструментальними похибками.

За відсутності сигналу на роторній обмотці приймача відносне положення роторів погоджене.

В разі непогодження осей роторів сельсинів датчика та приймача ЕРС в обмотці ротора приймача в режимі холостого ходу змінюється пропорційно до синуса кута непогодження:

$$E_{\Pi} = E_{\Pi m} \sin \alpha,$$

де $\alpha = \alpha_d - \alpha_{\Pi}$ – кут непогодження; α_d , α_{Π} – кут повороту ротора відповідно датчика і приймача.

Поворот ротора приймача на 180° відносно будь-якого положення спричиняє зміну фази ЕРС, що наводиться в ньому, на 180° .

Під час автоматичної обробки кута непогодження напруга з ротора сельсина-приймача подається через підсилювач на керуючу обмотку електродвигуна, що відпрацьовує цей кут. Ротор двигуна через редуктор з'єднується з ротором сельсина-приймача. Двигун обертає ротор приймача до погодженого положення, при якому напруга на роторній обмотці приймача відсутня.

Параметром, який характеризує сельсин, що працює в трансформаторному режимі, є питома вихідна напруга $U_{\text{пит}} = E_{1\text{max}} \sin 1^\circ = 0,0175 E_{1\text{max}}$.

В ідеальному випадку ротор сельсина-приймача повертається на той самий кут, на який повернуто ротор сельсина-датчика, але практично між положеннями роторів датчика та приймача завжди є певний кут непогодження, який характеризує точність синхронного передавання кута. Похибки в передаванні кута (статична в режимі повороту і динамічна в

режимі обертання) – це насамперед наслідок різниці характеристик окремих машин, вплив опору лінії зв'язку та коливань напруги живильної мережі.

Під час роботи в трансформаторному режимі великий вплив на точність має вихідний струм, а під час роботи в індикаторному режимі – гальмівний момент на валу приймача.

Залежно від допустимої похибки сельсини, що випускаються промисловістю, поділяються на три класи точності (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Класи точності сельсинів [5]

Клас точності	Похибка в індикаторному режимі, °		Похибка в трансформаторному режимі, °	
	Датчик	Приймач	Датчик	Приймач
1	0,25	0,75	0,25	0,25
2	0,5	1,5	0,5	0,5
3	1	2,5	1	1

При цьому допустима похибка сельсина-приймача в індикаторному режимі значно перевищує похибку датчика. Пояснюється це тим, що на роботу сельсина-приймача в індикаторному режимі значно впливає момент тертя M_T .

Похибка, що визначається моментом тертя сельсина-приймача, характеризує його зону нечутливості, в межах якої ротор приймача може набувати будь-якого положення при фіксованому положенні ротора датчика. Значення цієї зони визначається співвідношенням $M_T/M_{\text{пит}}$.

Згідно з структурною схемою на рис. 6.17 (нехтуємо індуктивністю обмоток двигуна) передаточна функція сельсинної передачі трансформаторного типу з двигуном, який балансує положення сельсина-приймача, дорівнює [5]:

$$w(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1)},$$

де

$$T_1 = \frac{L_{\text{д-п}}}{R_{\text{д-п}}}, \quad T_2 = \sqrt{\frac{T_{\text{дв}}}{1 + k_1 k_k k_{\text{дв}}}}, \quad k_1 = \frac{k_2 \alpha_{\text{max}}}{U_3 / R_{\text{д-п}}},$$

$$k = \frac{k_1 k_k k_{дв}}{1 + k_1 k_k k_{дв}}, \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{T_{дв} (1 + k_1 k_k k_{дв})}};$$

L_d та L_n – індуктивності обмоток; R_d і R_n – опори обмоток; k_2 – коефіцієнт пропорційності.

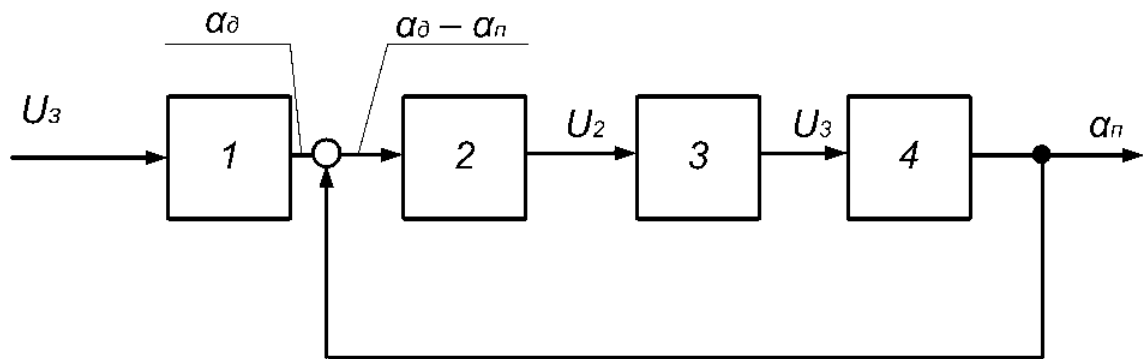


Рис. 6.17. Структурна схема сельсинної передачі в трансформаторному режимі [5]

На рис. 6.17 позначено: 1 – ротор сельсина датчика; 2 – коло статорів; 3 – підсилювач; 4 – двигун з ротором сельсина-приймача.

Основні технічні характеристики сельсинів [5]:

Напруга живлення, В	36
Частота живлення, Гц	400
Струм збудження, мА	300
Максимальна вихідна напруга, В	36
Кутова помилка в трансформаторному режимі, хв.	$\pm 20 \dots 30$
Вага, Н	1,9
Розміри, мм:	
діаметр	66
довжина	14,5

Недоліки сельсинів: значний момент зворотної дії; високий рівень нульового сигналу.

В якості сельсинів, що працюють у трансформаторному режимі, звичайно використовують так звані плоскі сельсини, в яких відношення довжини до діаметра становить 1:6 або 1:8.

В авіаційній техніці, де значні габаритні розміри стандартних сельсинів обмежують їх застосування, плоскі сельсини мають безперечну перевагу: їх конструкція дає змогу вписувати їх в конструкцію приладу, не збільшуючи помітно габаритних розмірів останнього.

Сельсини застосовують як первинні перетворювачі [5], в магнесинно-сельсинних слідкуючих системах [5], в релейних слідкуючих системах [5].

Конструктивно плоскі сельсин-датчик і сельсин-приймач принципово не відрізняються один від одного. Пакети заліза статора і ротора набирають з пластин електротехнічної сталі типу Э44. Пакет заліза статора запресовують в циліндричну оправу, яка з одного боку має буртик, а з другого розвальцьована (рис. 6.18). Пакет заліза ротора закріплюють на дюралюмінієвій оправі, що має форму стакана. Оправи статора і ротора мають спеціальні посадочні поверхні. На рис. 6.18 позначено: 1 – статор сельсина-датчика; 2 – ротор сельсина-датчика; 3 – вихідна вісь приладу.

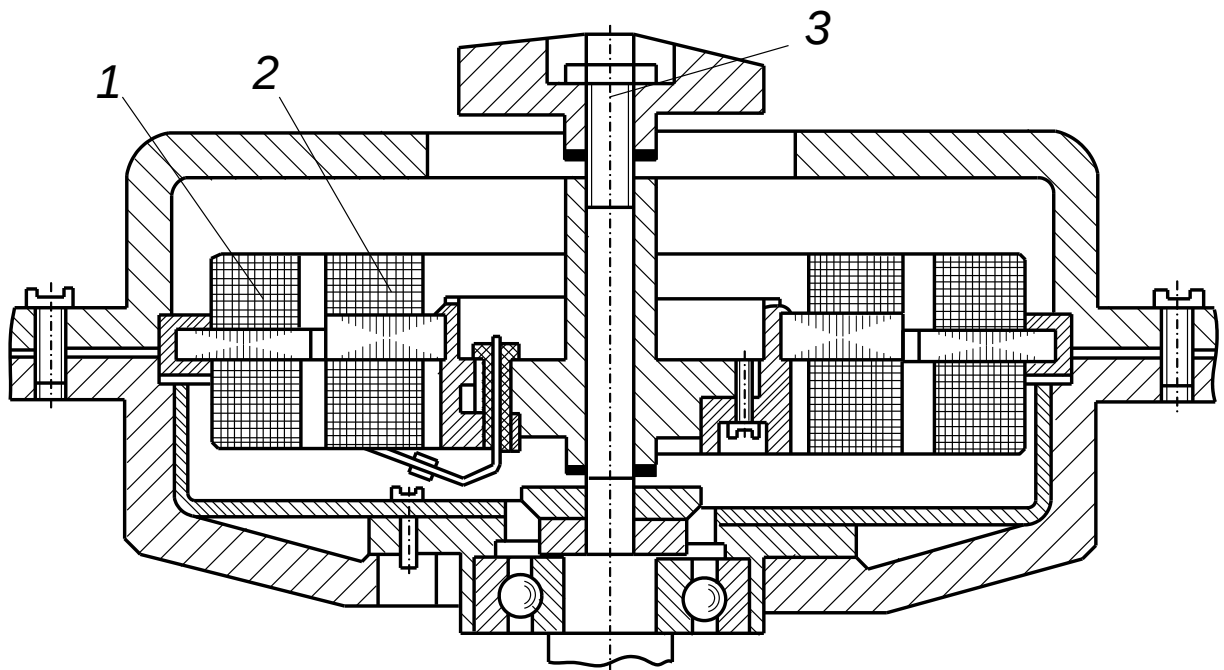


Рис. 6.18. Конструктивне оформлення вузла плоского сельсина [5]

Крім індикаторного і трансформаторного режимів, сельсини можуть працювати і в режимі алгебраїчного підсумовування кутових переміщень двох механічно не пов'язаних між собою валів.

В перших двох режимах сельсини працюють як вимірювальний перетворювач, а в третьому вони виконують роль лічильно-розв'язувального пристрою.

В режимі алгебраїчного підсумовування кутових переміщень двох механічно не пов'язаних між собою валів функція підсумовування виконується диференціальним сельсином (ДС), який ввімкнений в проміжку між двома сельсинами-датчиками, ротори яких механічно з'єднуються з валами двох робочих механізмів (рис. 6.19).

Диференціальні сельсини конструктивно не відрізняються від трифазних: статорна і роторна обмотки являють собою розподілені трифазні обмотки, з'єднані в зірку, які підключаються до трифазних обмоток сельсинів-датчиків СД1 і СД2, ротори яких жорстко пов'язані з командними осями, або вхідними валами. Вихідним або виконавчим, валом є вал ротора ДС.

Принцип дії такої схеми полягає в наступному. Потоки збудження сельсинів-датчиків створюються обмотками збудження, що живляться змінною напругою $U_{\sim}$. В початковому положенні, яке відповідає погодженому стану вхідних валів сельсинів-датчиків і вихідного вала ДС, вектори результируючих потоків статора Φ_1 і ротора Φ_2 ДС збігаються за напрямом, отже, ротор ДС лишається нерухомим. При повороті ротора СД1 за годинниковою стрілкою на кут α_1 результируючий магнітний потік Φ_1 статора ДС повернеться на той самий кут, але проти годинникової стрілки. Поворот ротора СД2 за годинниковою стрілкою на кут α_2 приведе до повороту на той самий кут, але в протилежний бік результируючого магнітного потоку Φ_2 ротора ДС. Оскільки потоки Φ_1 і Φ_2 виявляються направленими під кутом $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ один до одного, то виникає синхронізуючий момент в розточці статора ДС, який намагається розвернути його ротор на кут, що відповідає погодженому положенню, при якому напрями магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 збігаються. Цей кут дорівнює різниці кутів повороту вхідних (командних) валів. Якщо ротор СД2 повернутий на кут α_2 проти годинникової стрілки, то ротор ДС повернеться на кут, який дорівнює сумі $\alpha_1 = \alpha_2$. Отже, сельсинні вимірювальні перетворювальні елементи з ДС

виконують дистанційне алгебраїчне підсумовування кутових переміщень двох механічно не пов'язаних валів робочих механізмів.

