

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра транспортного зв'язку

**РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ОСНОВНИХ
ПОКАЗНИКІВ ТА ПОХИБОК ЦИФРОВИХ
ВОЛЬТМЕТРІВ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до розрахункової та контрольної роботи
з дисципліни**

***«СПЕЦІАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ В СИСТЕМАХ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ»***

Харків – 2016

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри транспортного зв'язку 9 лютого 2015 р., протокол № 6.

Наведено теоретичні відомості про класифікацію вимірювачів напруг, особливості реалізації та принцип дії схем цифрових вольтметрів з різними методами перетворення напруги в код, принципи розрахунку основних параметрів та похибок цифрових вольтметрів.

Призначено для студентів факультету АТЗ усіх форм навчання та слухачів ІППК.

Укладачі:

доценти М.О. Колісник,
І.В. Піскачова

Рецензент

проф. А.Б. Бойнік

РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА ПОХИБОК ЦИФРОВИХ ВОЛЬТМЕТРІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до розрахункової та контрольної роботи
з дисципліни

*«СПЕЦІАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ В СИСТЕМАХ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ»*

Відповідальний за випуск Колісник М.О.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 19.04.16 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,25. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Вступ

Електричний струм має величезне значення у техніці зв'язку. Без нього неможливо уявити ані сучасну техніку, ані комфортне життя людини. Основними одиницями виміру струму є вольт і ампер. Контролювати напругу і електрорушійну силу (ЕРС) може вольтметр - прилад, що вимірює різницю потенціалів між двома точками електричного кола.

Вольтметри розрізняються за побудовою і принципом дії. Найпростіші стрілкові прилади можуть вироблятися з магнітоелектричними, електростатичними, електромагнітними та іншими рухомими системами. Наприклад, магнітоелектрична система являє собою легку рамку-катушку з проводом, підвішену на розтяжках або встановлену на голчасті підшипники. Рамка, із закріпленою на ній стрілкою, поміщається в полі постійного магніту. Протікаючи через витки рамки, вимірюваний струм взаємодіє з магнітним полем і повертає рамку (стрілку). Додатковий резистор, встановлюваний послідовно з катушкою системи, задає струм, а значить, і напругу повного відхилення рамки. Підключенням додаткового резистора потрібної величини досягається необхідна межа вимірювання приладу.

Для систем передачі даних і систем зв'язку основним параметром при контролі технічного стану обладнання є напруга. Для вимірювання напруги використовуються аналогові та цифрові вольтметри. Вони відрізняються структурою, використовуваними методами вимірювань, принципами перетворення напруги в код, формою подання результату вимірювань. Більш перспективними в даний час є цифрові вольтметри, призначені для вимірювання напруги постійного та змінного струму. Результат вимірювання значення напруги повинен бути достовірним – тобто повинна забезпечуватись точність вимірювання. Точність забезпечується досягненням малого значення похибок вимірювання: інструментальних похибок та похибок дискретності. Тому актуальним завданням для студентів є розрахунок основних параметрів та похибок цифрових вольтметрів різних видів.

1 Основний теоретичний матеріал

Особливостями вимірювання напруги є паралельне підключення вольтметра до струмових кіл. Тому одним з найбільш важливих параметрів вважається вхідний опір вольтметра. Адже від того, наскільки велике значення опору приладу, залежить його вплив на вимірювані параметри кола схеми. У слабкострумових колах це може позначитися на точності вимірювань. Електронні вольтметри можуть мати вхідний опір у двадцять мегаом і навіть більше. Це досягається за рахунок високоомного діельника, застосовуваного у вхідних колах таких приладів.

Оскільки електричний струм може бути постійним і змінним (імпульсним та ін.), то і вольтметри класифікуються на прилади для вимірювання постійної і змінної напруги. Останні, залежно від частоти, форми сигналу і необхідних способів вимірювання, поділяються на пікові, високочастотні, селективні і т. д. Найбільшого поширення набули універсальні електронні вольтметри, що володіють солідним набором функцій, що дозволяє вимірювати електричні сигнали в широкому діапазоні величин (від одиниць мілівольт до тисячі вольт). Межі вимірювань можуть бути істотно розширені застосуванням спеціальних виносних голівок (наприклад, для вимірювання напруги в десятки кіловольт підключають високовольтний діельник).

Основною характеристикою будь-якого приладу, в тому числі і вольтметра, є точність вимірювань, яка залежить від температури, правильності перетворення сигналу, калібрування приладу, дрейфу струму, рівня перешкод і т. д. Температура змінює опір провідників струму і режими роботи електронних схем. З цими явищами справляються вибором матеріалу провідників з малим температурним коефіцієнтом, включенням компенсаційних ланцюгів, введенням схем стабілізації.

Вольтметри, за способом перетворення вимірюваного сигналу, поділяються на дві великі групи: аналогові і цифрові. Як правило, стрілкові прилади є аналоговими. Такі пристрої були поширені в другій половині 20-го століття. Точність таких приладів була не дуже висока. Навіть еталонні аналогові

гальванометри мали відносну похибку не менше 0,005 %. Цифрові вольтметри, основу схеми яких становить АЦП (аналого-цифровий перетворювач), володіють цілим рядом переваг у порівнянні з аналоговими пристроями. Це, в першу чергу, висока точність перетворення, менша залежність від зовнішніх впливів, кращі масогабаритні показники, зручність зчитування інформації (цифровий багаторозрядний індикатор).

Набули поширення малогабаритні недорогі, але досить точні (похибка до 0,2 %) цифрові мультиметри, які здатні вимірювати напругу, струм, опір, а деякі з них температуру, ємність, параметри напівпровідникових приладів і т. д. Однак випускаються і прецизійні вольтметри - калібратори, що мають клас точності 0,00005 і цифровий 8-розрядний індикатор.

В даний час для контролю технічного стану систем зв'язку та передачі даних використовуються електронні та цифрові вольтметри. Електронні вольтметри поділяються на групи:

В1 - установки або прилади для повірки вольтметрів. Можуть використовуватися як джерела каліброваних напруг для градування вольтметрів, підсилювачів, генераторів, осцилографів та ін.;

В2 - вольтметри постійного струму;

В3 - вольтметри змінного струму. Найбільш часто використовуються для вимірювання напруг змінного струму різної форми в діапазоні частот від одиниць герца (Гц) до одиниць гігагерца (ГГц);

В4 - вольтметри імпульсного струму. Призначені для вимірювань імпульсних напруг відеоімпульсів і радіоімпульсів. Шкали приладів проградувані в пікових значеннях імпульсних напруг;

В5 - вольтметри фазочуттєві (вектометри). Призначені для вимірювання величин комплексних складових напруги на виході досліджуваного чотиріполюсника по відношенню до опорної напруги;

В6 - вольтметри селективні. Призначені для вибіркового вимірювання рівнів спектральних складових сигналів в певній смузі частот, діапазон і положення якої можна змінювати;

В7 - вольтметри універсальні. Комбіновані прилади, що дозволяють вимірювати значення різних фізичних величин (силу

струму, напругу постійного або змінного струму, опір постійному струму та ін.);

В8 - вимірювачі відношення напруг. Застосовуються при визначенні нестабільності рівнів, регулюванні апаратури за коефіцієнтом передачі;

В9 - перетворювачі напруги. Призначені для перетворення напруги в іншу електричну величину.

