

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Пристрій вимірювання параметрів конденсаторів»

Завідувач кафедри:

Опанасюк А.С.

Керівник

дипломного проекту:

Горячев О. Є.

Виконав студент

гр. ЕС-71:

Лісовенко Є. С.

Суми 2021 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 53 сторінки тексту, 22 рисунки, 12 джерел посилання. Графічна частина роботи містить алгоритм роботи, структурну, функціональну і принципову електричну схеми.

У даній роботі пропонується пристрій вимірювання параметрів конденсаторів.

У першому розділі проведений огляд літературних джерел.

Другий розділ містить розробку та обґрунтування алгоритму роботи, структурної, функціональної, принципової електричної схем. Виконаний відбір елементної бази.

У третьому розділі проведено розробку програмного забезпечення.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	5
1.1 Основні параметри конденсаторів	5
1.2 Методи вимірювання ємності конденсаторів	9
1.3 Методика вимірювання ємності та ESR конденсаторів.....	21
1.4 Постановка задачі проектування.....	25
2 РОЗРОБЛЕННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ВУЗЛІВ І БЛОКІВ ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРІВ	26
2.1 Розробка алгоритму роботи	26
2.2 Розробка структурної схеми	28
2.3 Розробка функціональної схеми.....	29
2.4 Вибір елементної бази	30
2.5 Розробка схеми електричної принципової	33
3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	38
3.1 Лістинг коду програми	38
ВИСНОВОК.....	52
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	53

					ЕЛІТ 6.171.00.10.389 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.					Пристрій вимірювання параметрів конденсаторів	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.						3		
Т. Контр.						СумДУ, зр. ЕС-71		
Н. Контр.		Гапич В.М.			Пояснювальна записка			
Затверд.		Опанасюк А.С.						

ВСТУП

На сьогоднішній день, коли більшість джерел живлення радіоелектронної апаратури будуються за імпульсними схемами, одним з найбільш необхідних приладів інженера електроніка є вимірювач ESR електролітичних конденсаторів або ESR-метр. Причиною втрати працездатності або нестабільної роботи комп'ютера, телевізора, монітора чи іншого пристрою, обладнаного імпульсним блоком живлення, найчастіше являється вихід з ладу конденсаторів. Виявлення такої поломки не завжди можливе за допомогою візуального огляду плати живлення і часто потребує використання спеціальних приладів.

Сучасний ринок електроніки представлений широкою номенклатурою пристроїв для вимірювання фізичних величин в галузі радіоелектроніки, а саме мультиметрів, вимірювачів LCR, тощо. Прилади високої якості з гарними експлуатаційними характеристиками, високою точністю, широким діапазоном вимірюваних значень мають високу вартість. З іншого боку існують дешеві прилади виробництва Китаю, що зазвичай не відповідають заявленим характеристикам, мають низьку надійність та високу похибку вимірювання. Тому не втрачає актуальності самостійне виготовлення вимірювальних приладів, не є виключенням і робота радіолюбителів в сфері розробки приладів для вимірювання параметрів конденсаторів – ємності та ESR.

Доступність і широкий вибір електронної елементної бази та велика кількість схем та проектів на радіолюбительських Інтернет-ресурсах дозволяють розробляти власні схеми на основі існуючих, вдосконалювати пристрої шляхом заміни елементної бази на більш сучасну, розширювати їх функціонал, замінювати мікроконтролери в приладах на більш швидкодіючі та оптимізувати програмний код.

Таким чином, задача розробки пристрою для вимірювання параметрів конденсаторів є актуальною, проведення роботи за цією темою дозволить розробити прилад, що має в порівнянні з аналогами більшу надійність, більшу швидкодію, менше енергоспоживання, вищу точність та діапазон вимірюваних значень.

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	4
Зм..	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Основні параметри конденсаторів

Основними параметрами, що характеризують конденсатори, є їх електрична ємність, еквівалентний послідовний опір і кут втрат.

В електронних пристроях застосовуються конденсатори багатьох типів і різних призначень. Можливі значення їх ємностей лежать приблизно в межах від 1 пФ до 1000 мкФ. В області високих і надвисоких частот об'єктами вимірювань можуть також з'явитися досить малі міжелектродні ємності електронних приладів і паразитні ємності між різними елементами схеми (ємності монтажу).

Допустима похибка вимірювання ємностей конденсаторів залежить від області застосування останніх. Ємність конденсаторів, що входять до складу коливальних систем, повинна визначатися особливо ретельно, з похибкою принаймні 1%. При виборі конденсаторів блокувальних, розділових, зв'язку і т. д. зазвичай допускається значний (до 20-50%) розкид ємностей і вимір їх можна виконувати найпростішими методами.

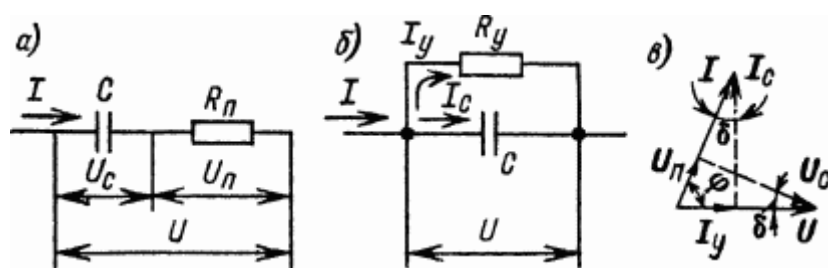


Рисунок 1.1 - Еквівалентні схеми (а, б) і векторна діаграма (в) ланцюга з конденсатором

У кожному конденсаторі, включеному в електричний ланцюг, мають місце втрати енергії, що виникають головним чином в матеріалі діелектрика, а також внаслідок недосконалості ізоляції між висновками. З урахуванням втрат еквівалентну схему конденсатора можна уявити в двох варіантах: або у вигляді ємності C , включеної послідовно з опором втрат R_n (рис. 1.1, а), або у вигляді тієї ж ємності C , що шунтується опором витoku R_y (рис. 1.1, б). При переході від однієї еквівалентної схеми до іншої для перерахунку значення активного опору користуються формулою

$$R_y = 1 / ((2 * \pi * f * C)^2 * R_n), \quad (1.1)$$

де f - частота струму в ланцюзі конденсатора.

З векторної діаграми на рис. 1.1, в, справедливою для обох варіантів еквівалентних схем, слідує, що в ланцюзі з конденсатором через наявність втрат фазовий зсув φ між струмом I і напругою U завжди менше 90° . Втрати в конденсаторі зазвичай характеризують кутом втрат $\delta=90^\circ - \varphi$, що визначаються відповідно до позначень на рис. 1.1 з формули

$$\operatorname{tg} \delta = U_n/U_c = I_y/I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_n = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R_y). \quad (1.2)$$

Втрати в конденсаторі іноді виражають коефіцієнтом потужності $\cos \varphi$ або струмом витоку I_y , що визначаються при стандартних умовах. Для більшості конденсаторів втрати дуже малі ($\operatorname{tg} \delta < 0,001$), тому можна вважати

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta \approx \sin \delta = \sin (90^\circ - \varphi) = \cos \varphi. \quad (1.3)$$

Найбільші втрати мають місце в електролітичних і паперових конденсаторах, застосування яких в основному обмежується областю низьких частот.

При деяких методах вимірювань втрати в конденсаторі визначаються одночасно з вимірюванням його ємності. При цьому слід мати на увазі, що з підвищенням частоти втрати помітно зростають (що відповідає збільшенню значення R_n і зменшення R_y), тоді як ємність C практично не залежить від частоти. На дуже високих частотах можливо помітне зростання діючої (виміряної за приладами) ємності конденсаторів через вплив індуктивності обкладок і підвідних проводів.

Параметри конденсатора (C , R_n , R_y , δ) залежать від зовнішніх умов його роботи - температури, вологості, атмосферного тиску, а також від прикладеної до нього напруги. Тому в відповідальних випадках випробування конденсаторів здійснюється не тільки на їх робочих частотах, але і в умовах, близьких до експлуатаційних.

Найпростіші перевірки конденсаторів можна виконувати і без спеціальних вимірювальних приладів. За допомогою омметра або пробника легко виявити ураження електричним струмом чи пробною між обкладинками конденсатора (слід лише враховувати, що пробій іноді проявляється тільки при значній напрузі на конденсаторі, близькій до його робочої напруги). Перевірка на обрив

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

неелектролітичних конденсаторів ємністю від 0,01 мкФ і вище найпростіше проводиться включенням конденсатора в ланцюг змінного струму, наприклад освітлювальну або трансляційну мережу, послідовно з будь-яким навантаженням - лампою розжарювання, гучномовцем і т. п. Нормальне або кілька ослаблене світіння лампи або звучання радіопередачі буде свідчити про відсутність обриву.

Конденсатор, опір витоку якого великий, здатний утримувати тривалий час без помітного зменшення отриманий ним заряд; це дозволяє простими засобами оцінити якість конденсаторів ємністю понад 0,01 мкФ. При підключенні до такого конденсатору омметра стрілка вимірювача останнього за рахунок струму заряду дещо відхилиться, а потім (при великому опорі витоку) повернеться у вихідне або близьке до нього положення. Наступні короточасні підключення до конденсатору омметра, повторювані з інтервалом в декілька секунд, не повинні викликати відхилення стрілки вимірювача. При малому опорі витоку помітне відхилення стрілки буде спостерігатися при кожному підключенні омметра. Для перевірки на витік конденсаторів ємністю понад 100 пФ можна застосувати головні телефони, з'єднані послідовно з низьковольтною батареєю. При малому опорі витоку кожне підключення індикатора до конденсатору викликає клацання в телефонах, тоді як при хорошому конденсаторі клацання прослуховується лише при першому підключенні. Вимірювання значення опору витоку (на постійному струмі) може проводитися індукторними або електронними Мегомметрами.

ESR (Equivalent Series Resistance) Еквівалентний послідовний опір - один з параметрів конденсатора, що характеризує його активні втрати в колі змінного струму. В еквіваленті його можна уявити, як включений послідовно з конденсатором резистор, опір якого визначається, головним чином, діелектричними втратами, а також опором обкладок, внутрішніх контактних з'єднань і висновків.

Втрати в діелектрику, зумовлені особливостями його поляризації, складають основну частину втрат в конденсаторі і визначаються матеріалом, а також товщиною шару діелектрика.

Частинки діелектрика, що володіють зарядом, під впливом змінного електричного поля змушені здійснювати мимовільні механічні коливання, обумовлені їх переорієнтацією і зміщенням (поляризацією).

У шарах діелектрика, близьких до обкладок, заряди, не покидаючи своїх зв'язків, активно беруть участь у всіх процесах формування напруги і струму в

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7

конденсаторі, як і провідники. По суті, зменшується товщина шару реального діелектрика.