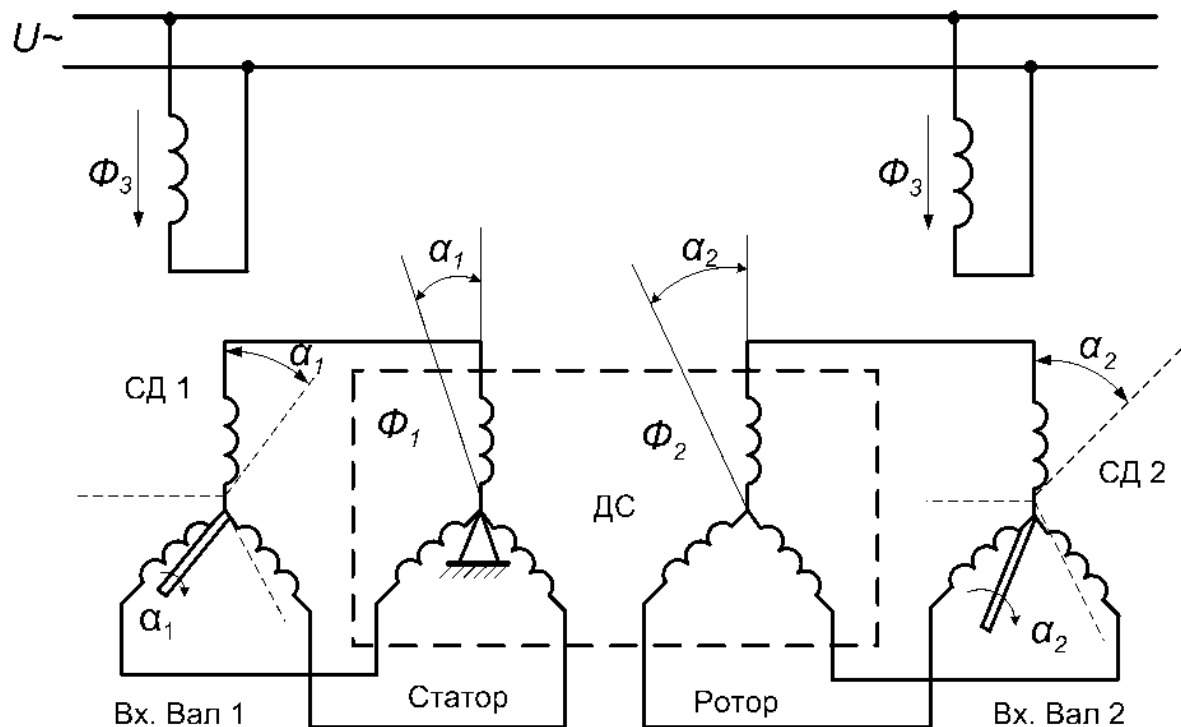


Рис. 6.19. Схема вмикання диференціального сельсина в режимі алгебраїчного підсумовування кутових переміщень механічно не пов'язаних валів [5]

Контрольні питання до практичного заняття 6

1. Класифікація мікромашин.
2. Загальні питання теорії та конструювання мікромашин у режимах генератора та двигуна.
3. Фізичні принципи дії виконавчих елементів.
4. Загальні питання теорії та конструювання електричної мікромашини.
5. Генераторний і двигунний режими електричної машини.
6. Класифікація мікродвигунів.
7. Механічна характеристика мікродвигунів.
8. Номінальна кутова швидкість, кутова швидкість холостого ходу мікродвигунів.
9. Номінальний і пусковий моменти мікродвигунів.
10. Регулювальні характеристики мікродвигунів.

11. Потужність, коефіцієнт корисної дії мікродвигунів.
12. Напруга рушання мікродвигунів.
13. Основні причини похибок асинхронного тахогенератора.
14. Конструктивна схема асинхронного тахогенератора.
15. Первинне та вторинне симетрування обертового трансформатора.
16. Синусно-косинусний обертовий трансформатор.
17. Лінійний обертовий трансформатор.
18. Класи точності обертових трансформаторів.
19. Викладіть електродинамічний принцип дії електричних мікромашин.
20. Дайте визначення поняттю інформаційні електричні мікромашини.
21. Поясніть принцип дії тахогенератора.
22. Поясніть принцип дії обертових трансформаторів і основні режими роботи.
23. Поясніть принцип дії і основні режими роботи сельсинів.

Заняття 7

МІКРОДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета практичного заняття 7 - розглянути конструктивне виконання, механічні та регульованні характеристики мікродвигунів постійного струму.

Мікродвигуни постійного струму

Важлива особливість машин постійного струму порівняно з машинами змінного струму полягає в тому, що вони мають на роторі колекторний випрямляч, який забезпечує погодження частоти $f=n/60$, індукованої в обмотці ротора ЕРС, з частотою зовнішньої мережі.

Обмотка збудження, яка живиться постійним струмом, розміщується на статорі і створює нерухомий в просторі потік $\Phi_{\text{п}}$.

Електрорушійна сила, індукована в обмотці ротора, – наслідок перетину провідником обертового ротора цього потоку $E=k\Phi_{\text{п}}$.

Постійний струм знімається з обмотки ротора (у генераторному режимі) або підводиться до неї (у двигунному режимі) через контактні щітки, що притискаються до пластин колектора.

У разі підключення обмотки якоря до напруги живлення машина працює в двигунному режимі з частотою обертання, пропорційною до значення напруги живлення: $n=U_z / (c \cdot \Phi_{\text{п}})$.

Залежно від способу збудження магнітного поля на статорі розрізняють двигуни з електромагнітним збудженням і двигуни з постійними магнітами.

Перші з них розраховані на відносно велику потужність (кілька десятків ват і більше). Їх обмотку збудження звичайно виконують або незалежною, або ввімкненою послідовно чи паралельно колу якоря (рис. 7.1). Другі не мають обмотки збудження, їх будова простіша, ККД і питома потужність вищі, ніж у перших.

За своїми робочими характеристиками двигуни з постійними магнітами аналогічні двигунам з постійним або незалежним збудженням.

Розрізняють двигуни постійного струму звичайного виконання, силові і керовані виконавчі.

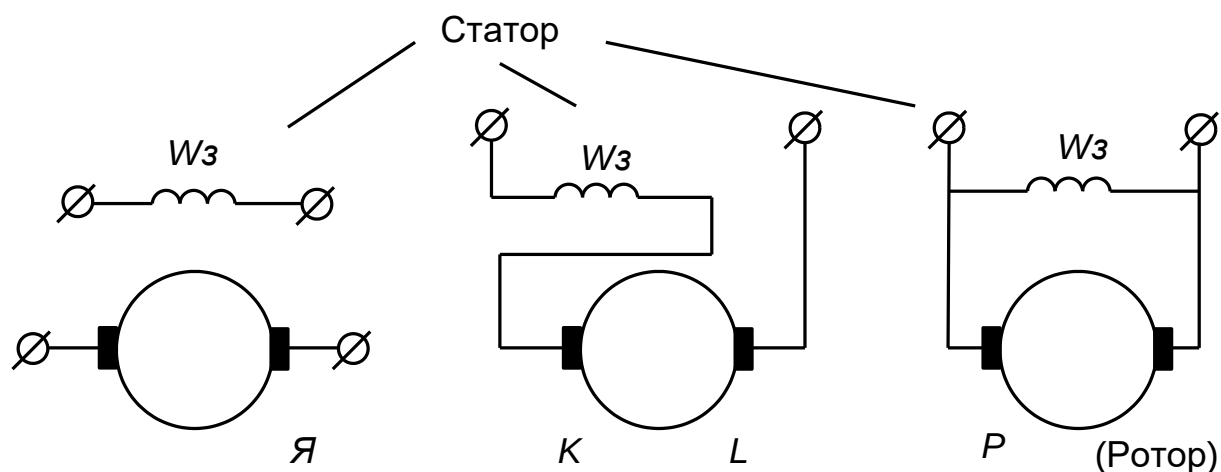


Рис. 7.1. Схеми підключення обмоток збудження машин постійного струму

Силові мікродвигуни (марка двигуна СД) постійного струму відрізняються від двигунів постійного струму загального призначення середньої і великої потужності тим, що мають менший ККД і проектуються звичайно на великі частоти обертання ($4000 \dots 10000 \text{ хв}^{-1}$), що сприяє зменшенню їх маси та габаритних розмірів. Іноді їх випускають з вбудованими регуляторами кутової швидкості, які стабілізують цю швидкість з точністю 3–5% вмиканням-вимиканням опору в колі якоря або обмотки збудження.

Керовані мікродвигуни постійного струму, широко застосовуються в приладах і за своїми властивостями здебільшого перевершують показники асинхронних керованих двигунів змінного струму. Вони мають вищі енергетичні показники за однакових габаритних розмірів, малу потужність керування, що зменшує габаритні розміри підсилювача, практично не споживають потужності за відсутності сигналу керування та в разі зупиненого ротора, мають ширший діапазон регулювання кутової швидкості.

До недоліків цих двигунів належать: низька надійність через наявність щітково-колекторного вузла з ковзаючими контактами, які зношуються під час експлуатації; підвищене значення сигналу керування при зрушенні; наявність завад, зумовлених іскрінням під щітками.

Керовані виконавчі двигуни постійного струму виконують або із збудженням від постійних магнітів, або з незалежним збудженням.

Керування виконавчими двигунами залежно від того, в яку з обмоток подається керуючий сигнал, може бути якірним і полюсним. У першому разі обмотка збудження підключається до мережі живлення (рис. 7.2,а), в другому – на керуючу напругу (рис. 7.3,а).

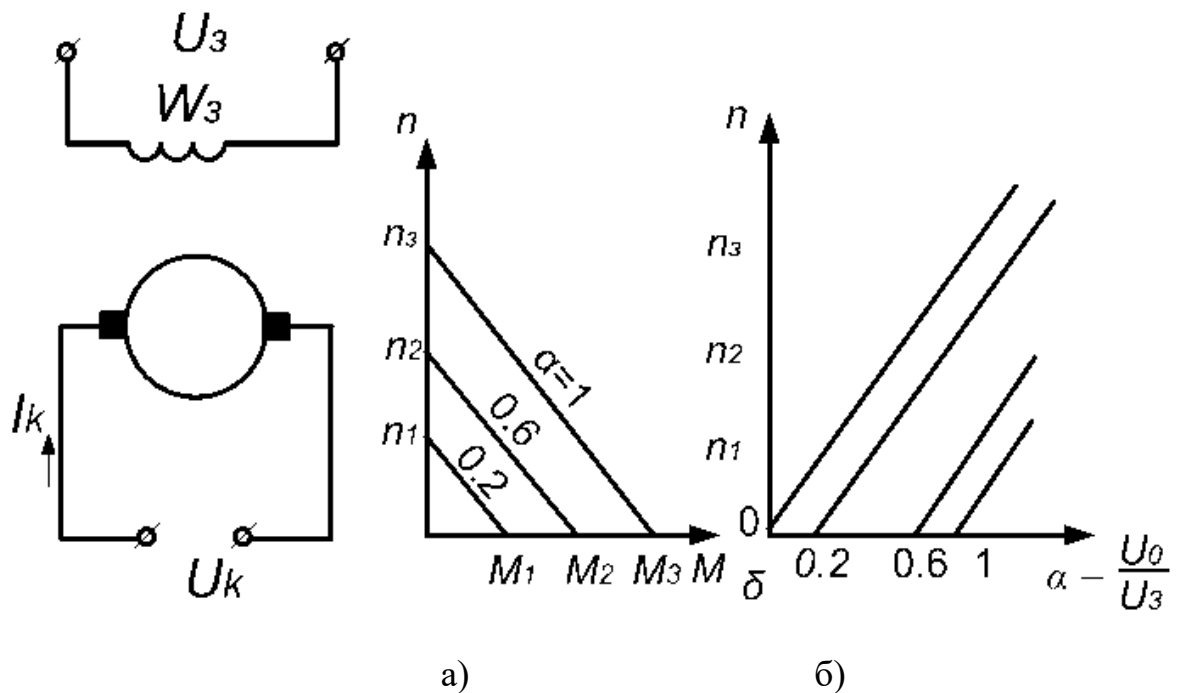


Рис. 7.2. Якірне керування виконавчим двигуном (а) і його механічні характеристики (б)

Механічні та регульовальні характеристики при якірному керуванні показано на рис. 7.2,б, а при полюсному – на рис. 7.3,б.

