

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **Комп'ютеризований прилад для вимірювання напруги
постійного струму**

Виконав: студент 2 курсу, групи МТ-1м
Спеціальності: 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

Шрубович О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри М та ІВТ
кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: кандидат технічних наук, доцент
Добржанський О.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної техніки
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент _____ Шрубовичу Олександрю Степановичу

1. Тема роботи: Комп'ютеризований прилад для вимірювання напруги постійного струму

Керівник роботи: доцент кафедри М та ІВТ кандидат технічних наук, доцент
Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 09 » листопада 2023 р. № 648/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 17 » грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи система повинна забезпечити вимір напруги постійного струму в діапазоні 1мкВ – 2В, визначення напруги, вивід вимірюваних значень напруги на екран, вимоги по точності до результатів вимірювань – похибка не повина бути більше 0,2%, час вимірювання не більше 0,01 с., напруга живлення 220В, частота живлення 50Гц.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) аналітичний огляд та аналіз методів вимірювання постійного струму, розробка структури комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму, розробка принципової схеми, розробка програмно-алгоритмічного та метрологічного забезпечення комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги.

5. Перелік графічного матеріалу
структурна схема, принципова схема, блок-схема алгоритму.

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-4	Чепюк Л. О.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз джерел інформації	01.10.23 – 05.10.23	Виконано
2	Формулювання завдань кваліф. роботи	06.10.23 – 10.10.23	Виконано
3	Розробка методу вимірювань напруги постійного струму	25.10.23 – 09.11.23	Виконано
4	Розробка структурної схеми	11.10.23 – 15.10.23	Виконано
5	Розробка принципової схеми	16.10.23 – 24.10.22	Виконано
6	Розробка алгоритму та програми обробки вим інф	10.11.23 – 22.11.23	Виконано
7	Розрахунок метрологічних характеристик	23.11.23 – 03.12.23	Виконано
8.	Написання висновків	04.12.23 – 10.12.23	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	11.12.23 – 17.12.23	Виконано

Студент

Шрубович О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Чепюк Л. О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризований прилад для вимірювання напруги постійного струму.

У першому розділі проведено огляд існуючих рішень та класифікацію методів вимірювань, з фокусом на напрузі постійного струму. Робота також включає опис об'єкта вимірювання та висновки до цього розділу.

Другий розділ розглядає розробку структури комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму. Розглянуті структурні схеми вимірювальних пристроїв, їх характеристики, та представлена математична модель вимірювального каналу. Розділ завершується висновками.

Третій розділ присвячено розробці принципової схеми, зокрема вибору мікроконтролера, схеми живлення та світлодіодної матриці. Робота містить висновки до цього розділу.

У четвертому розділі розглядається розробка програмно-алгоритмічного та метрологічного забезпечення комп'ютеризованого приладу. Визначено алгоритм роботи та програму приладу, а також розглянуто вимірювальні параметри напруги та їх класифікацію. Проведений розрахунок похибок вимірювання, підкріплений висновками.

У заключному розділі подані основні висновки дослідження та розроблені рекомендації для подальших наукових досліджень у галузі вимірювання постійного струму.

Ключові слова: вимірювання напруги, постійний струм, мікроконтролер, вольтметр, похибка вимірювання.

ABSTRACT

In this qualification work, a computerized device for measuring direct current voltage has been developed.

The first section provides an overview of existing solutions and a classification of measurement methods, focusing on direct current voltage. The work also includes a description of the measurement object and conclusions for this section.

The second section examines the development of the structure of a computerized device for measuring direct current voltage. Structural schemes of measuring devices, their characteristics, and a mathematical model of the measuring channel are considered. The section concludes with conclusions.

The third section is dedicated to the development of the schematic diagram, including the selection of a microcontroller, power supply scheme, and LED matrix. The work contains conclusions for this section.

In the fourth section, the development of software-algorithmic and metrological support for the computerized device is considered. The algorithm of operation and the program of the device are defined, and the measurement parameters of voltage and their classification are studied. Error calculation is conducted, supported by conclusions.

The final section presents the main conclusions of the research and provides recommendations for further scientific studies in the field of direct current measurement.

Keywords: voltage measurement, direct current, microcontroller, voltmeter, measurement error.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	11
1.1. Огляд існуючих рішень з вимірювання напруги постійного струму.....	11
1.2. Опис постійного струму об'єкта вимірювання	28
1.3. Класифікація та методи вимірювань	29
1.4. Висновки до розділу	43
2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	45
2.1. Структурні схеми вимірювальних пристроїв їх статистичні та динамічні характеристики	45
2.2. Структурна схема комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму	55
2.3. Математична модель вимірювального каналу	61
2.4. Висновки до розділу	64
3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	65
3.1. Вибір мікроконтролера	65
3.2. Вибір схеми та блока живлення	66
3.3. Світлодіодна матриця.....	69
3.4. Висновки до розділу	71
4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО -АЛГОРИТМІЧНОГО ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ.....	73
4.1. Розробка алгоритму роботи комп'ютеризованого приладу.....	73
4.2. Програма роботи комп'ютеризованого приладу.....	74

4.3. Вимірювальні параметри напруги та класифікація приладів.....	76
4.4.Розрахунок похибок вимірювання	84
4.5. Висновки до розділу	91
ВИСНОВКИ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94
ДОДАТКИ	96

ВСТУП

Актуальність теми. Тема вимірювання напруги постійного струму залишається актуальною і важливою в сучасній науковій та інженерній галузі. Точні вимірювання напруги відіграють ключову роль у різних галузях, таких як електроенергетика, електроніка, автоматизація, медична техніка та інші.

Якість вимірювання напруги постійного струму залежить від низки чинників, які є важливими для забезпечення точності та достовірності результатів вимірювань. Таких як точності використовуваних вимірювальних пристроїв. Це включає в себе як самі вимірювальні прилади, так і використовувані для калібрування стандарти, зовнішні умови, температури, вологості, електромагнітних перешкод, як можуть впливати на якість вимірювань. Роздільна здатність, частотні характеристики, динамічний діапазон та інші параметри, які визначають здатність вимірювальних пристроїв реєструвати зміни в напрузі. Процес калібрування вимірювальних приладів і дотримання стандартів метрології. Також якість вимірювань залежить від методів обробки та аналізу даних, всі вони мають вирішальне значення для забезпечення точності результатів вимірювань

Тому при розробці приладу для вимірювання напруги постійного струму треба враховувати важливість її безперервної роботи протягом досить тривалого часу.

В даній роботі розроблено та досліджено нову систему мілівольтметр, що відповідає сучасним вимогам до вимірювальної і іспитової техніки, але в той же час цілком зберігає колишню функціональність і особливості роботи.

Метою даної роботи є розробка комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідження ринку вольтметрів;
- вибір мікроконтролера і розробка на його основі комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму;

- розробка програмного забезпечення;
- розробка метрологічного забезпечення шляхом моделювання метрологічних характеристик;

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання напруги при постійному струмі.

Предмет дослідження – комп'ютеризований прилад для вимірювання напруги постійного струму.

Методи дослідження базуються на аналітичному виведенні рівнянь математичної моделі вимірювального каналу, використанні методів ЦОС, використанні обчислювальних блоків у вимірювальному каналі, застосуванні методів комп'ютерного моделювання з наступною статистичною обробкою отриманих результатів.

Наукова новизна даної роботи полягає в:

- 1) Сформульовано перелік фіз величин, вимірювання яких дозволяє покращити точність;
- 2) Удосконалено структурну схему
- 3) Удосконалено програмно алгоритмічні методи
- 4) Удосконалено методи вимірювань
- 5) Отримано математичну модель об'єкту вимірювання вимірювального, каналу

Практична цінність даної роботи полягає в:

- 1) вибрано вимірювальний засіб та елементну базу системи вимірювання напруги постійного струму;
- 2) розраховано метрологічні характеристики системи вимірювання напруги постійного струму;
- 3) пропонується впровадити нову систему вимірювання напруги постійного струму.

Структура та обсяг роботи. Дана робота складається з анотації, вступу, 3 основних розділів, висновків, переліку використаних літературних

джерел та додатку. Робота викладена на 103 сторінках основного тексту і містить 24 рисунки та 1 таблицю.

Публікації. За темою кваліфікаційної магістерської роботи було опубліковано 1 теза науково-практичної конференції:

АНАЛІЗ ПОХИБОК ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1. Огляд існуючих рішень з вимірювання напруги постійного струму

Обслуговування та вдосконалення приладів у сучасних умовах неможливе без застосування радіовимірювальних приладів, таких як амперметри, омметри та вольтметри. У цьому контексті електронні вольтметри є найбільшою групою радіометричних приладів, володіючи значущими перевагами в ряді аспектів.

Електронні вольтметри відрізняються високою стійкістю до низьких і високих частот, високою чутливістю та енергоефективністю. Завдяки цим характеристикам вони придатні для точного вимірювання ефективного значення сигналу, середньоквадратичного імпульсу змінного струму та імпульсних сигналів, що тривають всього кілька наносекунд.

Електронний вольтметр є ключовим приладом, оскільки його вимірювальні показники прямо відповідають значенням напруги, яка піддається вимірюванню. Напруга подається на входи високоомних блоків електронних пристроїв, що призводить до досягнення великої вхідної опору електронних вольтметрів та їх здатності стійко переносити значні перевантаження.

За типом вимірюваної напруги електронні вольтметри можливо поділити на такі типи.

Вольтметри змінної напруги - ключовий клас вимірювальних приладів для кількісного аналізу змінної напруги в електричних системах. Їхні особливості включають широкий діапазон робочих частот, високу чутливість до слабких сигналів, а також можливість роботи з різними формами сигналів, включаючи синусоїдальні, прямокутні та імпульсні.

Вольтметри цього типу важливі для аналізу динаміки змін напруги та вимірювань фазового зсуву між напругою та струмом в електричних лініях.

Завдяки їх високоточним характеристикам та можливостям адаптації до різноманітних умов, вони стають невід'ємним елементом в електротехніці та електроенергетиці.

Вольтметри постійної напруги – це важливі засоби вимірювання, розроблені для аналізу та точного вимірювання постійних електричних потенціалів. Їх використання знаходить широке застосування у наукових, технічних та інженерних областях, де важливо забезпечити стійке та надійне вимірювання сталого напругового рівня.

Однією з визначальних характеристик вольметрів постійної напруги є їхній високий рівень точності. Ця особливість обумовлена потребою у вимірюваннях постійного струму, де стабільність та невідхильний потенціал визначаються як ключові параметри. Висока точність вимірювань важлива для таких застосувань, як калібрування приладів, а також для забезпечення точності роботи електронних пристроїв.

Універсальні вольтметри - ключові вимірювальні прилади з високою функціональністю. Здатні вимірювати постійні та змінні напруги, а також інші параметри, включаючи опір, струм та ємність. Вони гнучкі в режимах вимірювань, таких як ефективне значення, пікове значення та фазовий зсув, що робить їх універсальними для складних електричних систем.

Вольтметри імпульсної напруги - вимірюють та аналізують напругу в системах з імпульсними сигналами. Вони володіють високою швидкістю відгуку та електричною чутливістю для точного вимірювання короткочасних імпульсів. Ці властивості роблять їх важливими для застосувань в електроніці, телекомунікаціях та радіоінженерії, де необхідно контролювати імпульсні напруги для забезпечення нормальної роботи систем та пристроїв.

Селективні вольтметри - призначені для точного вимірювання напруги в обмежених частотних діапазонах, ідеально підходять для радіочастот та мікрохвильового діапазонів. Забезпечують високу чутливість та точність, використовуються для аналізу напругових сигналів на конкретних частотах. Це робить їх ефективними вимірювальними засобами в електроніці та засобами контролю якості сигналів у радіоінженерії.

Електронні вольтметри бувають аналоговими та дискретними. В аналогового вольтметра, виміряна напруга перетворюється на пропорційне значення постійного струму, який вимірюється мікро амперметром магнітоелектричним, шкала якого градується в одиницях напруги (мікрровольти, мілівольти, вольти). У дискретному вольтметрі виміряна напруга перетворює кількість витків, що перетворює аналогове показання в інший сигнал, значення якого відображається у вигляді яскравого числа на дисплеї. Дискретні і аналогові вольтметри майже завжди називають цифровими і стрілочними відповідно.

Під час вимірювання напруги методом безпосереднього оцінювання вольтметр під'єднують паралельно тій ділянці ланцюга, на якій вимірюють напругу. Для зменшення методичної похибки вимірювання власне споживання енергії вольтметра має бути малим, а його вхідний опір великим. Тому в схемах електроніки під час вимірювання в малопотужних колах зміна електромеханічних приладах обмежена (відносно невеликий вхідний опір), а переважним є використання електронних вольтметрів.

Електронні вольтметри являють собою поєднання електронного перетворювача і магнітоелектричного або цифрового вимірювального приладу.

На відміну від вольтметрів електромеханічної групи, електронні вольтметри постійного і змінного струмів мають високий вхідний опір і чутливість і мале споживання струму від вимірювального кола. Електронні, аналогові та цифрові вольтметри дають змогу проводити вимірювання в широкому діапазоні напруг і частот.

Вимірювана напруга U надходить на вхідний пристрій ВУ, що являє собою багатограничний високоомний дільник напруги на резисторах. З дільника напруги надходить на підсилювач постійного струму УПТ і далі - на стрілочний прилад V . Дільник і підсилювач постійного струму послаблюють і підсилюють відповідно напругу до значень, необхідних для нормальної роботи приладу. Одночасно підсилювач забезпечує узгодження високого опору вхідного кола вольтметра з низьким опором рамки приладу магніто-

електричної системи. Високий вхідний опір електронного вольтметра (кілька десятків Мом) дає змогу вимірювати напругу у високоомних колах без помітного споживання потужності від об'єкта вимірювання. Щоб забезпечити необхідну точність вольтметра і підсилювача постійного струму зі змінним, до електронних вольтметрів висувають жорсткі вимоги щодо лінійності амплітудної характеристики, сталості коефіцієнта посилення, температурного і тимчасового дрейфу нуля. Під час побудови електронних вольтметрів для вимірювання малих напруг ці вимоги не завжди можуть бути задоволені. Тому вольтметри постійного струму для вимірювання малих напруг виконуються за схемою.

У таких вольтметрах постійна вимірювана напруга спочатку перетворюється модулятором М на змінну, а далі посилення вимірюваного сигналу здійснюється підсилювачем змінного струму У, який має кращі метрологічні характеристики порівняно з УПТ. Випрямлена випрямлячем (детектором) В, напруга подається на стрілочний прилад V, це дає змогу одержати електронні мікровольтметри з нижньою межею виміру порядку 10-8В.

Електронні вольтметри змінного струму виконують за двома структурними схемами. У першій із цих схем вимірювана змінна напруга спочатку перетворюється в постійну детектором, а потім посилюється УПТ. У другій схемі посилення проводиться на змінному струмі і лише потім, попередньо посилений сигнал, випрямляється детектором. Ці схеми доповнюють одна одну. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Вольтметри, побудовані за першою схемою, дають змогу вимірювати напругу змінного струму в широкому частотному діапазоні (10Гц...100МГц), але не дають можливості вимірювати напругу меншу за кілька десятих часток вольта, тому що детектор випрямляє лише досить великі напруги. Друга схема дає змогу будувати більш чутливі вольтметри, нижня межа вимірювання яких становить усього лише одиниці мікровольт. Однак такі вольтметри мають менший частотний діапазон, оскільки частотний діапазон УПТ важко зробити досить широким.

Найважливішим елементом електронного вольтметра, що значною мірою визначає його метрологічні характеристики, є детектор. Напруга на виході детектора може бути пропорційною амплітудному, середньовипрямленому або середньоквадратичному значенню вимірюваної напруги. Характер цієї залежності визначає, на яке з цих значень реагує магнітоелектричний стрілочний прилад. Відповідно, розрізняють вольтметри середньовипрямлених, амплітудних і середньоквадратичних значень. Необхідно, однак, пам'ятати, що шкалу електронного вольтметра зазвичай градуують у середніх квадратичних значеннях напруги синусоїдальної форми, і це слід урахувати під час вимірювання та під час аналізу похибок, зумовлених відхиленням форми реального вимірюваного сигналу від синусоїди.

Найпростішими вольтметрами середніх значень є випрямні вольтметри, розглянуті вище на основі пасивних перетворювачів середньовипрямлених значень. Перетворювачі виконуються на напівпровідникових діодах, що працюють на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики (ВАХ).

За родом струму електронні вольтметри поділяються на вольтметри постійної напруги, змінної напруги, універсальні та імпульсні. Крім того, випускаються вольтметри з частотно-вибірковими властивостями - селективні. Електронні вольтметри постійного струму виконуються за схемою, представленою на малюнку

Зараз широко використовуються цифрові вимірювальні засоби, які мають багато переваг перед аналоговими приладами – точність і роздільна здатність широкого діапазону вимірювань, представлення результатів у цифровому форматі вимірювань.

Так як використання високоякісної електроніки завжди вимагає точності та якості, то до недоліків використання цифрового вольтметра можна віднести складність складання схем та конструкцій, високу вартість та низьку надійність. В основному ці недоліки мають зворотню дію для вольтметрів. Їх можна назвати тимчасовими, оскільки вони вже припиняються через стрімкий розвиток мікроелектроніки. І чим швидше розвивається ця наука, тим

ефективніше вся родина електронних вимірювальних пристроїв буде використовуватись.

Принцип дії ЦВ полягає в вимірюванні постійної напруги, що повільно трансформується в електричний код, який відображається на цифровому таблі. Відповідно до цього загальна структурна схема цифрового вольтметра складається з вхідного пристрою (ВхП), аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та цифрового індикатора (ЦІ).

Аналогово-цифрові перетворювачі призначені для перетворення аналогових сигналів у відповідні цифрові сигнали, тобто сигналів з безперервною шкалою значень в сигнали з дискретною шкалою значень. А звітний блок відображає значення вимірюваної величини в цифровому вигляді.

Вимірювання вольтметром в основному використовує мікросхеми інтегруючого АЦП, і розроблений блок не є винятком. Інтегровані двотактні АЦП зазвичай включають операційний підсилювач, аналогові ключі, компаратор напруги, регістр дешифратор, джерело опорної напруги, двійково-десятковий лічильник, вихідні схеми управління, джерело опорної напруги, генератор тактових імпульсів.

Вольтметри змінної напруги. Електронний вольтметр змінної напруги складається з перетворювача напруги змінного в постійний, підсилювача і магнітоелектричного індикатора. Часто на вході вольтметра встановлюють калібрований дільник напруги, таким чином збільшуючи верхню межу вимірюваної напруги. Залежно від типу перетворення показання вольтметра можуть бути пропорційними амплітуді, середньому випрямленню або середньому значенню вимірюваної напруги.

При розробці електронних вольтметрів враховують такі основні технічні вимоги:

- висока чутливість;
- широкі межі вимірюваної напруги;
- широкий діапазон робочих частот;

- високий вхідний опір і мала вхідна ємність;
- невелика помилка;
- відома залежність вимірюваної величини від розміру вимірюваної кривої напруги.

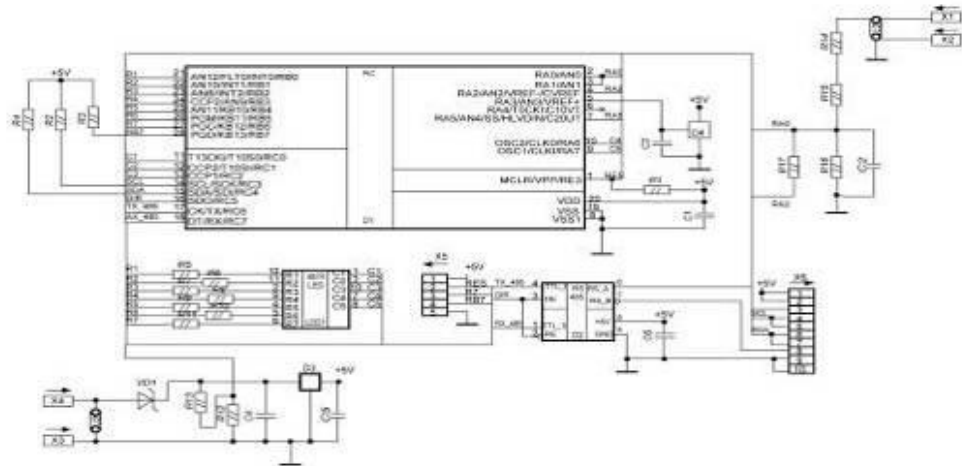


Рис. 1.1 Електронний мілівольтметр

Основною функцією цього мілівольтметра може бути використання однієї світлодіодної матриці 5x7 для індикації вимірюваної напруги. Виміряна напруга (три цифри з крапкою) відображається суцільною лінією. У цьому випадку одночасно видно лише два символи і одну десяткову кому. Значення відображається в правій частині індикатора зі швидкістю близько 1,2 секунди. Цей метод індикації не викликає труднощів з читанням.