В результаті істотно підвищується ємність конденсатора але, через інертність і внутрішнє тертя пов'язаних частинок, процеси супроводжуються виділенням тепла і втратами енергії в струмопровідних шарах діелектрика. Тобто, ці поляризовані шари мають активним опором електричному струму.

Зі збільшенням частоти, діелектричні втрати пропорційно зростають з тієї ж причини - механічної інертності поляризованих зарядів.

Опір струмопровідних шарів діелектрика послідовно складається з опором обкладок, виводів і контактних з'єднань. В результаті утворюється загальний активний опір R - Equivalent Series Resistance (ESR). По суті він являє собою резистор, включений послідовно з конденсатором.

У цьому випадку кут зсуву фаз між струмом і напругою буде не 90° , як в ідеальному конденсаторі, а трохи менше.

Тангенс кута δ , що становить цю різницю з 90° , називають тангенсом кута втрат.

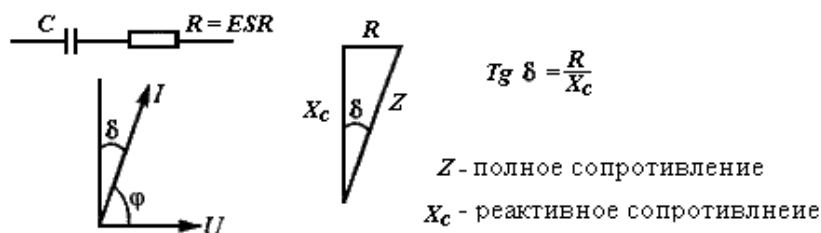


Рисунок 1.2 – Визначення тангенса кута втрат в конденсаторі

Тангенс кута визначиться відношенням активного опору до реактивного R/X_c , як тригонометрична функція відношення двох катетів трикутника опорів, показано на рисунку 1.2.

В електролітичних конденсаторах значущою частиною ESR є опір рідкого електроліту, який використовується в якості однієї з обкладок для забезпечення максимальної площі дотику з діелектриком.

Активний опір електроліту в реальних конденсаторах зазвичай співрозмірний з десятими або навіть з сотими частками Ома при 20°C , але для конденсаторів великої ємності, що використовуються у фільтрах випрямлячів ППП на робочій частоті близько 100 кГц, коли його реактивний опір вимірюється тисячними частками Ома, ця величина може становити основні втрати, і буде значно зменшуватися в міру прогріву.

При робочій температурі величина діелектричних втрат на таких частотах зазвичай виявляється в кілька разів більше. Опір електроліту залежить від температури через зміну ступеня його в'язкості і рухливості іонів.

У процесі роботи відбувається нагрів діелектрика і електроліту змінним струмом, у зв'язку з чим суттєво зменшується опір електроліту, тоді ESR конденсатора буде визначатися переважно його діелектричними втратами, які продовжать гріти конденсатор в допустимих розрахунками межах.

Але, в випадках розігріву до температури кипіння, електроліт втрачає свої первинні властивості і при наступному охолодженні стає більш в'язким, що погіршує рухливість іонів і підвищує активний опір. Подальша експлуатація буде викликати ще більший розігрів і погіршення якості електроліту, що надалі приведе до непридатності конденсатора для подальшої роботи.

Несправні конденсатори, в яких кипів електроліт, зазвичай визначаються візуально по роздутому і розгерметизованому корпусу.

Для надійності роботи електролітичних конденсаторів дуже важливим є правильний вибір його типу, номіналу і максимальної напруги в залежності від режимів та умов експлуатації.

Для фільтрів випрямлячів в перетворювачах, що працюють на частотах десятків або сотень кілогерц, виробники випускають спеціальні конденсатори з малим ESR і вказують повне опір змінному струму (імпеданс Z) для всіх номіналів в таблицях.

Тип таких конденсаторів супроводжується позначкою в технічній документації - Low impedance або Low ESR. Для аналізу стану електроліту і внутрішніх з'єднань електролітичних конденсаторів застосовуються вимірювачі або пробники ESR, які можуть бути виконані виходячи з різних принципів вимірювань і вимог до похибок.

Велика частина простих ESR-пробників і тестерів ґрунтується на принципі вимірювання імпедансу. У них є свій істотний плюс - низькоомний вхід, що дозволяє перевіряти конденсатори, не випаюючи їх з плати.

Поряд з погіршенням якості електроліту, часто активний опір в конденсаторах зростає через погіршення контактів обкладок з висновками, аж до повного обриву. В електролітичних це відбувається частіше, в металокерамічних рідше.

1.2 Методи вимірювання ємності конденсаторів

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

Вимірювання ємностей методом вольтметра – амперметра. Метод вольтметра - амперметра застосовують для вимірювання порівняно великих ємностей. Живлення вимірювальної схеми зазвичай виконують від джерела струму низької частоти: $F = 50 \dots 1000$ Гц, тому виявляється можливим знехтувати активними втратами в конденсаторах, а також впливом реактивних параметрів вимірювальних приладів і паразитними зв'язками.

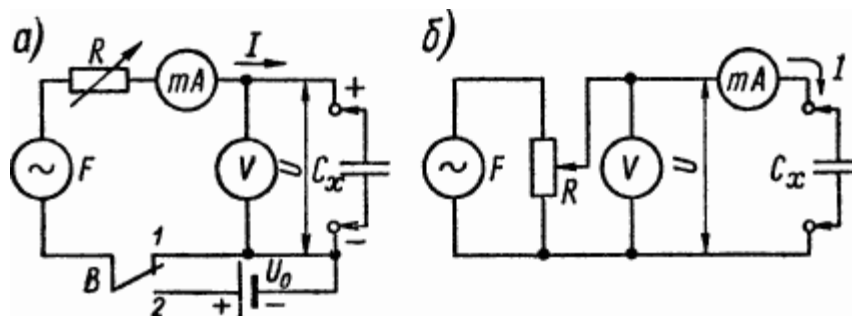


Рисунок 1.3 - Схеми вимірювання ємностей методом вольтметра-амперметра

Схема вимірювань представлена в двох варіантах на рис. 1.3. Конденсатор C_x , що перевіряється, включається в ланцюг змінного струму відомої частоти F , і реостатом (або потенціометром) R встановлюють необхідне за умовами випробування або зручне для відліку значення струму I або напруги U . За показниками приладів змінного струму V і mA можна розрахувати повний опір конденсатора

$$Z = (R_2 + X_2)^{0,5} = U/I, \quad (1.4)$$

де R і $X = 1/(2 * \pi * F * C_x)$ - відповідно його активна і реактивна складові.

Якщо втрати малі, тобто $R \ll X$, то ємність, яка вимірюється, визначається формулою

$$C_x = I/(2 * \pi * F * U). \quad (1.5)$$

Схема на рис. 1.3, а, дає досить точні результати при вимірюванні великих ємностей, опір яких X значно менше вхідного опору вольтметра V . Схема на рис. 1.3, б, застосовується для вимірювання менших ємностей, опір яких в десятки і більше разів перевищує опір міліамперметра mA . Припустимо, що потрібно вимірювати ємності в межах 0,1-1 мкФ на частоті 50 Гц при наявності

міліамперметра змінного струму на 3 мА. Так як опір цих ємностей $X = 3200 \dots 32000 \text{ Ом}$ у багато разів більше будь-якого можливого опору міліамперметра, то вимірювання слід проводити за схемою на рис. 1.3, б, при напрузі живлення $U \geq I * X = 0,003 * 3200 \approx 10 \text{ В}$.

Схема на рис. 1.3, а може бути застосована і для вимірювання ємностей електролітичних конденсаторів. Якщо напруга живлення не перевищує 1-2 В, то вимір допустимо проводити при установці перемикача В в положення 1. При великих змінних напругах можливе пошкодження конденсаторів внаслідок розкладання електроліту. Ця небезпека усувається, якщо перемикач В встановити в положення 2. При цьому послідовно з джерелом змінного струму частоти F включається джерело постійного струму, напруга на затискачах якого U_0 має перевищувати амплітуду змінної напруги. Тоді в ланцюзі буде діяти пульсуюча напруга, безпечна для конденсатора за умови правильної полярності його включення в схему. Пульсуючу напругу можна також отримати при послідовному включенні в вимірювальну схему діода. У всіх випадках вольтметр V і міліамперметр mA повинні вимірювати лише змінні складові напруги і струму, для чого вони виконуються із закритою схемою входу.

Мікрофарадметри з послідовною і паралельною схемами вимірювання. Прилади, у яких оцінка вимірюваних ємностей проводиться безпосередньо за шкалою стрілочного вимірювача, називаються мікрофарадметрами. Дія цих приладів може базуватися на використанні залежності струму або напруги в ланцюзі, що живиться джерелом змінного струму, від значення вимірюваної ємності включеного в неї конденсатора. Схеми таких приладів багато в чому аналогічні схемам омметрів і мегомметрів.

Мікрофарадметри можуть мати послідовну або паралельну схему вимірювання. Послідовна схема (рис. 1.4) застосовується для вимірювання ємностей середніх значень (приблизно від 100 пФ до 10 мкФ). Напруга U частоти F підводиться від джерела до ланцюга, в який послідовно включені конденсатор опорної ємності C_0 , випробуваний конденсатор C_x і мікро- (або мілі) амперметр змінного струму mA . Перед початком вимірювань при короткому замиканні вхідних затискачів (що еквівалентно $C_x = \infty$) реостатом R встановлюють в ланцюзі мікроамперметра mA струм повного відхилення I_n ; це забезпечується при виборі ємності опорного конденсатора

$$C_0 \geq I_n(2 * \pi * F * U). \quad (1.6)$$

При підключенні конденсатора C_x струм через мікроамперметр знизиться до деякого значення I_x , тим меншого, чим менше ємність C_x , що дозволяє забезпечити вимірювач шкалою з відмітками значень вимірюваних ємностей. Градууювальна характеристика приладу не залежить від частоти і форми кривої напруги живлення і приблизно визначається формулою

$$I_x/I_n \approx C_x/(C_o + C_x). \quad (1.7)$$

Аналогічно змінюється і похибка вимірювань: найменша в середині шкали, вона зростає до її краях. Середині шкали відповідає ємність $C_x \approx C_o$, а діапазон вимірювань обмежується значеннями $0,1 C_o$ і $10 C_o$. Необхідна напруга живлення визначається з умови

$$U \geq I_n/(2 * \pi * F * C_o). \quad (1.8)$$

Наприклад, при $I_n = 1$ мА, $F = 50$ Гц і $C_o = 20000$ пФ джерело живлення повинен забезпечувати напругу $U \geq 160$ В, але якщо частота коливань джерела $F = 1000$ Гц, то потрібна напруга живлення знижується до 8-10 В.