Як видно з рис. 7.2 та 7.3, найкращі регульовальні властивості має якірне керування. Тому, незважаючи на те, що порівняно з полюсним якірне керування потребує значно більшої потужності на вході, найчастіше застосовується саме воно.

Основні переваги двигунів постійного струму на відміну від двигунів змінного струму такі: лінійність механічної характеристики; широкі можливості щодо зміни частоти обертання при постійному моменті на валу; великі пускові моменти за невеликих струмів; підвищена швидкодія;

можливість використовувати активні матеріали машин; великий ККД; малі маса та габаритні розміри.

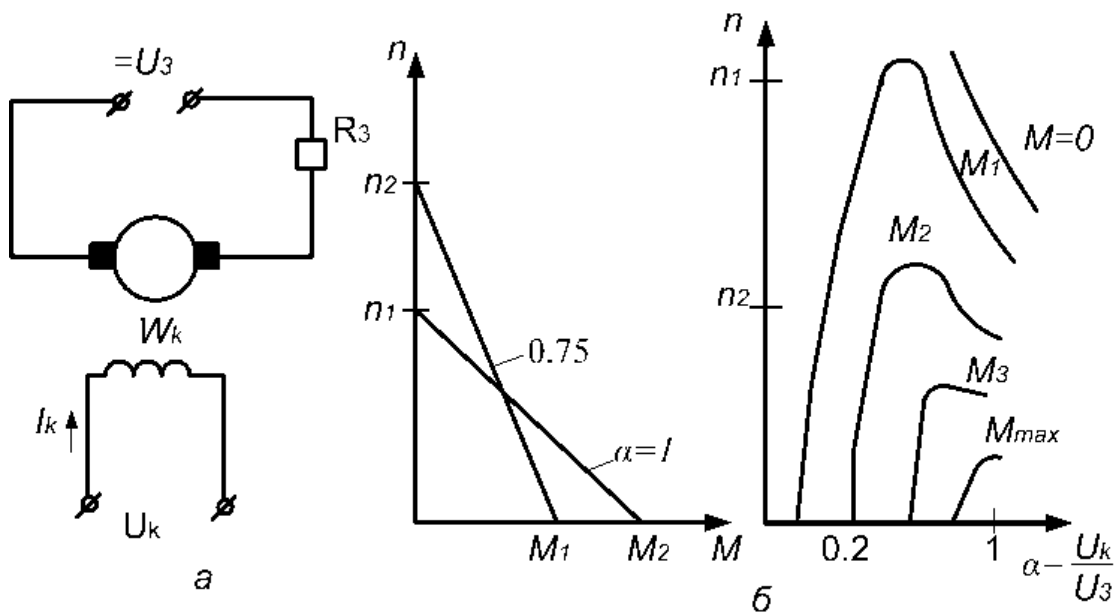


Рис. 7.3. Поліусне керування виконавчим двигуном (а) і його характеристики (б)

Двигуни постійного струму мають деякі недоліки: наявність ковзаючого щіткового контакту знижує надійність роботи машини і створює внаслідок комутаційного іскріння значні перешкоди, особливо при роботі у важких умовах (трясіння, вібрація, підвищена вологість, температура і тиск, що різко змінюються, тощо).

Для прикладу наведемо характеристики деяких типових найпоширеніших двигунів постійного струму (табл. 7.1): силового двигуна СД-10А, виконавчого двигуна ИД-150 з обмоткою збудження та виконавчого двигуна ИД-500 із збудженням від постійних магнітів.

На рис. 7.4 зображено механічні характеристики різних двигунів постійного струму: крива 1 стосується двигунів з незалежним збудженням; крива 2 – двигунів з послідовним збудженням; крива 3 – двигунів з паралельним збудженням і постійними магнітами.

Режим холостого ходу ($M_n=0$) в двигунах з послідовним збудженням неможливий, оскільки при цьому кутова швидкість стає дуже великою і перевищує допустиму, тобто момент навантаження M_n тут не повинен бути нижчим за певний поріг.

Таблиця 7.1

Характеристики деяких типів двигунів постійного струму

Позначення двигуна постійного струму	Напруга живлення		Струм споживання		Номінальний навантажувальний момент, $M_H \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{см}$	Номінальна потужність P , Вт	Номінальна частота обертання n , об/хв	Нелінійність регулювальної характеристики %	Напруга зрушення (не більш як) $U_{зруш.}$, В
	Обмотка якоря $U_{я}$, В	Обмотка збудження, U_3 В	Якірною обмоткою, не більше $I_{я}$ А	Обмоткою збудження, I_3 А					
СД-10А	60	$27 \pm 2,7$ $27 \pm 2,5$	0,7	0,5	330	10	6000 ± 600	5	3
ИД-150	60	постійний магніт	4	1,2	1950	150	7500 ± 750	5	3
ИД-500	60	постійний магніт	12	—	6500	500	7500 ± 750	5	3

Передаточні функції керованих двигунів за різних методів керування мають такий вигляд [6]:

1. Якірне керування:

$$w(p) = \frac{k / R_{я}}{p \left(J_p p + \frac{k^2}{R_{я}} + c \right)},$$

де $k = U_{я}/n$, В/об/хв; $U_{я}$ – напруга обмотки якоря, В; n – кутова швидкість обертання ротора, об/хв; $R_{я}$ – активний опір якоря. Ом; $I_{я}$ – момент інерції ротора двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; c – коефіцієнт тертя.

2. Полісне керування:

$$w(p) = \frac{\frac{k U_{я}}{R_{я} R_3}}{p^3 \frac{L_3}{R_3} I_p + p^2 \left(I_p + \frac{L_3}{R_3} n \right) + p n},$$

де $k' = U_{\text{я}}/I_3$; I_3 – сила струму в обмотці збудження; L_3 , R_3 – відповідно індуктивний та активний опір цієї обмотки.

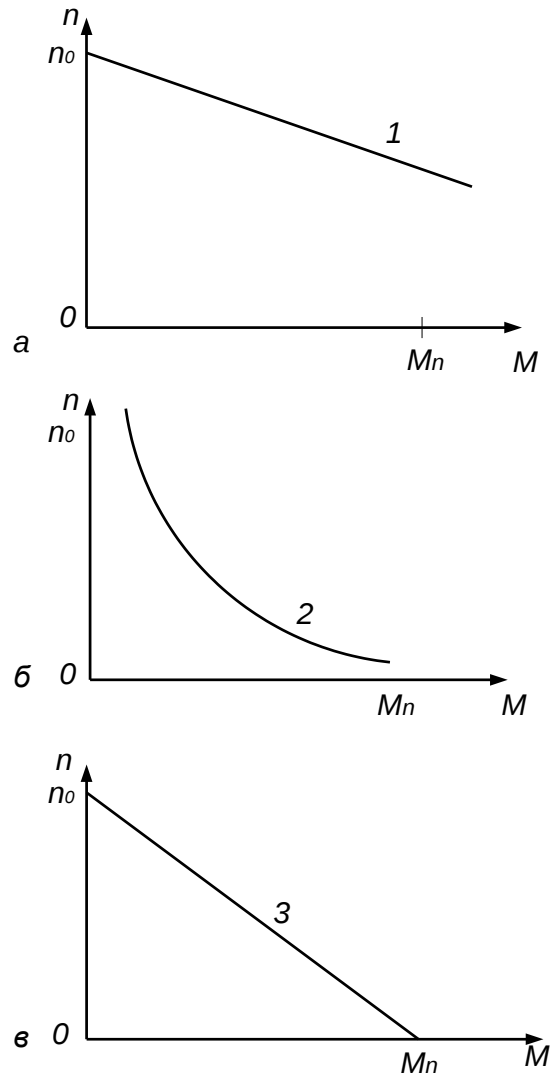


Рис. 7.4. Механічні характеристики різних двигунів постійного струму

3. Двигун з послідовним збудженням:

$$w(p) = \frac{k_1}{R_{\text{я}} + R_3} \times$$

$$\left\{ \frac{L_{\text{я}} + L_3}{R_{\text{я}} + R_3} I_p p^3 + \left[I_p + c \frac{L_{\text{я}} + L_3}{R_{\text{я}} + R_3} \right] p^2 + p(c - k_2) \right\}^{-1},$$

$$\text{де } k_1 = \frac{dM}{dI}, \quad k_2 = \frac{dM}{dn}.$$

В малопотужних керуючих пристроях, в різних побутових приладах широко застосовують універсальні колекторні двигуни, здатні працювати від джерела як постійного, так і змінного струму.

Відмінність універсального двигуна від машини постійного струму полягає в тому, що його магнітну систему виконують шихтованою, а послідовно ввімкнену обмотку збудження – секціонованою з відводами (рис. 7.5,а), які дають змогу зменшити магнітне поле машини під час переходу на живлення змінним струмом, щоб забезпечити однакову частоту обертання двигуна при номінальному моменті незалежно від роду напруги живлення (див. рис. 7.5,б).