Пристрій змонтовано на мікроконтролері PIC. Його вибір залежить від наявності достатньої кількості портів вводу-виводу для управління світлодіодним масивом LED1 без використання додаткових мікросхем, наявності вбудованого десяти розрядного АЦП і джерела опорної напруги. Для зниження енергоспоживання і спрощення схеми мікроконтролер тактується внутрішнім генератором.

Вхідний ланцюг вольтметра складається з резисторів R14-R17 і конденсатора C2 і утворює автоматичний подільник напруги зі змінним передавальним числом. Його зміна здійснюється шляхом підключення додаткового резистора R17 з портом RA2. Тобто доки виміряна напруга

нижче 10 В, порт RA2 неактивний. Коли напруга на вході вольтметра перевищує 10В, на виході RA2 встановлюється логічний нуль і паралельно R16 підключається резистор R17, що збільшує коефіцієнт вхідного дільника.

З виходу дільника подається напруга пропорційна входу лінії RA0 (вивід 2) на мікроконтролер D1.

Використання послідовного з'єднання двох резисторів R14-R15 потужністю 0,5 Вт залежить від необхідності забезпечення надійної роботи, оскільки їх максимальна робоча напруга становить 250 В. Виміряна напруга подається на контакти X1-X2. На X3-X4 - напруга живлення. В якості джерела живлення можна використовувати будь-який прилад з вихідною напругою від 7 до 24 вольт. З'єднання X5 призначене для внутрішнього схемного програмування мікроконтролерів PIC.

Вольтметр встановлений на друкованій платі з двостороннього фольгового скловолокна товщиною 1 мм. Використовуються резистори розмірами 0805 R1-R13, R16-R17 і 1206 R14, R15. Конденсатори - розміри 0805.

Найцікавішим застосуванням модуля є вольтметри для лабораторного джерела живлення або, завдяки оригінальному способу індикації, як елемент дизайну в модифікації корпусів ПК. У цьому випадку, якщо використовується кілька індикаторів, ви можете спробувати змінити світлодіодну матрицю на деяких з них на жовту або зелену матрицю світіння.

В часово імпульсних цифрових вольтметрах (ЧЦВ) з лінійно змінюваною напругою напруга, що подається на вхід цифрового вольтметра, перетворюється в пропорційний інтервал часу Δt , тривалість якого вимірюється шляхом заповнення цього інтервалу імпульсами зі стабільною частотою проходження (рахунковими імпульсами) методом порівняння вимірюваної напруги з лінійно-змінюваною напругою. Спрощена структурна схема часово імпульсного цифрового вольтметра постійного струму наведена на рисунку 1.2.

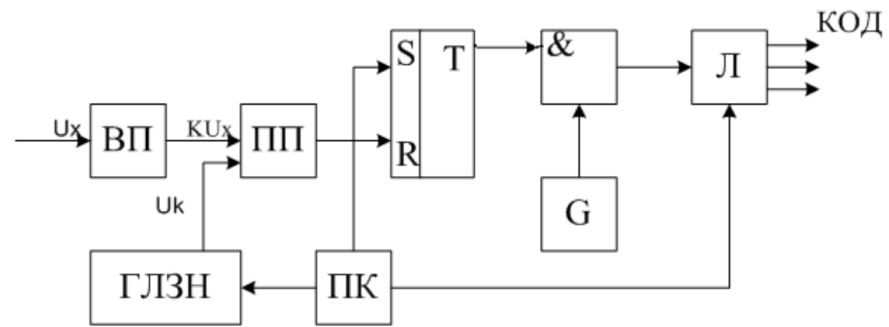


Рис. 1.2 Часово імпульсний цифровий вольтметр

Де ВП – вхідний пристрій;

ГЛЗН – генератор лінійно-змінюваної напруги;

ПП – пристрій порівняння;

ПК – пристрій керування;

G – генератор тактових імпульсів;

Л – лічильник;

& - логічний елемент «І»;

RS-T – RS-тригер.

Часові діаграми, що пояснюють принцип дії цифрового часово імпульсного вольтметра з лінійно-змінюваною напругою, наведені на рисунку 1.3.

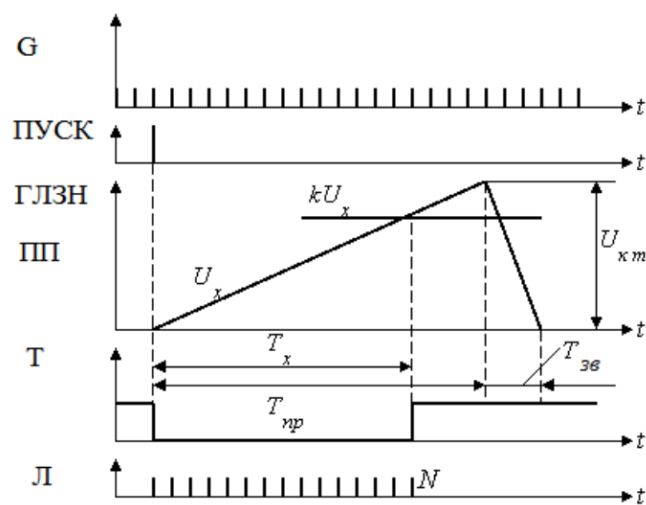


Рис. 1.3 Часова діаграма

Принцип дії схеми

Напруга постійного струму U_x подається на вхідний пристрій (ВП) і на пристрій порівняння (ПП). Після запуску на ПП подається від ГЛЗН напруга U_k . Одночасно із запуском ПП тригер встановлюється в одиничний стан і елемент “І” відчиняється для проходу імпульсу генератора G на лічильник L .

Доки виконується рівність постійної напруги (або напруги, що повільно змінюється) $U_x \cdot k_1$ і напруги, що лінійно змінюється, на виході ГЛЗН U_k , елемент “І” залишається відкритим.

Коли дана рівність перестає виконуватися, сигнал від ПП переводить тригер у стан 0, елемент “І” зачиняється. Таким чином, на лічильник надходить кількість імпульсів N .

Дана схема дозволяє вимірювати миттєве значення напруги, її перевагою є низька вартість та простота реалізації. До недоліків слід віднести низьку швидкодію, низьку завадостійкість та невисоку точність вимірювань. Основним недоліком методу часово імпульсного перетворення є його невисока завадостійкість. Шумова завада, накладена на вимірювану напругу U_x , змінює її та, отже, змінює момент появи імпульсу, що визначає тривалість 14 часу підрахунку. Тим не менш часово імпульсне перетворення постійної напруги з генератором лінійно-змінюваної напруги дозволяє створювати порівняно прості та досить точні вольтметри.

Похибки методу визначаються нелінійністю і нестабільністю лінійно-змінюваної напруги і похибкою, зумовленою нестабільністю порога спрацьовування пристрою порівняння. Основний недолік методу - неможливість усунення напруги завад. Для усунення цього недоліку на вході приладу включають фільтр, що призводить до істотного збільшення часу вимірювання. Цифрові вольтметри з ГЛЗН мають похибку, яка не перевищує 0,1 ... 0,05 %.

У цифрових вольтметрах з двотактним інтегруванням напруга перетворюється в пропорційний інтервал часу Δt шляхом двотактного інтегрування.

Структурна схема даного вольтметра і часові діаграми сигналу наведені

на рисунках 1.4 і 1.5. Дана схема дозволяє вимірювати середнє значення напруги, має такі переваги: простота реалізації, низька вартість, незалежність похибки від параметрів елементів та інтегратора, висока завадостійкість. До недоліків відноситься низька швидкодія схеми.

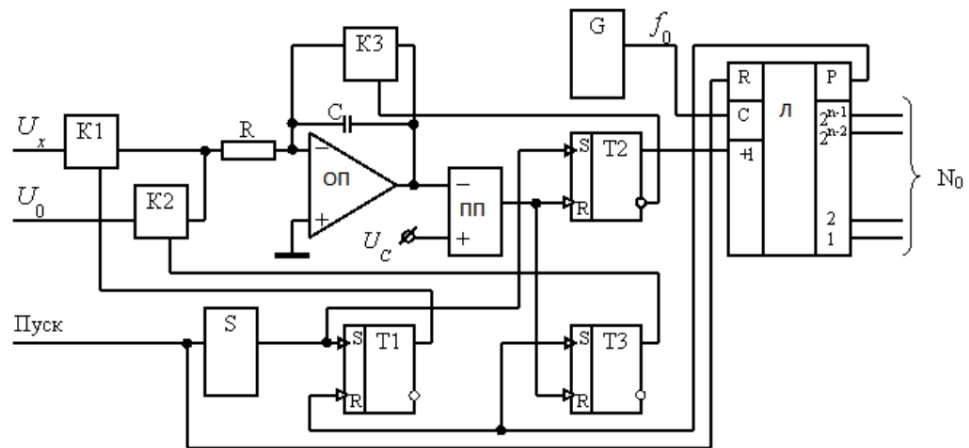


Рис. 1.4 Цифровий вольтметр з двотактним інтегруванням

де, S – одновібратор;

INT – операційний підсилювач на інтегральних мікросхемах (інтегратор);

ПП – пристрій порівняння;

K1, K2 – ключі;

Л – лічильник;

T1, T2, T3 – RS-тригери;

ОП – операційний підсилювач;

G – генератор опорної частоти.

Принци дії схеми

У початковий момент T1, T2, T3 перебувають у стані «0». Керований інверсним виходом T2 ключ K3 замкнутий, отже, вхід і вихід ОП мають однаковий потенціал. Ключі K1 і K2 розімкнуті. Рахунковий вхід Л замкнений сигналом «0» тригера T2. Тому в Л зберігається попередній результат. Сигналом ПУСК починається перший такт інтегрування. При цьому Л скидається в «0», а після затримки одновібратором S встановлюються в стан «1» T1 і T2.

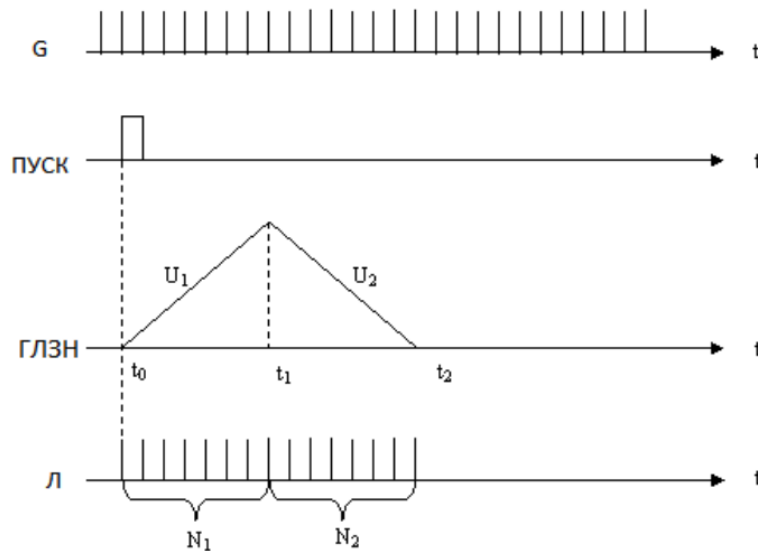


Рис. 1.5 Часова діаграма

Замикається К1, розмикається К3 і відмикається рахунковий вхід Л, який починає рахувати імпульси генератора Г. Інтегратор починає інтегрувати U_x з постійною часу RC . Час першого такту постійний і обумовлюється ступенем заглушення періодичної завади.

У момент часу t_2 $U_2 = U_c$ і на виході ПП з'явиться імпульс, яким Т2 і Т3 встановлюються в стан «0». При цьому замикається Л, розмикається К2 і замикається К3. Схема повертається в початковий стан.

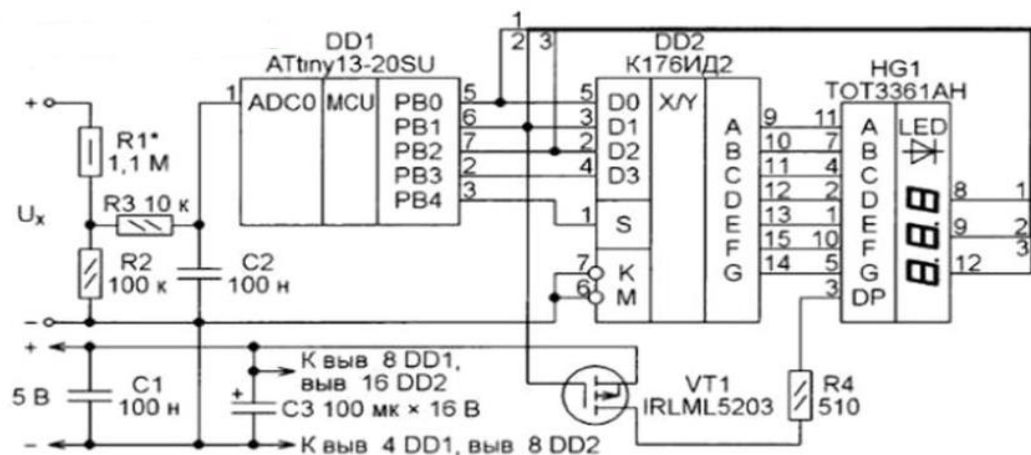


Рис. 1.6 Принципова схема вольтметра на МК ATtiny13

Мікроконтролер ATtiny13-20SU та дешифратора K176ID2 за схемою,

зображеною на рис. 1.6. Прилад вимірює постійну напругу U_x позитивної полярності від 0 до 99,9 В, відображаючи результат на три розрядному семи елементному світлодіодному індикаторі HG1 із загальними катодами розрядів.

Якщо вхідна напруга перевищує 99,9, починає блимати символ 0 у другому розряді індикатора. Інші два розряди при цьому погашені.

Вольтметр на мікроконтролері Atmega8 та на світлодіодному індикаторі FYT-3031-BSR-21 із загальним анодом, застосовують у вимірюваннях напруг блоків живлення, при контролі зарядки акумуляторів та інших пристроях.

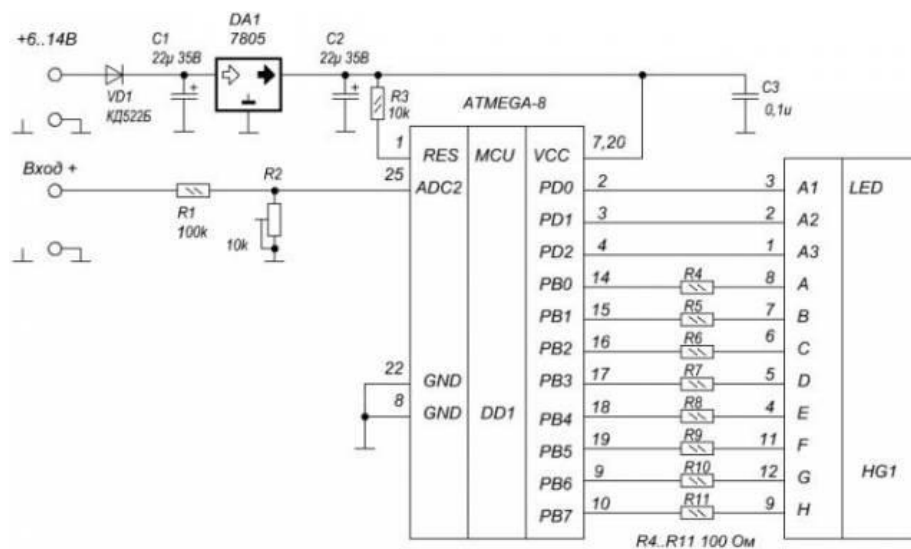


Рис. 1.7 Вольтметр на мікроконтролері Atmega8

Вхідна напруга обмежує та стабілізує мікросхему DA1 – 7805. Діод VD1 є свого роду гарантом того, що полярність не переплутана. Конденсатори C1 та C2 стабілізують роботу мікросхеми. Вимірювана напруга подається на вхід мікроконтролера через дільник напруги, R1 і R2, які розширюють діапазон вимірювання. Напруга, що отримується на вході в АЦП перетворюється на цифрове значення. Резистор R3 номіналом 10 кОм необхідний захисту мікроконтролера від випадкового скидання.

Отримане у такий спосіб цифрове значення розкладається на розряди. Виведення значення кожного розряду проводиться послідовно з допомогою динамічної індикації. Набір резисторів R4 - R11 обмежує струм у сегментах

індикатора до прийнятних значень. На висновках A1 - A3 утворюється позитивна напруга послідовно.

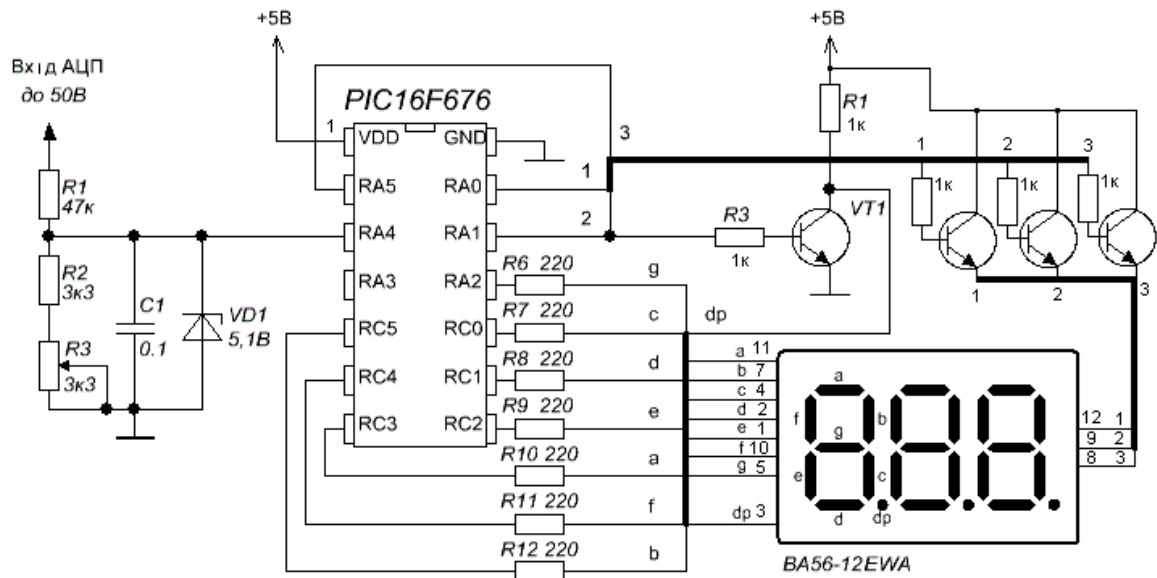


Рис. 1.8 Вольтметр на PIC16F676

На резисторах R1 і R2 зібрано дільник напруги, багатооборотний побудовний резистор R3 слугує для калібрування вольтметра. Конденсатор C1 захищає вольтметр від імпульсної перешкоди і згладжує вхідний сигнал. Стабілітрон VD1 слугує для обмеження вхідної напруги на вході мікроконтролера, щоб вхід МК не згорів у разі перевищення напруги на вході.

На транзисторі VT1 (KT3102 або SMD-варіант BC847) і резисторах R11, R12 і R13 зібрано інвертуючий елемент, який запалює крапку на індикаторі разом із другим розрядом.

У схемі застосовано індикатор із загальним анодом BA56-12GWA, який через струмообмежувальні резистори під'єднано до МК. Цей індикатор вирізняється низьким споживанням струму. У разі використання потужніших (більші сегменти або іншого кольору) індикаторів рекомендується поставити ключі на аноди.

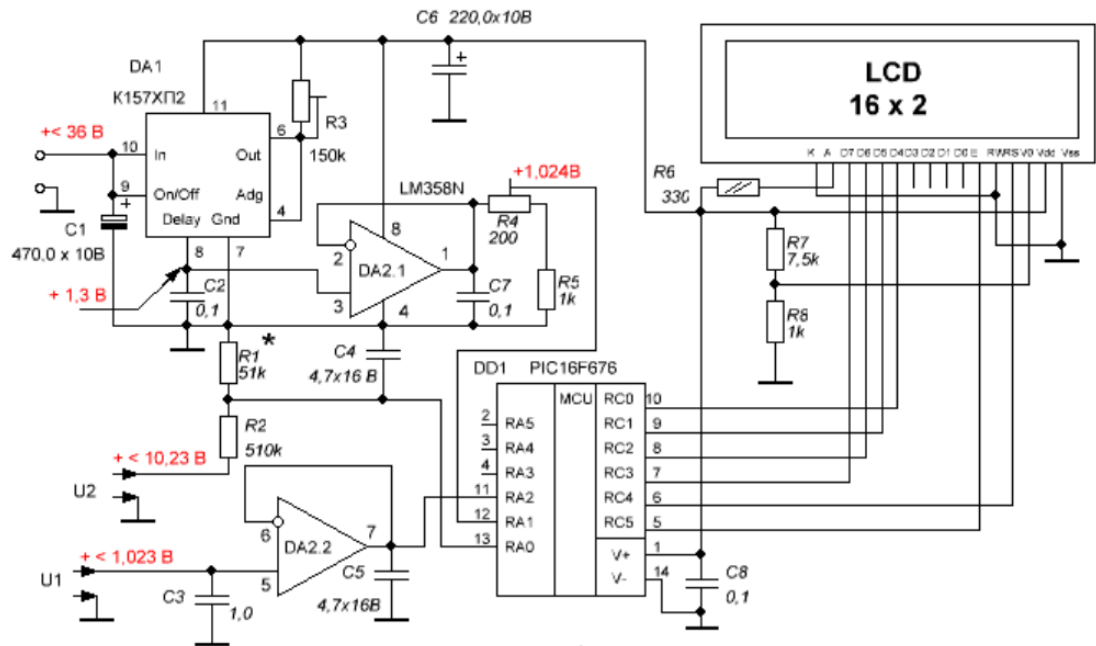


Рис. 1.9 Два вольтметри

Один вольтметр має діапазон вимірюваних напруг від 0,001 до 1,023 вольт, інший, з відповідним резистивним дільником 1:10, може вимірювати напруги від 0,01 до 10,02 вольт. Струм споживання всього пристрою за вихідної напруги стабілізатора +5 вольт становить приблизно 13,7 мА. Схема вольтметра зображена на малюнку 1.