Для вимірювання ємностей в широкому діапазоні мікрофарадметр повинен мати кілька меж вимірювань, які доцільно ставити середніми значеннями шкали C_o при перехідному коефіцієнті N , кратному 10.

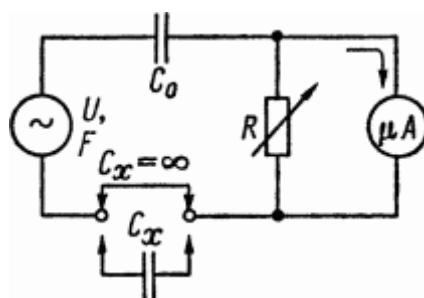


Рисунок 1.4 - Послідовна схема мікрофарадметра з вимірником струму

Найбільш зручним джерелом живлення мікрофарадметра є мережа змінного струму частотою 50 Гц, що дозволяє за допомогою малогабаритного трансформатора отримати будь-яку потрібну напругу. Високе значення останньої необхідно лише на межах з найменшими ємностями C_o . Високовольтне живлення допустимо включати лише після розряду конденсатора C_o і приєднання до схеми випробуваного конденсатора. Для замикання вхідних

затискачів з метою встановлення стрілки вимірювача на позначку «∞» бажано використовувати кнопку. Конденсатори C_o і C_x повинні бути розраховані на робочу напругу, що не менше випробувального. Для запобігання пошкодженню вимірювача в разі пробою конденсатора C_o , останній доцільно складати з двох послідовно включених конденсаторів, кожний ємністю $2C_o$. Можливо також включення в ланцюг живлення обмежувального резистора з опором, в 5-10 разів меншим ємнісного опору конденсатора C_o .

Для розширення діапазону вимірювань в бік більших значень C_o на початку зазвичай зменшують в N раз напруга живлення (поки воно не досягне одиниць вольт), використовуючи відводи від обмоток силового трансформатора або за допомогою резистивного дільника напруги. Перехід до меж з ще більшим значенням C_o може супроводжуватися зниженням чутливості індикатора за допомогою його шунтування. Верхня межа вимірюваних ємностей зазвичай не перевищує 1-10 мкФ, оскільки при опорі конденсатора C_o , який можна порівняти з внутрішнім опором індикатора і ланцюга живлення, сильно зростає похибка вимірювань.

При розширенні діапазону вимірювань в бік малих значень C_o для отримання прийнятних значень напруги живлення U схему доводиться виконувати від внутрішнього або зовнішнього генератора - джерела напруги підвищеної частоти F в тисячі герц. При цьому необхідно вживати заходів до усунення впливу власних ємностей схеми і монтажу.

Схема мікрофарадметра по рис. 1.4 діятиме і при заміні опорного конденсатора C_o на опорний резистор R_o . У цьому випадку вбрання середнє значення C_o шкали вимірювання ємностей буде досягатися при опорі

$$R_o \approx (4 * U^2 / I_n^2 - 1 / (2 * \pi * F * C_o)^2)^{0,5} \quad (1.9)$$

Такий прилад можна одночасно використовувати і як омметр з послідовною схемою для наближеного виміру (на частоті F) активних опорів за умови виконання відліку за спеціальною шкалою, схожої зі шкалою ємностей, але зворотного розташування.

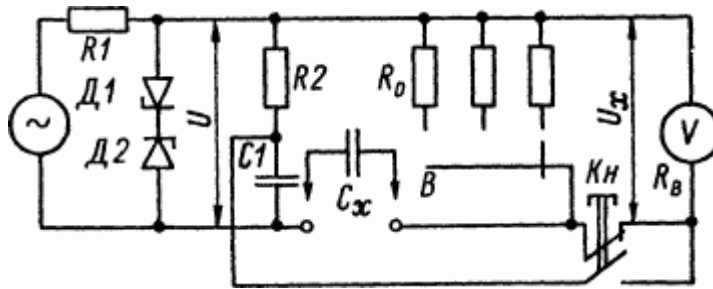


Рисунок 1.5 - Послідовна схема багатограничного мікрофарадметра з вимірником напруги

При наявності електронного вольтметра змінного струму з великим вхідним опором $R_в$ за основу мікрофарадметра може бути прийнята схема, наведена на рис. 1.5. Змінна напруга U , стабілізована ланцюжком $R1, D1, D2$ і рівна приблизно межі вимірювання U_n вольтметра V , при замиканні вхідних затискачів впливає на вольтметр. Регулюванням чутливості останнього домагаються відхилення стрілки його вимірювача до кінця шкали. При включенні в схему випробуваного конденсатора C_x утворюється діляник напруги R_o, C_x , з якого до вольтметра підводиться напруга U_x , тим менше, чим менше ємність C_x . Обране середнє значення C_o шкали ємностей буде досягатися при опорі $R_o \approx 1 / (11 * F * C_o)$. Перемиканням резисторів R_o різних номіналів здійснюється зміна меж вимірів ємностей. Мінімально можливе значення ємності C_o обмежується гранично допустимим значенням опору $R_o \approx 0,1 R_o$. Наприклад, при $R_o = 1 \text{ МОм}$ і частоті $F = 50 \text{ Гц}$ отримуємо ємність $C_o \approx 1 / (11 * F * R_o) = 1820 \text{ пФ}$.

Мікрофарадметр в розглянутому режимі його роботи має крайні позначки шкали ємностей «0» і «∞». Однак якщо використовувати в приладі чутливий мілівольтметр з межею вимірювання $U_n \ll U$, що допускає короточасну випадкову перевантаження до напруги, рівного U , то верхні межі вимірювання приладу можуть бути обмежені обраними значеннями ємностей C_n , яким повинні відповідати опору

$$R_o \approx U_n / (U * 2 * \pi * F * C_n) ; \quad (1.10)$$

при цьому значно розширюється робочу ділянку шкали. У даному випадку при допустимому опорі $R_o = 1 \text{ МОм}$, частоті $F = 50 \text{ Гц}$ і відношенню напруг $U_n/U = 1/30$ отримуємо $C_n \approx 100 \text{ пФ}$, що дозволяє проводити вимірювання ємностей від 10 пФ і більш. Якщо порядок вимірюваної ємності C_x невідомий, то перемикачем

В слід спочатку встановити межу вимірювань найбільших ємностей, при якому можлива перевантаження вольтметра обмежується через зростання падіння напруги на резисторі R_1 .

У мікрофарадметрі з обмеженими межами вимірювання перед початком вимірювань необхідно проводити калібрування приладу. У схемі на рис. 1.5 для цієї мети служить ланцюжок R_2, C_1 . При натисканні кнопки K_n з конденсатора C_1 на вхід вольтметра подається напруга, при якому стрілка його вимірювача повинна відхилитися до кінця шкали (або до певної мітки на шкалі), чого домагаються регулятором чутливості. Зазвичай беруть R_2 рівним опору R_o одного з меж вимірювання, а C_1 рівній ємності C_n того ж межі.

На рис. 1.6, а представлений один з варіантів паралельної схеми мікрофарадметра. При вільних вхідних затискачах (що еквівалентно ємності $C_x = 0$) регулюванням чутливості вольтметра V домагаються відхилення стрілки його вимірювача до кінця шкали. Включення в схему конденсатора C_x призводить до того, що напруга на вольтметрі, спочатку рівна U_n , знижується до значення U_x , тим меншого, чим більше ємність C_x . Градувальна характеристика мікрофарадметра визначається формулою

$$U_x/U_n \approx C_o/(C_o + C_x), \quad (1.11)$$

аналогічною формулою, яка визначає градувальну характеристику послідовних схем омметром.

Вхідний опір вольтметра R в і частота струму живлення F обмежують вибір опорної ємності конденсатора C_o , що визначає середнє значення шкали, умовою

$$C_o \geq 1,5/(F \cdot R_e) . \quad (1.12)$$

Наприклад, при $R_e = 1$ МОм і $F = 50$ Гц отримуємо $C_o \geq 30000$ пФ, тобто прилад виявляється придатним для вимірювання лише порівняно великих ємностей, але не електролітичних. При високочастотному джерелі живлення можливе зниження допустимих значень C_o до сотень пікофарад, проте похибка вимірювань може виявитися великою, якщо не враховувати вхідну ємність вольтметра.

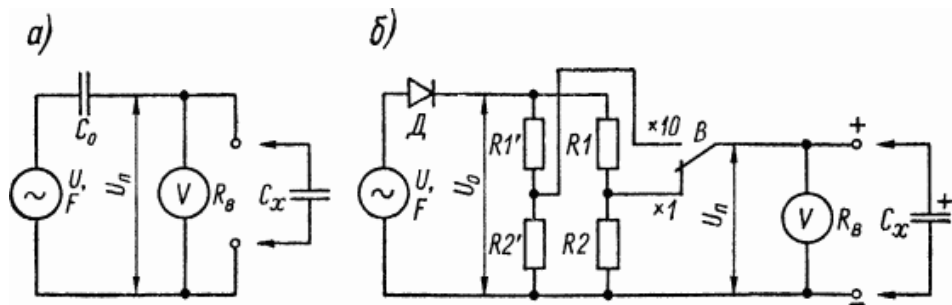


Рисунок 1.6 – Паралельні схеми мікрофарадметрів

Для вимірювання ємностей електролітичних конденсаторів придатна схема на рис. 1.6, б. Завдяки включенню діода Д на ділянку напруги R1, R2 діє пульсуюча напруга U_o . При $C_x = 0$ з резистора R2 на вольтметр V (він може бути порівняно низькоомним, наприклад випрямним) подається напруга повного відхилення U_n . Включення конденсатора C_x призводить до зниження напруги на вольтметрі. При обраному середньому значенні шкали ємностей C_o і частоті $F = 50$ Гц необхідні значення опорів ділянки напруги визначаються формулами:

$$R1 = U_o / (U_n * 180 * C_o); \quad (1.13)$$

$$R2 = R1 * U_n (U_o - U_n). \quad (1.14)$$

Зміна меж вимірювань здійснюється за допомогою використання декількох подільників напруги з однаковим коефіцієнтом ділення U_o / U_a , але різними значеннями опорів R1 і R2. Вольтметр змінного струму V повинен мати закриту схему входу, інакше напругу на нього слід подавати через електролітичний конденсатор великої ємності.

Всі розглянуті схеми мікрофарадметрів дозволяють вимірювати ємності конденсаторів з похибкою 5-10%, а іноді і більше. Виконати їх шкалу на основі розрахунку градуовальної характеристики не завжди вдається внаслідок впливу різних важко прогнозованих факторів, наприклад внутрішніх опорів джерела живлення і вимірювальних приладів, нелінійності шкали напружень вольтметра і т. п. тому при регулюванні і градуюванні мікрофарадметрів необхідно використовувати магазини ємностей або набори конденсаторів з допусками по ємності не більше 5%.