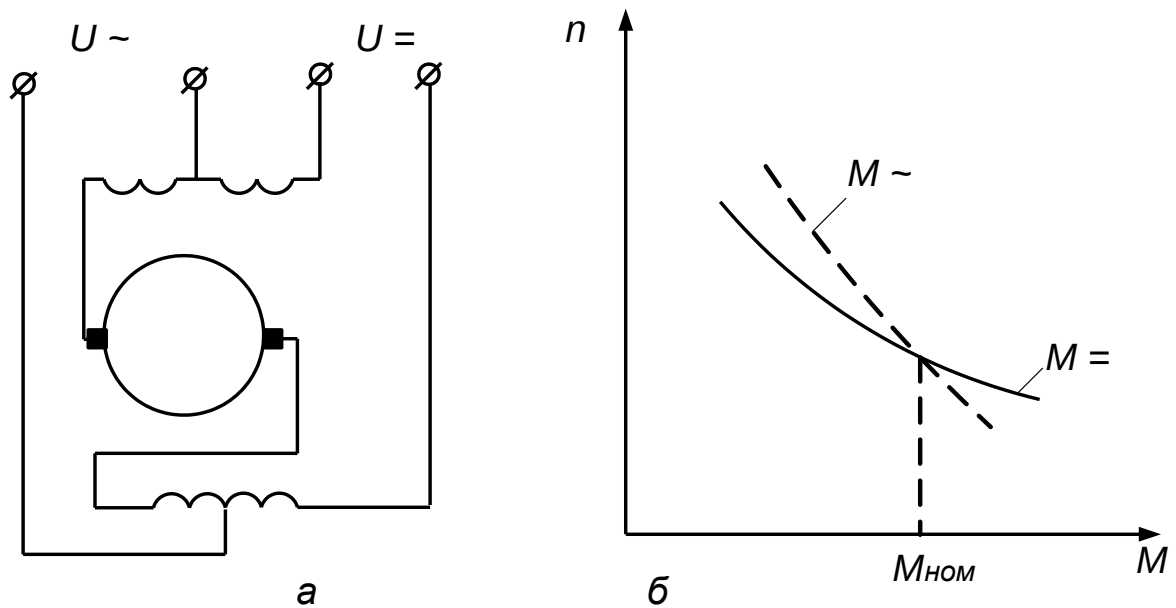


Рис. 7.5. Універсальний колекторний двигун (а) і характеристика його роботи (б)

Найпоширенішими є керовані двигуни постійного струму в звичайному виконанні та малоінерційні.

Двигуни звичайного виконання відрізняються від силових меншим моментом інерції ротора (збільшується відношення довжини двигуна до його діаметра), покращеною якістю щітково-колекторного вузла та підшипників.

Малоінерційні двигуни бувають з друкованою обмоткою якоря на диску або на порожнистому циліндрі і з обмоткою якоря на порожнистому диску (за своїми пусковими та робочими властивостями вони близькі один до одного).

Керовані двигуни постійного струму з обмоткою збудження мають ККД $\eta=25\ldots30\%$, якщо потужність споживання $p=5\ldots10$ Вт, і $\eta=50\ldots60\%$, якщо $p=200$ Вт.

Їх габаритні розміри та маса приблизно в 2–3 рази менші, ніж у керованих асинхронних двигунів тієї самої потужності, але більші, ніж у силових двигунів постійного струму.

Двигуни з постійними магнітами мають вищий ККД ($\eta=50\ldots70\%$), не потребують джерела живлення для кола збудження. Проте незважаючи на відносну простоту, вартість їх не менша за вартість звичайних двигунів з обмотками збудження, їх випускають здебільшого на малі потужності – до кількох десятків ват. Найпоширенішими є такі їх серії:

- керовані двигуни постійного струму із збудженням від обмотки (серія СЛ);
- двигуни з постійними магнітами і звичайним якорем (серія ДПМ);
- двигуни з порожнистим якорем і звичайною обмоткою (серія ДПР).

Двигуни ДПР випускають потужністю від десятих часток до декількох десятків ват, їх ККД на 15–20% вищий, а електромеханічна стала часу в 2–2,5 рази менша, ніж у двигунів ДПМ.

Значного поширення набули безконтактні двигуни постійного струму, в яких щітково-колекторний вузол замінено надійнішим напівпровідником комутатором, що керується датчиками положення ротора. Комутатор не лише виконує основну функцію – замінює щітково-колекторний вузол, але й керує двигуном: регулює кутову швидкість, виконує реверс, пуск, зупинку обертання.

Порівняно з колекторними безколекторні двигуни мають вищі енергетичні показники, більший діапазон регулювання кутової швидкості, не є джерелом перешкод, характеризуються високою надійністю, але вартість їх значно більша. Механічні та регульовальні характеристики цих двигунів лінійні і такі ж самі, як і у колекторних двигунів з якірним керуванням.

Контрольні питання до практичного заняття 7

1. Мікромашини постійного струму. Принцип дії, характеристики, режими роботи.
2. Статичні механічні характеристики мікродвигунів постійного струму.
3. Регульовальні характеристики мікродвигунів постійного струму.

4. Аналітичне представлення характеристик мікродвигунів постійного струму.
5. Графічне представлення характеристик мікродвигунів постійного струму.
6. Класифікація мікромашин. Переваги. Недоліки. Галузь застосування. Принцип дії. Конструктивні різновиди.
7. Класифікація мікродвигунів. Основні характеристики і параметри мікродвигунів, їх розрахунок.

Заняття 8

МІКРОДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета практичного заняття 8 - розглянути конструктивне виконання, механічні та регулювальні характеристики мікродвигунів змінного струму.

Мікродвигуни змінного струму

Асинхронні мікромашини використовують в автоматичних і вимірювальних пристроях як одно- та двофазні двигуни, тахогенератори і сельсини.

Розглянемо особливості роботи однофазного асинхронного двигуна, що використовується найчастіше.

Обмотка збудження w_z статора підключена до джерела живлення *змінного струму* (рис. 8.1,а). Обмотка w_z створює пульсуюче магнітне поле, в якому розміщено ротор двигуна [26, 32, 49, 52, 53].

Нехай на роторі вкладено лише один виток; в поточний момент часу кут між віссю поля та витком дорівнює α . Струми, що виникають в цьому витку, взаємодіючи з полем, намагаються повертати виток доти, поки він не охопить максимум потоку.

Так, для кожного витка реального ротора можна знайти інший виток, розміщений симетрично першому відносно поля. Результируюче зусилля такої пари витків дорівнюватиме нулю, оскільки витки будуть з однаковою силою намагатися обертатись в протилежні боки. Таким чином, пусковий момент однофазного асинхронного двигуна дорівнює нулю (рис. 8.1,б, пунктир).

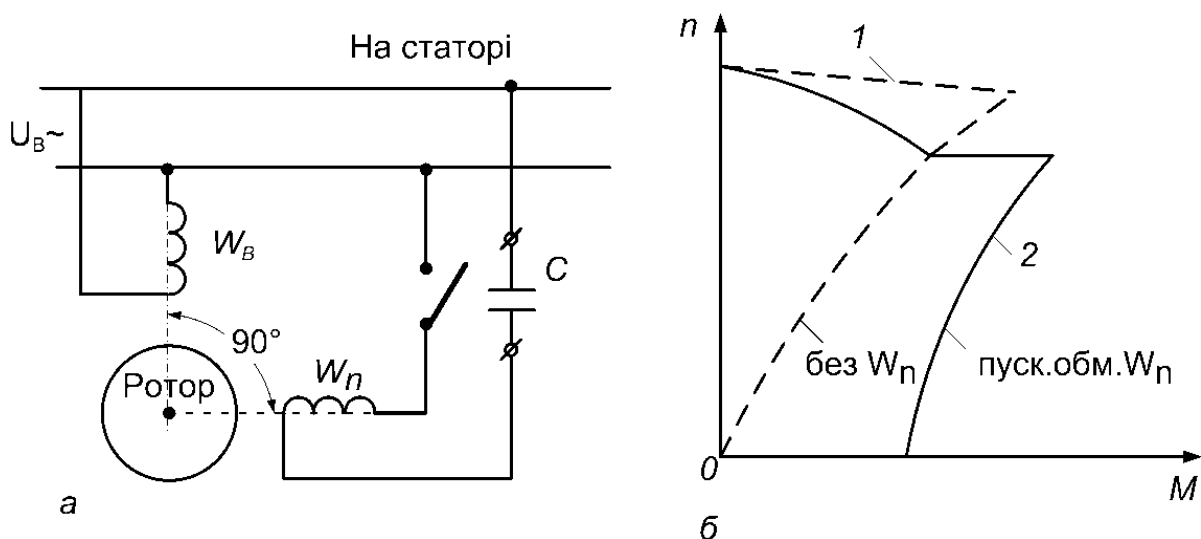


Рис. 8.1. Схема однофазного асинхронного двигуна (а) і механічна характеристика (б)

На відміну від трифазного двигуна, обмотки статора якого створюють магнітне поле, що обертається з кутовою швидкістю $n=60f/p$ (f – частота джерела живлення; p – число пар полюсів), обмотка збудження статора однофазного двигуна створює пульсуюче поле, МРС якого в зазорі

$$F_x = F_{\max} \sin \omega t \cos \alpha, \quad (8.1)$$

де $\alpha = \pi x / \tau$ (x – відстань від осі обмотки; τ – полюсна поділка – довжина дуги, яка відповідає одному полюсу).

Вираз (8.1) легко перетворюється у вираз

$$F_x = \frac{1}{2} F_{\max} \sin(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\max} \sin(\omega t + \alpha), \quad (8.2)$$

який дає змогу розглядати пульсуюче поле як суму двох полів, що обертаються з однаковою кутовою швидкістю n , але в протилежні боки. Одне з них, напрямком обертання якого збігається з напрямком обертання ротора, називають прямим, протилежне йому – зворотним, або інверсним.

Ковзання ротора, який обертається з кутовою швидкістю n_p , відносно прямого поля

$$S_{\text{пр}} = (n - n_p) / n = 1 - n_p / n$$

і відносно зворотного поля

$$S_{\text{зв}} = (n + n_p) / n = 1 + n_p / n,$$

звідки

$$S_{зв} = 2 - S_{пр}.$$

Отже, однофазну асинхронну машину можна розглядати як жорстко з'єднані на одному валу дві трифазні, які намагаються обертатися в протилежні боки, а її момент M – як результат додавання моментів цих двигунів $M_{пр}$ і $M_{зв}$ (рис. 8.2,а).

Для порівняння на рис. 8.2,б зображені механічні характеристики $n_p=f(M)$ трифазного 2 та однофазного 1 двигунів.

Як випливає з рис. 8.2, б, однофазний двигун не має пускового моменту ($M=0$ при $n=0$) і обертатиметься в той бік, в який буде запущений зовнішнім моментом; його механічна характеристика 1 м'якша за характеристику 2 трифазного; швидкість, перевантажувальна здатність M_{max} і ККД менші. Всі ці недоліки – наслідок наявності зворотного поля.

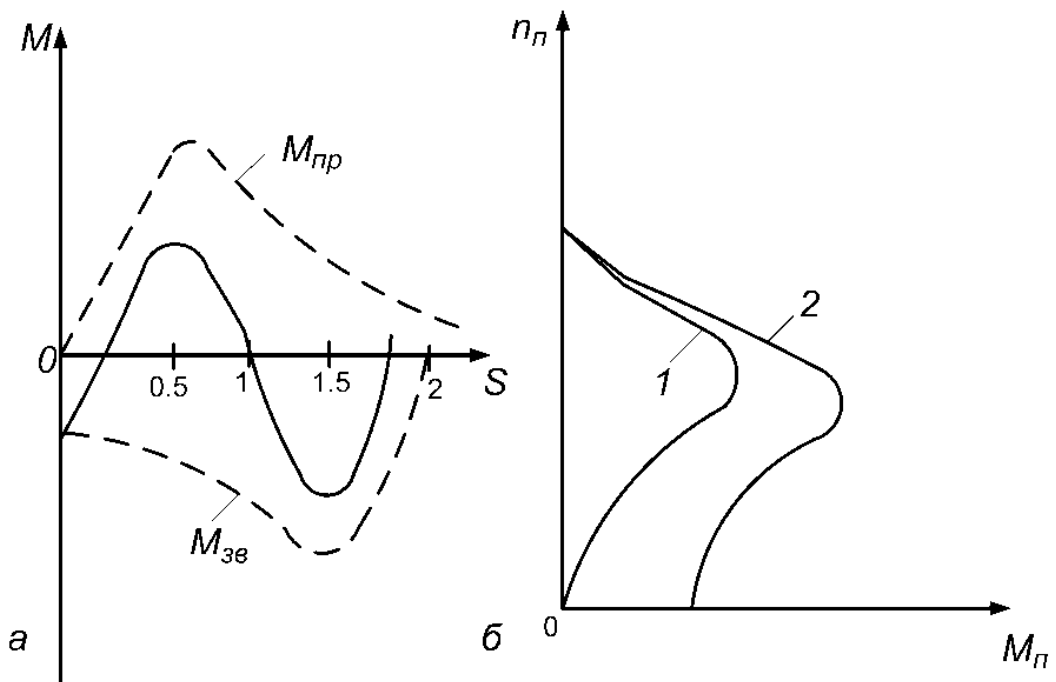


Рис. 8.2. Момент асинхронного двигуна (а) і його механічна характеристика (б)

Для забезпечення пускового моменту в однофазних асинхронних двигунах використовують додаткову пускову обмотку, яка живиться від мережі через фазозсуваючий елемент (конденсатор або резистор). Додаткову обмотку розміщують на статорі так, що її вісь виявляється взаємно перпендикулярною до осі обмотки збудження. Добором відповідного фазозсуваючого елемента можна дістати обертове поле, близьке до

кругового. З досягненням максимального моменту пускову обмотку можна вимкнути (див. рис. 8.2, а, б, суцільна крива).