Змінну напругу можна виразити через такі параметри:

- миттєве значення напруги. Його вимірювання здійснюється осцилографами в i -й момент часу;

- пікове (амплітудне) значення напруги - максимальне значення напруги за час вимірювання або період коливання. Якщо сигнал має різні пікові значення напруги позитивної і негативної полярності, то вони вказуються окремо відповідно як U_{a+} , U_{a-} ;

- U_{cp} - середнє значення напруги (постійна складова). Для напруги синусоїдальної форми, симетричної відносно осі часу, середнє значення дорівнює нулю;

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

- $U_{св}$ – середнє випрямлене значення напруги:

$$U_{св} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |U(t)| dt;$$

- U_d – діюче значення напруги:

$$U_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U^2(t) dt;$$

Для сигналів однієї полярності середнє значення та середнє випрямлене значення напруги дорівнюють одне одному.

Параметри напруги сигналу синусоїдальної форми показані на рисунку 1.

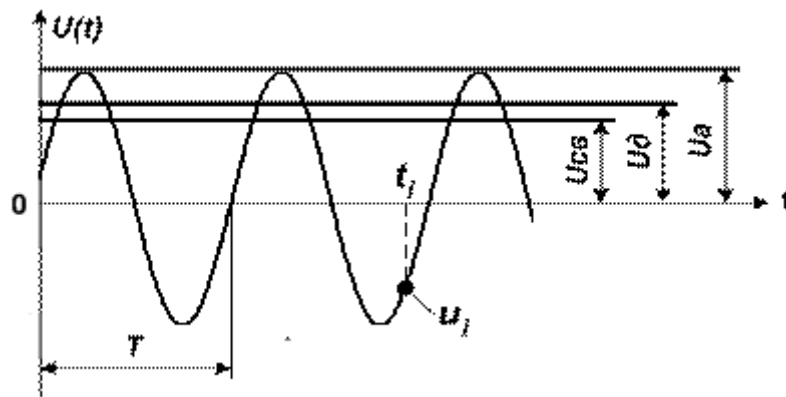


Рисунок 1 - Параметри напруги сигналу синусоїдальної форми

Зв'язок між величинами U_a , $U_{св}$, U_d визначається коефіцієнтами:

- коефіцієнт амплітуди

$$K_a = \frac{U_a}{U_d}$$

- коефіцієнт форми

$$K_\phi = \frac{U_d}{U_{св}}$$

- коефіцієнт усереднення

$$K_y = \frac{U_a}{U_{св}}$$

Як видно,

$$K_y = K_\phi \cdot K_a \text{ і } 1 \leq K_\phi \leq K_a \leq K_y.$$

Пряме вимірювання вимірюваного параметра змінної напруги можливе лише за наявності в приладі перетворювача відповідного типу (детектора). У вольтметрах змінної напруги

застосовують переважно детектори з закритим входом, що реагують тільки на змінну складову напруги.

Залежно від кількості та виду вимірюваних величин можна виділити чотири основні групи серійних приладів:

1) цифрові вольтметри для вимірювання тільки напруги постійного струму;

2) універсальні прилади (мультиметри), які можуть вимірювати:

а) середнє значення за модулем синусоїдальної напруги;

б) середньоквадратичне значення будь-якої періодичної напруги;

в) опір, ємність, температура, індуктивність, відношення двох напруг або струмів;

3) прилади для вимірювання тільки середніх і середньоквадратичних значень. Вони містять відповідний перетворювач вимірюваної величини в напругу постійного струму;

4) імпульсні цифрові вольтметри. Вони містять вхідний перетворювач амплітуди імпульсного сигналу в амплітуду постійного струму.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналоговий сигнал в цифровий (представляє цифровим кодом). Процес аналого-цифрового перетворення становить сутність будь-якого цифрового приладу, в тому числі і вольтметра. Використання в АЦП цифрових вольтметрів двійково-десятькового коду полегшує зворотнє перетворення цифрового коду в десяткове число, що відображається цифровим відліковим пристроєм.

Цифровий відліковий пристрій вимірювального приладу реєструє вимірювану величину. Керуючий пристрій об'єднує і управляє всіма вузлами вольтметра.

За типом АЦП цифрові вольтметри можуть бути поділені на такі основні групи:

- кодово-імпульсні (з порозрядним зрівноваженням);
- часо-імпульсні цифрові вольтметри: з лінійною розгорткою і з двотактним інтегруванням;
- частотно-імпульсні;
- просторового кодування;

- комбіновані.

В даний час цифрові вольтметри будуються частіше на основі кодово-імпульсного і часо-імпульсного перетворення.

АЦП вольтметрів перетворюють сигнал постійного струму в цифровий код, тому й цифрові вольтметри також вважаються приладами постійного струму. Для вимірювання напруги змінного струму на вході вольтметра ставиться перетворювач змінної напруги в постійну напругу, найчастіше це детектор середневипрямленого значення.

Проаналізуємо основні технічні характеристики середнестатистичного цифрового вольтметра постійного струму:

- діапазон вимірювання: 100 мВ, 1 В, 10 В, 100 В, 1000 В;
- поріг чутливості (рівень квантування амплітуди напруги або одиниця дискретності) на діапазоні напруги в 100 мВ може бути 1 мВ, 100 мкВ, 10 мкВ;
- кількість знаків (довжина цифрової шкали) - відношення максимальної вимірюваної величини на цьому діапазоні до мінімальної, наприклад: діапазону вимірювання 100 мВ при рівні квантування 10 мкВ відповідає 104 знаки;
- вхідний опір електричної схеми - дуже високий, зазвичай більш 100 МОм;
- заводо захищеність - так як цифрові вольтметри володіють високою чутливістю, дуже важливо забезпечити хорошу заводо захищеність.

У часо-імпульсному цифровому вольтметрі напруга постійного струму перетворюється на пропорційний інтервал часу. Різниця між двома варіантами полягає в способі перетворення напруги в інтервал часу. У першому варіанті воно здійснюється шляхом порівняння вимірюваної напруги з лінійно-змінюваною напругою. У другому варіанті перетворення напруги в інтервал часу здійснюється шляхом двотактного інтегрування.

2 Вимоги до оформлення розрахунково-графічної роботи

Студенти оформлюють РГР на аркушах формату А4, без рамки. Якщо оформлення роботи здійснюється вручну, то всі рисунки наводяться на міліметровому папері. Кожний рисунок повинен бути підписаний, розділи починаються з нового аркуша.

Розміри елементної бази повинні відповідати стандарту щодо оформлення графічних елементів. Після титульного аркуша наводиться таблиця з вихідними даними згідно з варіантом студента.