Мікрофарадметри з рівномірною шкалою. Мікрофарадметр з рівномірною шкалою може бути виконаний за схемою, аналогічною схемами ємнісних частотомерів, в принципі відрізняючись від останніх лише тим, що об'єктом вимірювань є не частота, а ємність. Дія таких приладів базується на

вимірюванні середнього значення струму заряду або розряду конденсатора, що перезаряджається напругою відомої частоти.

На рис. 1.7, а, наведена схема вимірювального блоку мікрофарадметра, що живиться імпульсною напругою U прямокутної форми. Під час дії імпульсу через діод D відбувається заряд конденсатора C_x до максимальної напруги U_m . В інтервалі між імпульсами конденсатор розряджається через вимірник (електромагнітний мікроамперметр) I до початкової напруги U_n . У сталому режимі при частоті повторення входних імпульсів f і їх амплітуді $U_n = U_m - U_n$ середнє значення струму, що протікає через вимірювач $I_x = C_x U_n f$. При фіксованих значеннях U_n і f вимірювач можна забезпечити рівномірною шкалою з відліком в значеннях C_x відповідно до формули

$$C_x = I_x / (U_n f). \quad (1.15)$$

Граничне значення вимірюваних ємностей

$$C_n = I_u / (U_n f),$$

де I_i - струм повного відхилення вимірювача. Для згладжування пульсацій і усунення коливань стрілки вимірювача служить конденсатор C , опір якого при частоті f має бути значно меншим опору R_u вимірювача.

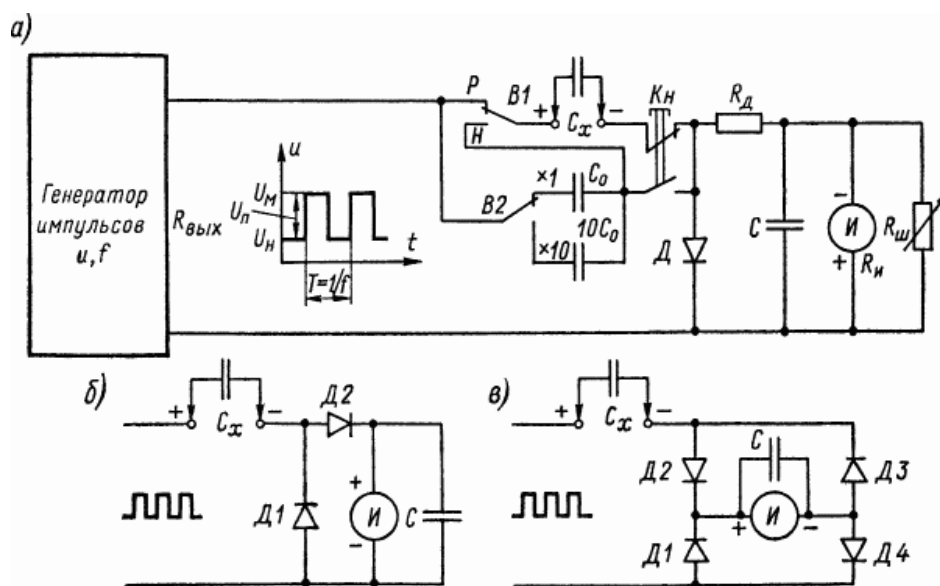


Рисунок 1.7 – Схеми вимірювальних блоків мікрофарадметрів з рівномірною шкалою

Результати не зміняться, якщо вимірювач включити в ланцюг зарядного струму послідовно з діодом Д2 (рис. 1.7, б); тоді розрядний струм конденсатора C_x буде замикатися через діод Д1. При вимірі малих ємностей іноді застосовують двухнапівперіодну схему включення вимірювача (рис. 1.7, в). У цьому випадку через вимірювач протікають і зарядний і розрядний струми, що дозволяє отримати необхідну межу вимірювань при напрузі U_n або частоті f , вдвічі менших, ніж в схемах з однонапівперіодним включенням вимірювача.

Межі вимірювань приладу задаються значеннями C_n і для їх забезпечення при перемиканні меж змінюють частоту повторення імпульсів джерела живлення, яка визначається формулою

$$f = I_u(U_n C_n) . \quad (1.16)$$

Перед початком вимірювань на кожному межі повинно проводитися калібрування мікрофарадметра, для чого до нього натисканням кнопки Кн приєднують конденсатор ємністю $C = C_n$ (рис. 1.7, а); при цьому домагаються відхилення стрілки вимірювача до кінця шкали за допомогою плавного регулювання частоти f , амплітуди імпульсів U_n або чутливості вимірювача (наприклад, за допомогою шунтуючого реостата $R_{ш}$). Оскільки шкала приладу рівномірна, то похибка вимірювання ємностей в основному визначається похибкою підбору опорної ємності C_o , відхилення якої від необхідного номіналу (C_n) не повинно перевищувати 1 ... 5%.

Для отримання правильних результатів вимірювань необхідно, щоб за один період вхідного напруги і конденсатор C_x встигав повністю зарядитися і розрядитися (в межах напруг $U_m - U_n$). Найлегше це забезпечується при прямокутній формі вхідних імпульсів і належному виборі частоти їх повторення f .

Як відомо, в ланцюзі, що складається з елементів R і C, тривалість заряду (розряду) конденсатора C до значення прикладеного до цього ланцюга постійної напруги визначається постійної часу $\tau = RC$ і практично не перевищує 5τ . Для того щоб заряд (розряд) закінчувався протягом напівперіоду $T/2$ напруги частоти f , необхідно виконання умови

$$5RC = 5 \tau \leq T/2 = 1/(2*f), \quad (1.17)$$

яка задовольняється при частоті

					ЕЛІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм..	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

$$f \leq 1/(10 \cdot RC). \quad (1.18)$$

Беручи максимально можливий опір ланцюгів заряду і розряду $R=10$ кОм (з урахуванням вихідного опору $R_{вих}$ генератора імпульсів), отримуємо практичну формулу для вибору частоти повторення імпульсів (в кілогерцах):

$$f \leq 10^4 / C_n \quad (1.19)$$

(де C_n - в пікофарадах). В останній умові часто приймають знак рівності. Тоді верхнім межах вимірювань C_n - 100, 1000, 10 000 пФ і 0,1 мкФ будуть відповідно відповідати частоти $f = 100, 10, 1$ і $0,1$ кГц.

Необхідна амплітуда імпульсів (в вольтах):

$$U_n \geq 0,1 \cdot I_u$$

(де I - в мікроамперах). Наприклад, при роботі з вимірювачем, що має струм повного відхилення $I_i = 100$ мкА, потрібно амплітуда $U_n \geq 10$ В.

Опір резистора R_d (рис. 1.7, а) береться таким, щоб опір ланцюга вимірника $R_d + R_i$ значно перевищувало (принаймні, в десятки разів) прямий опір діода D ; в той же час він не повинен збільшувати загальний опір кола розряду понад допустимого значення (10 кОм). Якщо обидві умови не вдається одночасно задовольнити, то резистор R_d замінюють діодом, пропускає струм розряду; при цьому вимірювач виявляється включеним за схемою на рис. 1.7, б. При розрахунку приладу враховують також характер вихідного опору $R_{вих}$ генератора імпульсів, який в залежності від схеми генератора може бути постійним, регульованим або навіть нелінійним (великим під час дії імпульсу і малим в інтервалі між імпульсами).

Мікрофарадметри розглянутого типу зазвичай мають верхні межі вимірів C_n не менше 100 пФ через труднощі генерування прямокутних імпульсів з високою частотою повторення і впливу паразитних зв'язків. Труднощі виникають і при розширенні діапазону вимірювань в бік великих ємностей. Наприклад, при виборі верхніх значень меж $C_n = 1$ і 10 мкФ, потрібно збуджувати схему імпульсами з частотами повторення відповідно 10 і 1 Гц, однак при цьому відлік по вимірювачу стає неможливим через сильні вібрації його стрілки, які не вдається усунути збільшенням ємності конденсатора C . При вимірі великих ємностей вимірювальну схему зазвичай живлять імпульсами з частотою

повторення 50 Гц (їх легко отримати перетворенням напруги мережі змінного струму). Останнє веде до зростання розрядного струму, що викликає відхилення стрілки вимірювача на всю шкалу, до декількох міліампер. Комутація ланцюгів заряду і розряду повинна автоматично керуватися вхідними імпульсами.

Крім рівномірної шкали ємностей, мікрофарадметри можуть мати нерівномірну шкалу з діапазоном показань від 0 до ∞ , подібну шкалами паралельних схем омметром. Характер шкали (рівномірна - Р, нерівномірна - Н) в схемі на рис. 1.7, а, визначається установкою перемикача В1. У положенні останнього «Н» випробуваний конденсатор C_x включається послідовно з опорним конденсатором C_o , ємність якого задає межа вимірювань приладу і приблизно відповідає середині його нелінійної шкали.

Рівномірна шкала вимірювання ємностей може бути отримана і деякими іншими методами. Так, якщо до виходу мультівібратора підключити диференціюючий ланцюжок R, C_x , то середня напруга імпульсів однієї полярності, що знімаються з резистора R , виявляється пропорційною ємності C_x . Для роботи в такому приладі потрібно чутливий мілівольтметр постійного струму. Межі вимірювань можуть задаватися опорами резистора R . При частоті повторення імпульсів $f = 100$ кГц були отримані верхні межі вимірювання ємностей $C_n = 10$ і 100 пФ.

Вимірювання ємностей методом порівняння (заміщення). Даний метод базується на порівнянні дії, що здійснюється вимірюваною ємністю C_x і відомою ємністю C_o на режим вимірювальної схеми.

Найпростіша схема вимірювань, в якій ємності C_x і C_o порівнюються за значенням їх опору змінному струмі, наведена на рис. 1.8. При включенні конденсатора C_x потенціометром R встановлюють в ланцюзі струм, зручний для відліку або контролю міліамперметром змінного струму mA або іншим низькоомними індикатором. Потім замість конденсатора C_x приєднують до схеми магазин ємностей або зразковий (опорний) конденсатор змінної ємності і зміною його ємності C_o домагаються колишнього показання індикатора. Це буде мати місце при $C_o = C_x$. Похибка вимірювань залежить від чутливості індикатора і похибки відліку ємності C_o ; вона може бути отримана рівній приблизно 1% і менше.