В деяких випадках, враховуючи, що наявність другої обмотки істотно поліпшує механічну характеристику, її не вимикають. Такі двигуни називають конденсаторними.

На відміну від однофазних двигунів з використанням другої обмотки лише для пуску, коли вона може бути виконана тоншим проводом і вкладається, в менше число пазів, в конденсаторних двигунах обидві обмотки займають однакове число пазів і виготовляються з одного і того ж самого проводу.

Недолік конденсаторних двигунів – великі габаритні розміри і маса конденсаторів.

Резистори як фазозсувні елементи застосовують в двигунах за легких умов пуску (коли порівняно невеликий пусковий момент). Пояснюється це тим, що зсув фаз при активному опорі менший за необхідний для створення симетричного обертового поля. В результаті поле виходить еліптичним, а пусковий момент – меншим.

Інший спосіб забезпечення пускового моменту – створення зсунутого за фазою потоку з охопленням частини магнітопроводу короткозамкненим витком.

В цьому разі застосовується явноплюсна машина з розщепленими полюсними наконечниками, на одну частин з яких і надівається короткозамкнений виток (рис. 8.3). Характеристику однофазного двигуна $M(S)$ при $S_{кр}=1$ показано на рис. 8.4.

Двигуни з короткозамкнутим витком характеризуються простотою конструкції та високою надійністю в експлуатації, але мають низькі $\cos\varphi$, ККД і пусковий момент.

Як виконавчі двигуни приладів точної механіки, систем автоматики і вимірювальної техніки використовують двообмоткові (двофазні) асинхронні двигуни, в яких друга обмотка є обмоткою керування, а напруга в ній визначається керуючим пристроєм як функція сигналу на вході (рис. 8.5).

Швидкістю таких двигунів можна керувати трьома способами: амплітудним, фазовим і амплітудно-фазовим.

При амплітудному керуванні (рис. 8.5,а) змінюється лише значення (амплітуда або діюче значення) напруги керування U_k , яке оцінюється коефіцієнтом сигналу $\alpha = U_k/U_3$.

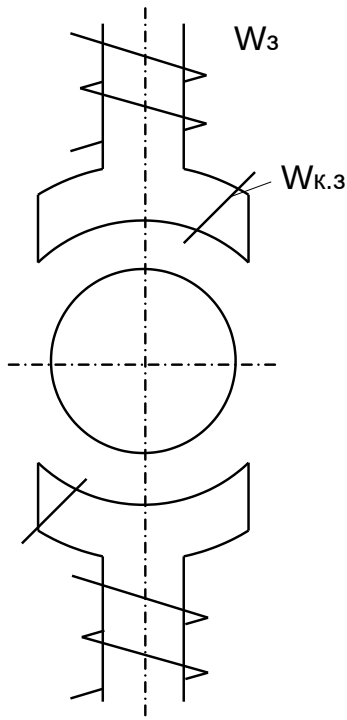


Рис. 8.3. Двигун з короткозамкненим витком

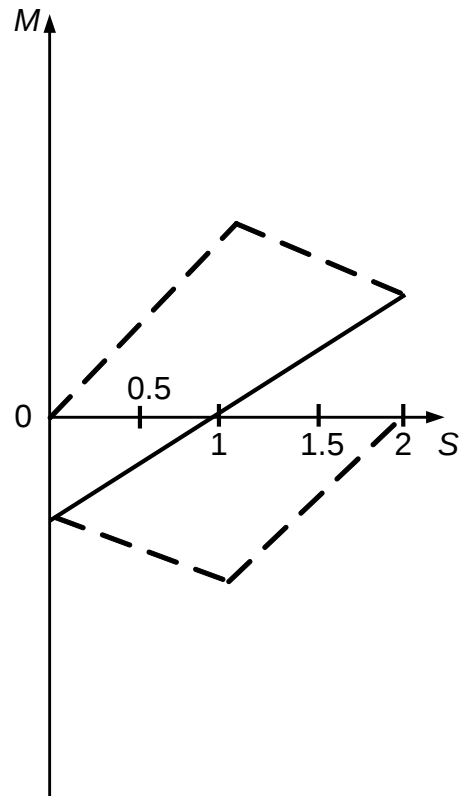


Рис. 8.4. Залежність $M(S)$ однофазного двигуна при $S_{кр}=1$

Значення фазового зсуву β між U_3 і U_k при всіх сигналах дорівнює $\pi/2$.

При фазовому керуванні (рис. 8.5,б) незмінними лишаються значення напруг U_3 і U_k , але змінюється кут зсуву фаз між ними β . В цьому разі коефіцієнт сигналу $\alpha = \sin\beta$.

Якщо керування амплітудно-фазове, змінюються як значення U_k , так і кут зсуву фаз між U_3 і U_k .

Зміна U_k або кута зсуву фаз між U_3 і U_k приводить до зміни еліптичного поля машини, яке можна представити у вигляді суми двох неоднакових кругових полів, що обертаються в різні боки. Зміна співвідношення прямого

та зворотного полів і зумовлює зміну швидкості (зміну механічної характеристики).

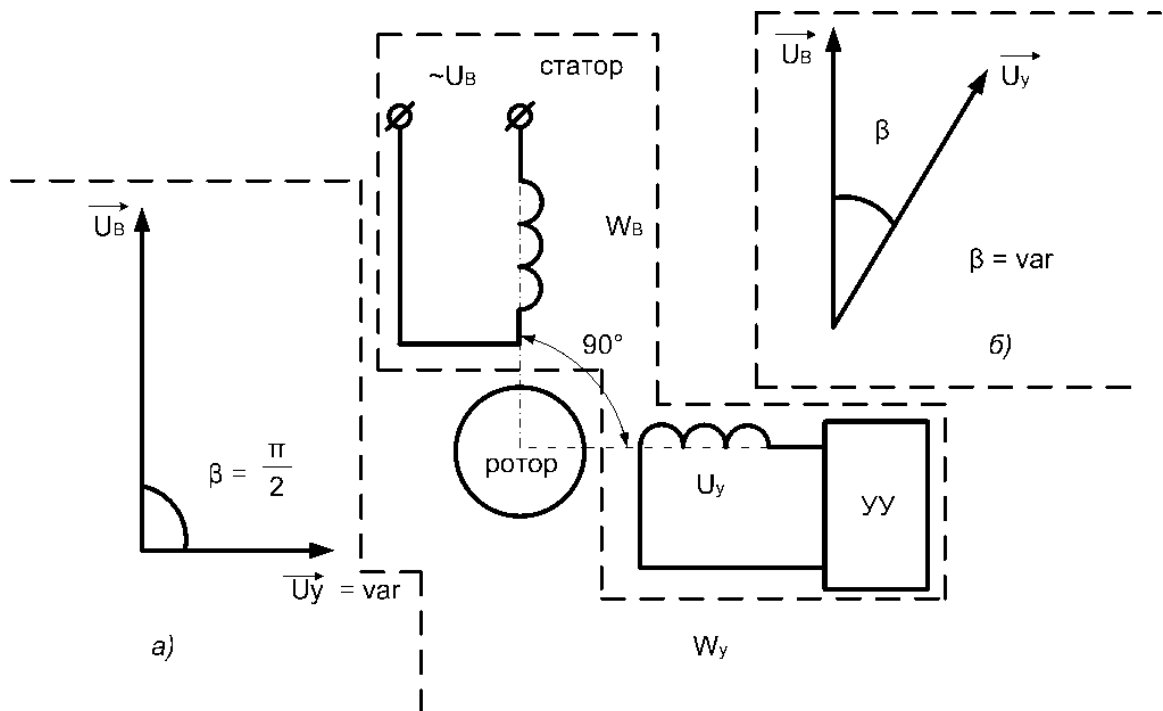


Рис. 8.5. Виконавчий двигун при амплітудному (а) і фазовому (б) керуванні

До асинхронних мікромашин, що працюють як виконавчі двигуни приладів точної механіки, систем автоматики та вимірювальної техніки, висувають такі вимоги: керованість у всьому діапазоні швидкостей; висока лінійність механічної та регулювальної характеристики, чутливість і швидкодія.

З точки зору керованості найважчим є режим $U_k=0$ ($\alpha=0$), коли ротор має бути загальмований.

Як видно з рис. 8.5, якщо $U_k=0$, то двофазний двигун еквівалентний однофазному. За умови незмінності моменту запущений двигун не зупиниться і продовжуватиме обертатися (тобто спостерігатиметься явище, яке називають самоходом двигуна).

Щоб виключити самохід двигуна (забезпечити зупинку двигуна в однофазному режимі), необхідне виконання умови: при $U_k=0$ момент $M=M_{\text{пр}} - M_{\text{зв}}=0$.

Ця умова виконується при $S_{кр}=1$ (див. рис 8.4). Практично у виконавчих двигунах $S_{кр}=3...7$, що досягається застосуванням ротора з підвищеним опором (у вигляді білячої клітки або порожнистого суцільного циліндра).

Таке велике значення $S_{кр}$, хоча і знижує ККД двигуна, але надійно забезпечує відсутність самоходу (керованість) двигуна і покращує його механічні характеристики, наближаючи їх до прямолінійних.

На рис. 8.6 наведено механічні характеристики виконавчого асинхронного мікродвигуна в разі амплітудного та фазового керування. Ці характеристики м'які і нелінійні, хоча нелінійність їх невисока.