Для реалізації двох вольтметрів використано два виводи мікроконтролера, сконфігурованих на вхід для модуля цифрового перетворення. Вхід RA2 використовується для вимірювання малих напруг, у районі вольт, а до входу RA0 під'єднано дільник напруги 1:10, який складається з резисторів R1 і R2, що дає змогу вимірювати напругу до 10 вольт. У цьому мікроконтролері використовується десятирозрядний модуль АЦП і щоб реалізувати вимірювання напруги з точністю до 0,001 вольт для діапазону 1 В, довелося застосувати зовнішню опорну напругу від ІОН мікросхеми DA1 K157XP2. Оскільки потужність ІОН мікросхеми дуже маленька, і щоб унеможливити вплив зовнішніх ланцюгів на цей ІОН, у схему введено буферний ОУ на мікросхемі DA2.1 LM358N. Це неінвертуючий повторювач напруги, що має стовідсотковий негативний зворотний зв'язок - ООС. Вихід цього ОУ навантажений на навантаження, що складається з

резисторів R4 і R5. З двійка підлаштування резистора R4, опорна напруга величиною 1,024 В подається на вивід 12 мікроконтролера DD1, налаштованого, як вхід опорної напруги для роботи модуля АЦП. За такої напруги кожен розряд оцифрованого сигналу дорівнюватиме 0,001 В. Щоб зменшити вплив шумів, під час вимірювання малих величин напруги застосовано ще один повторювач напруги, реалізований на другому ОУ мікросхеми DA2. ООС цього підсилювача різко зменшує шумову складову вимірюваної величини напруги. Так само зменшується напруга імпульсних перешкод вимірюваної напруги.

Для виведення інформації про вимірювані величини застосовано дворядковий РКІ, хоча для цієї конструкції вистачило б і одного рядка. Але мати в запасі можливість виведення ще якоїсь інформації, теж не погано. Яскравість підсвічування індикатора регулюється резистором R6, контрастність виведених символів залежить від величини резисторів дільника напруги R7 і R8. Живиться пристрій від стабілізатора напруги зібраного на мікросхемі DA1. Вихідна напруга +5 В встановлюється резистором R3. Для зменшення загального струму споживання, напругу живлення самого контролера можна зменшити до величини, за якої зберігалася б працездатність контролера індикатора. Під час перевірки цієї схеми індикатор стійко працював за напруги живлення мікроконтролера 3,3 вольт.

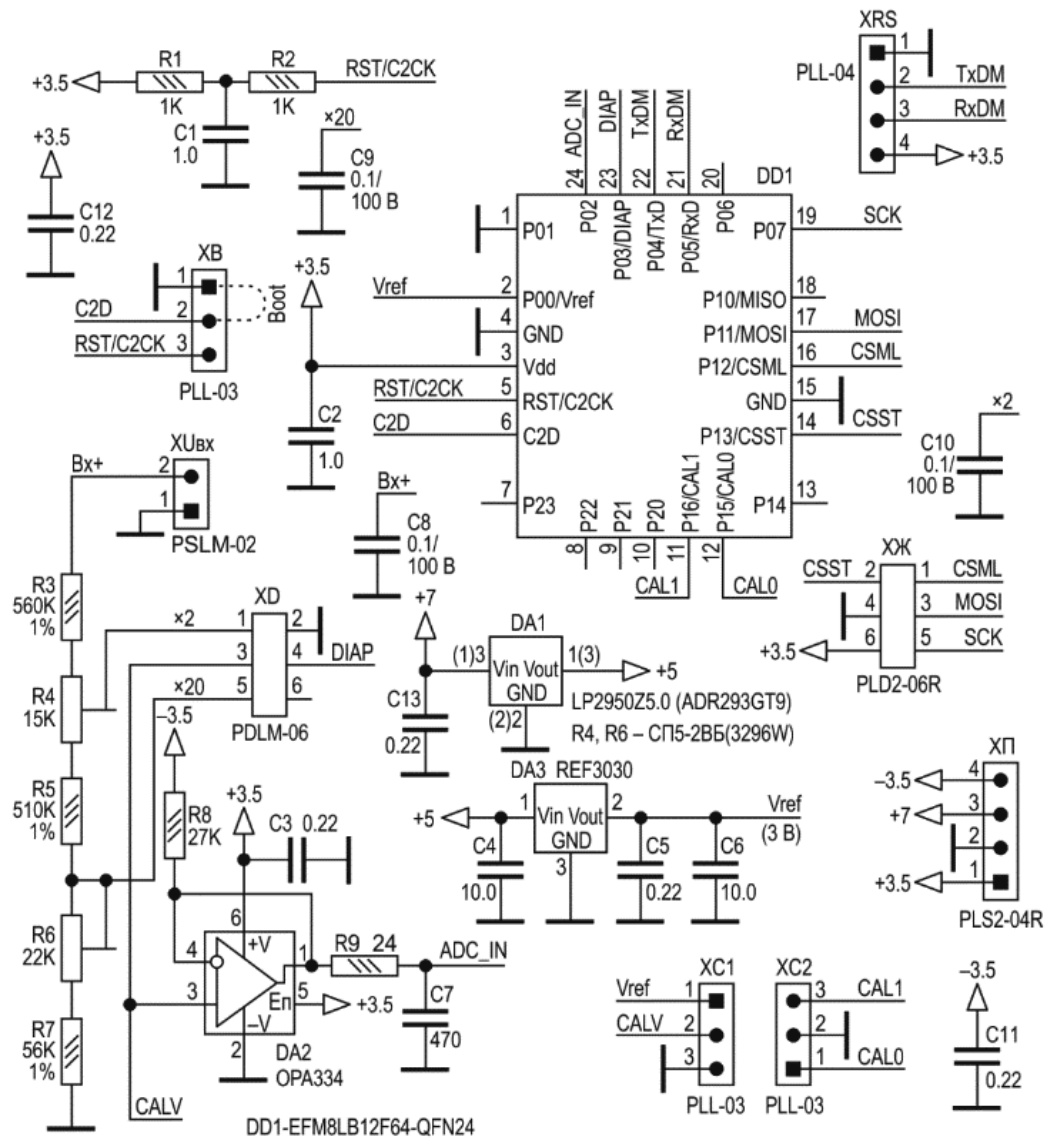


Рис. 1.10

Вхідна напруга (сигнал V_{x+} і "земля") подається на 2-контактний роз'єм XU_{vx} . До цього роз'єму під'єднано атенюатор - дільник напруги, що складається з резисторів $R3 - R7$. Номінали резисторів обрано таким чином, що сума опору $R3$ і опору верхньої за схемою частини підлаштування резистора $R4$ дорівнює сумі опорів нижньої частини $R4$ і $R5$, $R6$ і $R7$. У зв'язку з цим напруга на рушій резистора $R4$ (сигнал $x2$) в точності дорівнює половині вхідної напруги (сигнал V_{x+}), тобто напруга сигналу $x2 = V_{x+}/2$. Крім того, сума опорів $R3$, $R4$, $R5$ і верхньої за схемою частини підлаштування резистора $R6$ відноситься до суми опорів нижньої частини $R6$ і $R7$ як $1/19$, у зв'язку з чим напруга на движку резистора $R6$ (сигнал $x20$) дорівнює $1/20$ вхідної напруги (сигнал V_{x+}), тобто напруга сигналу $x20 =$

Vx+/20. Обидва сигнали x2 і x20 підключені до роз'єму вибору діапазону вимірювання XD. Сигнал CALV під'єднано до входу повторювача на ОУ ОРА334. 2-й контакт заземлено, а до четвертого контакту під'єднано сигнал DIAP, який з'єднано з портом P03 мікроконтролера DD1.

1.2 Опис постійного струму як об'єкту вимірювання

Постійний струм - це тип електричного струму, який протікає завжди в одному напрямку і має незмінне значення. Він стосується потоку електроенергії, отриманої від акумуляторів, сонячних панелей тощо. Струм, що протікає в ліхтарику або іншому приладі, що працює від батарейок - постійний (DC), його можна обчислити за законом Ома для ділянки ланцюга:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

де, U – напруга, R – опір

Переваги постійного струму:

- відсутнє випередження або затримка струму, що протікає до навантаження, у разі включення в ланцюг, наприклад, конденсатора;
- не виробляється реактивна потужність – уся електроенергія надходить до навантаження без втрат;
- забезпечується можливість зберігати електроенергію, наприклад, в акумуляторах.

Недоліки постійного струму:

- значні втрати потужності при транспортуванні електроенергії, особливо на великі відстані;
- постійну напругу складніше перетворювати – для передавання електроенергії необхідно спочатку перетворити її в змінну напругу, а потім знову в постійну. З цієї причини обладнання для перетворення DC напруги дорожче, ніж обладнання для AC;

- DC важко перервати – до постійного струму завжди прикладається постійна напруга. При високій напрузі в момент відключення може виникнути дуга, при цьому існує ризик ураження електрикою;
- сильна корозія проводів та ізоляторів через електростатичну індукцію та електричну корозію.

Розглянемо перетворення DC в AC на прикладі роботи сонячної електростанції. Сонячні панелі генерують постійний електричний струм (DC) завдяки фотоелектричній технології. Для можливості споживання виробленої електроенергії навантаженням або подачі в енергосистему, необхідно перетворити її до параметрів промислової, побутової або загальної електромережі. Для перетворення DC на виході сонячної панелі або від акумуляторної батареї в AC, застосовуються інвертори.

Сучасні інвертори здатні організувати повноцінний цикл роботи сонячної електростанції, об'єднуючи управління фотоелектричними модулями, акумулятором, загальною мережею і навантаженням через себе. У підсумку користувач може раціонально використовувати сонячну енергію, програмуючи режими споживання, акумуляування і передачі перевиробництва електроенергії в загальну мережу.

1.3 Класифікація та методи вимірювань

За першою класифікаційною ознакою вимірювання поділяють на: статичні, за яких вимірювана величина залишається постійною в часі в процесі вимірювання, і динамічні, за яких вимірювана величина змінюється в часі в процесі вимірювання.

Класифікація за другою ознакою є великою мірою умовною, однак широко застосовується у вимірювальній техніці. Нею визначаються сформовані сукупності споріднених за природою або застосуванням в окремих галузях науки або техніки фізичних величин.

За третьою ознакою вимірювання поділяють на три класи.

Вимірювання максимально можливої точності, досяжної за сучасного рівня

техніки. Це вимірювання, пов'язані зі створенням і відтворенням еталонів, а також вимірювання універсальних фізичних констант.

Контрольно-повірочні вимірювання, похибки яких не повинні перевищувати заданого значення. Такі вимірювання здійснюють переважно державні та відомчими метрологічними службами.

Технічні вимірювання, у яких похибка результату визначається характеристиками засобів вимірювань, вони є найбільш поширеними і виконуються в усіх галузях виробництва і науки. До них, зокрема, належать і технологічні вимірювання.

Четвертою класифікаційною ознакою слугує кількість вимірювань (спостережень під час вимірювання або просто спостережень), що виконуються для отримання результату. Тут розрізняють вимірювання з одноразовим спостереженням (звичайні) і вимірювання з багаторазовими спостереженнями (статистичні). Під спостереженням під час вимірювання (або просто спостереженням) у даному випадку відповідно до чинного державного стандарту розуміють експериментальну операцію, яку виконують у процесі вимірювання, у результаті якої отримують одне значення з групи значень величини, що підлягають спільній обробці для отримання результатів вимірювання.

За п'ятою ознакою вимірювання поділяють залежно від виду рівняння вимірювання, що й визначає спосіб отримання результату. В метрології заведено розрізняти прямі, непрямі та сукупні вимірювання. У наш час сукупні вимірювання поділяють на власне сукупні та спільні.

Прямими називають вимірювання, за яких шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних. У процесі прямого вимірювання об'єкт вимірювання приводиться у взаємодію із засобом вимірювань і за показаннями останнього

відраховують значення вимірюваної величини або зазначені показання множать на постійний коефіцієнт для визначення значення вимірюваної

величини. Прикладом прямих вимірювань можуть слугувати: вимірювання довжини лінійкою, маси за допомогою ваг, температури скляним термометром тощо. До прямих вимірювань відносять вимірювання переважної більшості

параметрів хіміко-технологічних процесів.

Непрямими називають вимірювання, за яких шукане значення величини знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною і величинами, що піддаються прямим вимірюванням. У разі непрямих вимірювань шляхом прямих вимірювань знаходять значення величин-аргументів. Прикладом непрямих вимірювань можуть слугувати вимірювання: густини однорідного тіла за його масою та об'ємом, електричного опору за величиною напруги та сили струму тощо.

Сукупними називають здійснювані одночасно вимірювання декількох однорідних величин, за яких шукані значення величини знаходять рішенням системи рівнянь, одержуваних під час прямих вимірювань різних поєднань цих величин або низки інших величин, функціонально пов'язаних із вимірюваними. Тому результат вимірювання кожної з величин можна розглядати як результат непрямого вимірювання.

Спільними називають проведені одночасно вимірювання двох або декількох неоднорідних величин для знаходження залежності між ними. Метою спільного вимірювання, як правило, є визначення функціональної залежності між величинами.

Крім наведених раніше ознак класифікації вимірювань для конкретних випадків за необхідності можуть бути використані й інші. Наприклад, вимірювання можна поділити залежно від місця виконання на:

- лабораторні;
- промислові.

Залежно від процедури виконання в часі на:

- безперервні;
- періодичні.

Залежно від форми подання результатів на:

- абсолютні;
- відносні.

Викладений вище матеріал, пов'язаний з видами вимірювань, дає змогу зробити висновок про те, що прямі вимірювання, будучи самостійними і найбільш поширеними, водночас слугують основою для складніших видів вимірювань (непрямих, сукупних і спільних). У зв'язку з цим методи прямих вимірювань, що розглядаються далі, є загальними для всіх видів вимірювань, і надалі будуть називатися просто методами вимірювань.

З урахуванням того, що метод вимірювань являє собою сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювань, розрізняють два методи вимірювань: метод безпосередньої оцінки і метод порівняння з мірою (міра – засіб вимірювань, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру).

Класифікаційною ознакою в такому поділі методів вимірювань є наявність або відсутність під час вимірювань міри.

Метод безпосередньої оцінки (відліку) – метод вимірювань, у якому значення величини визначають безпосередньо за відліковим пристроєм вимірювального приладу прямої дії (прилад прямої дії – вимірювальний прилад, у якому сигнал вимірювальної інформації рухається в одному напрямку, а саме саме з входу на вихід).

Метод порівняння з мірою – метод вимірювання, у якому вимірювану величину порівнюють із величиною, що відтворюється мірою.

Методи порівняння залежно від наявності або відсутності під час порівняння різниці між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою, підрозділяють на нульові та диференціальні.

Нульовий метод – це метод порівняння з мірою, у якому результуючий ефект впливу величин на прилад порівняння доводять до нуля (прилад порівняння, або компаратор – вимірювальний прилад, призначений для порівняння вимірюваної величини з величиною, значення якої відоме).

Диференціальний метод – це метод порівняння з мірою, у якому на вимірювальний прилад впливає різниця між вимірюваною величиною і відомою, відтворюваною мірою.

Як у нульовому, так і в диференціальному методі можуть бути виділені методи протиставлення, заміщення і збігу.

Метод протиставлення – метод порівняння з мірою, у якому вимірювана величина і величина, що відтворюється мірою, одночасно впливають на прилад порівняння, за допомогою якого встановлюється співвідношення між цими величинами.

Метод заміщення – метод порівняння з мірою, у якому вимірювану величину заміщують відомою величиною, що відтворюється мірою.

Метод збігу – метод порівняння з мірою, у якому різницю між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою, вимірюють, використовуючи збіг позначок шкал або періодичних сигналів.

Для пояснення сутності наведених визначень звернемося до прикладів реалізації методів вимірювань.

Метод безпосередньої оцінки з відліком показань за шкалою приладу характеризується тим, що оператору, який здійснює вимірювання, не потрібно будь-яких обчислень, крім множення показань приладу на деяку постійну,

відповідну даному приладу. Прикладом цього методу вимірювань може слугувати

зважування вантажу X на пружинних вагах. Маса вантажу тут визначається на основі вимірювального перетворення за значенням δ деформації пружини.

Процес вимірювання за методом безпосередньої оцінки характеризується швидкістю, що робить його часто незамінним для практичного використання. Однак точність вимірювання зазвичай виявляється невисокою через вплив впливових величин і необхідність градуювання шкал приладів.

Для підвищення точності вимірювання за методом безпосередньої оцінки під час виконання деяких вимірювань, зокрема лінійних, застосовують метод відліку за шкалою і ноніусом або верньєром (допоміжною шкалою). Цей метод характеризується використанням збігу відміток шкал (основної та допоміжної).

Нульовий метод вимірювання характеризується рівністю впливів, що чиняться вимірюваною величиною і мірою, на прилад, що використовується для порівняння. Відповідно до класифікації розрізняють нульові методи протиставлення, заміщення і збігу. Перші два з цих методів іноді називають відповідно методами повного протиставлення і повного заміщення.

Прикладом нульового методу протиставлення може слугувати зважування вантажу X на рівноплечих вагах, коли маса вантажу визначається масою гир, що врівноважують вплив вантажу на важіль носів. Стан рівноваги визначається за положенням покажчика нуль-індикатора, який у цьому разі має перебувати на нульовій позначці. Ваги при такому вимірюванні виконують функцію компаратора. Цей метод використовується для вимірювання найрізноманітніших фізичних величин і, як правило, забезпечує більшу точність вимірювання, ніж метод безпосередньої оцінки, за рахунок зменшення впливу на результат вимірювання похибок засобу вимірювань, який у даному випадку здійснює тільки порівняння впливів, створюваних

вимірюваною величиною і мірою. Недоліком цього методу є необхідність мати велику кількість мір різних значень для складання сполучень, що відтворюють величини, які дорівнюють вимірюваним, тобто необхідність відтворювати будь-яке значення відомої фізичної величини без істотного зниження точності.

Як правило, це пов'язано з істотними труднощами. Різновидом розглянутого методу є компенсаційний метод вимірювань, застосовуваний у тих випадках, коли важливо виміряти фізичну величину, не порушуючи процесу, в якому вона спостерігається. Під час під'єднання вимірювального пристрою, що реалізує компенсаційний метод, до об'єкта вимірювання на цьому пристрої створюється дія, спрямована назустріч дії, створюваній досліджуванним явищем. При цьому створюване у вимірювальному пристрої явище змінюється до тих пір, поки не буде досягнута повна компенсація дії досліджуваного явища на вимірювальний пристрій. За розміром фізичної величини, що створює компенсуюче явище, судять про розмір вимірюваної фізичної величини. За умови повної компенсації досліджуване явище протікає в об'єкті так само, як воно протікає у випадку, коли до об'єкта не під'єднано вимірювальний пристрій.

Нульовий, метод заміщення полягає в тому, що вимірювана фізична величина і міра послідовно впливають на вимірювальний прилад. При цьому значення міри підбирають таким, щоб її вплив на вимірювальний прилад дорівнював впливу вимірюваної фізичної величини. Нульовий метод заміщення застосовується в тих випадках, коли проводяться точні вимірювання параметрів, оскільки він дає змогу практично виключити вплив змін характеристик використовуваного засобу вимірювань на результат вимірювання.

Нульовий метод збігу полягає в збігу сигналів двох періодичних процесів, характеристика одного з яких вимірюється, а іншого використовується як міру. Диференціальний метод вимірювань характеризується тим, що за допомогою вимірювального приладу методом

безпосередньої оцінки вимірюється різниця між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою. Цей метод дає змогу отримати високоточні результати навіть у разі використання для вимірювання зазначеної різниці відносно грубих засобів вимірювань. Реалізація диференціального методу можлива тільки за умови наявності високоточної міри, близької за значенням до вимірюваної величини. З огляду на наведену класифікацію розрізняють диференціальні методи протиставлення, заміщення і збігу. Перші два з них іноді називають методами неповного протиставлення та неповного заміщення.