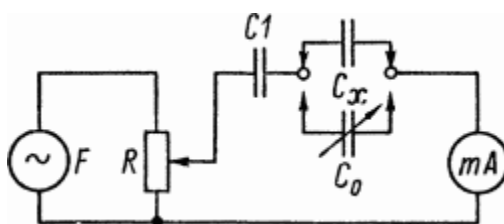


Рисунок 1.8 - Схема вимірювання ємностей

При вимірі ємностей понад методом порівняння 5000 пФ схему вимірів можна живити від мережі змінного струму частотою 50 Гц. Для вимірювання менших ємностей необхідний генератор, що працює на більш високих частотах. У всіх випадках для забезпечення безпеки індикатора в ланцюг слід включати обмежувальний конденсатор (С1) або резистор.

Метод порівняння в різних варіантах широко застосовується в мостових і резонансних схемах вимірювання ємностей. Він може бути реалізований і в мікрофарадметрах, розглянутих вище, при істотному зниженні похибки вимірювань.

1.3 Методика вимірювання ємності та ESR конденсаторів

Еквівалентний послідовний опір (ESR), як один із значущих паразитних параметрів електролітичних конденсаторів, в останні роки набув широкої популярності серед ремонтників електронної апаратури. Вимірювачі та пробники ESR для багатьох майстрів стали приладом першої необхідності поряд з тестером або мультиметром.

Збільшення ESR конденсатора на кілька Ом, а іноді на кілька десятків часток Ома, може бути причиною непрацездатності приладу, в якому він встановлений, що іноді неможливо виявити існуючими вимірювачами ємності, не здатними враховувати інші параметри конденсатора.

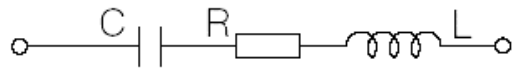
Зазвичай в ремонтній практиці не потрібно особливої точності у вимірюванні ESR, тому відчутна похибка пробників частіше не повинна викликати занепокоєння при знаходженні несправних елементів, а визначення стану конденсатора пробником може спрощуватися до оцінки його якості за принципом - придатний або не придатний для роботи в конкретному вузлі пристрою.

Але, слід зазначити, для конденсаторів, що працюють при великих імпульсних струмах, наприклад, в фільтрах перетворювачів, іноді потрібно більш об'єктивна оцінка якості, а похибка в десяті і навіть соті частки Ома може мати суттєве значення.

На рисунку 1.9 можна побачити, що в діапазоні робочих частот перетворювачів (декількох десятків кГц) реактивний опір конденсатора великої ємності і паразитного індуктивності в послідовному ланцюзі мають значення на

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм..	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

порядок менше ESR і повного опору змінному струмі (імпедансу). Отже, практично весь струм, який в імпульсі може досягати десятків ампер, буде виділяти активну потужність на опорі (ESR), розігріваючи діелектрик і електроліт конденсатора.



$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

- Z - Полное сопротивление переменному току - импеданс
- R - Эквивалентное последовательное сопротивление ESR
- L - Эквивалентная последовательная индуктивность ESL
- C - Собственная ёмкость конденсатора
- X_L - Реактивное сопротивление L
- X_C - Реактивное сопротивление C

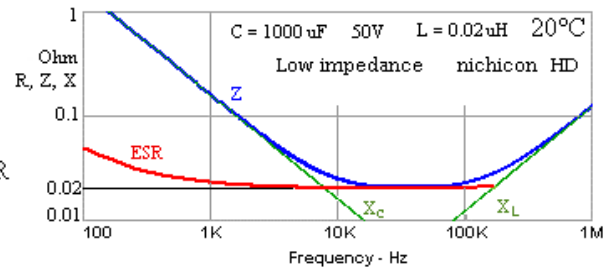


Рисунок 1.9 – Еквівалентна схема і параметри конденсатора

Тангенс кута втрат, що вказується в технічній документації виробників електролітичних конденсаторів для частоти 120 Гц (типове значення 0.1-0.22), втрачає свою актуальність на робочих частотах перетворювачів ППП і для конденсаторів фільтрів їх вторинних випрямлячів буде на порядки більше.

Для роботи в таких режимах виробники виготовляють низькоімпедансні конденсатори (Low impedance) і вказують для них значення імпедансу, виміряного на частоті 100 кГц для кожного номіналу в таблицях.

Значення активної складової (ESR) тоді можна обчислити за формулою $R = \sqrt{(Z^2 - X^2)}$.

Наприклад, для конденсатора Jamicon 1000uF 25V серії WL значення Z вказано 0.04 Ом, з огляду на його реактивний опір $X_C = 0.0016$ Ом для зазначеної частоти, можна порахувати значення ESR. У міліомах це буде приблизно 39.97 мОм, що практично не відрізняється від значення $Z = 40$ мОм.

Тангенс кута втрат для даного випадку R / X_C складе $39.97 / 1.6$ приблизно 25. Паразитна індуктивність тут в розрахунках не використовується, але в окремих випадках вона може мати суттєве значення.

Більшість популярних і застосовуваних в ремонтній практиці приладів і пробників ESR засновані на вимірі повного опору змінному струмі на частоті 40 - 100 кГц. На частотах цього порядку для електролітичних конденсаторів великих номіналів такі прилади покажуть значення, максимально близькі до величини ESR, яка складе основну частину імпедансу на цих частотах.

Якщо порахувати час заряду для двох фіксованих значень напруги U_1 і U_2 , взявши значення U_2 удвічі більшим U_1 , розрахунок ємності буде таким:

$$C = I \frac{t_2 - t_1}{U_2 - U_1} = I \frac{t_2 - t_1}{U_1} \quad (1.22)$$

Порахувати U_R для обчислення ESR можна кількома способами, наприклад, склавши рівняння прямої по двох точках і знайти координату Y для нульового значення X , або геометрично, виходячи зі співвідношення сторін подібних трикутників.

Активний опір конденсатора (ESR) в такому випадку складе:

$$ESR = \frac{U_1 (t_2 - 2t_1)}{I (t_2 - t_1)} \quad (1.23)$$

Для реалізації такого методу немає необхідності в застосуванні АЦП, порогові значення напруг для управління таймером встановлюються компараторами, а математичні обчислення ємності і ESR виробляються мікроконтролером з виведенням інформації на рідкокристалічний дисплей.

У деяких подібних конструкціях для вимірювання ESR використовується більш простий, але менш точний спосіб.

Проводиться вимір рівня напруги U_R за допомогою АЦП в початковий момент часу.

Незважаючи на те, що вимірювальний імпульс досить короткий (1-2 мкс), конденсатори меншою ємності встигають зарядитися до більшого значення, ніж конденсатори великої ємності, що створює деяку похибку у вимірі ESR різних номіналів конденсаторів.

Слід враховувати, що ESR, виміряний постійним струмом, є відносним показником якості електролітичного конденсатора.

Значущою складовою ESR є діелектричні втрати, які істотно змінюються зі зміною частоти змінного струму.

Існують більш складні і точні методики і способи вимірів, засновані на аналізі зсуву фаз в конденсаторі. В цьому випадку ESR визначиться добутком імпедансу і тангенса кута втрат.

1.4 Постановка задачі проектування

Метою даного проекту є розробка пристрою вимірювання параметрів конденсаторів.

Пристрій має виконувати наступні функції:

- Вимірювання ємності конденсатора;
- Вимірювання еквівалентного послідовного опору конденсатора;
- Відображення показань на дисплеї пристрою.

Для виконання поставлених задач необхідно:

- Розробити алгоритм роботи пристрою вимірювання параметрів конденсаторів.
- Розробити структурну та функціональну схеми пристрою вимірювання параметрів конденсаторів;
- Провести вибір елементної бази та розробити принципову електричну схему пристрою вимірювання параметрів конденсаторів;
- Розробити програмне забезпечення.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ВУЗЛІВ І БЛОКІВ ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРІВ

2.1 Розробка алгоритму роботи

Відповідно до технічного завдання пристрій, що розробляється в дипломному проекті повинен проводити вимірювання параметрів конденсаторів – ємності та ESR. Проведення вимірювань та розрахунків вказаних параметрів проводиться за методикою, що описана в п. 1.3 літературного огляду.

Схему алгоритму роботи пристрою вимірювання параметрів конденсаторів представлено на рисунку 2.1.

Пристрій має лінійний алгоритм роботи. Першим етапом при увімкненні пристрою є початкова установка параметрів, при якій проводиться ініціалізація пристрою і всіх його блоків, відбувається завантаження з енергонезалежної пам'яті пристрою коефіцієнтів та калібровочних значень. Пристрій переходить у режим очікування.

Для початку вимірювання користувач повинен підключити досліджуваний конденсатор до клем пристрою і натисканням клавіші подати команду початку вимірювання. Після початку вимірювання вмикається джерело струму, що заряджає конденсатор до моменту працювання компараторів 1 та 2. Пристрій проводить відрахунок часу t_1 , поки напруга на конденсаторі досягне значення U_1 і спрацює компаратор 1, після чого заряджання конденсатора продовжується і проводиться відрахунок часу t_2 , поки напруга на конденсаторі досягне значення U_2 і спрацює компаратор 2. Після подачі сигналу від компаратора 2, джерело струму вимикається, заряджання конденсатора відповідно припиняється, і відкривається транзисторний ключ, через який проводиться розряджання конденсатора.

За одержаними значеннями U_1 , U_2 , t_1 , t_2 проводиться розрахунок параметрів конденсатора – ємності та еквівалентного послідовного опору. Розраховані значення виводяться на дисплей, а пристрій вимірювання параметрів конденсаторів переходить в режим очікування.



Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритму роботи пристрою вимірювання параметрів конденсаторів

2.2 Розробка структурної схеми

Структурна схема пристрою вимірювання параметрів конденсаторів представлена на рис. 2.2.

Мікроконтролер є основним блоком, що проводить відлік проміжків часу заряджання конденсатора, розрахунок параметрів, виконує подачу керуючих сигналів на транзисторний ключ і джерело струму, виводить дані на дисплей.

Джерело живлення подає напругу живлення на електронні компоненти схеми – мікроконтролер, компаратори, дисплей та на всі інші електричні кола.

Джерело струму виконує функцію подачі стабільного струму визначеного номіналу для зарядження конденсатора. Джерело струму керується сигналами від мікроконтролера.

Джерело опорної напруги задає два значення опорної напруги U_1 та U_2 , що використовуються в схемах порівняння при заряджанні конденсатора.

Компаратори порівнюють значення напруги на досліджуваному конденсаторі з еталонними значеннями з джерела опорної напруги і генерують на своїх виходах високий логічний рівень, якщо напруга на конденсаторі вище еталонної U_1 чи U_2 .

Транзисторний ключ призначений для розрядження конденсатора після проведення вимірювань, керується сигналами мікроконтролера.