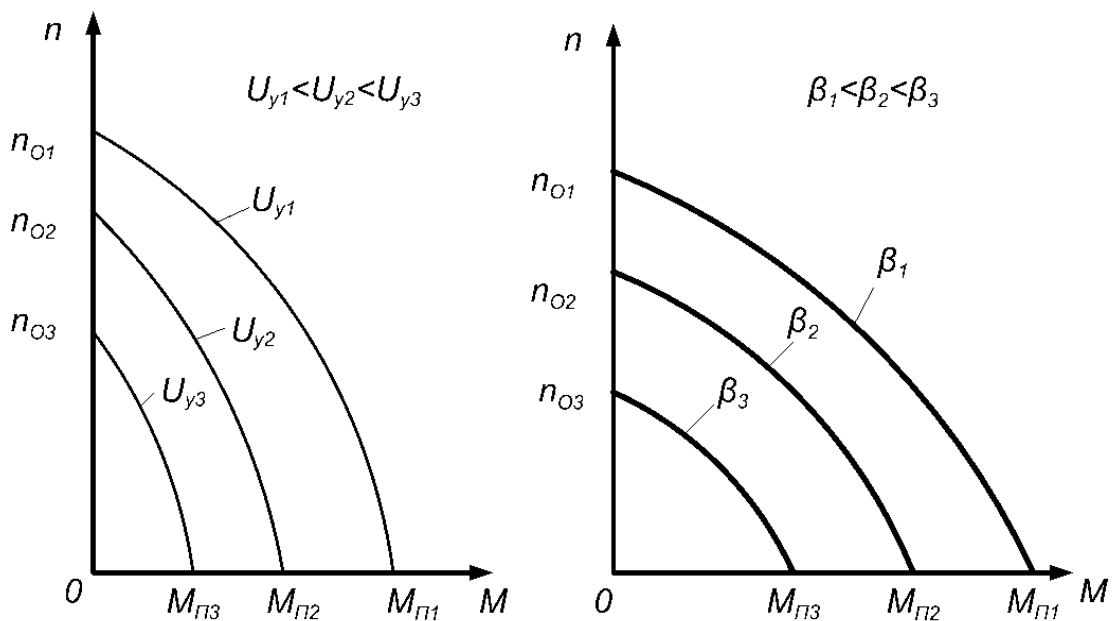


Рис. 8.6. Механічні характеристики виконавчого асинхронного мікродвигуна з амплітудним (а) та фазовим (б) керуванням

Як видно з рис. 8.6, лише при малих значеннях n механічну характеристику можна вважати лінійною.

Механічні характеристики при фазовому керуванні виходять ближчими до лінійних, проте таке керування застосовується значно рідше через нижчу чутливість (велику потужність керування при малих α) і відносну складність зміни фази керуючого сигналу.

Велика потужність керування в разі фазового способу з малими сигналами керування $\alpha=\sin\beta$ пояснюється тим, що для сталого U_k коефіцієнт

сигналу α практично не впливає на потужність керування, тоді як при амплітудному керуванні його потужність пропорційна до квадрата коефіцієнта сигналу:

$$\alpha = \frac{U_{\kappa}}{U_3}, \quad P_{\kappa} = U_{\kappa}^2 / R = U_3^2 \alpha^2 / R.$$

Під час амплітудно-фазового керування, яке виконується за рахунок ввімкнення конденсатора в коло збудження, характеристики близькі до характеристик при амплітудному керуванні.

Перевага амплітудно-фазового керування – можливість забезпечити значні пускові моменти, а недолік – зниження стійкості при малих сигналах.

Рівняння руху двофазного двигуна

При виведенні рівняння двигуна будемо використовувати положення про еквівалентність взаємодії намагнічуючої сили ротора, що обертається, з намагнічуючою силою статора та намагнічуючої сили нерухомого ротора з намагнічуючою силою статора, якщо струми в нерухомому роторі ті ж самі, що і при його обертанні [16, 17]. Тоді двигун можна представити у вигляді еквівалентної схеми (рис. 8.7). Процеси, що відбуваються в обмотках статора і ротора, характеризуються такими рівняннями:

$$i_{\kappa} \cos \omega t = i_{\kappa} R_c; \quad i_3 \sin \omega t = i_3 R_c;$$

$$M \frac{di_3}{dt} = i_{1p} R_p, \quad M \frac{di_{\kappa}}{dt} = i_{2p} R_p - M_n.$$

В даному випадку M – це коефіцієнт взаємної індукції.

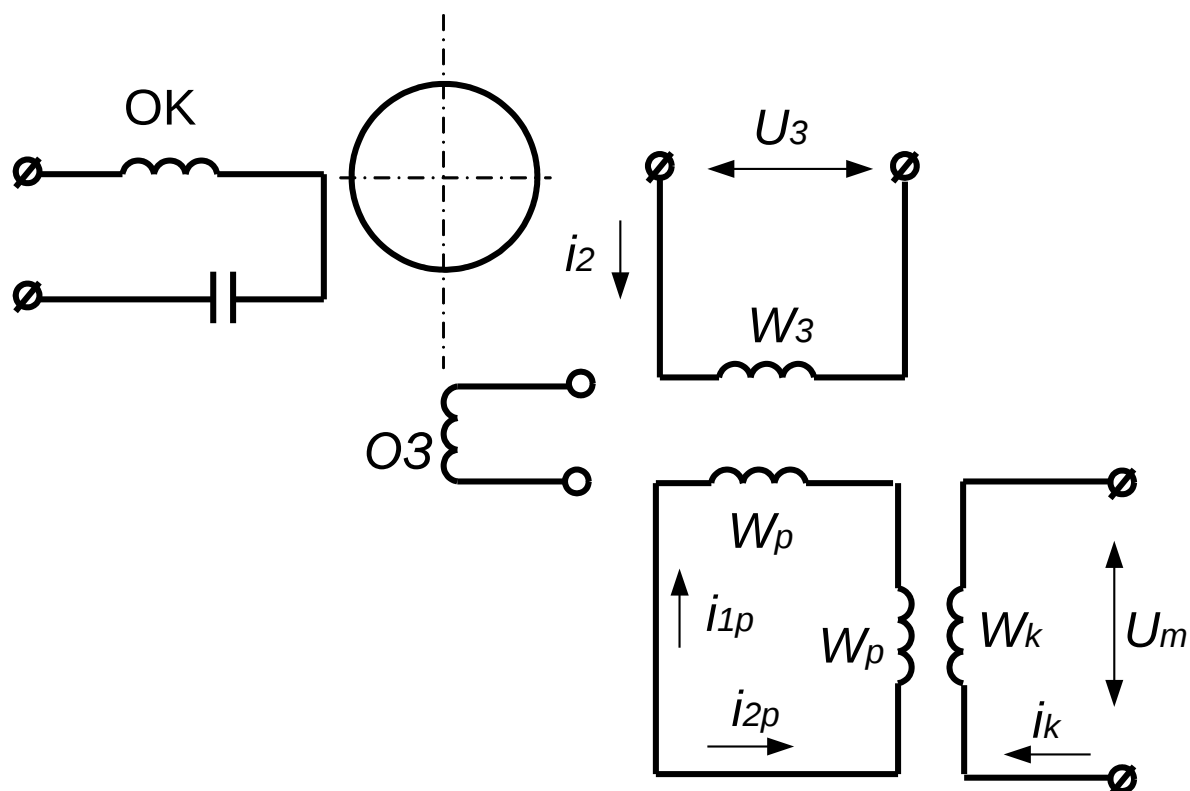


Рис. 8.7. Еквівалентна схема двофазного двигуна

Розв'язуючи наведені рівняння відносно i_{1p} , i_{2p} , i_3 , i_k і підставляючи в рівняння

$$M_{об} = M(i_{1p}i_k - i_{2p}i_3),$$

отримуємо

$$M_{об} = \frac{M^2 \omega U_3}{R_p R_c^2} \left(U_k - \frac{U_3}{2\omega} n \right) + \frac{M^2 U_3^2}{2R_p R_c^2} n \cos 2\omega t.$$

Ротор двигуна через свою інерційність не реагує на коливання обертового моменту подвоєної несучої частоти, тому

$$M_{об} = \frac{M^2 \omega U_3}{R_p R_c^2} \left(U_k - \frac{U_3}{2\omega} n \right).$$

Вираз $M_{об}$ подібний виразу, знайденому для двигуна постійного струму. На основі цього виразу робота двигуна змінного струму може бути описана рівнянням:

$$(Tp + 1)n = k_1 U_k - k_c M_c,$$

в якому

$$k_1 = \frac{2M^2 \omega U_3}{2R_p R_c C_T + M^2 U^2}, \quad k_c = \frac{2R_p R_c^2}{2R_p R_c^2 C_T + M^2 U_3^2},$$

$$T_1 = \frac{2JR_p R_c^2}{2R_p R_c^2 + M^2 U_3^2}, \quad M = \frac{w_p w_c}{R_m},$$

де C_T – коефіцієнт сил в'язкого тертя; w_p – число витків обмотки ротора; w_c – число витків обмоток керування та збудження статора R_m – магнітний опір.

Контрольні питання до практичного заняття 8

1. Загальна характеристики мікродвигунів змінного струму.
2. Маркування мікродвигунів змінного струму.
3. Принцип дії мікродвигунів змінного струму.
4. Схема однофазного асинхронного двигуна та його механічна характеристика.
5. Момент асинхронного двигуна і його механічна характеристика.
6. Фазозсувні елементи мікродвигунів змінного струму.
7. Схема двофазного асинхронного двигуна та його механічна характеристика.
8. Амплітудне та фазове керування двофазного асинхронного двигуна.
9. Механічні характеристики виконавчого асинхронного мікродвигуна з амплітудним та фазовим керуванням.
10. Рівняння руху двофазного двигуна.

Заняття 9

АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета практичного заняття 9 - вивчити основні теоретичні відомості щодо контролерів та мікроконтролерів автоматизованих систем.

Мікроконтролери

Особливістю побудови сучасних технічних систем, в тому числі мехатронних, є широка автоматизація процесів, контролю їх стану і керування їх станом за допомогою, так званих контролерів (пристроїв керування). Саме для створення подібних пристроїв використовується у даний час більша частина електронної продукції, що випускається. З метою скорочення витрат апаратури при побудові контролерів і зниження їх вартості виробляються однокристальні мікроконтролери (МК або ОМК, MCU - Microcontroller Unit), виконані у вигляді окремих великих інтегральних схем (BIC) [7].

Якщо персональні комп'ютери орієнтовані на користувача, то мікроконтролери - на об'єкт керування. На відміну від мікропроцесорів МК включають всі пристрої, необхідні для реалізації цифрових систем керування мінімальної конфігурації: процесор, запам'ятовуючий пристрій даних, запам'ятовуючий пристрій команд, внутрішній генератор тактових сигналів, а також програмовано інтегральну схему для зв'язку із зовнішнім середовищем. МК дозволяють домогтися невеликих габаритів пристроїв, малої споживаної потужності, а також можливості швидкої модифікації алгоритмів роботи.

Найбільшу спеціалізацію і різноманітність функцій мають мікроконтролери, які використовуються у вбудованих системах керування, в тому числі у побутових приладах. Загальна кількість типів кристалів з різними системами команд перевищує 500. В даний час найпоширенішими і доступними (хоча і не єдиними) є мікроконтролери

сімейств PIC (фірма Microchip) і AVR (фірма Atmel) [7].

Спектр застосування МК надзвичайно широкий. У наші дні на їх базі створюють інтелектуальні датчики, системи керування електродвигунами, промислові роботи, мікро-АТС, автовідповідачі, мобільні телефони, зарядні пристрої, факси, модеми, пейджери, таймери, системи сигналізації, вимірювальні прилади, лічильники води, газу та електроенергії, дозиметри, прилади сигналізації, системи керування запаленням і уприскуванням палива, приладові панелі і радарні детектори, регулятори температури, вологості, тиску та ін., схеми керування принтерами і плоттерами, мережеві контролери, сканери, схеми керування аудіо- та відеосистемами, системи синтезу мовних повідомлень, відеоігри, системи дистанційного керування, касові апарати та ін [7] .

Швидкий розвиток і поширення МК обумовлено їх універсальністю і низькою вартістю. Сучасні мікроконтролери володіють всіма ресурсами для вирішення завдань керування і при цьому виробляються у такому розмаїтті, що можуть задовольнити практично будь-які потреби. Зараз саме вони є засобом реалізації блочного підходу до побудови пристроїв електронної техніки.