Сутність диференціального методу збігу полягає в тому, що збіг сигналів двох періодичних процесів є неповним. При цьому вимірюється характеристика періодичного процесу, що являє собою результат взаємодії названих вище двох періодичних процесів. Результат вимірювання визначається так само, як у всіх диференціальних методах.

При ввімкненні вимірюваної напруги $U_x = const$ протягом часу t вихідна напруга підсилювача $U_1 = ktU_x$ лінійно зростає.

В момент, коли U_1 стає дорівнювати U_2 спрацьовує УН та видає імпульс. Цей імпульс відкриває ключ SW1 на зразковий час T_K . Протягом цього часу T_K конденсатор C розряджається імпульсом з дозованою кількістю електрики від джерела зразкової напруги U_0 . Після закінчення розряду напруга U_1 знову починає зростати, і цикл повторюється.

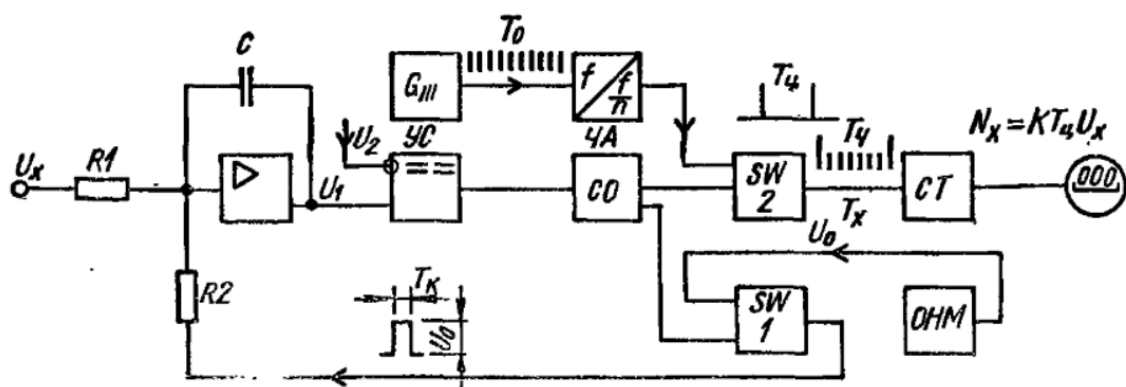


Рис. 1.11 Цифровий інтегруючий вольтметр з перетворенням напруги в частоту імпульсів

Ключ SW_2 , через який імпульси частоти f_x поступають на лічильник, відкритий протягом $T_{\text{Ц}}$. Ключ SW_2 керується дільником частоти імпульсів (рис. 1.11).

Тоді

$$N_x = \int_0^{T_{\text{Ц}}} f_x dt = \frac{R_2}{R_1 U_0 T_K} \int_0^{T_{\text{Ц}}} U_x dt. \quad (1.2)$$

Час інтегрування $T_{\text{Ц}}$ в таких приладах можна регулювати змінюючи їх завадостійкість в різних умовах. Регулювання $T_{\text{Ц}}$ можна також змінювати чутливість приладу. Недоліком цих приладів є необхідність в двох лічильниках імпульсів і високі вимоги до джерела коротких розряджають імпульсів.

Тривалу високоточну стабільність кількості електрики в імпульсі забезпечити важко, тому в приладах даного типу доводиться застосовувати часті калібрування. Цифрові вольтметри з частотними перетворювачами відрізняються наявністю двох лічильників імпульсів: одного - для рахунку імпульсів вихідний частоти частотного перетворювача і другого - для управління ключем, який відкривається на час інтегрування.

Основна схема цифрового вольтметра із двотактним інтегруванням представлена на рис. 1.12,а. Цикл вимірювання складається із двох тактів (рис. 1.12,б)

У першому такті з моменту t_1 до t_2 цифровий автомат ЦА замикає ключ SW_1 і на вхід інтегратора, що складається з підсилювача, резистора R і конденсатора C , надходить напруга U_x . Вихідна напруга інтегратор

$$U_1 = 1/RC \int_0^i U_x dt. \quad (1.3)$$

У момент t_1 відкривається також ключ SW_5 , і на СТ від генератора квантуючих імпульсів G_{ii} надходять імпульси частотою f_0 . При досягненні в СТ числа N_0 (зазвичай повного обсягу СТ) в момент t_2 перший такт закінчується. Час інтегрування U_x складе

$$T_{\text{інт}} = N_0/f_0 \quad (1.4)$$

У цей момент t_2 , СТ скидається в нульовий стан, а ЦА замикає SW2. На вхід інтегратора подається відоме за значенням постійна напруга U_0 , полярність якого протилежна полярності U_x . Вихідна напруга інтегратора лінійно зменшується і в момент t_3 стає рівною нулю. Цей момент фіксується пристроєм порівняння УС. В момент t_s закінчується другий акт перетворення.

Баланс зарядів на конденсаторі С відповідає умові:

$$\frac{1}{RC} \int_I^{t_2} U_x dt = \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_s} U_0 dt \quad (1.5)$$

Або

$$\int_0^{T_{\text{інт}}} U_x dt = U_0 T_x \quad (1.6)$$

Звідки

$$T_x = \frac{\int_0^{T_{\text{інт}}} U_x dx}{U_0} \quad (1.7)$$

За час T_x на СТ пройде $f_0 T_x$ імпульсів. Тоді

$$N_x = f_0 T_x = \frac{\int_0^{T_{\text{інт}}} U_x dx}{U_0} = \frac{f_0 T_{\text{інт}} U_x}{U_0} \quad (1.8)$$

Це число, що представляє результат вимірювання, в момент t_3 за командою ЦА переписується в регістр пам'яті. У момент t_3 СТ скидається в нуль, ЦА повертається у вихідне положення, в якому розімкнуті SW1, SW2, SW5, а SW3 і SW4 замкнуті. Починаючи з моменту t_3 , аналогова частина приладу і УС автоматично коригуються.

При $U_x = \text{const}$ протягом інтервалу $T_{\text{інт}} = N_0 T_0$

$$N_x = \frac{U_x T_{\text{інт}}}{U_0} f_0 = N_0 \frac{U_x}{U_0} \quad (1.9)$$

Отже, відлік лічильника прямо пропорційний вимірюваній напрузі і залежить тільки від напруги джерела зразкової напруги U_0 . Цифровий відлік приладу не залежить від опору R, ємності C, періоду T_0 , а також від напруги

U_k . Необхідно, щоб їх значення були постійні лише протягом кожного короткочасного циклу вимірювання. Важливими перевагами таких приладів є: використання одного лічильника імпульсів в обох циклах (завдяки чому знижується складність), висока перешкодостійкість, зручність вимірювання відносин двох напруг, підвищена чутливість.

Ця схема є однією з найбільш перспективних для створення цифрових інтегруючих вольтметрів високої точності, так як зміни параметрів і елементів практично не впливають на інформативний параметр вихідного сигналу. До числа основних похибок вольтметра двотактного інтегрування відносяться: похибку від неідентичності ключів SW1 і SW2 - $\delta_{\text{кл}}$, похибка від нелінійності інтегрування - $\delta_{\text{п}}$; похибка, викликана дрейфом нуля підсилювача УС, похибка через кінцевість смуги пропускання підсилювача - δ_{f_1} ; похибка від абсорбції конденсатора і похибка від квантування.

Похибка від перехідних опорів ключів виникає через те, що напруги U_x і U_0 подаються на інтегратор через ключі SW1 і SW2, опір яких в замкнутому стані кінцеві (не дорівнюють нулю). З урахуванням цього рівняння перетворення в часовий інтервал матиме вигляд:

$$\frac{1}{(R+r_{K1})C} \int_0^{T_{\text{інт}}} U_x dt = \frac{1}{(R+r_{K2})C} \int_0^{T_x} U_0 dt \quad (1.10)$$

Де r_{K1} і r_{K2} опір першого і другого ключів в замкнутому стані.

Після отримаємо:

$$T_x = \frac{R+r_{K2}}{R+r_{K1}} \frac{\int_0^{T_{\text{інт}}} U_x dx}{U_0} \quad (1.11)$$

Похибка викликається нестабільною r_{K2} і r_{K1} . Із урахуванням $R \gg r_K$

$$\delta_{K1} = \frac{\Delta r_{K2} - \Delta r_{K1}}{R} \quad (1.12)$$

Де Δr_{K2} і Δr_{K1} – зміна опору замкнутих ключів під впливом зовнішніх факторів або старіння. Ключі на польових транзисторах, виконані у вигляді однієї інтегральної схеми мають $(\Delta r_{K1} - \Delta r_{K2}) \approx 0,1 \dots 1$ Ом. При $R = 10^5 \dots 10^6$ Ом

$\delta_{\text{кл}}$ лежить в області десятої долі процента. Як видно із (1.12), $\delta_{\text{кл}}$ є похибкою крутизни перетворювача.

Похибка від нелінійного інтегрування δ_H залежить від часу інтегрування та еквівалентна постійній часу інтегратора $\tau_{\text{інт}}$:

$$\tau_{\text{інт}} = 2RC(1 + K_{\text{п}}) \quad (1.13)$$

Де $K_{\text{п}}$ – коеф. підсилення підсилювача на постійному струмі

Відносно похибки від нелінійності інтегрування δ_H знаходять за допомогою виразу:

$$\delta_H = \frac{T_{\text{інт}} - T_x}{2RC(1 + K_y)} \quad (1.14)$$

Якщо $T_{\text{інт}} = 0,1\text{с}$, $RC = 0,1\text{с}$, $K_d = 10^5$, а $T_x = 0$, то $\delta_H = 0,0005\%$

Дана похибка для випадку $U_{x_{\text{н}}} = U_0$

$$\delta_{\text{др}} = \pm 2U_{\text{др}}/U_0 \quad (1.15)$$

Де $U_{\text{др}}$ – приведена до входу напруга дрейфу підсилювача.

Формула для обчислення $\delta_{\text{др}}$ отримана з аналізу із урахуванням того, що інтегрується реально $U_x + U_{\text{др}}$ і $U_0 + U_{\text{др}}$. Похибка може бути великою, і зазвичай між циклами перетворення вводять такт корекції дрейфу, протягом якого SW1 і SW2 розімкнуті. Напруга дрейфу запам'ятовується на конденсаторі C_K . Тому в такті перетворення $\delta_{\text{др}}$ знижується більш ніж на порядок.

Кінцева смуга пропускання U призводить до похибки через затримки початку зміни вихідної напруги інтегратора відносно моменту комутації де $1/\tau = f_{\text{мр}}$ – межа рівномірної полоси пропускання підсилювача.

Цю похибку можна компенсувати, якщо включити послідовно з ємністю C інтегратора невеликий опір R_K , яке розраховується з умови:

$$\frac{U_x R_K}{R} = \frac{U_x \tau / k_y}{RC} \quad (1.16)$$

$$\delta = \pm \left[c + d \left| \frac{A_K}{A_{\Pi}} - 1 \right| \right] \quad (1.19)$$

Де c і d - постійні числа, що характеризують клас точності конкретного вольтметра, A_{Π} - показання приладу, A_K - кінцеве значення встановленої межі вимірювання.

Для уяви про можливості сучасних цифрових вольтметрів наведемо значення відносної похибки одного з найбільш точних приладів - 8 ½ - розрядного вольтметра.

При вимірюванні напруги постійного струму

$$\delta = \begin{cases} \pm \left[0,0013 + 0,003 \frac{A_K}{A_{\Pi}} \right] \text{ для } A_K = 100\text{В (чутливість 1 мкВ);} \\ \pm \left[0,0016 + 0,006 \frac{A_K}{A_{\Pi}} \right] \text{ для } A_K = 0,1\text{В (чутливість 10 нВ);} \end{cases} \quad (1.20)$$

Слід мати на увазі, що відносна похибка цифрового вольтметра і число розрядів, що відображаються дисплеєм, характеристики взаємопов'язані: зменшення числа розрядів втягне за собою збільшення можливої відносної похибки.

На точність і чутливість цифрового вольтметра впливають перешкоди загального вигляду і нормального (послідовного) виду.

У приладах для вимірювання напруги постійного струму широке поширення отримали наступні методи порівняння: компенсації та диференціальний.

Метод компенсації заснований на рівноваженні (компенсації) вимірюваної напруги відомим падінням напруги на опорному (вимірювальному) резисторі. Індикаторний прилад реєструє рівність вимірюваної і компенсуючої величин.

Для методу компенсації характерна висока точність, що визначається точністю міри і чутливістю індикатора. На цьому методі засновані Потенціометри, потенціометричні та інтегropотенціометричні цифрові вольтметри.

При диференціальному методі повного врівноваження не відбувається. Прилад вимірює різницю між вимірюваної величиною і мірою і відградуваний в одиницях вимірюваної величини. Вимірювана величина визначається за значенням міри і показанням приладу. Цей метод дозволяє отримати результати з високою точністю навіть при застосуванні відносно грубих засобів вимірювання різниці. Однак існування цього методу можливе тільки за умови відтворення з великою точністю міри, значення якої вибирається близьким значенням вимірюваної величини.

Нехай значення вимірюваної напруги, записується як

$$U_x = U_{зр} + \Delta U \pm a = (U_{зр} + \Delta U)[1 \pm a/(U_{зр} + \Delta U)] \quad (1.21)$$

Де $U_{зр}$ – значення зразкової напруги (міри); $\Delta U = U_x - U_{зр}$ – напруга некомпенсації, що вимірюється вимірювальним приладом; a – похибка вимірювання різниці $U_x - U_{зр}$.

Так як $U_{зр}$ значно більше ΔU , то відносна похибка вимірювання і значно менше відносної похибки вимірювання ΔU . Якщо $U_{зр} = 9,9$ В, $\Delta U = 0,1$ В, $a / \Delta U = 0,01$ (1%), то $a\Delta U / (U_{зр} + \Delta U) \Delta U = 0,01 * 0,1 / 10 = 10^{-4}$ (0,01 %). Таким чином, для досягнення такої високої точності можна застосовувати порівняно

грубий прилад. Однак при цьому виміри необхідно використовувати точну міру $U_{зр}$, значення якої знайдено ще з меншою ніж (0,01%) похибкою.

1.4. Висновки до розділу

У даному розділі розглянуто тему вимірювання напруги постійного струму та об'єкта його вимірювання, зокрема застосування електронних вольтметрів у різних аспектах сучасних технічних процесів. Електронні вольтметри виявляються найбільшою та ефективною групою радіометричних приладів завдяки своїм унікальним характеристикам, таким як висока стійкість до частот, висока чутливість та енергоефективність.

Докладно розглянуті різновиди вольтметрів (змінної напруги, постійної напруги, універсальні, імпульсні та селективні) їхню ключову роль в електричних системах, де вони забезпечують точне вимірювання та аналіз напруги відповідно до конкретних вимог та умов роботи.

Досліджувалися основні типи вольтметрів, такі як аналогові та цифрові, та їх структурні особливості. Розкривалися принципи роботи різних типів вольтметрів, що визначає їхню ефективність в різних умовах вимірювань.

Детально проаналізовано постійний струм як об'єкт вимірювання, визначаючи його переваги та недоліки. Зокрема, обговорено проблему втрат потужності при транспортуванні та слабкі сторони його конвертації в змінний струм, підкреслюючи важливість інверторів у сучасних сонячних електростанціях.

Було розглянуто класифікацію вимірювань за декількома ознаками: статичні та динамічні, за схожістю величин, за точністю вимірювань. Виділено прямі, непрямі та сукупні вимірювання. Зазначено можливі класифікації за місцем та процедурою виконання та формою подання результатів.

Було висвітлено проблематику вимірювання фізичних величин та оцінки похибок у цьому процесі. Впроваджено концепції абсолютної похибки, випадкових та систематичних похибок, а також детально розглядаєте грубі похибки та промахи, надаючи їм конкретні визначення.

Було використано термінологію ймовірнісної та математичної статистики яка дозволяє науково підтверджено розглядати похибки вимірювань як випадкові величини. Також застосовується концепція нормального розподілу для розуміння властивостей випадкових величин та їх похибок.

Загальною темою тексту є важливість точності та достовірності вимірювань, а також визначення та контроль похибок для покращення якості наукових досліджень.

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Структурні схеми вимірювальних пристроїв їх статичні та динамічні характеристики

Для зручності аналізу різних з'єднань вимірювальних пристроїв між собою та із засобами автоматичного управління будь-яке вимірювальний пристрій прийнято розглядати як деякий перетворювач, який служить для перетворення вхідного сигналу X в вихідний Y . Таке уявлення вимірювальних пристроїв дозволяє застосовувати при аналізі систем добре розроблений апарат теорії автоматичне регулювання.

Якщо вхідний і вихідний сигнали є деякі фізичні процеси, що характеризуються декількома параметрами, то серед їх розрізняють інформативні та неінформативні.

Для конструкторів-приладобудівників надзвичайно важливою є інформація про внутрішню структуру вимірювальних пристроїв. Вимірювальні

пристрої складаються з деякого числа елементів (складових частин), призначених для виконання певних функцій, таких як: перетворення сигналу, що надходить за формою або видом енергії, заспокоєння коливань, захист від перешкод, комутація ланцюгів, подання інформації тощо. До елементів вимірювальних пристроїв відносяться: опори, напрямні, пружини, магніти, контакти, розмножувально-передавальні механізми тощо.

Основні складові вимірювальних пристроїв:

Перетворювальний елемент - елемент засобу вимірювань, в якому відбувається одне із ряду послідовних перетворень величини;

Вимірювальний ланцюг - сукупність перетворювальних елементів

засоби вимірювань, що забезпечує здійснення всіх перетворень сигналу вимірювальної інформації;

Чутливий елемент - перший у вимірювальному ланцюгу перетворювальний елемент, що знаходиться під безпосереднім впливом вимірюваної величини;

Вимірювальний механізм - частина конструкції засобів вимірювань, що складається з елементів, взаємодія яких викликає їх взаємне переміщення;

Відліковий пристрій - частина конструкції засобу вимірювань, призначена для відрахування значень вимірюваної величини;

Реєструючий пристрій - частина реєструючого вимірювального приладу, призначену для реєстрації показань.

Структурна схема вимірювальних пристроїв однозначно визначається використанням методом перетворення.

Вимірювальний прилад, що базується на методі прямого перетворення, працює наступним чином. Вимірювана фізична величина X надходить у чутливий елемент 1, де перетворюється на іншу фізичну величину, зручну для подальшого використання (наприклад, струм, напруга, тиск, переміщення, сила), та надходить на проміжний перетворювач 2, який зазвичай або посилює надходить сигнал, або перетворює його формою. (В окремому випадку елемент 2 може бути відсутнім.) Вихідний сигнал елемента 2 надходить до вимірювального механізму 3, переміщення елементів якого визначається за допомогою відлікового пристрою 4. Вихідний сигнал U (показ), що формується вимірювальним приладом, може бути сприйнятий органами чуття людини.

Показанням називають значення величини, що визначається за відліковим влаштування та виражене в прийнятих одиницях цієї величини. Відліковий пристрій представляє собою цифрове табло або, в переважній

більшості, шкалу з покажчиком. Для шкальних відлікових пристроїв прийнято використовувати низку понять, сутність більшості з яких легко встановити.

Відмінною особливістю таких приладів є наявність негативної зворотного зв'язку. Тут сигнал Z , що виникає на виході чутливого елемента, надходить на перетворювальний елемент 5, який здатний здійснювати порівняння двох величин (елемент порівняння, що компарує елемент), що надходять на його вхід. Крім величини Z на вихід елемента 5 подається з протилежним знаком величина $Z_{ур}$ (врівноважуючий сигнал), яка формується на виході зворотного перетворювального елемента 6. На виході елемента 5 формується сигнал, пропорційний різниці значень величин Z та $Z_{ур}$. Цей сигнал надходить у проміжний перетворювальний елемент 2, вихідний сигнал якого надходить одночасно на вимірювальний механізм 3 і на вхід зворотного перетворювального елемента 6. Залежно від типу проміжного перетворювального елемента 2 при кожному значенні параметра, що вимірюється і відповідному йому значення Z різниця $Z - Z_{ур}$, що надходить на вхід елемента 5 може зводитися до нуля або мати деяке мале значення, пропорційне вимірюваній величині.

Наведені структурні схеми вимірювальних перетворювачів, заснованих відповідно на методах прямого та врівноважує перетворювача. У цих схемах відсутній вимірювальний механізм та відліковий пристрій. Цим визначається той факт, що сигнал вимірювальних перетворювачів має форму,

недоступну для сприйняття людиною. Водночас у складі вимірювальних перетворювачів, як правило, є кінцевий перетворювальний елемент 7, який формує вихідний сигнал (підсилює його за потужністю, перетворює на частоту коливань і т. д.) таким чином, що його можна передавати на відстань, зберігати та обробляти.

У загальному випадку стан (режим роботи) вимірювального пристрою, при якому значення вхідного X та вихідного Y сигналів не змінюються, називають статичними (стаціонарними чи рівноважними).