Спочатку наводяться структурні схеми та часові діаграми, описується принцип їх роботи. Після цього з детальним описом наводяться формули в символічному представленні, потім в чисельному представленні з підстановкою вихідних даних згідно з варіантом. Закінчується РГР висновками за результатами розрахунків, написаними на окремому аркуші. Розрахунково-графічна робота здається студентом викладачеві, що веде практичні заняття, і захищається на оцінку, яка враховується в оцінці за модуль і в підсумковій оцінці за семестр.

3 Зміст розрахунково-графічної роботи

Розрахунково-графічна робота містить чотири розділи:

3.1 Розрахунок похибок часо-імпульсного цифрового вольтметра з лінійно-змінюваною напругою.

3.2 Розрахунок основних параметрів і похибок цифрового вольтметра з двотактним інтегруванням.

3.3 Розробка структурної схеми кодово-імпульсного цифрового вольтметра.

3.4 Розрахунок основних параметрів та похибок частотно-імпульсного цифрового вольтметра.

Висновки.

Проведемо розрахунок основних показників та похибок основних видів цифрових вольтметрів. Вихідні дані для розрахунків студенти беруть з таблиці 1 згідно з варіантом, зазначеним викладачем.

Таблиця 1 - Вихідні дані для проведення розрахунків

Варіант	$K_{оп}$	$U_x, В$	$\delta_0 \cdot 10^{-6}$	$\delta_k \cdot 10^{-5}$	$\delta_s \cdot 10^{-5}$	$T_{звор},$ мс	$T_d,$ мкс	Y
1	20000	1,1	1,0	1,7	5,0	20	1	0,125
2	40000	1,2	2,0	1,8	3,5	25	3	0,400
3	50000	1,5	10	1,2	3,7	30	2	0,350
4	100000	1,0	1,5	1,8	1,0	36	9	0,500
5	120000	1,2	1,2	1,9	2,0	27	8	0,130
6	50000	1,3	4,0	1,3	1,0	25	7	0,300
7	30000	1,4	6,0	1,7	2,0	40	3	0,140
8	25000	2,0	5,0	3,0	10	45	2	0,150
9	20000	2,1	3,5	7,0	1,5	35	1	0,160
10	50000	1,1	3,7	8,0	1,0	20	6	0,170
11	100000	1,3	1,0	7,5	1,2	50	5	0,175
12	150000	1,5	2,0	5,0	1,3	32	8	0,165
13	200000	1,2	3,0	3,5	1,4	28	4	0,180
14	50000	1,6	7,0	3,7	2,0	37	3	0,185
15	20000	1,7	8,0	1,0	2,0	42	8	0,190
16	30000	1,4	7,5	2,0	3,0	30	5	0,200
17	40000	1,1	5,5	5,0	7,0	40	2	0,250
18	25000	1,7	3,5	1,2	8,0	50	5	0,270
19	50000	1,8	6,5	1,3	2,0	47	1	0,275
20	100000	1,2	7,2	1,4	1,0	43	3	0,375
21	200000	1,8	8,0	2,0	2,0	33	2	0,350
22	150000	1,9	9,0	1,3	10	38	7	0,280
23	20000	1,3	1,0	1,5	1,5	49	9	0,430
24	50000	1,2	1,2	1,7	1,2	31	2	0,440
25	40000	1,1	1,5	1,9	4,0	41	5	0,380
26	30000	1,5	1,4	1,2	1,2	50	6	0,460
27	25000	1,6	1,9	1,8	1,6	30	7	0,470
28	20000	1,7	1,7	1,9	1,7	35	3	0,430
29	50000	1,9	2,3	1,3	1,4	43	5	0,485
30	70000	1,5	2,5	1,2	1,1	45	6	0,390

3.1 Розрахунок похибок часо-імпульсного цифрового вольтметра з лінійно-змінюваною напругою

В часо-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 часо-імпульсного цифрового вольтметра постійного струму наведена на рисунку 2.

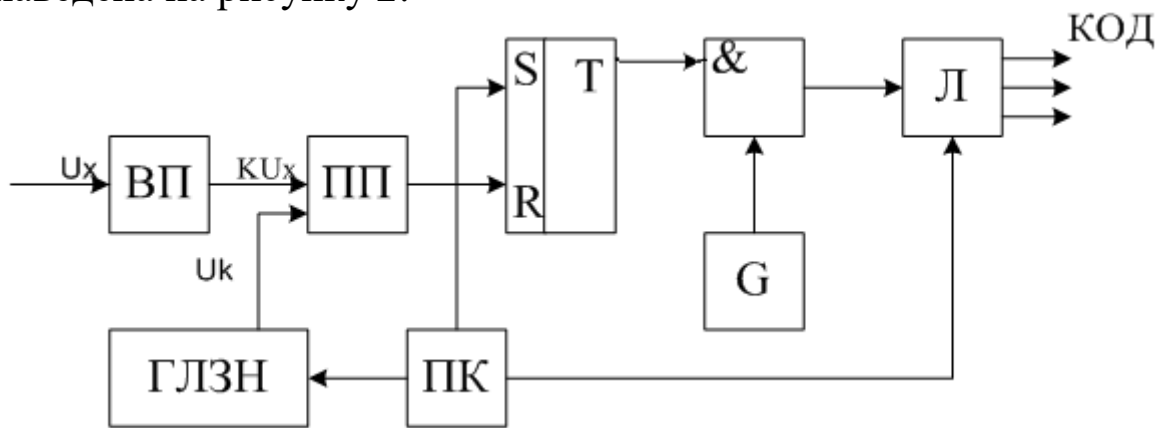


Рисунок 2 - Структурна схема ЧЦВ з лінійно-змінюваною напругою

- Тут 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 часо-імпульсного вольтметра з лінійно-змінюваною напругою, наведені на рисунку 3.

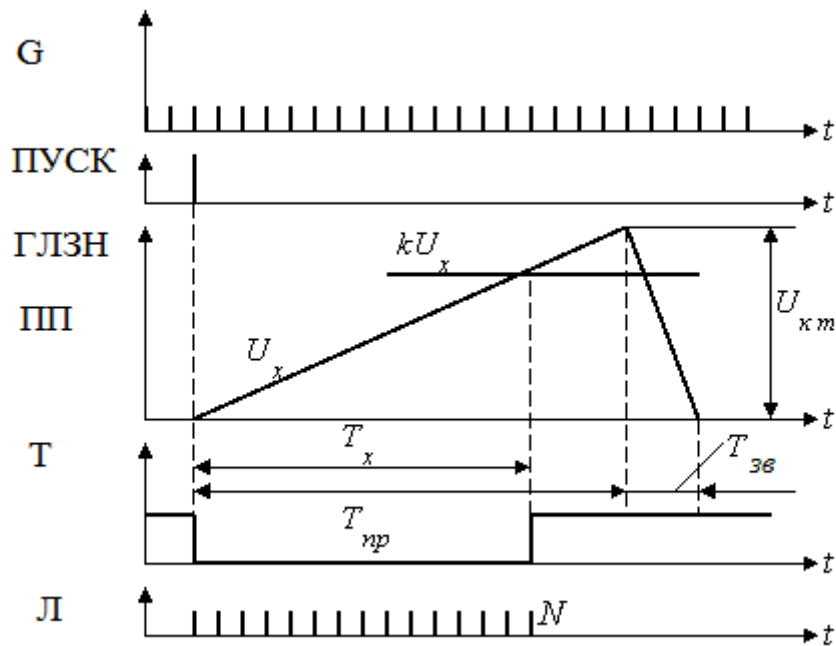


Рисунок 3 - Часові діаграми, що пояснюють принцип дії цифрового часо-імпульсного вольтметра з лінійно-змінюваною напругою

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 "Т" відчиняється для проходу імпульсу генератора G на лічильник Л.