Пристроями введення в мікроконтролери є перетворювачі інформації, а саме датчики, встановлені на об'єкті керування. Датчики перетворюють неелектричні величини в електричні сигнали. До складу мікроконтролерів зазвичай входять перетворювачі аналогових сигналів у цифровий код - аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) [7].

Пристроями виведення мікроконтролерів є виконавчі механізми об'єктів, як правило, це - електронна система керування електричними проводами. Для сполучення виходу МК з системою приводу до складу мікроконтролерів, зазвичай, входять перетворювачі цифрового коду в аналогові сигнали - цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) [7].

Мікроконтролери зазвичай працюють у реальному масштабі часу і

виконують обмежений набір програм, що повторюються у часі. На відміну від ПК мікроконтролери не потребують великих обчислювальних ресурсів (пам'яті команд і даних), причому алгоритми перетворення у програмах МК прості і зводяться до арифметичних і логічних операцій. Кожна команда мікроконтролерів, як правило, це - програма, написана на мові команд МП.

Найпростіший мікроконтролер складається з однієї БІС, на якій розміщуються всі пристрої цифрового ЕОМ і перетворювачі інформації. Більш складні багатоплатні конструкції мікроконтролерів, як правило, містять універсальний МП.

Цифрові сигнальні процесори

Цифрові сигнальні процесори (Digital Signal Processor - DSP) є різновидом мікропроцесорів і призначені для обробки в реальному часі цифрових потоків даних, утворених у результаті оцифровування аналогових сигналів. Сучасні DSP здатні проводити обчислення з «плаваючою» точкою над операндами довжиною до 40 розрядів [7].

Оскільки відмінною рисою задач цифрової обробки сигналів є потоковий характер обробки великих обсягів даних у реальному режимі часу, то основними вимогами до DSP, є висока продуктивність і забезпечення можливості інтенсивного обміну даними з зовнішніми пристроями.

Відповідність цим вимогам у даний час досягається завдяки наступним особливостям:

- застосування RISC-архітектури;
- великої розрядності;
- апаратної підтримки програмних циклів і буферів;
- можливості множинного доступу до пам'яті;
- наявності кеш-пам'яті.

Також для сигнальних процесорів характерною є наявність

апаратного множника, що дозволяє виконувати множення двох чисел за один командний такт (в універсальних мікропроцесорах множення зазвичай реалізується як послідовність операцій зсуву і складання, що вимагає декількох тактів). Основними виробниками DSP є фірми: Texas Instruments, Lucent Technologies (більше 50% ринку), Analog Devices, Motorola [7].

Багато сучасних DSP підтримують обчислення, що йдуть в кілька потоків. Це досягається шляхом реалізації декількох ідентичних процесорних ядер на одному кристалі. Таким чином, можна істотно підвищити продуктивність DSP, не підвищуючи тактової частоти, за рахунок розпаралелювання процесу обробки сигналів (наприклад, обробка різними ядрами окремих каналів зв'язку) [7].

DSP є різновидом мікропроцесорів, тому для них існує два типи архітектури - неймановська і гарвардська. Відзначимо, що перші DSP будувалися з неймановською архітектурою, проте з часом вони були практично повністю витіснені DSP на основі гарвардської архітектури та її модифікацій. Головна перевага гарвардської архітектури в порівнянні з неймановською полягає в підвищенні продуктивності за рахунок можливості пересилати команди і дані одночасно з фізично розділених пам'яті програм і пам'яті даних по власних лініях зв'язку з АЛП [7].

Інтеграція мехатронних модулів

Конструкція сучасних мехатронних систем заснована на модульних принципах і технологіях. Мехатронні модулі (ММ) служать у якості конструктивної основи при компонуванні багатовимірних мехатронних машин і комплексів.

Мехатронний модуль - це функціонально і конструктивно самостійний виріб для реалізації рухів з взаємопроникненням і синергетичною апаратно-програмною інтеграцією складових його

елементів, що мають різну фізичну природу.

До елементів різної фізичної природи відносять механічні (перетворювачі руху, трансмісії, ланки), електротехнічні (двигуни, гальма, муфти), електронні (електронні блоки і мікропроцесори) і інформаційні (датчики інформації) елементи. Класифікація мехатронних модулів за конструктивними ознаками представлена на рис. 5.1.

Розглянемо більш докладно мехатронні модулі, в залежності від рівня їх інтеграції.

Модулі руху

Модуль руху (МР) - конструктивно і функціонально самостійний виріб, що включає у себе механічну (гідравлічну, пневматичну) і електротехнічну частини, який можна використовувати індивідуально і в різних комбінаціях з іншими модулями.

Головною відмінністю МР від загальнопромислового приводу є використання валу двигуна в якості одного з елементів механічного перетворювача руху. Прикладами МР є мотор-редуктори, мотор-колесо, мотор-барабан, електрошпинделі.

У 1927 р фірмою «Бауер» була розроблена принципово нова конструкція - мотор-редуктор, що об'єднала в один компактний конструкційний модуль електродвигун і механічний перетворювач руху (редуктор) і отримала в даний час широке поширення. З тих пір з'явилася величезна гамма різних мотор-редукторів для різних умов застосування, які дозволяють знайти оптимальне рішення у кожному конкретному випадку [7].

Конструктивне об'єднання електродвигуна і перетворювача руху в єдиний компактний електропривод - мотор-редуктор має ряд переваг у порівнянні із застарілою системою з'єднання електродвигуна і перетворювача руху через муфту. Це і значне скорочення габаритних

розмірів, суттєве зменшення кількості приєднувальних деталей, і витрат на установку, налагодження та запуск. Таким чином, мотор-редуктор є в даний час одним з найбільш поширених видів електроприводу. Мотор-редуктори при необхідності постачають фотоімпульсними датчиками, резольверами і гальмами.

Мотор-редуктор (рис. 9.1) складається з двох основних елементів: електродвигуна M і перетворювача руху (редуктора) 2, що має стикувальну поверхню 3 з отворами для кріплення до неї електродвигуна гвинтами і болтами 4. При об'єднанні електродвигуна і редуктора в єдиний конструктивний модуль вал 5 електродвигуна вставляють у вхідний порожнистий вал 6 редуктора і закріплюють шпонкою 7 [7].

У мотор-редукторах як електродвигунах найбільш часто використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і регульованим перетворювачем частоти обертання валу, однофазні двигуни і двигуни постійного струму, а також крокові двигуни. Як механічні перетворювачі руху використовують зубчасті циліндричні і конічні черв'ячні, планетарні, хвильові, гвинтові, прецизійні шарико- і кулькові передачі з короткими і довгими різьбовими роликами.

ВАТ «Електропривод» розробляє і виготовляє, електромеханізми обертального і поступального руху, які відрізняються найменшими масогабаритними показниками і високим ступенем надійності, призначені для авіаційної техніки, атомних електростанцій, нафтогазового комплексу та інших галузей промисловості.

Електромеханізми за типом руху вихідної ланки діляться на дві групи: з обертовим рухом вихідного валу і поступальним рухом вихідного штока.

Серед однодвигунних електромеханізмів загального застосування розглянемо електромеханізм МРС-1, призначений для регулювання по зросту сидіння катапульт крісел льотчиків. Вона використовує

вентильний електродвигун потужністю 50 Вт з вбудованим малогабаритним модулем керування.

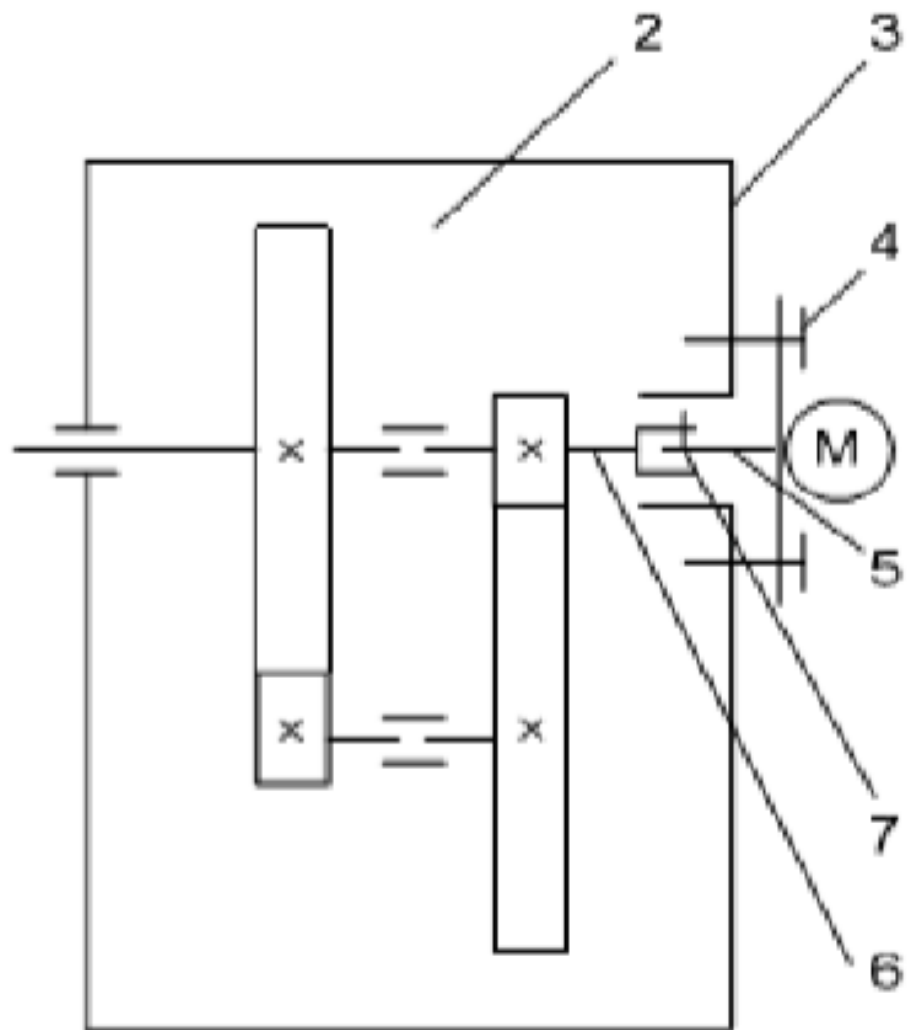


Рис. 9.1. Циліндричний мотор-редуктор [7]

Основні технічні характеристики електромеханізму [7]:

- напруга живлення постійного струму - 27 В;
- навантажувальний протидіючий момент - 5,9 Нм;
- частота обертання вихідного валу - 60 об / хв;
- маса - 2 кг;
- режим роботи - повторно-короткочасний.

Для приводу наземної запірно-регулюючої арматури розроблені електромеханізми MB10Д1,5 і MB25ТД1,5 з електроживленням від

промислової 3-х фазної мережі.

Електромеханізми мають вбудовані регульовані кінцеві вимикачі і сигналізацію крайніх положень вихідного валу, захист від перевантажень з сигналізацією, візуальну сигналізацію поточного становища вихідного валу, вбудований потенціометричний датчик зворотного зв'язку і безпечний ручний привід для повороту вихідного валу у знеструмленому стані електромеханізму. Основні технічні характеристики електромеханізму MB25TD1,5 [7]:

- напруга живлення, 220/380 В, частота 50 Гц;
- номінальний навантажувальний момент на валу - 250 Нм;
- момент спрацьовування муфти обмеження моменту навантаження - 320-500 Нм;
- діапазон регулювання кута повороту вихідного валу, 36-180 град;
- частота обертання при номінальному навантажувальному моменті - 1,5 об / хв;
- маса - 10 кг;
- габарити - 245 x 248 x 270 мм;
- діапазон робочої температури -60 ... + 50 ° С.