Статичною характеристикою вимірювального пристрою називають функціональну залежність вихідного сигналу від вхідного у статичному режим роботи зазначеного пристрою. Більш точно статичну характеристику можна визначити як залежність інформативного параметра вихідного сигналу від інформативного параметра його вхідного сигналу статичному режимі. Статична характеристика описується у випадку деяким нелінійним рівнянням (рівнянням перетворення):

$$Y = f(X) \quad (2.1)$$

Для вимірювальних перетворювачів, а також вимірювальних приладів з неіменованою шкалою або зі шкалою, відградуєваною в одиницях, відмінних від одиниць вимірюваної величини, статичну характеристику прийнято називати функцією перетворення. Для вимірювальних приладів іноді статичну характеристику називають характеристикою шкали.

Визначення статичної характеристики пов'язані з виконанням градуювання, тому всім засобів вимірювань використовують поняття градуювальні характеристики, під яким розуміють залежність між значеннями величин на виході та вході засобу вимірювань, складену в вигляді таблиці, графіка чи формули.

За винятком спеціальних випадків, основна вимога, що пред'являється до статичної характеристики вимірювальних пристроїв, зводиться до отримання лінійної залежності між вихідним та вхідним величинами. На практиці ця вимога реалізується в загальному випадку тільки з деякою прийнятою заздалегідь похибкою.

Крім статичної характеристики для визначення метрологічних Властивостей вимірювальних пристроїв використовується ряд параметрів.

Діапазон показань - область значень шкали, обмежена кінцевим та початковим значеннями шкали. Діапазон вимірів (робоча частина шкали.) - область значень вимірюваної величини (на шкалі приладу), для якої нормовані похибки, що допускаються засобів вимірів.

В окремому випадку вказані діапазони можуть збігатися.

Щодо вимірювальних пристроїв взагалі діапазон вимірювань часто називають робочим діапазоном перетворень. Верхня межа вимірювань найбільше значення діапазону вимірів. Нижня межа вимірів — найменше значення діапазону вимірів.

Зі сказаного випливає, що діапазон вимірювань визначається різницею значень верхньої та нижньої меж вимірювань $(X_B - X_H, Y_B - Y_H)$. Для кількісної оцінки впливу на вихідний сигнал вимірювального пристрою вхідного сигналу у довільній точці статичної характеристики служить межа відношення збільшення ΔY вихідного сигналу до збільшення ΔX вхідного сигналу, коли останнє прагне нуля, т. е. похідна у вибраній точці

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (2.2)$$

Щодо вимірювальних приладів цей параметр називають чутливістю і визначають як відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до зміни вимірюваної, що викликає його величини. Графічно вона визначається тангенсом кута нахилу а дотичної, проведеної до обраної точки А статичної характеристики.

Якщо статична характеристика вимірювального приладу нелінійна, то його чутливість буде різною у різних точках характеристики, а шкала приладу – нерівномірною. Прилади з лінійною або пропорційною статичною Характеристикою мають незмінну в будь-якій точці шкали чутливість та рівномірну шкалу.

У вимірювальних перетворювачів статична характеристика, як правило, є лінійною:

$$Y = KX \quad (2.3)$$

Тут K - коефіцієнт перетворення (або при використанні перетворювача в системах автоматичного регулювання – коефіцієнт передачі), що визначається

як відношення сигналу на виході вимірювального перетворювача, що відображає вимірювану величину, що викликає його сигналу на вході перетворювача. Для вимірювальних приладів важливим параметром є ціна поділу, яка визначається як різниця значень величин, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали. Фізична ціна поділу визначається кількістю одиниць вхідної величини, що містяться в одному розподілі шкали вимірювального приладу.

Ціна поділу однозначно пов'язана з числом поділів n шкали вимірювального приладу. Останнє своє чергу пов'язані з похибкою вимірювального приладу, що зазвичай представляється його класом точності L . Число поділів шкали вимірювального приладу, як правило, у першому наближенні визначається із співвідношення

$$n \geq \frac{10}{2L} \quad (2.4)$$

При виконанні умови (2.4) число поділів шкали вибирають таким, щоб ціна розподілу становила цілу кількість одиниць вимірюваної величини.

У науково-технічній літературі використовується поняття порогу чутливості (порога реагування) вимірювального пристрою, під яким розуміють ту найменшу зміну вхідного сигналу, яка викликає впевнено фіксована зміна вихідного сигналу.

Як правило, спостерігач, який здійснює вимір, упевнено може помітити усунення стрілки на половину поділу шкали, тому поріг чутливості вважатимуться рівним половині ціни розподілу, і якщо врахувати при цьому співвідношення то в першому наближенні поріг чутливості дорівнює класу точності L .

Однією з найважливіших умов отримання коректних результатів вимірювань є облік взаємодії вимірювальних пристроїв між собою та з об'єктом вимірювань.

При підключенні вимірювального пристрою або перетворювача до об'єкту вимірювань останній споживає деяку енергію чи потужність від об'єкт. Аналогічна ситуація має місце при підключенні вимірювального приладу або перетворювача до виходу попереднього ланцюга вимірювання перетворювача. Це визначає необхідність враховувати властивості вимірювальних пристроїв відбирати чи віддавати енергію через свої вхідні чи вихідні ланцюги.

Як характеристику зазначеної властивості прийнято використовувати для вимірювальних пристроїв поняття вхідного імпедансу (повного або здається опору), а для вимірювальних перетворювачів - поняття вхідного та вихідного імпедансів. У випадку під імпедансом Z розуміють відношення узагальненої сили N до обумовленої нею узагальненої швидкості W :

$$Z = \frac{N}{W} \quad (2.5)$$

В даний час поняття вхідного та вихідного імпедансів широко використовується для електричних вимірювальних приладів. При цьому імпеданс визначається як відношення напруги до струму. Стосовно до вимірювальним пристроям для неелектричних величин у кожному окремому у разі необхідне проведення досліджень для встановлення найбільш доцільної форми подання вхідного та вихідного імпедансів.

Режим роботи вимірювального пристрою, при якому значення вихідного та вхідного сигналів змінюються в часі, називають динамічним (нестационарним чи нерівноважним).

Практично всі вимірювальні пристрої мають у своєму складі інерційні елементи, а саме: рухомі механічні вузли, електричні або пневматичні ємності, індуктивності, елементи, які мають теплову інерцію і т. п. Наявність інерційних елементів визначає інерційність всього вимірювального пристрою, тобто призводить до тому, що в динамічному режимі миттєве значення вихідного сигналу вимірювального пристрою залежить не тільки від миттєвого значення

вхідного сигналу, але і від будь-яких змін цього сигналу, тобто від його першої та другий похідних та похідних вищого порядку.

Зазначені інерційні властивості вимірювальних пристроїв визначають динамічною характеристикою.

Динамічна характеристика вимірювального пристрою загалом у разі це залежність між інформативними параметрами вихідного та вхідного сигналів та часом або залежність вихідного сигналу від вхідного у динамічному режимі. Динамічну характеристику вимірювального пристрою прийнято описувати диференціальним рівнянням, передавальним чи комплексним частотною функціями.

У переважній більшості випадків динамічна характеристика вимірювальних пристроїв у лінійній частині статичної характеристики (для вимірювальних пристроїв з лінійною статичною характеристикою у всьому діапазоні перетворень) може бути описана диференціальним рівнянням виду

$$a_n \frac{d^n Y(\tau)}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + Y(\tau) = KX(\tau) \quad (2.6)$$

Або відповідною передавальною функцією

$$W(p) = \frac{K}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1} \quad (2.7)$$

Або

$$Y(p) = \frac{W(p)}{X(p)} \quad (2.8)$$

Де $Y(\tau)$ – вихідний або вхідний сигнали вимірювального пристрою як функції часу; n – число, яке визначає порядок похідної.

Передатну функцію $W(p)$ можна розглядати як коефіцієнт перетворення вимірювального пристрою в динамічному режимі.

Передатна функція, як і диференціальне рівняння, є вичерпною характеристикою інерційних властивостей вимірювального пристрої. Вона

дозволяє визначати реакцію вимірювального пристрою на вхідні сигнали, що змінюються у часі за будь-яким законом.

Передачу функцію вимірювальних пристроїв зручно використовувати при аналізі роботи останніх в автоматичних системах регулювання. Її визначають зазвичай через перехідну чи тимчасову характеристику, яка визначається як зміна у часі вихідного сигналу $h(t)$ вимірювального пристрою при подачі на його вхід стрибкоподібного сигналу, що дорівнює за значенням одиниці вхідної величини.

Якщо висота стрибкоподібного вхідного сигналу не дорівнює одиниці, а має деяке значення X_A , то за перехідною характеристикою можна визначити вихідний сигнал, використовуючи вираз

$$Y(\tau) = h(\tau)X_A \quad (2.9)$$

Для визначення інерційних властивостей вимірювальних пристроїв перехідним характеристикам зазвичай використовують запозичене з теорії автоматичне регулювання концепції динамічної ланки. Перехідні характеристики та передатні функції типових динамічних ланок відомі, що дозволяє за формою перехідної характеристики вимірювального пристрою ототожнити його з якоюсь типовою динамічною ланкою, а слідом, визначити форму передавальної функції випробовуваного вимірювального пристрою. Описану процедуру прийнято називати ідентифікацією.

На рис. 2.1 показано найбільш типові для вимірювальних пристроїв форми перехідних характеристик, тобто криві перехідних процесів, або криві розгону.

Для отримання в нульовий (для простоти) момент часу вхідний сигнал вимірювального пристрою стрибком змінюється на X_A від деякого значення X_1 до X_2 . Після закінчення перехідного процесу вихідний сигнал вимірювального пристрою змінюється Y_A від значення Y_1 до Y_2 .

Для визначення коефіцієнта перетворення вимірювального пристрою достатньо обчислити відношення Y_A/X_A ,

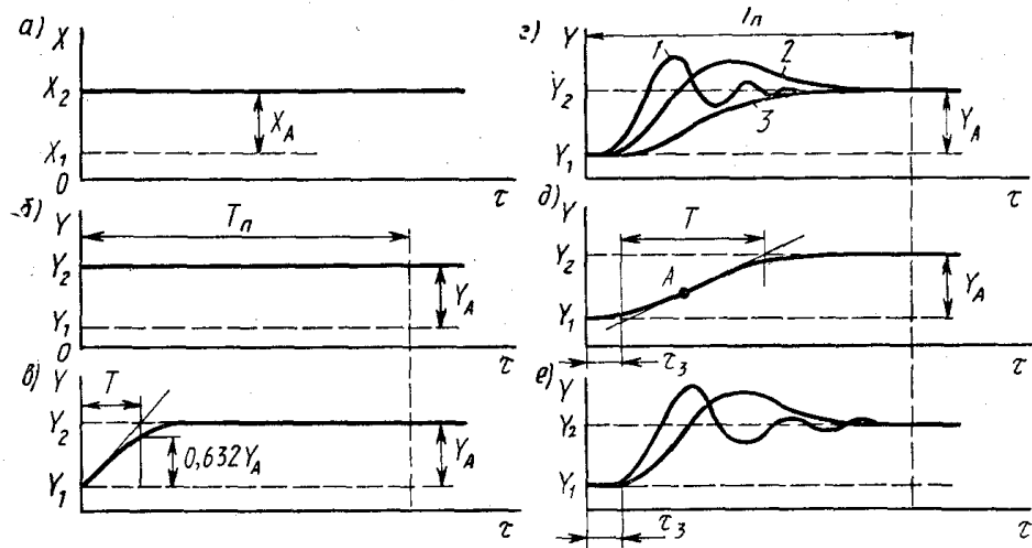


Рис. 2.1 Типичні для вимірювальних пристроїв форми перехідних процесів

Перехідні процеси, показані на рис. 2.1 б, в, г, відповідають типовим підсилювальному (безінерційному), аперіодичному першого порядку та коливальній ланки.

Процес представлений на рис. 2.1 б, характерний для електронних вимірювальних пристроїв, а процеси, подані на рис. 2.1, в, г, - для великої кількості вимірювальних пристроїв, заснованих на прямому перетворенні. Крива на рис. 2.1, являє собою експоненту, а величина T (підкасальна) називається постійною добою. Вона визначає собою час, за який вихідний сигнал досяг би нового значення, якби змінювався з постійною швидкістю, що дорівнює швидкості в момент стрибкоподібної зміни вхідного сигналу.

Постійна часу використовується для динамічних характеристик властивостей вимірювальних приладів. Проведення дотичної та кривої перехідного процесу пов'язано з похибками, тому значення постійного часу визначають як інтервал часу, за який вихідний сигнал змінюється на 0,632 від свого збільшення Y_A рис. 2.1, в. Коректність такого визначення легко доводиться математично.

Коливальна динамічна ланка, а отже, і вимірювальна пристрій, в якому має місце перехідний процес рис. 2.1 г, можна розглядати як з'єднання двох аперіодичних ланок із постійними часу T_1 і T_2 . При цьому залежно від співвідношень T_1 і T_2 перехідний процес буде різним. Якщо $(T_1/T_2) < 2$, то він має форму кривих 1 і 2, а при $(T_1/T_2) \geq 2$ форму кривої 3 (рис. 2.1, г).

Перехідні процеси, показані на рис. 2.1, д, е, характерні для випадків, коли диференціальне рівняння, що описує динаміку вимірювального пристрою має порядок більш ніж другий. У цих випадках прийнято розглядати вимірювальні пристрої як сукупність декількох, з'єднаних послідовно типових динамічних ланок. Наприклад, вимірювальний пристрій з перехідним процесом, показаним на рис. 2.1, д, можна розглядати як з'єднання ланки чистого запізнення часом запізнення τ_3 та аперіодичної ланки з постійної часу T (Для графічного визначення значень τ_3 і T достатньо провести дотичну до точки перегину А на рис. 2.1, д). Вимірювальний пристрій з перехідним процесом, показаним на рис. 2.1, е, можна розглядати як з'єднання ланки чистого запізнення та коливальної ланки.

2.2 Структурна схема комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму

У контексті вивчення вимірювань напруги, цифрові вольтметри визнаються високотехнологічними пристроями, які виявляються найбільш оптимальними та високоефективними в сучасному вимірювальному обладнанні. Ці пристрої володіють рядом визначальних особливостей, що сприяють їх важливому статусу у наукових та технічних вирішеннях.

Суттєвою рисою цифрових вольтметрів є їхні універсальність та широкий функціональний спектр. Здатність вимірювати як постійну, так і змінну напругу робить їх вельми важливими в інженерних та дослідницьких застосуваннях. Додатково, вони можуть ефективно виконувати вимірювання опору, струму та інших параметрів, розширюючи їхню функціональність та забезпечуючи комплексний підхід до вимірювальних завдань.

Сучасні мікропроцесорні цифрові вольтметри, включаючи клавіатуру

для користувача, відзначаються не лише високою точністю до 0,001, а й здатністю автоматичного вибору граничних значень та полярності напруги. Вони також автоматично виправляють помилки та виводять результати в цифровому форматі, що робить їх особливо зручними та точними вимірювальними інструментами.

Використання цифрових вольтметрів також визначається їхньою здатністю інтегруватися в складні інформаційно-вимірювальні системи та взаємодіяти з комп'ютерами для зручного аналізу та обробки даних. Документальна реєстрація результатів вимірювань відкриває можливості для подальшого наукового аналізу та дослідження.

Технічна складність цифрових вольтметрів визначається наявністю аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та цифрового зчитувача, що робить їх технічно вдосконаленими та високопродуктивними. Важливим етапом в їхньому функціонуванні є класифікація за методами перетворення безперервної величини в дискретну, блок-схемами АЦП, технічними засобами та методами заміни.

Цифрові вольтметри можуть бути розділені за методами посилення, враховуючи швидкість передачі даних через час та частоту імпульсів. Згідно з блок-схемами АЦП, їх можна поділити на вольтметри прямого та балансного перетворення.

За технічними засобами вони поділяються на електромеханічні та електронні вольтметри, враховуючи балансову модель, можна виділити вольтметри слідкуючим та розгорнутим балансом.

Комплексне моделювання пояснюється дискретним принципом вимірювання безперервної величини, коли абсолютна похибка виникає через обмежену кількість рівнів квантування. Абсолютна похибка вимірювання напруги визначається цим процесом та є результатом цього технічного підходу. $\Delta U = \pm(\text{увідн } U_x + m \text{ знаків})$, або $\Delta U = \pm(\text{увідн } U_{\text{кз}} + m \text{ знаків})$,

де, увідн – відносна похибка вимірювання;

U_x – значення вимірюваної напруги;

$U_{\text{кз}}$ – кінцеве значення на вибраній межі вимірювання;

m знаків – значення, розраховане одиницею молодшого розряду цифрового відлікового пристрою (адитивна похибка дискретності).

Основна допустима відносна похибка відображається і в іншому вигляді: $\text{увід} = \pm(a + \frac{bU_{\text{кз}}}{U_x})$, де a і b – постійні числа, які характеризують клас точності приладу. Перший елемент помилки не пов'язаний з продуктивністю пристрою, а другий збільшується зі зменшенням U_x , відповідно до гіперболічного закону.

Як приклад розглянемо схему цифрового вольтметра з перетворенням часу імпульсу рис. 2.2 і цифрового вольтметра з подвійним інтегруванням рис. 2.3.

На початку циклу керуючий пристрій формує прямокутний імпульс з каліброваною тривалістю T_1 , який подається на електронний перемикач. А протягом часу T_1 вхідна напруга постійного струму подається з блоку входу через електронний перемикач до інтегратора. Починається перший цикл інтегрування «вгору», в якому вихідна напруга інтегратора зростає за лінійним законом:

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_x \cdot dt \quad (2.10)$$

де, $U_{\text{вих}}$ - напруга на виході інтегратора, В;

R – опір, Ом;

C – ємність конденсатора Ф;

$U_{\text{вх}}$ – вхідна напруга, В;

t_1 – початковий момент інтегрування (момент появи фронту імпульсу T_1);

t_2 - кінцевий момент інтегрування.

Крутизна цієї напруги пропорційна вхідній напрузі U_x . У момент часу t_1 , коли закінчується перший імпульс, тригер переходить із стану «0» в стан «1», і електронний перемикач відключає вхідну напругу інтегратора і підключається джерело опорної напруги в інтегратор.

Напруга на компараторі залишається рівною «1». А другий цикл інтегрування починається «вниз», оскільки джерело опорної напруги має

протилежну полярність щодо вимірюваної напруги. Напруга на виході інтегратора лінійно зменшується. А в момент часу t_2 , коли напруга на виході інтегратора дорівнює «0», компаратор переходить зі стану «1» на стан «0». І при цьому тригер буде закриватись, тобто його вихід буде «0». Під час другого циклу, коли тригер відкритий, через нього проходять високочастотні імпульси до перемикача часу, у перемикачі часу імпульс від тригера заповнюється високочастотними імпульсами від тактового генератора. Ця кількість імпульсів пропорційна виміряній напрузі.

Робота цифрового вольтметра для методу перетворення часових імпульсів постійного струму. Метод перетворення часових імпульсів постійного струму встановлюється на часовий інтервал, який прямо пропорційний подальшій тривалості інтервалу часу.

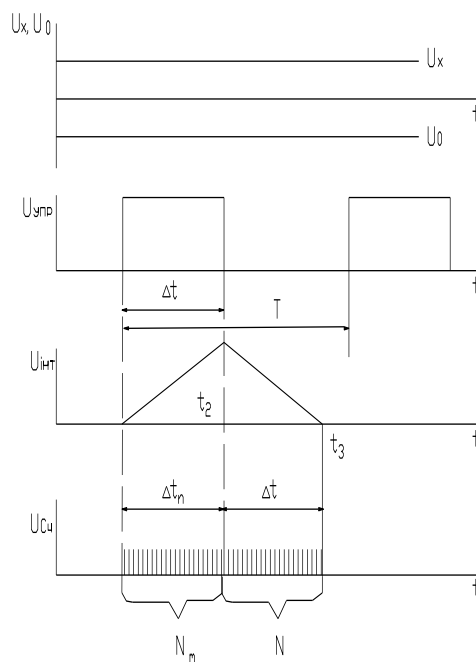


Рис. 2.2 Часова схема

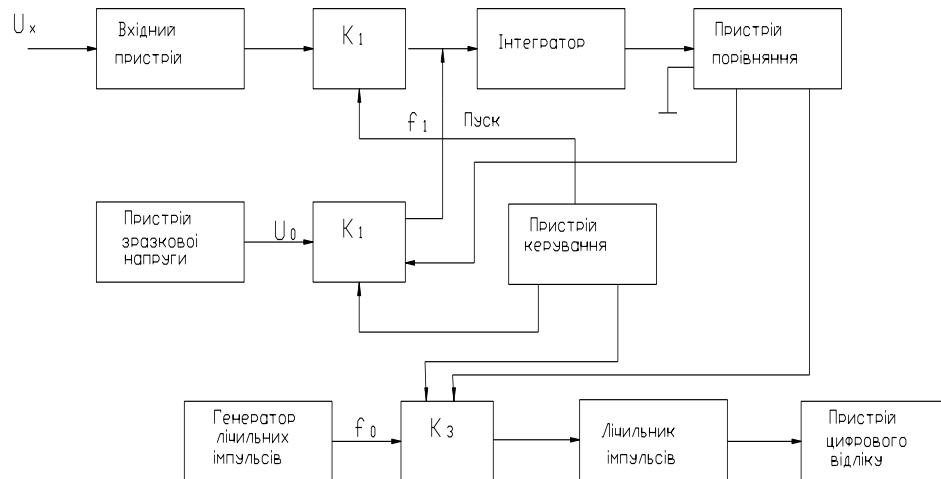


Рис. 2.3 Часовий вольтметр із подвійним інтегруванням

Похибка одиниці залежить від лінійності та швидкості вимірювання зміщення напруги, стабільності генератора, підрахунку імпульсів, чутливості еквалайзера, точності нульової або опорної напруги.