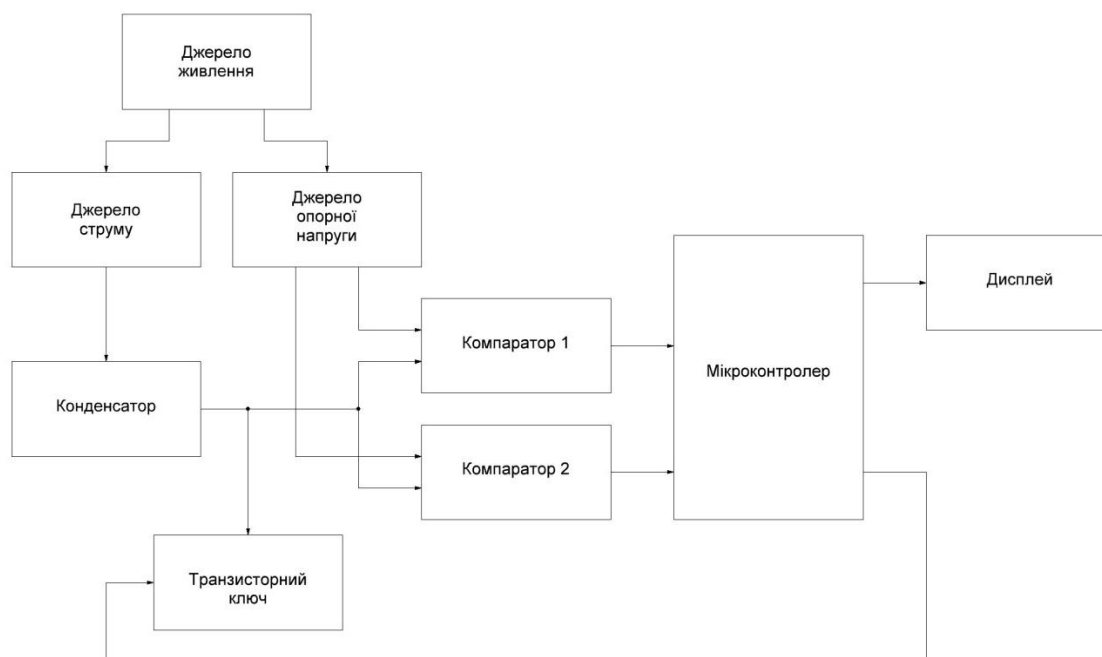


Рисунок 2.2 – Структурна схема пристрою вимірювання параметрів конденсаторів

2.3 Розробка функціональної схеми

Відповідно до структурної схеми рис.2.2 було розроблено функціональну електричну схему пристрою вимірювання параметрів конденсаторів, що представлена на рис.2.3.

Оскільки функціями пристрою є проведення математичних розрахунків, вимірювання проміжків часу, подача керуючих сигналів на транзисторні ключі, виведення даних на дисплей, то даний пристрій доцільно проектувати на базі мікроконтролера.

Функціональне призначення виводів мікроконтролера наступне:

Iout1, Iout2 – виходи керування подачею струму від джерел струму для заряджання конденсатора.

INT0, INT1 – входи подачі сигналу переривання від компараторів при перевищенні рівнів опорної напруги 2,4 В та 1,2 В значенням напруги на конденсаторі.

LCD – виходи ліній даних та керування дисплеєм.

Start – вхід керування запуском процесу вимірювання.

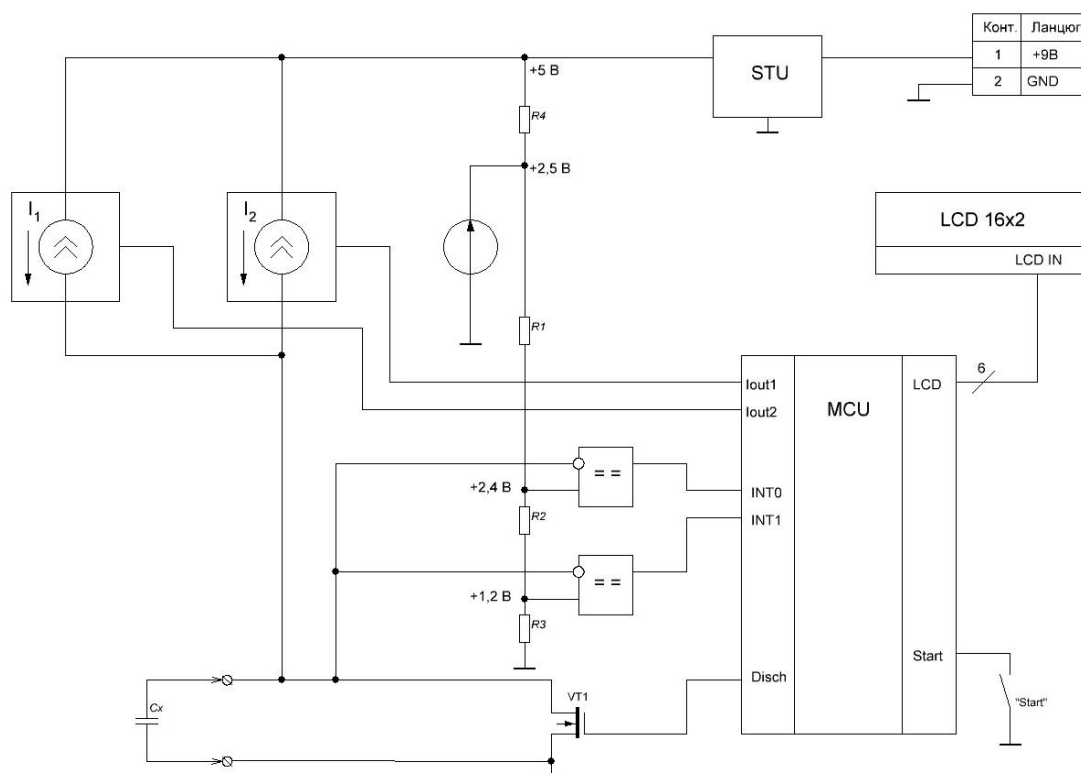


Рисунок 2.3 – Функціональна схема пристрою вимірювання параметрів конденсаторів

Disch – вихід керування транзисторним ключем VT1, призначеного для розрядження конденсатора.

Джерело опорної напруги – призначене для подачі стабільної опорної напруги на входи компараторів – 2,4 В та 1,2 В. Значення напруги задаються за допомогою резистивного дільника.

Джерела струму - призначені для генерації стабільного струму I_1 та I_2 , яким заряджається конденсатор. Вибір активного джерела виконується подачею керуючого сигналу від мікроконтролера. У пристрої передбачається використання двох джерел зі струмом $I_1=0,5$ мА та $I_2=8$ мА для зарядження конденсаторів малої та великої ємності, відповідно.

Компаратори – виконують функцію подачі сигналів на входи переривань мікроконтролера у випадку, якщо напруга на конденсаторі перевищує відповідне значення опорної напруги на компараторі – 2,4 В та 1,2 В. При цьому на лінії INT0 та INT1 мікроконтролера подається низький логічний рівень.

Дисплей - призначений для індикації розрахованих значень ємності та ESR. Доцільно використовувати символний дисплей 16x2 для повноцінного відображення.

Джерело живлення – перетворює вхідну напругу від зовнішнього джерела, наприклад батареї, літій-іонного акумулятора чи мережевого адаптера живлення в напругу живлення, необхідну для роботи електронних компонентів схеми.

2.4 Вибір елементної бази

Вибір елементної бази пристрою вимірювання параметрів конденсаторів ґрунтується на необхідності забезпечення високої точності роботи та чутливості аналогової частини пристрою – компараторів, джерел струму, джерела опорної напруги. Від роботи цих складових найбільшою мірою залежить точність вимірювання параметрів конденсаторів. Тому повинні бути використані комплектуючі з малим рівнем шумів, малим розкидом параметрів. Мікроконтролер в свою чергу для виконання математичних розрахунків повинен мати високу тактову частоту, кількість виводів, якої вистачить для виконання функцій керування та виведення даних на дисплей.

Вибір мікроконтролера. Мікроконтролер з одного боку повинен відповідати переліченим технічним вимогам для забезпечення функціоналу пристрою, з іншого боку – мати невисоку вартість та бути надійним. Для

					ЕлІТ 6.171.00.10.389 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

використання в даному проекті обрано мікроконтролер ATTINY 2313. Зовнішній вигляд та призначення виводів мікроконтролера показані на рис. 2.4.

Характеристики мікроконтролера ATTINY 2313:

- Напруга живлення (V_{CC} / V_{DD}): 2.7 V ~ 5.5 V
- Розмір RAM пам'яті: 128 байт
- Розмір EEPROM: 128 байт
- Тип програмованої пам'яті: FLASH
- Розмір програмованої пам'яті: 2KB (1K x 16)
- Число портів введення / виведення: 18
- Периферія: Brown-out Detect / Reset, POR, PWM, WDT
- Інтерфейси підключення: SPI, UART / USART
- Тактова частота: 20MHz
- Розрядність ядра: 8-Bit
- Процесор: AVR

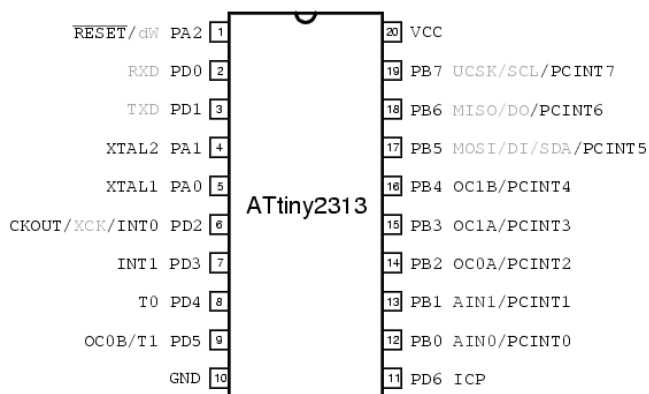


Рисунок 2.4 – Призначення виводів та зовнішній вигляд мікроконтролера ATTINY 2313

Вибір компаратора. Використовуються компаратори серії LM319D - це два прецизійних високошвидкісних компаратора в одному корпусі. Серія LM319 відрізняється більш швидким відкликом ніж LM311, більш високою швидкістю, більш широким діапазоном робочої напруги. Це робить LM319 більш універсальним, ніж пристрої більш старого покоління, такі як LM311. Зовнішній вигляд та призначення виводів компаратора LM319D показані на рис. 2.5.

Типові характеристики LM319D:

- Повністю працездатний при однополярній напрузі живлення 5В;
- Час затримки 80нс при ± 15 В;
- Максимальний вхідний струм 1мкА.