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 "Т" залишається відкритим.

Коли дана рівність перестав виконуватися, сигнал від ПП переводить тригер у стан 0, елемент "Т" 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 часо-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

часу підрахунку. Тим не менш часо-імпульсне перетворення постійних напруг 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 %.

Проведемо розрахунки основних показників ЧЦВ.

Розрахунок кількості імпульсів, що надходять на лічильник, здійснюється за формулою

$$N = f_0 \cdot T_x,$$

де f_0 – тактова частота генератора Г ;
 T_x – час відкритого стану елемента &.

Обираємо значення N , виходячи з умови, що кількість імпульсів змінюється в межах 8...16 і є цілою парною величиною. Обравши значення N , визначаємо значення тактової частоти f_0 в кілогерцах (кГц) і часу відкритого стану елемента “Г” T_x в мілісекундах (мс).

Наприклад, обираємо $N=12$, тоді $f_0 = 3000$ Гц, $T_x = 0,004$ с.

$$N = 3 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 12 \text{ (Гц} \cdot \text{с)}$$

При постійних значеннях $T_{пр}$, $U_{км}$, f_0 , k кількість імпульсів N прямо пропорційно залежить від напруги U_x , що перетворюється (вимірюється).

Для прикладу розрахунків обираємо в методичних вказівках варіант 0, вихідні дані до якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для варіанта 0

$U_x, В$	Y	δ_o	$T_d, мс$	$T_{звор}, мс$	δ_s	δ_k	$K_{оп}$
1	0,45	10^{-6}	20	35	$1,5 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	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 :

$$S = \frac{U_x \cdot f_0 \cdot K}{N}, \text{ В/с.}$$

Для обраного варіанта проведемо чисельні розрахунки показника крутості характеристики лінійно-змінюваної напруги S :

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

Для цифрових вольтметрів найважливішою характеристикою є точність вимірювання напруги, що включає в себе комплекс характеристик, які кількісно виражаються різними похибками. Слід відрізнити 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 Δ_d визначається за формулою

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

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

де q – абсолютна похибка.

Тоді

$$q = 2 \cdot \Delta_d.$$

Відносна δ_d та наведена γ_d похибки дискретності відповідно визначаються за формулами

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

$$\delta_{d\max} = \pm \frac{1}{2 \cdot N};$$

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

$$\gamma_{d\max} = \pm \frac{1}{2N_{\text{ном}}}.$$

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_H :

$$\delta_H = \delta'_H + \delta_s;$$

$$\delta'_H = Y \cdot \delta_s,$$

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

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

Для обраного варіанта 0 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:

$$(d ; c),$$

$$(0,5 ; 5),$$

$$\delta_{\text{н}} = \delta_{\text{м}} \leq \frac{c-d}{100} .$$

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 .

Для обраного варіанта 0 проведемо чисельні розрахунки:

$$\delta_{\text{н}} = \delta_{\text{м}} \leq \frac{5-0,5}{100} = 0,045 .$$

$$\delta = \pm (2,175 \cdot 10^{-5} + 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-4} + 0,083) = \pm (0,0834).$$

Розрахуємо амплітудне значення лінійно-змінюваної напруги за формулою

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

Для обраного варіанта 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 "Г", ПП, ГЛЗН та тривалість керуючого імпульсу.

$$T_{ц} = T_{пр} + T_{звор} ;$$

де $T_{пр}$ – тривалість прямого ходу;
 $T_{звор}$ – тривалість зворотного ходу.

$$T_{пр} = 0,8 \cdot T_{в} ;$$

$$T_{в} = T_{пр} + T_{д} + T_{звор} ;$$

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

Для обраного варіанта 0 проведемо чисельні розрахунки:

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

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

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

$$T_{в} \cdot 0,2 = 55 \cdot 10^{-3} ;$$

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

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

При використанні сучасної елементної бази можна досягти значення $T_{д}$ не більше одиниць мікросекунд.

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

Розрахуємо максимальну ємність лічильника:

$$N_{\max} = \frac{f_0 \cdot K \cdot U_{km} \cdot T_{пр}}{U_{km}} = f_0 \cdot K \cdot T_{пр} .$$

Для обраного варіанта проведемо чисельні розрахунки:

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

Розрахуємо кількість розрядів коду на виході лічильника.
Для десятинного коду

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

Для обраного варіанта проведемо чисельні розрахунки кількості розрядів десятинного коду на виході лічильника:

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

Для двійкового коду

$$n = \lg(N_{\max}) / \lg(2) ;$$

$$n = \lg(660) / \lg(2) = 9,14.$$

3.2 Розрахунок основних параметрів і похибок цифрового вольтметра з двотактним інтегруванням

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 4 і 5. Дана схема дозволяє вимірювати середнє значення напруги, має такі переваги: простота реалізації, низька вартість, незалежність похибки від параметрів елементів та інтегратора, висока заводостійкість. До недоліків відноситься низька швидкодія схеми.

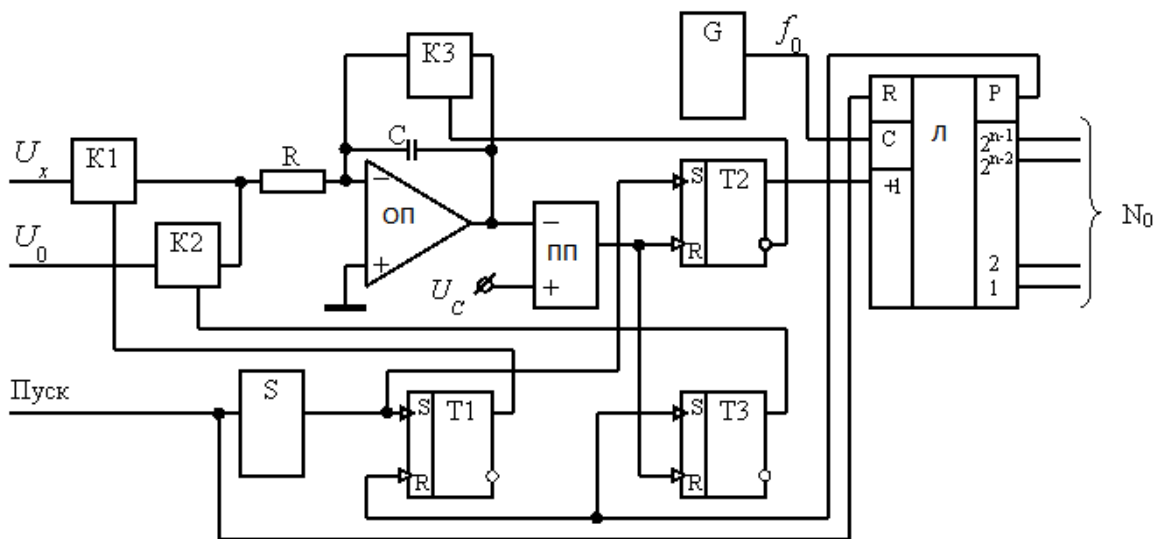


Рисунок 4 – Структурна схема цифрового вольтметра з двотактним інтегруванням

- Тут S – одновібратор;
 ОП – операційний підсилювач на інтегральних мікросхемах (інтегратор);
 ПП – пристрій порівняння;
 К1, К2 – ключі;
 Л – лічильник;
 Т1, Т2, Т3 – RS-тригери;
 ОП - операційний підсилювач;
 G – генератор опорної частоти.