Принцип його функціонування подібний до принципу перетворення часових імпульсів, з тією різницею, що протягом циклу вимірювання є два інтервали часу, тривалість яких встановлюється кратною інтерференційному періоду. Це визначає середнє значення вимірюваної напруги і перешкоди пригнічуються. Ці вольтметри точніші та стійкіші до шумів, ніж цифрові вольтметри для пульсації часу та перетворення частоти, але мають більший час вимірювання.

Імпульсний метод перетворення в поєднанні з інтеграцією двох частин дає змогу без особливої потреби ефективніше зменшити вплив поміх, вимірювання обох полярностей, отримати вхідний опір, який буде рівний одиниці гігаом, та невелику помилку вимірювання без особливих вимог до постійності лінійної напруги.

Електронні лічильники надійно привертають увагу покупців. А надалі очікується лише підвищення ролі їхньої служби. Все це обумовлено рядом їх беззаперечних переваг.

Поява широко доступних і відносно недорогих мікроконтролерів вивела

промисловість електронних вимірювальних приладів на новий рівень високої якості. Це не тільки усунуло недоліки, але й надало цифровим пристроям значні переваги перед своїми аналоговими конкурентами. Тепер виміряти електричні величини стало набагато простіше і доступніше навіть для школярів. Зникла потреба в складних аналогових розрахунках несправностей лічильників напруги і струму, а зберігання додаткових резисторів і шунтів стало непотрібним.

Цифрові вимірювальні системи – це системи майбутнього, і з часом їх роль буде зростати, якість покращиться, а ціни стануть доступними.

Структурна схема пристрою складається з таких частин:

A1: (Вхідний каскад) – регулює вимірювану напругу до потрібного рівня;

A2: (Аналого-цифровий перетворювач) – пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал в дискретний код (цифровий сигнал);

A3: (Транзисторні ключі) – Одним з основних елементів цифрової та імпульсної техніки є ключовий блок. Ключові блоки (перемикачі) використовуються для підключення (відключення) ланцюгів навантаження під впливом зовнішніх сигналів, що управляють. Ключі входять як окремі елементи в складні блоки. Вони перемикають живлення на окремі розряди восьмирозрядного дисплея.

A4: (Схема визначення полярності) – допомагає визначити полярність вимірюваної напруги;

A5: (Блок індикації) – електронний дисплей для відображення результатів вимірювання;

A6 (Блок живлення) – забезпечує живлення приладу і всіх частин мілівольтметра. Схема регулювання напруги 5,12 В – встановлює напругу в 5.12 В, що необхідна для більш точних вимірювань.

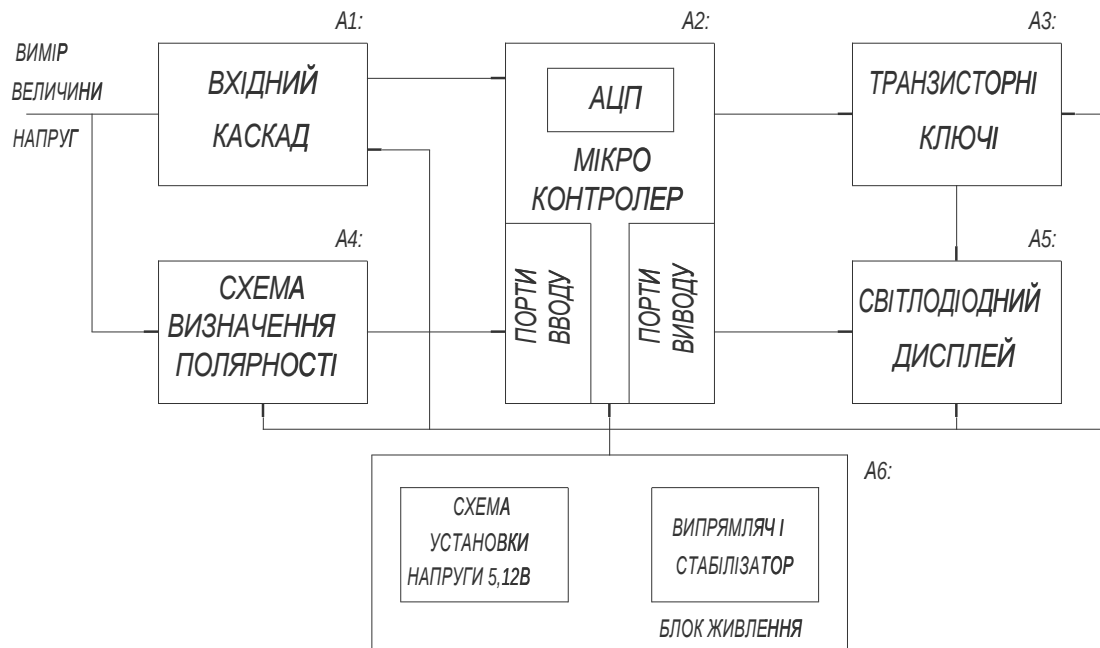


Рис. 2.4 Структурна схема

2.3 Математична модель вимірювального каналу

Для вирішення завдання отримання математичної моделі електричного кола зі зосередженими параметрами необхідно ретельно вказати індивідуальні номери його вузлів, деталізувати параметри кожної гілки та встановити їх інцидентність відповідним вузлам. Цей процес є визначальним для створення математичної моделі, що враховує особливості взаємодії елементів електричного кола.

Визначення параметрів та інцидентності є ключовим кроком у формуванні математичної моделі електричного кола. Це вимагає не лише точного визначення значень параметрів, але й чіткої ідентифікації зв'язків між різними елементами системи. З урахуванням отриманих даних можна використовувати перші та другі закони Кірхгофа для формулювання системи інтегродиференціальних лінійних або нелінійних рівнянь, яка належить до обраного класу електричного кола.

Особливо важливим етапом є реалізація матрично-топологічних методів на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ). Процес формування математичної моделі ланцюга завершується утворенням системи звичайних диференціальних рівнянь у нормалізованій формі. Цей підхід дозволяє

ефективно представляти електричне коло у вигляді математичного виразу, який може бути використаний для подальших обчислень та аналізу його характеристик.

Таким чином, крок за кроком формується математична модель, яка дозволяє детально дослідити та розуміти поведінку електричного кола, забезпечуючи теоретичну підставу для подальших наукових розвідок у галузі електротехніки в формі:

$$\frac{dw}{dt} = f(w, t, z), \quad w(t_0) = w_0, \quad t \geq t_0, \quad (2.11)$$

де w – N -мірний вектор шуканих струмів і (або) напруги; $f(w, t, z)$ – N -мірна вектор-функція; z – N -мірний вектор зовнішнього впливу; w_0 – N -мірний вектор значень струмів і (або) напруги в момент часу t_0

Очевидно, що в разі взаємодії k різнорідних фізичних явищ у кожному елементі енергетичного ланцюга із зосередженими RLC - матричними параметрами, процес формування його математичної моделі можна здійснювати на основі тих самих методів формування моделей електричних ланцюгів, утворюючи систему звичайних диференціальних рівнянь виду (2.11) розмірністю в k разів більше.

Широко поширений випадок, коли в різних системоутворювальних елементах енергетичного ланцюга спостерігається різна кількість фізично неоднорідних явищ. При цьому може бути втрачено зв'язність ланцюга за потоками різних видів енергії - теплової, гідравлічної, електромагнітної. Наприклад, у двоконтурній схемі енергоблока з реактором водо-водяного типу маємо однозв'язний ланцюг за потоками теплової енергії та двозв'язний ланцюг за потоками механічної енергії рухомої рідини. Тому процес формування

математичних моделей енергетичних ланцюгів із такими специфічними фізико топологічними властивостями доцільно здійснювати послідовно за однотипними потоками енергії, використовуючи перший закон Кірхгофа. У результаті отримаємо інтегро-диференціальну систему рівнянь виду

$$f\left(\frac{dw}{dt} \int_{t_0}^t w(r) dr, w, t, z\right) = 0, \quad w(t_0) = y_0, \quad t \geq t_0, \quad (2.12)$$

де $w = \{u_n(t) | n = 1, N\}$ – вектор паралельних переміщень енергетичного кола, що містить N вузлів.

Особливий випадок становлять енергетичні ланцюги, що містять елементи з розподіленими параметрами. Математичні моделі таких ланцюгів формуються на основі законів збереження енергетичних потоків у вузлах. Основою формування є метод вузлових паралельних змінних - аналог методу вузлових потенціалів в електричних колах. Аналог методу контурних струмів для енергетичних кіл із розподіленими параметрами не використовується, оскільки в нестационарних режимах потоки на вході та виході елементів не збігаються. Тим самим порушуються умови застосовності цього методу.

Якщо паралельні та послідовні змінні на кордонах елементів із номерами $n = 1, N$ означити через

$$\{u_n(0, t), u_n(l, t), i_n(0, t), i_n(l, t) | n = 1, N\} \quad (2.13)$$

А значення вузлових потенціалів через

$$\{u_j(t) | j = 1, j_0\} \quad (2.14)$$

де загальна кількість вузлів у ланцюзі, то математичну модель енергетичного ланцюга з розподіленими параметрами можна представити у вигляді

$$A\{i_n(0, t), i_n(l, t) | n = 1, N\} = \{i_j(t) | j = 1, j_0\}, \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} u_n(0, t) = u_j(t) \text{ для } j_n^0 = j \\ u_n(l, t) = u_j(t) \text{ для } j_n^l = j \end{cases} \quad j = 1, j_0 \quad (2.16)$$

$$\left\{ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{vmatrix} u_n(x, t) \\ i_n(x, t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_{un} & r_n \\ g_n & K_{in} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_n(x, t) \\ i_n(x, t) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K_{un}^t & L_n \\ C_n & K_{in}^t \end{vmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{vmatrix} u_n(x, t) \\ i_n(x, t) \end{vmatrix} \right\} n = 1, N \quad (2.17)$$

тут $\{a_1 | a_2\}$ – вектор з елементом a_1 впорядкований по параметру a_2

система рівнянь (2.15) відображає перший закон Кірхгофа для послідовних змінних на кордонах елементів, що примикають до вузлів ланцюга. A – матриця з'єднань розмірності $(Kj_0)(2Nk)$; $i_j(t)$ послідовні змінні зовнішніх джерел або споживачів речовини та енергії, що примикають до вузла j . У системі рівнянь (2.16) встановлюється зв'язок між паралельними змінними на кордонах елементів і у вузлах ланцюга. j_n^0 і j_n^l – номери вузлів, до яких примикають відповідно ліва та права межі n -го елемента. Система рівнянь

(2.17) представляє сукупність математичних моделей елементів енергетичного ланцюга з розподіленими параметрами.

2.4 Висновки до розділу

В данному блоці було розглянуто ключові аспекти, пов'язані з розробкою структурної схеми вольтметрів та комп'ютеризованих приладів для вимірювання напруги постійного струму. Важливо зазначити, що ці теми мають прямий вплив на розвиток вимірювальних технологій і використання їх у наукових та промислових галузях.

Розглядалися аспекти розробки структурних схем, що є ключовим етапом в процесі створення вимірювальних приладів. Важливим є правильний вибір елементів схеми та їх взаємодія для досягнення максимальної точності та ефективності вимірювань.

Було розглянуто складові комп'ютеризованого приладу для вимірювання напруги постійного струму. Обговорювалися аспекти автоматизації, інтеграції з комп'ютерними системами та забезпечення високої точності вимірювань.

Висвітлювалася важливість розробки математичних моделей для опису роботи вимірювального каналу. Ці моделі дозволяють аналізувати та оптимізувати параметри приладу, підвищуючи його ефективність та точність.

Загальною метою цього блоку є розуміння принципів розробки та використання вольтметрів, а також важливість комп'ютеризації вимірювальних систем для забезпечення високої якості та точності вимірювань в сучасному науковому та технічному середовищі.

3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

3.1. Вибір мікроконтролера

Важливим етапом при аналізі характеристик мікроконтролера є розгляд його архітектури та специфікацій щодо робочої частоти, розрядності та наявності апаратного прискорення.

Зокрема, аналізуючи архітектурні особливості мікроконтролера, слід враховувати технологічний процес виготовлення, що безпосередньо впливає на його ефективність та тепловіддачу. Розглядаючи робочу частоту, важливо забезпечити її сумісність із завданнями вимірювань та обчислення, які виконує прилад.

Додатковим аспектом дослідження є аналіз можливостей апаратного прискорення, такого як вбудовані периферійні модулі, що дозволяють оптимізувати обробку сигналів та забезпечувати високу точність вимірювань. За врахуванням цих факторів дозволяється підняти рівень ефективності та швидкодії вимірювального пристрою.

Не менш важливим є питання інтеграції мікроконтролера з іншими елементами системи, такими як сенсори, інтерфейси зовнішніх пристроїв та можливості розширення функціоналу. Це відкриває перспективи для подальшого розвитку та модернізації вимірювальних приладів з урахуванням вимог специфічних завдань та технічних характеристик.

У подальших роботах рекомендується також детально вивчати питання енергоефективності та враховувати можливості оптимізації споживання енергії з метою продовження терміну служби вимірювального пристрою. Загальний науковий підхід до вивчення та вибору мікроконтролера для цифрових вимірювальних приладів сприятиме покращенню їхньої функціональності та надійності в різноманітних застосуваннях.

Для вирішення цих проблем підходящим варіантом є мікроконтролер типу PIC16F887 на рис. 3.1, фірми Microchip Technology, оскільки він складається з наступних блоків:

- Flash-пам'ять програм об'ємом 8Kx14-розрядних слів;
- ОЗП об'ємом 368x8 байт;
- EEPROM-пам'ять даних об'ємом 256x8 байт;
- два 8-бітних таймера-лічильника;
- 10-бітний, 8-канальний АЦП;
- аналоговий компаратор;
- чотири 8-бітних порта вводу\виводу.

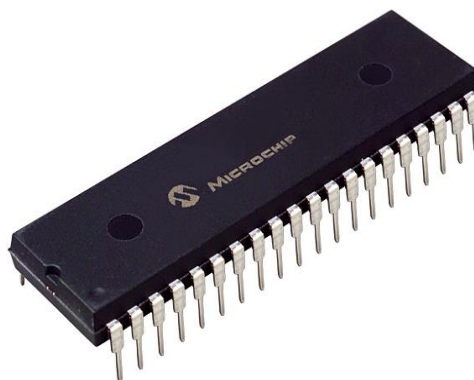


Рис. 3.1 Зовнішній вигляд мікроконтролера PIC16F887

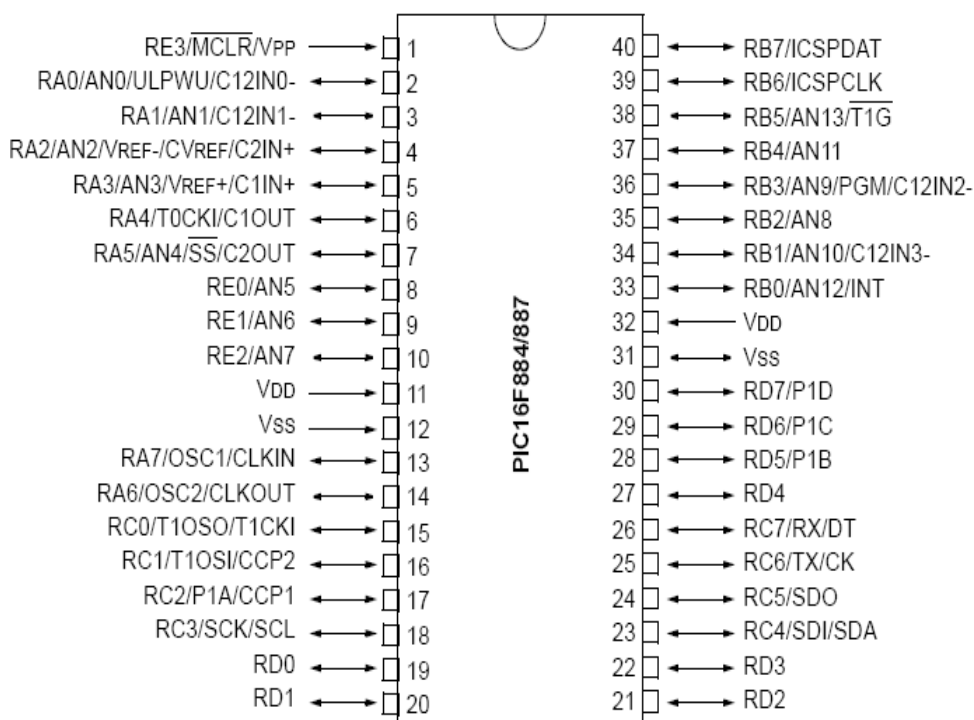


Рис. 3.2 Призначення виводів

3.2 Вибір схеми та блока живлення

При поглибленому аналізі вибору схеми вхідного підсилювача з огляду на ключові аспекти, що визначають його ефективність та придатність для інтеграції у вимірювальні системи. Важливою вимогою є забезпечення високого вхідного опору каскаду, який є визначальним для успішної адаптації підсилювача до конкретного джерела сигналу. Розглядаючи цей аспект, важливо враховувати не лише значення вхідного опору, але і його частотні характеристики для забезпечення ефективного узгодження зі сигналом.

Операційний підсилювач (ОП), оснащений внутрішньою схемою частотної корекції та операційним діапазоном від ± 3 до $\pm 18\text{В}$, виявляється досконалим інструментом для виконання математичних операцій. Ця властивість розширює його функціональність, забезпечуючи необхідну гнучкість для застосування в різних сферах електроніки.

ОУ використовуються не лише для математичних операцій, але й у різних аналогових та імпульсних схемах. Їх популярність пов'язана з низькою вартістю, надійністю та високими електричними параметрами. При цьому важливим елементом є використання глибокого негативного зворотного зв'язку, що сприяє підвищенню стабільності та точності вимірювань.

Аналізуючи конструкцію ОП, важливо враховувати його входи, виходи та виводи для підключення джерел живлення та загальних проводів. Також слід приділити увагу наявності виводів для підключення пасивних ланцюгів, які регулюють АЧХ ОУ, що розширює можливості та гнучкість налаштувань в рамках вимірювальної системи. Усе це відображає складність і великий потенціал операційних підсилювачів у сучасних електронних системах.

коефіцієнтом посилення¹⁰.

Конденсатори C1, C2, – вирівнюють вихідну напругу. Мікросхема DA1 типу KP142H12A – триполярний стабілізатор з регульованою вихідною напругою. Його функція: вбудований захист від перегріву, корекція зони безпечної роботи вихідного транзистора. Мікросхема KP142H12A дає стабільну напругу 5.12В, що є напругою живлення для операційного підсилювача вхідного пристрою.

3.3 Світлодіодна матриця

Основною метою використання світлодіодної матриці у вольтметрах є забезпечення зручності та точності вимірювань, а також можливості візуалізації даних для користувача.

Світлодіодна матриця, завдяки своїй властивості ефективного світіння при низькому споживанні енергії, стає ідеальним кандидатом для створення індикаторів та дисплеїв в вольтметрах. Це дозволяє підвищити енергоефективність та тривалість роботи пристрою, що особливо актуально в сучасних умовах стрімкого розвитку технологій енергозбереження.

Застосування світлодіодної матриці у вольтметрах також має потенціал покращити зручність користування пристроєм. Інтеграція цього елементу дозволяє створювати інформативні та легко читабельні дисплеї, що сприяє збільшенню комфорту користувача під час вимірювань.

Додатково, світлодіодна матриця може служити не лише як індикатор вимірювань, але й як елемент для візуалізації різних режимів роботи вольтметра. Це розширює можливості функціональності пристрою та надає користувачу більше можливостей для взаємодії з вольтметром.

Для цих цілей ми вибрали світлодіодну матрицю CA56-21SRWA із загальним анодом рис. 3.5.