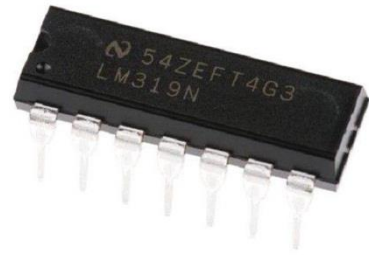
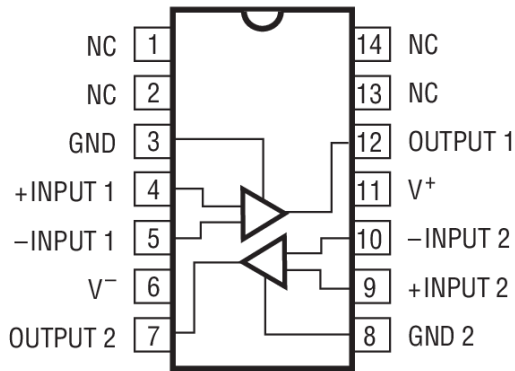


Рисунок 2.5 – Призначення виводів та зовнішній вигляд мікросхеми LM319D

Вибір підсилювача вхідної напруги. Підсилювач вхідної напруги зібраний на здвоєному операційному підсилювачі TLC2272. Це прецизійний Rail-to-Rail операційний підсилювач, виконаний за допомогою технології LinCMOS. Його типові характеристики:

- Низький рівень шуму: $9 \text{ nV} / \text{Hz}$ на $f = 1 \text{ kHz}$;
- Ультранизький вхідний струм: 1 pA ;
- Смуга пропускання підсилювача з одиничним посиленням: $2,2 \text{ MHz}$;
- Висока швидкість наростання вихідної напруги: $3.6\text{-V} / \mu\text{s}$;
- Низька напруга зсуву: $950 \mu\text{V}$ максимум при температурі 25°C .

Призначення виводів та зовнішній вигляд мікросхеми TLC2272 показані на рис. 2.6.

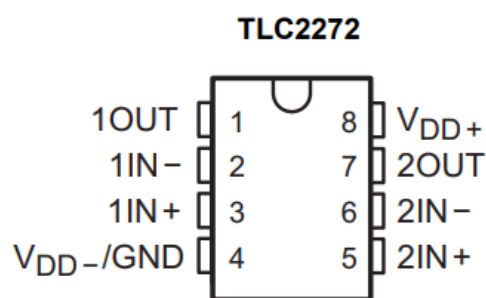


Рисунок 2.6 – Призначення виводів та зовнішній вигляд мікросхеми TLC2272

Вибір дисплея. Для повноцінного відображення значень вимірюваних параметрів та інформативності даних в проекті використовується символічний дисплей з вбудованим знакогенератором WH1602, що має наступні характеристики:

- Інформаційне поле: 16x2
- Розмір символа: 5x8 точок, включаючи курсор
- Вбудований контролер: ST7066 або еквівалентний
- Логічні рівні: 5V (доступно для 3V)
- Інтерфейс: 6800, на вибір SPI / I2C (RW1063 IC)
- Розмір інформаційного поля: 56 мм x 11 мм.

Призначення виводів та зовнішній вигляд дисплея WH1602 показані на рис. 2.7.

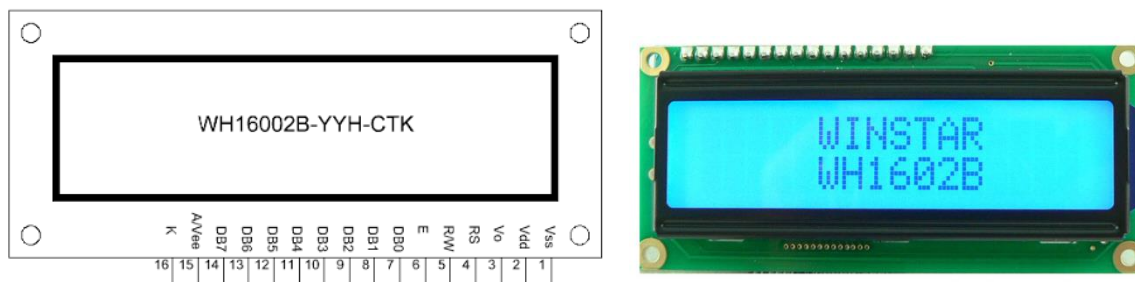


Рисунок 2.7 – Призначення виводів та зовнішній вигляд дисплея WH1602

2.5 Розробка схеми електричної принципової

Підключення мікроконтролера. Схема підключення мікроконтролера ATTINY 2313 показана на рис. 2.8.

Мікроконтролер розміщено в корпусі DIP20. Напряга живлення мікроконтролера складає 5В, до виводу живлення контролера 20 (VCC) підключений конденсатор ємністю 0,1мкФ для усунення високочастотних перешкод на по живленню. Від кварцового резонатора ZQ1 частотою 20 МГц подається тактовий сигнал на виводи 4 (XTAL1) та 5 (XTAL2), виходи кварцового резонатора підключені на «землю» через конденсатори C8 та C9 ємністю 22 пФ. Вивід 1 (RES) підтягнутий на шину живлення +5В через резистор R20 номіналом 10 кОм. Вивід 10 (GND) підключений до загального проводу «землі». До виводу 11 (PD6) підключено клавішу керування пристроєм.

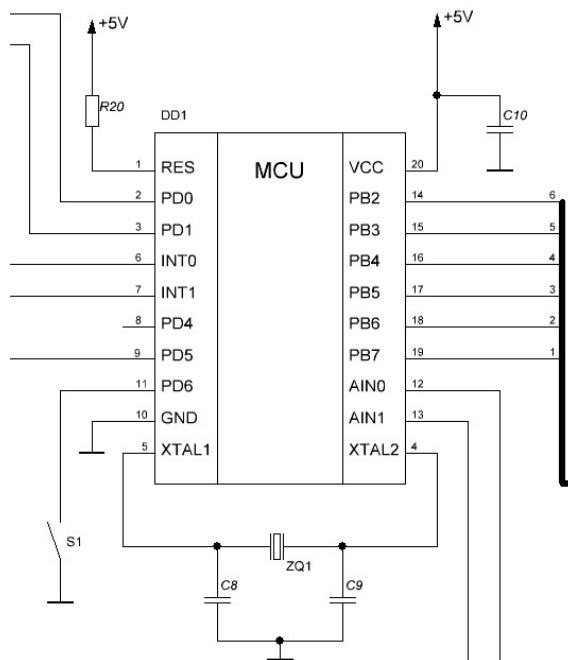


Рисунок 2.8 – Схема підключення мікроконтролера АТТІNY 2313

На виводи 6 (INT0) та 7 (INT1) подаються сигнали від компараторів. До виводу 9 (PD5) підключений польовий транзистор, через який розряджається досліджуваний конденсатор. Виводи 12 (AIN0) та 13 (AIN1) підключені до виходу операційного підсилювача DA1.2 для контролю рівня вхідного сигналу, та в резистивний дільник для контролю значення опорної напруги. Виводи 14-19 (PB2 – PB7) підключені до рідкокристалічного дисплею для виведення інформації.

Підключення схеми живлення. Схема живлення пристрою представлена на рис. 2.9. На вхід схеми живлення подається напруга живлення +12 В від зовнішнього джерела через роз'єм XS1. Напруга живлення мікроконтролера та дисплея складає +5В. Двополярне живлення потрібне для підсилювача на операційному підсилювачі та компараторів. Оскільки негативна напруга потрібна тільки для зсуву порогів перемикавання від нуля, вона не обов'язково має бути симетрично позитивної, тим більше і операційний підсилювачі і компаратори повноцінно працюють при однополярному живленні. Тому була обрана схема формування штучної середньої точки за допомогою дільника вихідної напруги та операційного підсилювача DA1.1. Напругу позитивного плеча стабілізовано за допомогою мікросхеми лінійного стабілізатора напруги LD1117-5.0 складає +5В, напруга негативного плеча буде залежати від поданої напруги живлення за вирахуванням падіння напруги на стабілізаторі DA2 і переході емітер-колектор транзистора VT3. Повністю симетричним двополярне живлення стане при вхідній напрузі живлення +12В.

На виході схеми живлення до шин +5В та -5В і «землі» підключені електролітичні конденсатори С1 та С2 ємністю 10 мкФ та керамічні конденсатори С3 та С4 ємністю 0,1 мкФ для фільтрації низькочастотної та високочастотної перешкод по живленню.

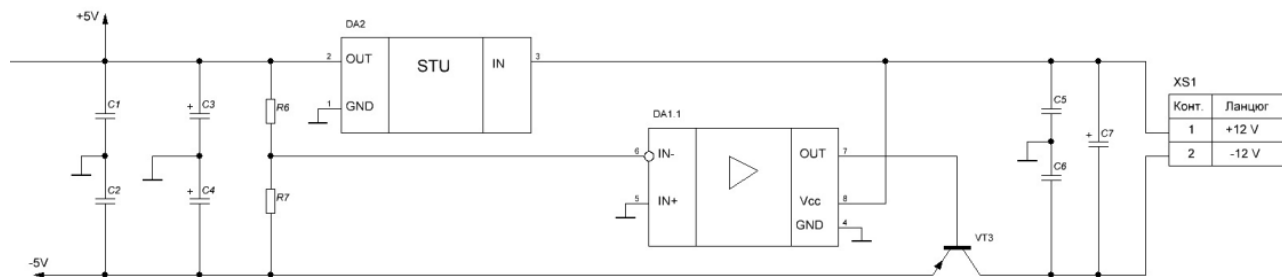


Рисунок 2.9 – Схема живлення пристрою

Підключення джерел струму та джерела опорної напруги. Схема підключення джерел стабільного струму та джерела опорної напруги представлена на рис. 2.10. У залежності від ємності досліджуваного конденсатора заряджання може проводитися струмом 0,5 мА (для конденсаторів малої ємності) та 8,0 мА (для конденсаторів великої ємності). З цією метою в схемі передбачено два джерела стабільного струму, що мають аналогічні схеми. Джерело (генератор) струму містить транзисторний ключ VT1, на базу якого через струмообмежуючий резистор R3 номіналом 2,2 кОм подається керуючий сигнал від мікроконтролера при увімкненні низького логічного рівня на порту PD1 мікроконтролера. Значення вихідного струму джерела задається резистором R1 та стабілітроном VD1 в нерегульованому включенні.