Мехатронні модулі руху

Мехатронний модуль руху (ММР) - конструктивно і функціонально самостійний виріб, що включає в себе механічну (гідравлічну, пневматичну), електротехнічну, електронну та інформаційну частини, який можна використовувати індивідуально і в різних комбінаціях з іншими модулями. На відміну від модулів руху (МР) у мехатронних модулях руху (ММР) з'явилися електронні та інформаційні пристрої.

Мехатронні модулі руху є базовими функціональними пристроями, з яких можна компонувати складні мехатронні системи.

Приклади мехатронних модулів руху: мехатронні модулі руху на основі електродвигунів кутового і лінійного руху і різних перетворювачів

руху (гвинтових, черв'ячних, планетарних і хвильових), безредукторні мехатронні модулі руху, безредукторні поворотні столи.

Мехатронний модуль руху складається з наступних основних частин.

Електродвигун - перетворювач електричної енергії в механічну.

Механічний перетворювач - пристрій, що перетворює параметри руху двигуна в необхідні параметри руху вихідної ланки (може бути відсутнім).

До складу механічного перетворювача входять [7]:

- перетворювач руху (передача) - механізм, призначений для перетворення одного виду руху в інший, узгодження швидкостей і моментів, що обертають двигун і вихідну ланку мехатронного модуля;

- гальмівний пристрій - пристрій, призначений для зменшення швидкості рухомої ланки, зупинки і утримання її у нерухомому стані (може бути відсутнім);

- люфтовибираючий механізм - пристрій, призначений для вибірки зазору (мертвого ходу) у деяких видах перетворювачів руху (може бути відсутнім);

- направляючі - пристрої, що забезпечують заданий відносний рух вихідної ланки мехатронного модуля (може бути відсутнім).

Інформаційний пристрій - пристрій, що перетворює контрольовану величину в сигнал, зручний для вимірювання, передачі, перетворення, зберігання і реєстрації, а, також для впливу ним на процеси керування.

На рис. 9.2. показана схема мехатронного поворотного столу, призначеного для позиціонування або обертання за заданою програмою закріпленої на планшайбі деталі для проведення вимірювальних і розмірочних операцій або для обробки деталі на металорізальних верстатах свердлильно-фрезерно-розточної групи.

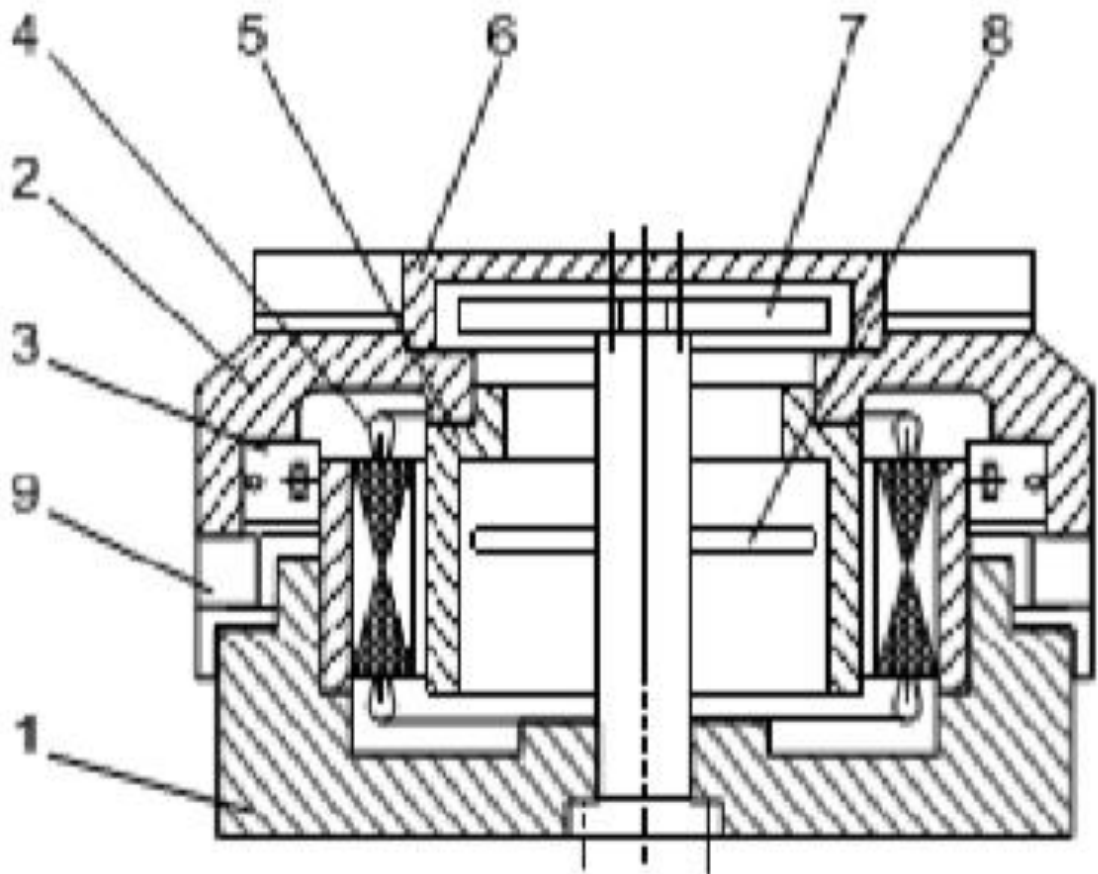


Рис. 9.2. Схема мехатронного поворотного столу [7]

Мехатронний модуль складається з підставки 1 і власне поворотного столу 2, що спирається на упорні підшипники 3, вбудованого безконтактного трифазного електродвигуна 4, ротор 5 якого скріплений з планшайбою 6, датчика 7 положення, датчика 8 швидкості і гідрогальмами 9, що забезпечує фіксацію планшайби у потрібному положенні. Безредукторне поєднання ротора електродвигуна і планшайби дозволяє повністю виключити люфт і відповідно збільшити точність позиціонування столу і розширити його технологічні можливості. При цьому спрощується конструкція столу, зменшується число деталей, підвищується жорсткість.

Функціональна схема мехатронного поворотного столу представлена на рис. 9.3.

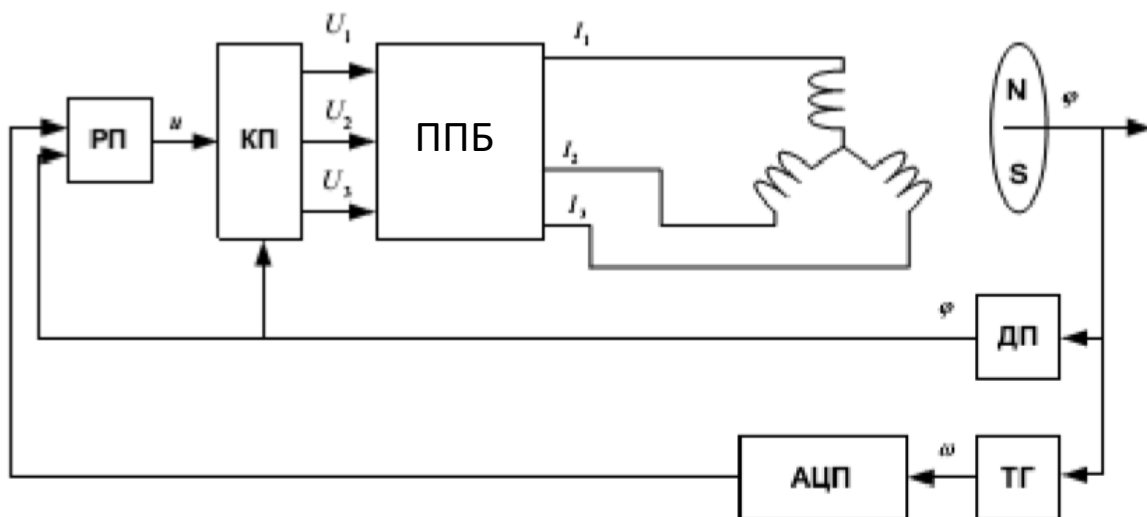


Рис. 9.3. Функціональна схема мехатронного поворотного столу [7]

ППБ - підсилювально-перетворювальний блок;

КП - координатний перетворювач; РП - регулятор положення

Стіл виконаний на основі трифазного синхронного двигуна. На статорі розташовані обмотки, а на роторі - постійні магніти. Вісь ротора пов'язана з датчиком положення (ДП), що визначає кут повороту ротора φ . Додатково мехатронний поворотний стіл обладнаний: датчиками струму (в кожній фазі обмотки статора), регуляторами фазових струмів, підсилювачем, тахогенератором (ТГ) і аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП). Датчики струму, регулятори і підсилювач об'єднані в єдиний підсилювально-перетворювальний блок (ППБ).

Сигнал з ДП подається на вхід координатного перетворювача (КП), на другий вхід якого з регулятора положення (РП) надходить модельований сигнал керування u . Мікропроцесорний КП обчислює фазні напруги U_1 , U_2 і U_3 , мінливі за синусоїдальним законом у функції електричного кута $\varphi_e = p \varphi$ (p - число пар полюсів) і зсунуті відносно один одного на 120 електричних градусів. Ці напруги посилюються за потужністю в ППБ і прикладаються до обмоток статора. Змінні струми статора I_1, I_2 і I_3 породжують пульсуючі магнітні поля, суперпозицією яких є обертове магнітне поле статора. В результаті взаємодії магнітних полів статора і ротора виникає крутний

момент, що приводить ротор у рух. При подачі постійного вхідного сигналу u розгін двигуна здійснюється до тих пір, поки величини протидії ЕРС e_1 , e_2 і e_3 не врівноважує фазові напруги U_1 , U_2 і U_3 .

Контрольні питання до практичного заняття 9

1. Промислові комп'ютери.
2. Програмовані логічні контролери.
3. Робочі режими контролерів.
4. Стандартизація контролерів.
5. Мікроконтролери автоматичних і автоматизованих систем.
6. Драйвери виконавчих елементів контролерів.
7. Де використовуються мікроконтролери (МК)?
8. Переваги сучасних МК.
9. Основні елементи МК.
10. Цифрові сигнальні процесори.
11. Інтеграція мехатронних модулів.
12. Модулі руху МК.
13. Циліндричний мотор-редуктор.
14. Мехатронні модулі руху.
15. Схема мехатронного поворотного столу.
16. Функціональна схема мехатронного поворотного столу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безвесільна О.М. Технічні засоби автоматизації (Перетворювачі фізичних величин): Підручник. – Київ, 2019.-809с.
2. Безвесільна О.М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2008. –704 с.
3. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Технологічні вимірювання та прилади: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2006. –560 с.
4. Безвесільна О. М. Перетворювачі механічних величин в електричні. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійної програми «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / О. М. Безвесільна, Ю. В. Киричук, Н. М. Назаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4.23 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 156 с. – Назва з екрана. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55864>
5. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; укладачі: О. М. Безвесільна, Т. О. Толочко. – Електронні текстові дані (1 файл: 6.4 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 332 с. – Назва з екрана. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55812>.
6. Безвесільна О.М, Ключко Т.Р., Заморський О.В.ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус) розміщений на сайті кафедри - https://asnk.kpi.ua/docs/syllabus/Syllabus_TZA.pdf
7. Прецизійні smart мехатронні комплекси вимірювання параметрів руху. Вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів: навч. посібник. – К. : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»; Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 300 с.