Принцип дії схеми

У початковий момент Т1, Т2, Т3 перебувають у стані «0». Керований інверсним виходом Т2 ключ К3 замкнений, отже, вхід і вихід ОП мають однаковий потенціал. Ключі К1 і К2 розімкнуті. Рахунковий вхід Л замкнений сигналом «0» тригера Т2. 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» Т1 і Т2.

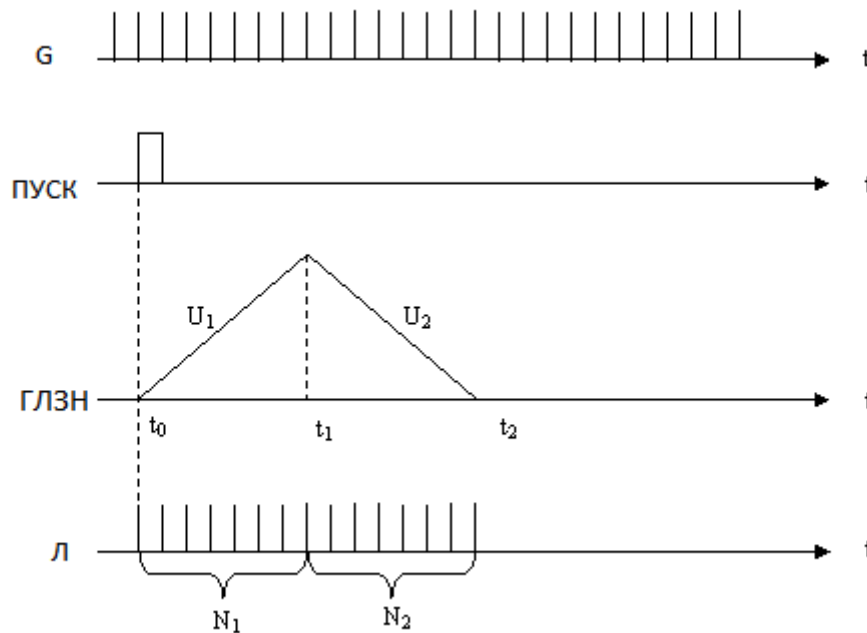


Рисунок 5 – Часові діаграми сигналу на виході різних компонентів схеми цифрового вольтметра з двотактним інтегруванням

Замикається К1, розмикається К3 і відмикається рахунковий вхід Л, який починає рахувати імпульси генератора G. 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.

Кількість імпульсів, що надходять на Л за 2-й такт,

$$N=(t_2-t_1) \cdot f_0=t'' \cdot f_0,$$

де $t'' =RC$ – постійна часу інтегратора по входу, на який подано U_x . Незалежно від номера варіанта обираємо значення $t''=0,02$ с. Значення f_0 використовуємо з підрозділу 3.1.

Для обраного варіанта 0 проведемо чисельні розрахунки:

$$N_2 = 3000 \cdot 0.02 = 60.$$

Якщо $U_c = 0$, можна отримати, що

$$U_x = U_0 \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

Виведемо значення U_0 :

$$U_0 = U_x \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

Джерелами похибок даного цифрового вольтметра є похибка дискретності та інструментальні похибки.

Максимальне значення абсолютної похибки дискретності визначається за формулою

$$\Delta_d = \pm \frac{U_0}{2N_1}.$$

Максимальні значення відносної δ_d та наведеної γ_d похибки дискретності визначаються за формулами

$$\delta_{d\max} = \pm \frac{1}{2 \cdot N_2};$$

$$\gamma_{d\max} = \pm \frac{1}{2 \cdot N_{2\text{ном}}}.$$

Розрахуємо відносну похибку дискретності за формулою

$$\delta_d = \frac{1}{N_2} \cdot 100\%.$$

$$\delta_d \leq d.$$

Відносна інструментальна похибка при $N_2 = N_{2\text{ном}}$ може знаходитись на рівні сотих – тисячних часток відсотка, тому

$N_{\text{ном}} = 10^5$. Відмінність U_0 від номінального значення створює мультиплікативну похибку перетворювача напруги в код, що залежить від G . Неідеальність ключів теж вносить похибку. Ідеальний ключ повинен мати в замкненому стані опір, що дорівнює нулю, в розімкненому стані – нескінченно великий, не повинен бути джерелом електрорушійної сили і струмів і повинен спрацьовувати без затримки. Неідеальність інтегратора полягає в тому, що його підсилювач має обмежений коефіцієнт підсилення не є безінерційною ланкою, не має нескінченно великого вхідного опору і нульового вихідного опору і має зміщення нульового рівня. Неідеальність ПП пов'язана з кінцевою (ненульовою) зоною невизначеності.

Для обраного варіанта 0 проведемо чисельні розрахунки значення U_0 .

Приймаємо кількість імпульсів $N_1 = N$. Для розглянутого варіанта 0: $N_1 = 12$.

$$U_0 = \frac{1 \cdot 12}{60} = 0,2 \text{ В.}$$

$$\delta_d = \frac{100}{60} = 1,67.$$

Ми обрали значення часу інтегрування $t'' = R \cdot C = 0,02 \text{ с}$ незалежно від номера варіанта. Знайдемо значення опору R і ємності конденсатора C в схемі інтегрування.

Значення опору R можна розрахувати з формули

$$R = \frac{R_{\text{вх оп}}}{100 \dots 1000},$$

де $R_{\text{вх оп}}$ - вхідний опір інтегратора (операційного підсилювача), визначається з довідника по операційних підсилювачах на інтегральних мікросхемах за значенням коефіцієнта підсилення за напругою $K_{\text{оп}}$.

Для варіанта 0 у вихідних даних задане значення $K_{\text{оп}} = 20000$. З довідника виписуємо тип операційного підсилювача, що має таке значення $K_{\text{оп}}$ і значення його вхідного опору.

3.3 Розробка структурної схеми кодово-імпульсного цифрового вольтметра

Особливостями кодово-імпульсного методу вимірювання напруги є: вимірювання миттєвого значення напруги, відносна складність схеми, висока вартість реалізації, висока чутливість, низька завадостійкість, принципово висока швидкодія. Спрощена структурна схема кодово-імпульсного цифрового вольтметра (КІЦВ) та часові діаграми, що пояснюють принцип дії схеми, наведені на рисунках 6 та 7.