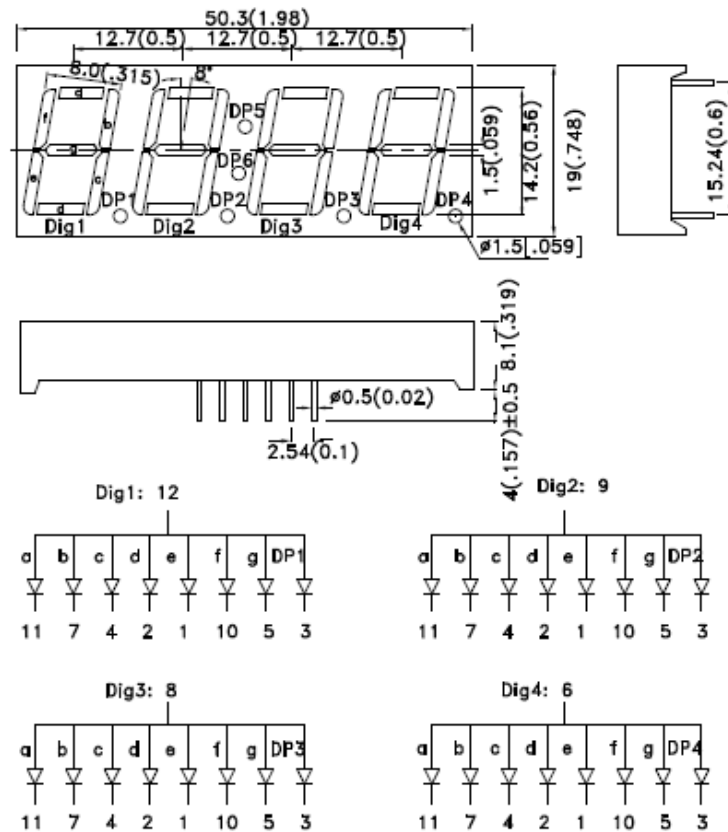


Рис. 3.5 Матриця світлодіодна CA56-21SRWA.

Щоб не використовувати велику кількість портів вводу-виводу в мікроконтролері, доречно використовувати принцип динамічного відображення. При цьому катоди всіх однойменних індикаторів підключаються через активні резистори до будь-якої клеит мікроконтролера, наприклад, клеми С. Запалення того або іншого індикатора здійснюється подачею на аноди обраного індикатора напруги, біля напруги живлення. Можна підключити індикатор так, як це показано на рис. 3.6

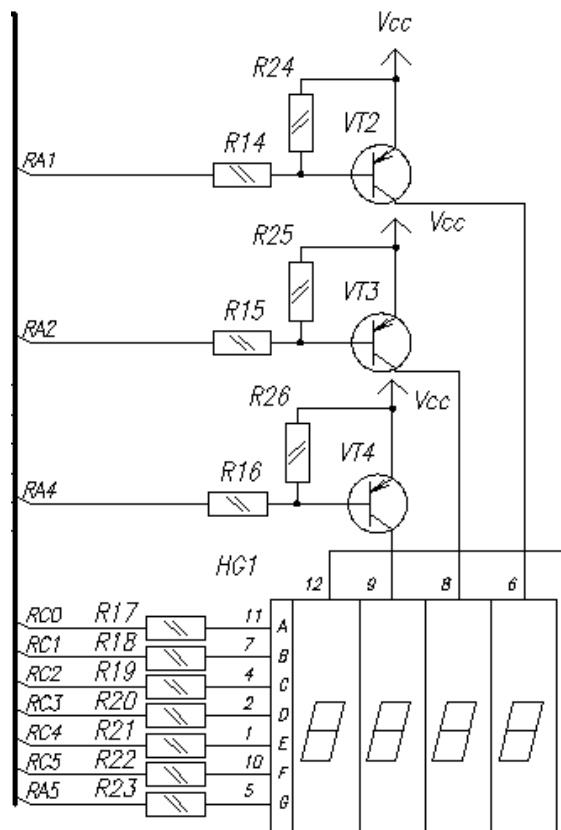


Рис. 3.6 Включення семисигментного індикатора.

Щоб увімкнути той чи іншого світлодіодного сегмент, необхідно встановити нульовий рядок C відповідного порту, та встановити лінію PC0. Резистори R17...R23 подають струм через сегменти.

3.4 Висновки до розділу

В цьому розділі було розглянуто принципову схему, яка в загальних рисах показує, як усі частини пристрою взаємодіють. Важливим моментом був вибір мікроконтролера. Тут розглянуто такі критерії, як енергоспоживання, швидкість, обсяг вбудованої пам'яті та ціна. Запропоновано мікроконтролер PIC16F887 з різними характеристиками, такими як Flash-пам'ять, ОЗП, EEPROM-пам'ять, таймери-лічильники, АЦП та інші.

Важливе уточнення у вигляді малюнків додає візуального аспекту та дає змогу краще зрозуміти, про що йдеться.

Було обговорено критерії вибору мікроконтролера та запропоновано приклад - PIC16F887. Розглянуто блоки та характеристики, які роблять його придатним для використання в приладі.

Було розглянуто важливість вибору схеми вхідного підсилювача та блока живлення. Підкреслено необхідність урахування високого вхідного опору каскаду для узгодження з джерелом сигналу. Розглянуто операційні підсилювачі, їх призначення та використання в різних електронних схемах. Визначено схему блоку живлення, описано компоненти, такі як конденсатори та мікросхема DA1 типу KP142H12A.

Візуалізація схем додає ясності та дає змогу краще сприймати подані дані.

У цьому розділі розглядається світлодіодна матриця CA56-21SRWA та її застосування. Обговорюється принцип динамічного відображення для оптимізації використання портів введення-виведення мікроконтролера. Підкреслюється важливість керування світлодіодами для досягнення потрібного відображення.

І знову, ілюстрації надають розуміння про те, як влаштована світлодіодна матриця і яким чином нею можна керувати.

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ

4.1 Розробка алгоритму роботи комп'ютеризованого приладу

Сукупність інструкцій, що конкретизують послідовність дій для досягнення певного результату, отримала термін "алгоритм" і визначається у вигляді команд для виконавчого об'єкта, що реалізує вказаний алгоритм.

Процес готування до розв'язання задачі на комп'ютері відомий як алгоритмізація, і його розробка складається з кількох етапів:

1) Ознайомлення з поставленою задачею, що передує алгоритму. Зазвичай вона

представлена описово за допомогою формул, графіків або таблиць. Необхідно глибоко вивчити процес, який підлягає алгоритмізації, виявити його закономірності та зазначити інформацію про джерело введення, області зміни аргументів та точність обчислень.

2) Математична формалізація описової умови задачі, включаючи побудови масивів арифметичних та логічних операторів. Особлива увага приділяється матриці логічних операторів, яка включає всі умови, що відображають закономірності оброблюваного процесу.

3) Створення схеми алгоритму.

Мікроконтролер, керований програмою, виконує ряд функцій:

- Підключення вимірювального каналу до необхідного каналу аналого-цифрового перетворювача (АЦП).
- Запуск АЦП та обчислення коду результату.
- Обчислення значення вимірювальної напруги після отримання коду АЦП.
- Перетворення вимірюваного значення напруги в код із сімома сегментами та відображення даних на індикаторі.

- Підтримання процесу динамічного відображення.

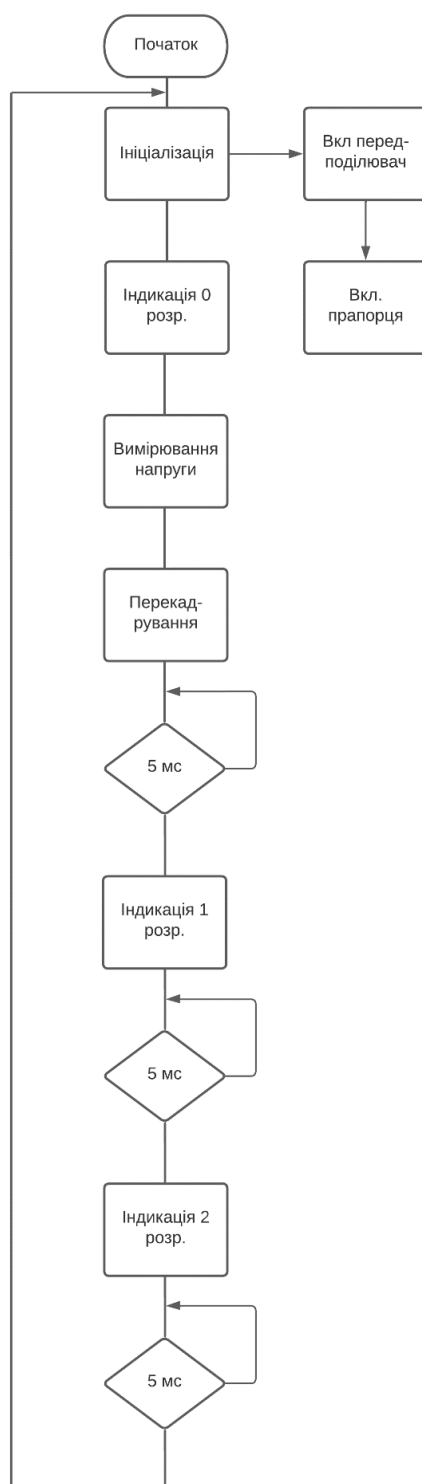


Рис. 4.1 Алгоритм прикладної програми для цифрового мілівольтметра постійного струму.

4.2 Програма роботи комп'ютеризованого приладу

Головна програма повинна виконувати наступну послідовність ініціалізації:

- ініціалізація портів вводу\виводу на мікроконтролері;
- ініціалізація семисигментного індикатора;
- встановлення режиму роботи для АЦП;
- ініціалізувати адреси відображення буфера;
- встановлення глобального рішення про переривання.

Під час робочого циклу програма повинна виконувати такі дії:

- вивести повідомлення про нормальну роботу пристрою, з успішним процесом ініціалізації мікроконтролера та семисигментного індикатора;
- виміряти напругу за допомогою АЦП;
- обчислити вихідне значення;
- завантажити результати в індикаторний буфер;
- відобразити данні на семисегментному індикаторі;

Повна версія алгоритму, на якому дані на рис. 4.1

Основною роботою процесора є організація трирозрядного динамічного відображення. Час індикації для кожного розряду приблизно 5 мс. Відлік цього часу організовується шляхом переривання переповнення таймера TMR0.

Таймер має коефіцієнт поділки 256, розподільник – 4. Після індикації нульової напруги розряду проводиться вимірювання.

Результати вимірювань заносяться в 2 регістри з правильним вирівнюванням. Потім 16 біт двійкового коду перекоднуються в 3 біти двійково десятичного коду. Результат перекодування заносяться в регістр індикації.

Програма повторюється після індикації другого розряду.

Спочатку необхідно вибрати елементну базу розроблюваного пристрою, оскільки від цього залежить качество апаратури і обсяги розроблюваного програмного забезпечення. Вибір елементної бази повинен бути ретельно продуманий і обоснований до початку програмної розробки, так як в деяких випадках заміна компонентів може привести до повного перероблювання програми.

Як тільки вибір зроблений, треба вибрати структуру програмного забезпечення. В результаті цієї роботи може з'явитись що в елементну базу треба внести якісь зміни.

Коли структура програмного забезпечення зібрана, приходить час написання програми. Щоб полегчити наступні тестування і відладку, треба розділити її на пару модулів, кожен із яких виконую певні функції. Ці модулі потрібно писати в порядку черги та тестувати їх, що особливо важливо для модулів драйверів, які керують портами входу/виходу. В ідеалі, кожним портом повинен керувати відповідний програмний модуль.

Коли програма написана її потрібно затестити. В залежності від обставин і специфіки розробляемого пристрою користуються симулятором або емулятором. По закінченню тестування можна виконати моделювання роботи.

Саме перепрограмування версії слід використовувати для наступних тестів макеті або досліджуваному зразку.

Настройку вольтметра починають зі встановлення напруги питания 5,12 В обертанням движка підлаштованого резистору. При цьому мікроконтролер не встановлюють в мікросхему.

При налагоджуванні вольтметра паралельно вимірюваного ланцюга встановлюють цифровий вольтметр. Зміну напруги живлення мікроконтролера вирівнюють показання приладу, що настраюється, і цифрового вольтметра. При цьому напруга живлення мікроконтролера не повинна перевищувати максимально допустиму напругу, яка дорівнює 5,5 В. При зменшенні напруги живлення показники збільшуються (зменшується вага розряду квантування).

4.3 Вимірювані параметри напруги та класифікація приладів

Вимірювання напруги є одним із найпоширеніших у практиці електровимірювань і має головне значення, оскільки саме цією величиною прийнято характеризувати режими роботи різних радіотехнічних пристроїв, їхніх вузлів і блоків. До того ж, підключення вольтметрів не призводить до порушення схеми з'єднань, а під час вимірювання струму ланцюг доводиться

розмикати і в його розрив включати амперметр. Однак, у цілій низці випадків необхідні прямі та непрямі методи вимірювання напруги розглядаються спільно.

Вимірювання класифікують за кількома ознаками, найважливіші з яких перелічені далі.

За першою ознакою вимірювання поділяють на статичні, за яких вимірювана величина (ІВ) залишається постійною в часі в процесі вимірювання, і динамічні, за яких ІВ змінюється в процесі вимірювання.

Класифікація за другою ознакою є більшою мірою умовною, проте широко застосовується у вимірювальній техніці.

За третьою ознакою вимірювання поділяються на 3 класи: Вимірювання максимально можливої точності, досяжної за сучасного рівня техніки – це вимірювання, пов'язані зі створенням і відтворенням еталонів. Контрольно-повірочні вимірювання, похибки яких не повинні перевищувати заданого значення. Такі вимірювання здійснюються переважно державними та відомчими метрологічними службами та ремонтними організаціями.

Технічні вимірювання - вимірювання, у яких похибка результату визначається метрологічними характеристиками засобів вимірювання. Технічні вимірювання є найпоширенішими і виконуються в усіх галузях господарства та науки.

За четвертою ознакою вимірювання класифікують залежно від числa спостережень багаторазові та одноразові. Під спостереженням розуміють експериментальну операцію, виконувану в процесі вимірювання, у результаті якої отримують одне значення із серії значень величин величин, що підлягають спільній обробці для отримання результату вимірювань.

За п'ятою ознакою вимірювання поділяються залежно від виду рівняння вимірювання, що й визначає спосіб отримання результату. Прямими називають вимірювання, за яких шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних (за показаннями ІІ). Непрямими називають вимірювання, за яких шукане значення величини знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною і величинами, виміряними прямим

методом.

Сукупними називають здійснювані одночасно вимірювання кількох однойменних величин, за яких шукані значення величини знаходять розв'язанням системи рівнянь, одержуваних під час прямих вимірювань різних сполучень цих величин або низки інших величин, функціонально пов'язаних із вимірюваними.

Спільними називають проведені одночасно вимірювання двох або декількох різнойменних величин для знаходження залежності між ними. Прикладом спільних вимірювань може слугувати вимірювання теплової енергії за температурою, тиском і витратою теплоносія, визначення питомого електричного опору провідника за його опором, довжиною та площею поперечного перерізу.

Вимірювання напруги характеризується низкою принципових особливостей, основними з яких є: широка область частот, дуже широкі межі вимірюваних струмів (від 10^{-14} до 10^6 А) і напруг (від часток мікровольт до сотень мікровольт); велике різноманіття форм вимірюваних напруг; мала потужність джерел сигналів, висуваються жорсткі вимоги до вхідного імпедансу вольтметрів і амперметрів.

Вимірювання постійної напруги та полягає в знаходженні їхнього значення та визначення полярності. Метою вимірювання змінних напруги є знаходження будь-якого їхнього параметра. Велике різноманіття форм змінних напруг вимагає уточнення і визначення вимірюваних параметрів.

Електричні сигнали напруги характеризуються насамперед миттєвими значеннями, тобто значеннями напруги і струму в заданий момент часу

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.1)$$

Миттєві значення напруги становлять інтерес під час дослідження форми сигналів, наприклад за допомогою осцилографа. Вольтметрами й амперметрами вимірюють інші параметри.

Змінний струм промислової частоти має синусоїдальну форму і характеризується миттєвим значенням, наведено в рівнянні середнім квадратичним значенням $U_{\text{с.к.}}$ (це значення часто називають діючим U або

ефективним), амплітудою і фазою.

В електроніці поряд із сигналами синусоїдальної форми широко використовують і несинусоїдальні сигнали, такі сигнали характеризуються піковими значеннями (максимальними значеннями з усіх миттєвих значень) у додатних або від'ємних напівхвилях $U_{max} + U_{max} - (U_{max}, U_{min})$, середніми квадратичними значеннями, а також середнім значенням, часто званим постійною складовою.

Якщо сигнал містить постійну складову, то середнє значення дорівнює середньому арифметичному всіх миттєвих значень за період

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (4.2)$$

Середньовипрямлене значення визначають як середнє арифметичне абсолютних миттєвих значень за період

$$U_{cv} = \frac{U}{T} \int_0^T |U(t)| dt \quad (4.3)$$

Середньоквадратичне значення знаходять як корінь квадратний із середнього за період квадрата миттєвих значень

$$U_{ck} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (4.4)$$

Гармонійні сигнали характеризуються амплітудним значенням U_m .

$$A = U_{max} - U_{min} = U_B - U_H = 2U_m \quad (4.5)$$

Величина називається розмахом сигналу. Для однополярних сигналів $U_{cv} = U_{cp}$, а амплітуда дорівнює розмаху сигналу.

Існує певний зв'язок між усіма перерахованими параметрами, що залежить від форми сигналу, тому що вище наведені формули справедливі для сигналів синусоїдальної форми. Цей зв'язок заведено характеризувати коефіцієнтами амплітуди.

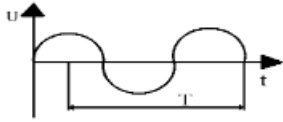
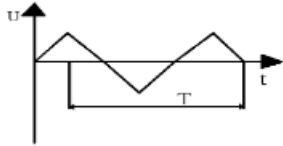
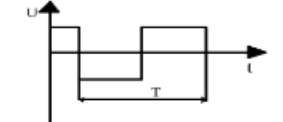
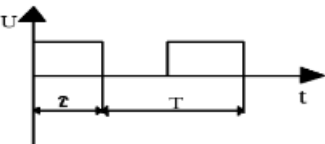
$$K_a = U_{max}/U_{ck} \quad (4.6)$$

$$K_\phi = U_{ck}/U_{cv}$$

Для деяких, часто використовуваних форм сигналів, коефіцієнти амплітуди і форми наведено в таб. 4.3. Коефіцієнти форми й амплітуди однополярних імпульсів визначаються їхньою свердловитістю, де $Q=T/\tau$,

$$K_a = K_\phi = \sqrt{Q}$$

Для вимірювання напруги змінюються як методи безпосередньої оцінки, так і методи порівняння. Вибір методів і засобів вимірювання напруги обумовлюється необхідною точністю вимірювань, амплітудним і частотним діапазонами вимірюваного сигналу, потужністю, що споживається приладом від вимірювального кола.

Форма сигналу	Коефіцієнт форми K_ϕ	Коефіцієнт амплітуди K_a
 синусоїдальна	1,11	1,41
 пилоподібна	1,16	1,73
 меандр	1,0	1,0
 імпульсивна	$\sqrt{T/t}$	$\sqrt{T/t}$

Таб. 4.1 Форми сигналів

Прилади для вимірювання сили струму утворюють підгрупу А-амперметри. Усередині цієї підгрупи виділяють амперметри постійного струму (А2), змінного струму (А3), універсальні (А7) і перетворювачі струму (А9).

Амперметри будуються на базі електромеханічних приладів, які за принципом своєї роботи дають змогу вимірювати постійні та змінні струми низької частоти. На них поширюються вимоги ДСТУ, який встановлює такі класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0. доповнення електромеханічних приладів перетворювачами змінного струму в постійний дає змогу значно розширити їхні можливості та використовувати для вимірювання на радіочастотах.

Більш широка класифікація приладів для вимірювання напруги - вольтметри, що утворюють групу В. Серед приладів цієї підгрупи виділяють вольтметри постійного струму (В2), змінного (В3), імпульсного струму (В4), фазочутливі (В5), селективні (В6), універсальні (В7), вимірювач відношення, різниці та нестабільності напруг (В8), перетворювач напруг (В9).

Вольтметри постійного і змінного струму низької частоти можуть будуватися на базі електромеханічних приладів згідно з ДСТУ. Однак, як правило, вольтметри - це представники електронних вимірювальних приладів в аналоговому або цифровому варіантах. На електронні аналогові вольтметри також поширюються вимоги ДСТУ, зокрема вольтметри видів В3...В7 додатково класифікуються за параметром напруги, що вимірюється, на вольтметри амплітудної (блокової), середньоквадратичної та середньовипрямленої напруги. Вони можуть мати класи точності 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0; 15; 25.

Розглянемо один зі способів вимірювання миттєвого значення напруги та частоти мережі з використанням 8-бітного мікроконтролера PIC. За необхідності, цей метод може бути адаптований для застосування з іншими мікроконтролерами, включно з широко використовуваними ARDUINO, за умови, що вони підтримують реалізацію переривань за таймером із частотою 5-10 кГц.

Також запропонований метод дає змогу вимірювати частоту мережевої напруги без використання додаткових зовнішніх пристроїв, таких як компаратори. Однак, при цьому виникає необхідність вибору між часовими ресурсами мікроконтролера і точністю вимірювання частоти.

Відзначається важливість вимірювання миттєвого значення напруги, на відміну від інших характеристик, наприклад, середнього випрямленого значення. Багато електронних вольтметрів, особливо дешеві моделі, вимірюють напругу мережі за середнім випрямленим значенням. Прийнятий метод вимірювання включає в себе вибірку N значень амплітуди напруги за період мережевого циклу, їх підсумовування (без урахування знака), ділення на N (усереднення), з подальшим множенням отриманого результату на відповідний коефіцієнт $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$.