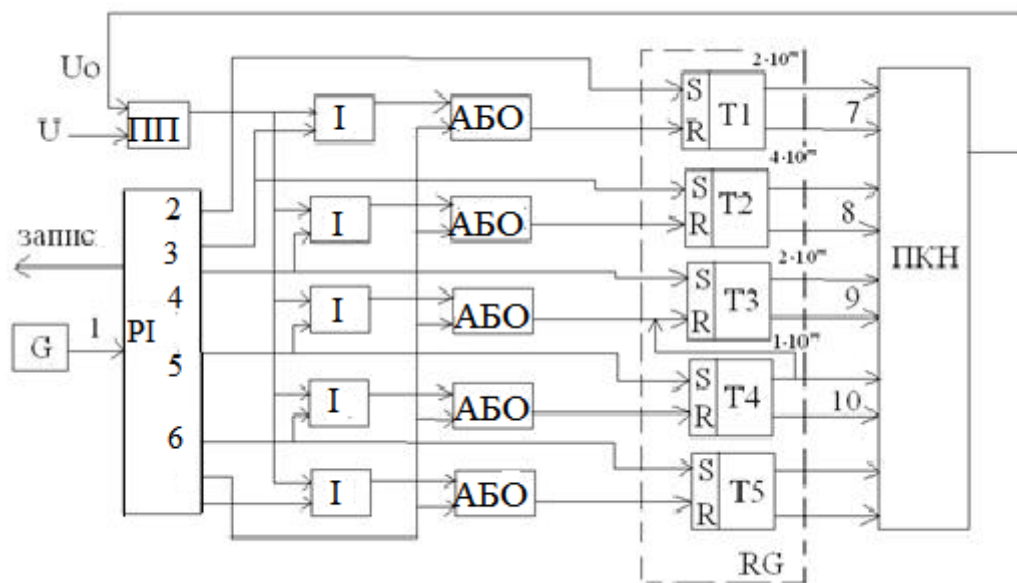


Рисунок 6 - Структурна схема КІЦВ

Принцип функціонування схеми

На входи ПП подається перетворювана напруга U і U_0 з перетворювача ПКН. В процесі перетворення U_0 змінюється за визначеною програмою, наближаючись до U . Цю програму реалізує ПК, що містить генератор G , розподільувач імпульсів (РІ), логічні елементи І, АБО і тригери. Кількість тригерів і логічних елементів визначається кількістю розрядів коду. Тригери $T1-T4$ – старша тетрада, $T5$ – молодший розряд молодшої тетради. Загальна кількість тригерів $4 \cdot m$, m – кількість тетрад.

Імпульси 1 від G послідовно з'являються на виходах РІ. Перший імпульс (скидання) сигнал 2 - проходить через АБО на вхід – R тригерів і встановлює їх в «0». На виході ПКН $U_0 = 0$. Другий імпульс (сигнал 3) – надходить на S – вхід Т1 і встановлює його в «1». На виході ПКН з'являється напруга, значення якої відповідає ваговому коефіцієнту $2 \cdot 10^{m-1}$, що відповідає

$$U_{01} = 2 \cdot 10^{m-1} = 0,2 \cdot U_{0\max}.$$

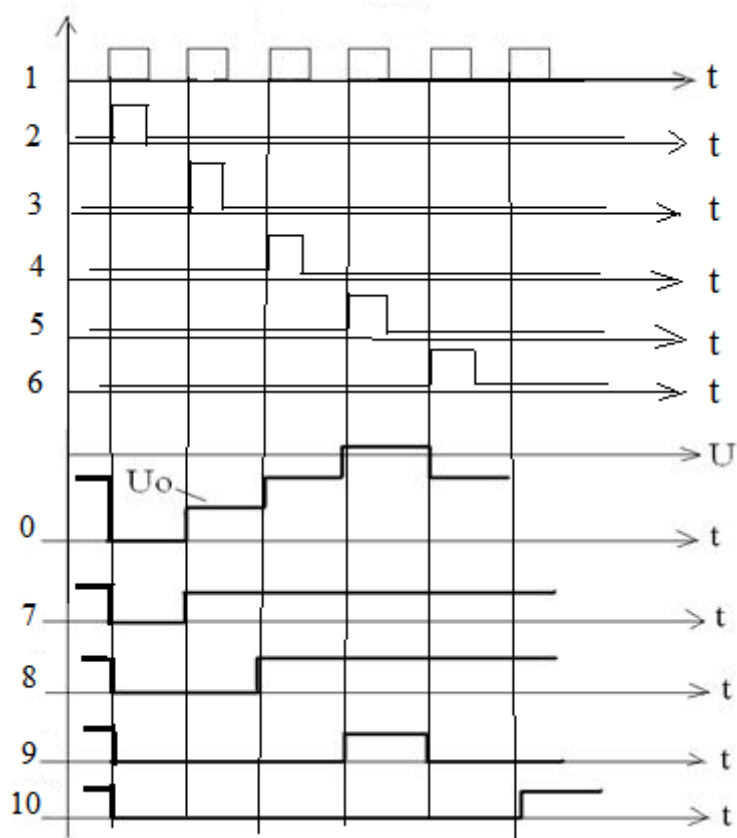


Рисунок 7 - Часові діаграми, що пояснюють принцип дії структурної схеми КЦВ

ПП визначає знак різниці $U_{01} - U$. Якщо $(U_{01} - U) < 0$ – на виході ПП «0», яким зачиняються елементи «I», якщо ж $(U_{01} - U) > 0$ – на виході ПП «1» і елементи «I» відчиняються.

Третій імпульс (сигнал 4) встановлює Т2 в одиничний стан і не змінює стан Т1. На виході ПКН формується U_{02} , що дорівнює

$$U_{02} = 0,2 \cdot U_{0\max} + 0,4 \cdot U_{0\max} = 0,6 \cdot U_{0\max}.$$

Четвертий імпульс (сигнал 5) встановлює ТЗ в одиничний стан і не змінює стан Т1 і Т2. На виході ПКН

$$U_{03}=U_{02}+0,2\cdot U_{0\max} = 0,8\cdot U_{0\max}.$$

Якщо при цьому $(U_{03}-U)>0$, то на виході ПП встановлюється «1», яка відчиняє елементи «І».

П'ятий імпульс (сигнал 6) встановлює в «1» Т4 і, проходячи на вхід R ТЗ, скидає його в «0». Отримуємо

$$U_{04}=0,2\cdot U_{0\max}+0,4\cdot U_{0\max}-0,1 U_{0\max} = 0,7\cdot U_{0\max}.$$

Стан тригерів Т1-Т4 після 5-го імпульсу виражають код старшого десятинного розряду.

Кількість виходів з РІ визначається з виразу

$$M=4\cdot m+3.$$

$4\cdot m+1$ - для керування тригерами;

$4\cdot m+1+1$ - для керування тригерами і скидання попередніх станів;

$4\cdot m+1+1+1$ - для керування тригерами, скидання попередніх станів і запису.

Похибка дискретності визначається за загальними формулами. Інструментальна похибка створюється ПКН і ПП.

В кожній наступній тетраді значення U_0 послідовно зменшуються в 10 разів.

$4\cdot m+1$ -й імпульс встановлює останній тригер молодшої тетради в стан «1» і в залежності від знаку (U_0-U) , з надходженням $4\cdot m+2$ -го імпульсу залишається в стані «1» або повертається в «0». Код, що створюється на виході регістра відповідає значенню U . Останнім $4\cdot m+3$ імпульсом цей код переписується в регістр цифрового пристрою відображення.

Вихідні дані для студентів для проведення розрахунків наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Коди, використовувані як вихідні дані

Варіант	Коди
1	1001101010110111
2	101011100101110001
3	1101100110101110011
4	110101111010100111
5	100010100011101010
6	100111101001101000
7	11010111010100011
8	11001010011100110
9	111001110101011100
10	11100010101110001
11	1101010111001010
12	11000101101100101
13	1111011101010100
14	1010100011110101
15	1001011101111000
16	111011000110100
17	1010100011110001
18	111011000111100
19	1000100011110101
20	111011000110101
21	1010100011010101
22	110011000110100
23	101010001111010
24	111011001110100
25	1010100101110101
26	111011000110100
27	1010101111010101
28	10101100110110101
29	101010101101010
30	110101111010100101

3.4 Розрахунок основних параметрів та похибок частотно-імпульсного цифрового вольтметра

У частотно-імпульсних цифрових вольтметрах (ЧЦВ) використовується частотно-імпульсний метод вимірювання напруги (або метод з проміжним перетворенням напруги в частоту). Спрощена структурна схема ЧЦВ наведена на рисунку 8. Схема призначена для вимірювання середнього значення напруги. особливостями даного цифрового вольтметра є складність схеми, середня точність та вартість, висока заводостійкість, залежність параметрів від температури. ЧЦВ являє собою сукупність перетворювача напруги в код та цифрового частотоміра.

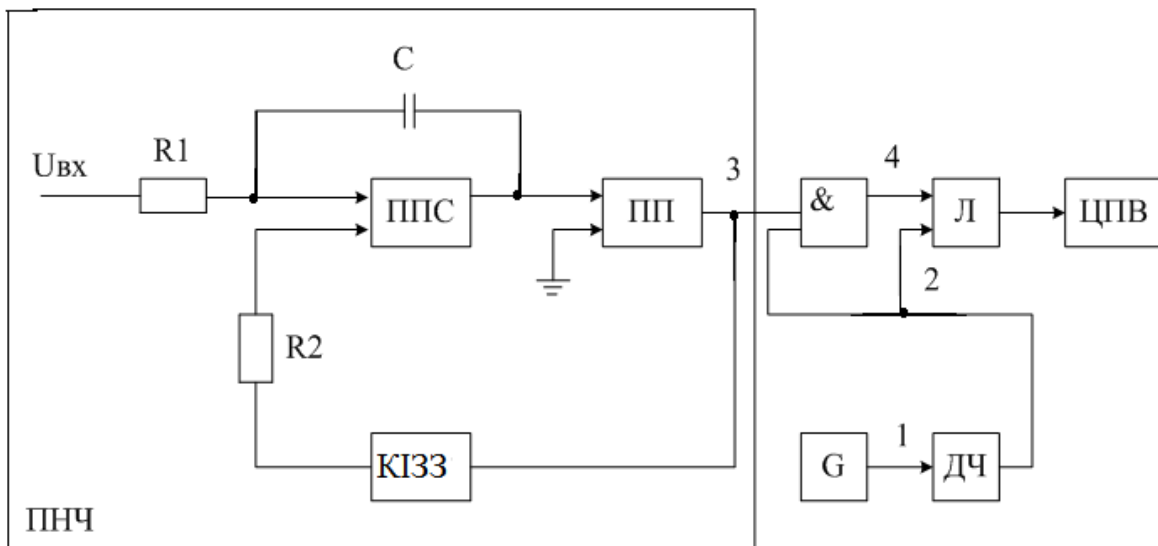


Рисунок 8 – Структурна схема ЧЦВ

Тут ПНЧ — перетворювач напруги в частоту;
ППС — підсилювач постійного струму;
КІЗЗ — коло імпульсного зворотного зв'язку;
ПП — пристрій порівняння;
& - «І» - логічний елемент;
Л — лічильник;
ЦПВ — цифровий пристрій відображення;
ДЧ — дільник частоти;
G — генератор тактових імпульсів.

Принцип дії схеми

В інтервалі часу $t_1 < t_2 < t_3$ на виході КІЗЗ напруга $U_0=0$, тому на виході інтегратора напруга лінійно спадає під дією додаткової вхідної напруги U_x . Коли $U_x=0$ (точка t_2), спрацьовує ПП, на виході якого з'являється третій імпульс. Фронт цього імпульсу є командою для КІЗЗ, який генерує імпульс опорної напруги U_0 , форма якого визначається схемою КІЗЗ. Під час дії цього імпульсу напруга на виході інтегратора зростає. По його закінченні лінійно спадає. Під час інтервалу Δt_0 , що створює G та ДЧ, імпульси проходять на лічильник, на виході якого з'являється код числа N.

Часові діаграми, що пояснюють принцип дії частотно-імпульсного цифрового вольтметра, наведені на рисунку 9.

Встановлюємо зв'язок між напругою та частотою:

$$\frac{1}{\tau_1} \int_{t_1}^{t_2} U_x dt = \frac{1}{\tau_2} \int_{t_2}^{t_3} U_0 dt - \frac{1}{\tau_1} \int_{t_2}^{t_3} U_x dt ;$$

$$\tau_2 = R_2 \cdot C ,$$

де τ_2 – постійна напруга інтегратора по входу, на який подана напруга U_0 .

$$R_1 = 1.3 \cdot R_2 ;$$

$$C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} ;$$

$$R_1 = \frac{R_{\text{вх оп}}}{1000} ;$$

$$R_1 = \frac{1000000}{1000} = 1000 \text{ Ом} ;$$

$$1000 = 1.3 \cdot R_2 ;$$

$$R_2 = \frac{1000}{1.3} = 769,231 \text{ Ом} .$$

Двовходовий інтегратор звичайно реалізується на базі підсилювача постійної напруги, охопленого від'ємним зворотним зв'язком за допомогою RC-кола, але в даному випадку це коло має загальний конденсатор C і два резистори R_1 і R_2 , тому $\tau_1=R_1 \cdot C$ і $\tau_2=R_2 \cdot C$.