Зазначений коефіцієнт визначає залежність діючого значення синусоїдального сигналу від середньовипрямленого.

Така методика вимірювання проста, не потребує багато ресурсів мікроконтролера (як часових, так і ресурсів пам'яті). Основним недоліком такої методики вимірювання є велика помилка вимірювання на несинусоїдальних сигналах.

Як усі знають, зміна сигналу мережевої напруги підпорядковується синусоїдальному закону (внаслідок застосування синхронних генераторів на електростанції), з частотою зміни сигналу 50 Гц (60 Гц). Однак, на практиці внаслідок впливу сторонніх чинників (здебільшого під'єднання до мережі потужних нелінійних навантажень), а також застосування інверторів із квазісинусоїдальною вихідною напругою (див. рисунок), синусоїда напруги або значно спотворюється, або замінюється прямокутними імпульсами. У таких випадках зазначений вище метод вимірювання дасть дуже велику похибку (наприклад, у квазісинусоїдальних інверторах вихідна напруга, виміряна "китайським" вольтметром, може дорівнювати 180-200В, тоді як чинна напруга дорівнюватиме 220В).

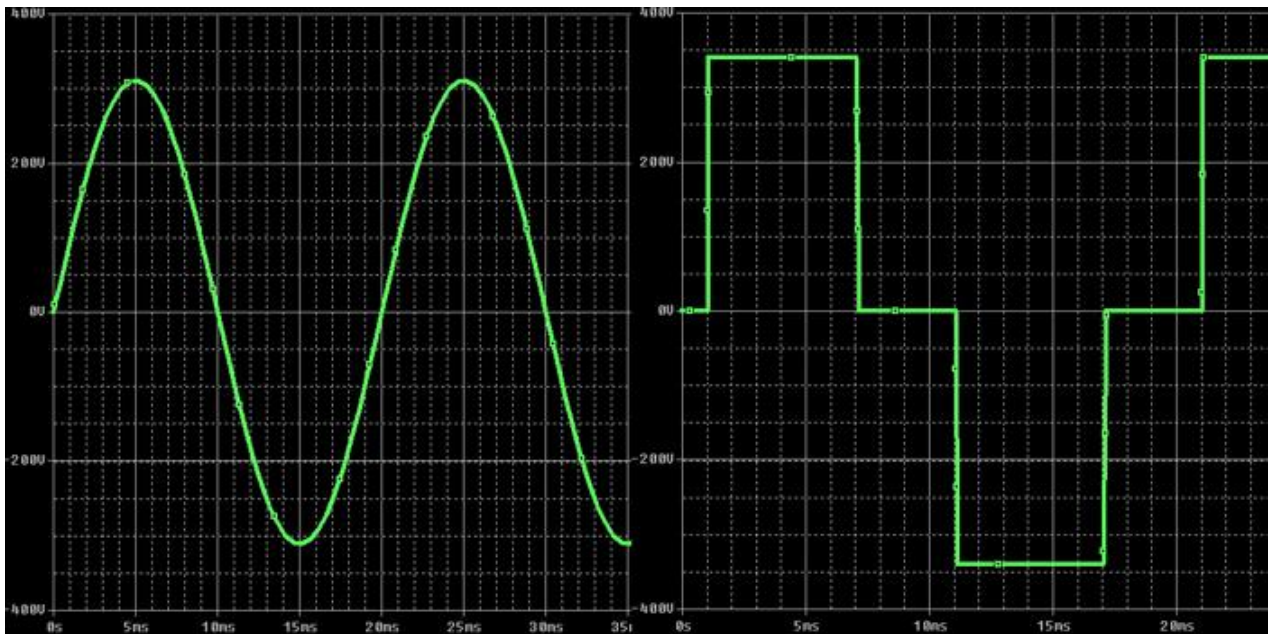


Рис. 4.2 Застосування інверторів із квазісинусоїдальною вихідною напругою

Чому важливо вимірювати саме діюче значення напруги струму. Тому що саме діючі (ще називають його ефективними) значення напруги і струму визначають роботу електричної системи (грубо кажучи, електронагрівач виділяє тепло в прямій залежності від діючих значень напруги і струму мережі).

Діюче значення вимірюваної періодичної величини розраховується за формулою

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (4.7)$$

Або після дискретизації отримаємо

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N V_i^2} \quad (4.8)$$

Необхідно здійснювати добір значень ряду протягом періоду мережевої напруги, потім проводити підсумовування квадратів точок вибірки, ділити отриману суму на кількість точок за період (під час визначення кількості точок вибірки з огляду на теорему Котельникова-Шеннона) і нарешті витягувати квадратний корінь із результату. На перший погляд, ці кроки здаються простими, але є деякі труднощі:

1) Кожного періоду необхідно заново формувати точки вибірки, що збільшує похибку вимірювання;

2) У реальній мережі можливі "нульові полиці" і повторні переходи через

нуль напруги біля нуля, що може істотно спотворити результат вимірювання.

Для подолання перших труднощів пропонується вимірювання суми квадратів точок вибірки за кожний напівперіод, з подальшим підсумовуванням n -ої суми квадратів з $(n+1)$, при цьому відкидаючи $(n-1)$.

Що стосується другої складності, пропонується ввести зони нечутливості за напругою (встановити межі напруги переходу через нуль з позитивного і негативного боку, зазвичай 5-10 В в обидві сторони), а також зони нечутливості за частотою (обмежити допустиму частоту сигналу напруги).

Таким чином, отримаємо розраховане значення діючого значення мережевої напруги за період на кожному напівперіоді мережевої напруги.

$$V = \sqrt{\frac{1}{N_1+N_2} (\sum_{i=0}^{N_1} V_i^2 + \sum_{j=0}^{N_2} V_j^2)} \quad (4.9)$$

Частота напруги вираховується по формулі:

$$F = \frac{F_d}{N_1+N_2} \quad (4.10)$$

де F_d - частота дискретизації (для зручності та збільшення точності вимірювання частоти обрано такою, що дорівнює 10 кГц (період вибірки - 100 мкс)).

4.4 Розрахунок похибки вимірювання

Для розрахунків було взято такі дані:

Напруга U_x , яка дорівнює 1 В;

Коефіцієнт, що залежить від типу ГЛЗН та способу узгодження ідеальної та реальної кривих – Y , 0,45;

Відносна похибка, обумовлена нестабільністю генератора G - δ_0 , 10^{-6} ;

Додатковий час на спрацювання тригера елемента "Г", ПП, ГЛЗН та тривалість керуючого імпульсу - T_d , 20 мс;

Тривалість зворотнього ходу - $T_{звор}$, 35 мс;

Відносна похибка - $\delta_s, 1,5 \cdot 10^{-5}$;

Відносна похибка вхідного пристрою - $\delta_k, 10^{-4}$;

Коефіцієнт операційного підсилення - $K_{оп}, 20000$;

Визначити значення напруги U_x можна за формулою:

$$U_x = \frac{S \cdot N}{f_0 \cdot K},$$

де S – крутість характеристики лінійно-змінюваної напруги.

Значення напруги U_x нам відоме з вихідних даних. Виводимо значення показника крутості характеристики лінійно-змінюваної напруги S :

$$S = \frac{U_x \cdot f_x \cdot K}{N}, \text{ В/с}$$

Проведемо чисельні розрахунки показника крутості характеристики лінійно-змінюваної напруги S :

$$S = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 1}{12} = 250 \frac{\text{В}}{\text{с}}$$

Для цифрових вольтметрів найважливішою характеристикою є точність вимірювання напруги, що включає в себе комплекс характеристик, які кількісно виражаються різними похибками. Слід відрізняти похибку результату вимірювання від похибки самого приладу. Похибка результату вимірювань включає в себе динамічні та статичні складові, причому перші залежать не лише від властивостей приладу, але і від поведінки досліджуваного сигналу у часі. Таким чином, похибка результату може бути більше похибок приладу за рахунок динамічних складових.

Проаналізуємо джерела похибок цифрового вольтметра. Похибка дискретності перетворювача напруги в код пов'язана з перетворенням безперервної величини у дискретну. Максимальне значення абсолютної похибки дискретності визначається за формулою

$$\Delta_d = \pm \frac{S}{2f_0}$$

$$\Delta_d = \pm 0,5q$$

де q – абсолютна похибка.

Тоді $q = 2 \cdot \Delta_d$

Відносно δ_d та наведена γ_d похибки дискретності відповідно визначаються за формулами

$$\delta_d = \frac{\Delta_d}{Nq}$$

$$\delta_{dmax} = \pm \frac{1}{2 \cdot N}$$

$$\gamma_d = \frac{\Delta_d}{N_{ном}q}$$

$$\gamma_{dmax} = \pm \frac{1}{2N_{ном}}$$

Розрахуємо відносну похибку вольтметра за формулою

$$\delta = \pm(\delta_n + \delta_0 + \delta_k + \delta_d)$$

де δ_n - відносна похибка, обумовлена нелінійністю ГЛЗН і нестабільністю крутості у часі;

δ_0 - відносна похибка, обумовлена нестабільністю генератора G ;

δ_k - відносна похибка вхідного пристрою;

δ_d – відносна похибка дискретності.

Розрахуємо значення δ_n :

$$\delta_n = \delta'_n + \delta_s$$

$$\delta'_n = Y \cdot \delta_s$$

де Y – коефіцієнт, що залежить від типу ГЛЗН та способу узгодження ідеальної та реальної кривих U_x ;

δ_s - відносна похибка;

δ'_H - відносна похибка;

Розрахуємо відносну похибку дискретності

$$\delta_d = \frac{1}{N}$$

Проведемо чисельні розрахунки:

$$\delta'_H = 0.45 \cdot 1.5 \cdot 10^{-5} = 6.75 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta_H = 6.75 \cdot 10^{-6} + 1.5 \cdot 10^{-5} = 2.175 \cdot 10^{-5}$$

$$\delta_d = \frac{1}{12} = 0.083$$

Цифрові вольтметри також мають інструментальні похибки, що виникають при нелінійності напруги U_x на робочій ділянці; часовій і температурній нестабільності частоти опорного генератора і крутості лінійної характеристики. Такі нестабільності створюють мультиплікативну похибку.

Задаємося границями шкали вимірювання цифрового вольтметра:

$$(d ; c)$$

$$(0,5 ; 5)$$

$$\delta_H = \delta_M \leq \frac{c - d}{100}$$

Також мають місце джерела адитивної похибки перетворювача напруги в код: зміщення нульового рівня напруги U_x ; ненульова (кінцева) зона невизначеності ПП; затримки початку робочої ділянки та фронтів сигналів. Адитивна похибка залежить від працездатності Т, ПП, G.

В цілому відносна інструментальна похибка при $N = N_{\text{ном}}$ може знаходитись на рівні десятих-сотих часток відсотка, тому звичайно $N_{\text{ном}}$ не перевищує 10^4 .

Проведемо чисельні розрахунки:

$$\delta_H = \delta_M \leq \frac{5 - 0,5}{100} = 0,045$$

$$\delta = \pm(2.175 \cdot 10^{-5} + 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-4} + 0,08) = \pm(0,0834)$$

Розрахуємо амплітудне значення лінійної-змінюваної напруги за формулою

$$U_{\text{км}} = 1,2 \cdot K \cdot U_x, \text{ В}$$

Проведемо чисельні розрахунки:

$$U_{\text{км}} = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 = 1,2 \text{ (В)}$$

Час вимірювання ЧЦВ - це інтервал часу між запуском приладу, в результаті чого схема приводиться у вихідний стан, і видачею результату на цифровий пристрій відображення.

Розрахуємо час вимірювання приладу

$$T_{\text{в}} = T_{\text{ц}} + T_{\text{д}}$$

де $T_{\text{в}}$ - час вимірювання ЧЦВ;

$T_{\text{ц}}$ - час циклу;

$T_{\text{д}}$ - додатковий час на спрацювання тригера елемента "І", ПП, ГЛЗН та тривалість керуючого імпульсу.

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{пр}} + T_{\text{звор}}$$

де $T_{\text{пр}}$ – тривалість прямого ходу;

$T_{\text{звор}}$ – тривалість зворотнього ходу;

$$T_{\text{пр}} = 0,8 \cdot T_{\text{в}}$$

$$T_{\text{в}} = T_{\text{пр}} + T_{\text{д}} + T_{\text{звор}}$$

$$T_{\text{в}} - 0,8 \cdot T_{\text{в}} = T_{\text{д}} + T_{\text{звор}}$$

Проведемо чисельні розрахунки

$$T_{\text{в}} - 0,8 \cdot T_{\text{в}} = (20 + 35) \cdot 10^{-3}$$

$$T_{\text{в}} - 0,8 \cdot T_{\text{в}} = 55 \cdot 10^{-3}$$

$$T_B(1 - 0,8) = 55 \cdot 10^{-3}$$

$$T_B \cdot 0,2 = 55 \cdot 10^{-3}$$

$$T_B = \frac{55 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 275 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$T_{\text{пр}} = 0,8 \cdot 275 \cdot 10^{-3} = 0,22 \text{ с}$$

При використанні сучасної елементної бази можна досягти значення T_d не більше одиниць мікросекунд.

Для найбільш поширеного діапазону значення тривалості прямого ходу ГЛЗН змінюється в межах $T_{\text{пр}} = 10^{-3} \dots 1 \text{ с}$, а значення тривалості зворотного ходу може бути доведено до 1- 2% від $T_{\text{пр}}$.

Розрахуємо максимальну ємність лічильника:

$$N_{\text{max}} = \frac{f_0 \cdot K \cdot U_{\text{км}} \cdot T_{\text{пр}}}{U_{\text{км}}} = f_0 \cdot K \cdot T_{\text{пр}}$$

Проведемо чисельні розрахунки:

$$N_{\text{max}} = 3 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,22 = 660$$

Розрахуємо кількість розрядів коду на виході лічильника.

Для десяткового коду

$$n = \lg(N_{\text{max}})$$

Проведемо чисельні розрахунки кількості розрядів десяткового коду на виході лічильника:

$$n = \lg(3 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,22) = 2,81 \approx 3$$

Для двійкового коду

$$n = \lg \frac{(N_{\text{max}})}{\lg(2)}$$

$$n = \lg \frac{(564)}{\lg(2)} = 9,14$$

Розглянемо приклад похибки каналу вимірювання каналу.

Вимога до похибки каналу вимірювань не більше 0,2%. Розрядність АЦП становить 10 розрядів.

Розрахунок допустимої похибки вимірювань вольтметра здійснюється за формулою

$$\delta_1 \leq \sqrt{\delta^2 - (\delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2)},$$

Де $\delta = 0,2\%$ - необхідна сумарна похибка вимірювання каналу вимірювань при довірчій ймовірності 0,95%

δ_2 – похибка передачі по каналу вимірювань;

δ_3 – похибка, яку вносить АЦП;

$\delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7$ – додаткові похибки, що вносяться температурою навколишнього повітря, перешкодами різного виду, тиском вимірюваного середовища та іншими факторами відповідно.

Похибка передачі по каналу вимірювань встановлюється рекомендаціями ДСТУ-Н РМГ 62:2006. "Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Оцінювання похибки вимірювань при обмеженій вихідної інформації"

$$\delta_2 = \frac{0,2 \cdot 4}{100} = 0,008\%.$$

Похибка, що вноситься 10-ти розрядними АЦП, розраховується наступним чином:

$$\delta_3 = \frac{0,2 \cdot 4}{2^{10}} = 0,0007\%$$

При розрахунках також враховуються додаткові похибки, викликані впливом:

- температури навколишнього повітря;
- перешкод різного виду;
- тиску вимірюваного середовища;
- інших факторів;

Додаткова похибка, яку вносить вплив температури навколишнього повітря, встановлюється рекомендаціями:

$$\delta_4 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002\%.$$

Додаткова похибка, яку вносять перешкоди різного виду, встановлюється рекомендаціями:

$$\delta_5 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002\%.$$

Додаткова похибка, яку вносить тиск вимірюваного середовища, встановлюється рекомендаціями:

$$\delta_6 = \frac{0,2 \cdot 1}{100} = 0,002\%.$$

Додаткова похибка, яку вносять інші фактори, встановлюється рекомендаціями:

$$\delta_7 = \frac{0,2 \cdot 36}{100} = 0,072\%.$$

Таким чином, підставивши в формулу отримані значення, розрахуємо допустиму основну похибку вольтметра.

$$\delta_1 = \sqrt{0,2^2 - (0,08^2 + 0,0007^2 + 0,066^2 + 0,002^2 + 0,002^2 + 0,072^2)} = 0,12\%$$

В результаті розрахунку видно, що основна похибка не перевищує допустимої похибки.

4.5 Висновки до розділу

У цьому блоці було обговорено процес створення оптимального алгоритму для ефективної роботи комп'ютеризованого вимірювального приладу. Звертається увага на обробку сигналів, взаємодію з датчиками та керування функціональними блоками пристрою. Розглядається розробка програмного забезпечення для ефективного функціонування комп'ютеризованого вимірювального пристрою. Основний акцент робиться на реалізації алгоритму, взаємодії з користувачем та інтеграції з комп'ютерними системами.

Розглядається визначення параметрів для вимірювання напруги та важливість класифікації вимірювальних пристроїв. Підкреслюється значення точності та надійності вимірювань, а також відповідність вимогам класифікації.

В цьому аспекті розглядається математичний аспект вимірювань. Аналізується, як враховувати та розраховувати похибки вимірювань для забезпечення високої точності та достовірності результатів.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризований пристрій для вимірювання напруги постійного струму. Для досягнення цієї мети було проведено аналітичний огляд існуючих методів вимірювання постійного струму, включаючи вимірювання напруги.

У першому розділі диплома розглядаються існуючі рішення з вимірювання напруги постійного струму, описуються об'єкти вимірювання та проводиться їх класифікація. Було проведено та написано висновок.

У другому розділі диплома було розроблено структуру комп'ютеризованого пристрою для вимірювання напруги постійного струму. Розглядаються структурні схеми вимірювальних пристроїв та їх характеристики, а також надається структурна схема самого комп'ютеризованого пристрою. Тут також наводиться математична модель вимірювального каналу, і знову робляться висновки до розділу.

Третій розділ присвячений розробці принципової схеми пристрою. В ньому визначається вибір мікроконтролера, схеми блока живлення та інших складових. Зокрема, розглядається використання світлодіодної матриці. Цей розділ також завершується висновками.

Четвертий розділ включає в себе розробку програмно-алгоритмічного та метрологічного забезпечення пристрою. Було розроблено алгоритм роботи пристрою, програму його функціонування та визначає вимірювальні параметри напруги. Важливою частиною цього розділу є розрахунок похибок вимірювання, який дозволяє визначити точність пристрою. Як завершення цього розділу, формулюються висновки, які можуть включати оцінку ефективності та можливостей розробленого програмного та апаратного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) А.В. Шилейко «Електронні прилади залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку», 1989 г. – 326 с.
- 2) Вольтметр – вимірюємо напругу. Призначення, принцип роботи, типи. Режим доступу: <https://instanko.ru/izmereniya/cifrovoj-voltmetr.html> – Дата доступу: 14.12.23
- 3) Мініатюрний вольтметр на мікроконтролері ATtiny13 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiostorage.net/5187-miniatorynyj-voltmetr-na-mikrokontrollere-attiny13.html> – Дата доступу: 14.12.23
- 4) Вольтметр на PIC16F676 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pichobby.lg.ua/shemu/voltmetry/item/2-voltmetr-na-pic16f676.html> – Дата доступу: 14.12.23
- 5) Точковий вольтметр на PIC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cxem.net/izmer/izmer131.php> – Дата доступу: 14.12.23
- 6) Цифровий вольтметр 0-25В на мікроконтролері AVR ATmega32 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://microkontroller.ru/avr-microcontroller-projects/czifrovoj-voltmetr-0-25v-na-avr-atmega32/> – Дата доступу: 14.12.23
- 7) Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «бакалавр» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» Укладачі: Ю.О. Подчашинський, Л. О. Чепюк, Р.В. Петросян. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. – 60 с.
- 8) Змінний і постійний струм – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/ru/postoyannyi-tok-i-peremennyy-tok-otlichiya/> – Дата доступу: 14.12.23
- 9) Методи математичного моделювання енергетичних ланцюгів – Режим доступу: https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/08/Saukh_2020.pdf – Дата доступу 14.12.23

- 10) Вимірювання струму та напруги – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5240651/page:12/> – Дата доступу 14.12.23
- 11) Метрологія і основи вимірювань – Режим доступу: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8766/1/lec_book_metrologia.pdf – Дата доступу: 14.12.23
- 12) Подчашинський Ю.О., Чепюк Л.О., Шавурська Л.Й., Шрубович О.С. Аналіз похибок цифрового вольтметра. Тези XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології», 30–31 березня 2023 р. Житомир : "Житомирська політехніка", 2023. С. 168-169. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/povnyy-tekst.pdf> – Дата доступу: 14.12.23