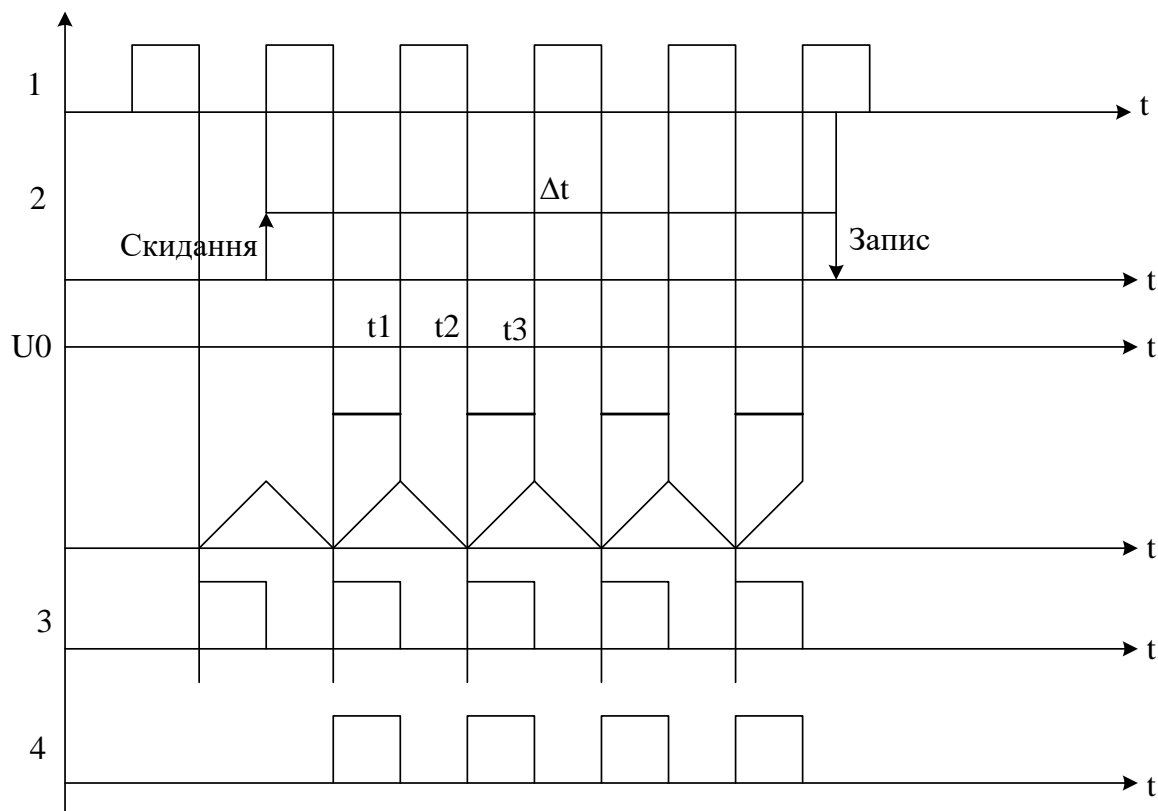


Рисунок 9 – Часові діаграми, що пояснюють принцип дії частотно-імпульсного цифрового вольтметра

Знаходимо постійні часу інтегратора по входу, на який подана U_x :

$$\tau_1=R_1 \cdot C ;$$

$$\tau_2=R_2 \cdot C ;$$

$$\tau_1=1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}=2 \cdot 10^{-3} \text{ с} ;$$

$$\tau_2=769,231 \cdot 2 \cdot 10^{-6}=1,538 \cdot 10^{-3} \text{ с} ;$$

$$f = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_x}{\int_0^{t_{\text{им}}} U_x dt} ;$$

$$f = \frac{769,231}{1000} \cdot \frac{1}{\int_0^{20 \cdot 10^{-3}} 1 dt} = 0,769 \cdot \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 38,5 \text{ Гц.}$$

Джерелами похибок даного цифрового вольтметра є похибка дискретності та інструментальні похибки.

Максимальне значення абсолютної похибки дискретності визначається за формулою

$$\Delta_d = \pm \frac{U_0}{2 \cdot N_1}.$$

Максимальні значення відносної δ_d та наведеної γ_d похибки дискретності визначаються за формулами

$$\delta_{d\text{max}} = \pm \frac{1}{2 \cdot N_2} ;$$

$$\gamma_{d\text{max}} = \pm \frac{1}{2 \cdot N_{2\text{ном}}} .$$

Розрахуємо відносну похибку дискретності за формулою

$$\delta_d = \frac{1}{N_2} \cdot 100\%.$$

$$\delta_d \leq d.$$

Відносна інструментальна похибка при $N_2 = N_{2\text{ном}}$ може знаходитись на рівні сотих – тисячних часток відсотка, тому $N_{\text{ном}} = 10^5$. Відмінність U_0 від номінального значення створює мультиплікативну похибку перетворювача напруги в код, що залежить від G . Неідеальність ключів теж вносить похибку. Ідеальний ключ повинен мати в замкненому стані опір, що дорівнює нулю, в розімкненому стані – нескінченно великий, не

повинен бути джерелом електрорушійної сили і струмів і повинен спрацьовувати без затримки. Неідеальність інтегратора полягає в тому, що його підсилювач має обмежений коефіцієнт підсилення, не є безінерційною ланкою, не має нескінченно великого вхідного опору і нульового вихідного опору і має зміщення нульового рівня. Неідеальність ПП пов'язана з кінцевою (ненульовою) зоною невизначеності.

Подамо максимальне значення абсолютної похибки дискретності:

$$\Delta g = \pm \frac{1}{\Delta t_0} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \int_0^{\text{tim}} U_x dx ;$$

$$\Delta g = \pm \frac{1}{0,00125} \cdot \frac{769,231}{1000} \cdot \int_0^{20 \cdot 10^{-3}} 1 dx = \pm 800 \cdot 0,769 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = \pm 12,32 .$$

У кінці РГР студент наводить висновки стосовно результатів розрахунків похибок для цифрових вольтметрів з перетворювачами напруги в код різних видів.

Список літератури

1 ГОСТ 24736-81. Преобразователи интегральные цифро-аналоговые и аналогово-цифровые. Основные параметры [Текст]. – М.: Государственный комитет по стандартам, 1981. – 3 с.

2 Лукьянов, В.Г. Электронный учебно-методический комплекс: Цифровые измерительные устройства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://it.fitib.altstu.ru/neud/ciu/index.php>

3 Кончаловский, В.Ю. Конспект лекций по курсу: “Цифровые измерительные приборы. Цифровые вольтметры” [Текст] / В.Ю. Кончаловский. – М.: МЭИ, 1979. – 52 с.

4 Кончаловский, В.Ю. Цифровые измерительные устройства [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.Ю. Кончаловский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

5 Кузнецов, В.А. Измерения в электронике [Текст]: справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских [и др.]; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.

6 Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений [Текст]: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.

7 Ракк, М.А. Измерения в технике связи [Текст]: учеб. для студентов вузов железнодорожного транспорта / М.А. Ракк, Л.Я. Мельникова, Г.П. Лабецкая, Х.Ш. Кульбикаян. – М.: Маршрут, 2008. – 566 с.

8 Піскачова, І.В. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки [Текст]: навч. посібник / І.В. Піскачова, А.П. Волобуєв, С.В. Герасимов [та ін.]. - Харків: ХУПС, 2006. – 161 с.