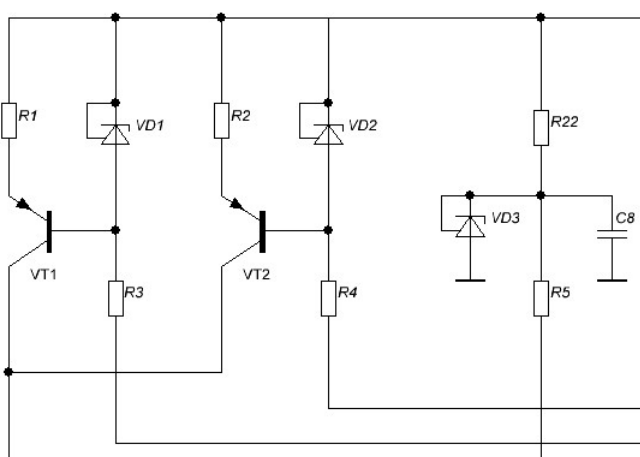


Рисунок 2.10 – Схема підключення джерел струму та джерела опорної напруги

Джерело опорної напруги для формування порогових рівнів компараторів виконане на основі стабілітрона VD3 TL431 у нерегульованому включенні, при

цьому напруга на катоді стабілітрона складає +2,5 В. Струм стабілітрона обмежується резистором R22.

Підключення вхідного кола пристрою. Вхідне коло пристрою вимірювання параметрів конденсатора складається із захисних елементів, підсилювача, двох компараторів та транзисторного ключа. Схема підключення вхідного кола представлена на рис. 2.11.

Досліджуваний конденсатор Сх підключається до вхідних клем X1 та X2. Вхідне захисне коло реалізовано на захисному діоді VD4, зустрічно включених діодах VD5 та VD6, резисторі R8. Вхідна напруга подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача DA1.2, коефіцієнт підсилення $K=8$ задається резисторами R9 та R10. Напруга з виходу підсилювача подається на інвертуючі входи компараторів DA3.1 та DA3.2 через резистори R11 та R12. Порогові рівні спрацювання компараторів задаються за допомогою резистивного дільника, виконаного з резисторів R14, R15, R16. Опорна напруга +2,5 В на резистивний дільник подається від джерела стабільної напруги. Виходи компараторів підтягнуті на шину живлення +5 В резисторами R18 та R19, сигнал з виходів компаратора подається на входи переривання мікроконтролера INT0 та INT1. Живлення компаратора двополярне і складає +5 В та -5В.

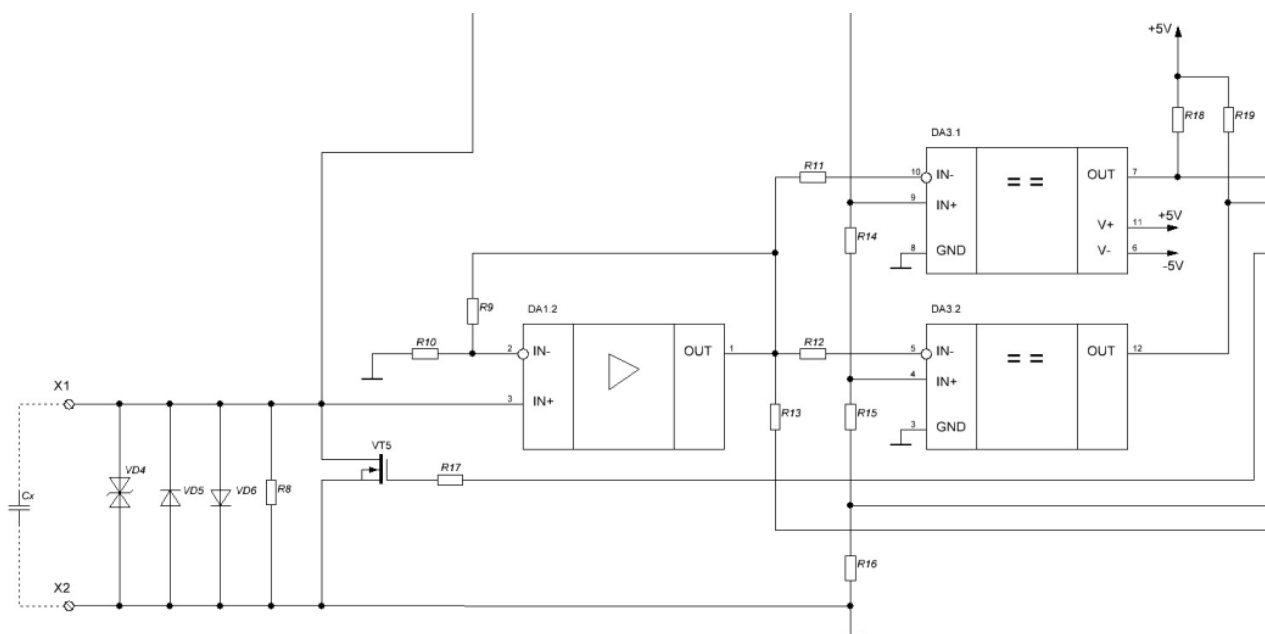


Рисунок 2.11 – Схема підключення вхідного кола пристрою

Польовий транзистор VT5 призначений для розряджання досліджуваного конденсатора. Керуючий сигнал від мікроконтролера подається на затвор транзистора через резистор R17.

Підключення рідкокристалічного символьного дисплея. Схема підключення рідкокристалічного символьного дисплея WH1602 представлена на рис. 2.12. Живлення дисплея складає +5В. Лінії даних D5-D8 та керування RS та E підключаються до портів PB2 – PB7 мікроконтролера. Контрастність зображення задається за допомогою змінного резистора 10 кОм, що підключений до виводу W0.

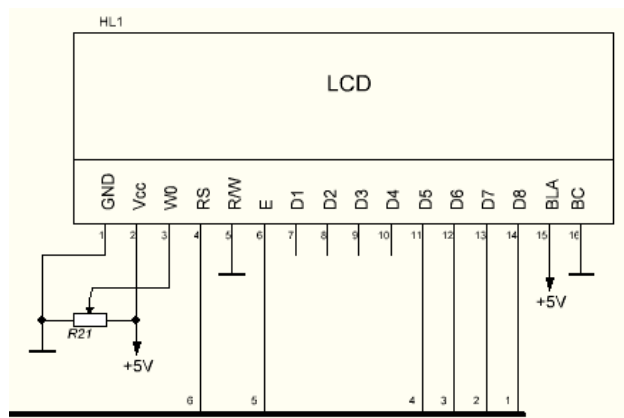


Рисунок 2.12 – Схема підключення символьного дисплея

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Лістинг коду програми

```
//  
// Title      : Capmeter main file  
// Target MCU : Atmel ATTINY 2313  
//  
#include <avr/interrupt.h>  
#include <avr/io.h>  
#include <avr/eeprom.h>  
#include "lcd.h"  
  
/* Hardware IO abstraction macros */  
  
/* AIN0 out also discharges cap */  
#define DISCHARGE_ON  DDRD |= (1<<6)  
#define DISCHARGE_OFF DDRD &= ~(1<<6)  
  
/* Range control */  
#define HIGH_RANGE PORTD |= (1<<5); DDRD |= (1<<5)  
#define LOW_RANGE  DDRD &= ~(1<<5); PORTD &= ~(1<<5)  
#define PULLDOWN_RANGE PORTD &= ~(1<<5); DDRD |= (1<<5)  
  
/* Threshold selection */  
#define ADMUX_LOW  1  
#define ADMUX_MEDIUM 2  
#define ADMUX_HIGH 3  
  
/* Timer abstraction */  
#define TIMER_VALUE TCNT1  
#define TIMER_START TCCR1B = (1<<CS10)  
#define TIMER_STOP  TCCR1B = 0  
  
/* Led abstraction */  
#define LED_ON  PORTD &= ~(1<<4)  
#define LED_OFF PORTD |= (1<<4)  
  
/* Button abstraction */  
#define BUTTON_PUSHED (!(PIND & (1<<2)))  
  
char decades[5] = {'p','n','u','m',' '};
```

```

char lcdbuffer[32];
unsigned short volatile timer_highword;

/* Program states: */
#define STATE_IDLE 0
#define STATE_LOW_THRESH 1
#define STATE_HIGH_THRESH 2
#define STATE_DONE 3
// #define STATE_BUTTONDOWN 4

unsigned char volatile measure_state;

/* The following is the value the analog compare interrupt will set ADMUX: */
unsigned char volatile set_admux;

/* The rangemode defines the measurement operation */
#define RANGE_HIGH_THRESH 1 /* If missing: threshold low */
#define RANGE_HIGH 2 /* If missing: range low */
#define RANGE_AUTO 4
#define RANGE_OVERFLOW 8 /* If set: cap was out of range */
unsigned char rangemode = RANGE_AUTO;

/* Constants defining measuring operation: */
#define EXTRA_DISCHARGE_MS 100 /* Extra discharging that is done even after a threshold
is crossed */
#define LOW_RANGE_TIMEOUT 500 /* At autorange, when to go to high range */
#define HIGH_RANGE_TIMEOUT 10000 /* When to give up completely */

/* Menu system */
#define MENU_SPEED 800 /* ms each menu item is shown */

#define MENU_ITEMS 6
char *menu_item[MENU_ITEMS] = {"Range: Auto","Range: Low ","Range: High","Calibrate:
Zero","Calibrate: 1 uF","Save calibration"};

/* Teoretisk beregning af capacitans

$$t = \tau * \ln((V_0 - V_{inf}) / (V - V_{inf}))$$

De forskellige threshold værdier, og deres forhold til tau:
V threshold t fra 0 til x: fra low til x:
0.88 low tau * 0.1918910 tau * 0.240725 (=K1)
1.77 medium tau * 0.4326161 tau * 0.554222 (=K2)
2.65 high tau * 0.7461127

```

```

5.04 top
R1 = 1.588.000 ohm
R2 = 1752 ohm
t = tclocks / fcpu
tau * K = t
tau = R*C      =>
C = tau / R = t / (K * R) = tclocks / (K * R * fcpu)
  = tclocks / (0.240725 * 1588000 * 8000000) = tclocks * 3.270e-13 = tclocks * 21430 / 65536 * 1E-
12
  = tclocks / (0.554222 * 1588000 * 8000000) =          tclocks * 9308 / 65536 * 1E-12
// // // alternatively
// // // = tclocks / (0.240725 * 1588000 * 8000000) = tclocks * 5.96856E-13 = tclocks * 53575 /
65536 * 4 * 1E-13
// // // = tclocks / (0.554222 * 1588000 * 8000000) = tclocks * 5.96856E-13 = tclocks * 46540 /
65536 * 2 * 1E-13
// // //
  = tclocks / (0.240725 * 1752 * 8000000) = tclocks * 19423 / 65536 * 1E-9
  = tclocks / (0.554222 * 1752 * 8000000) = tclocks * 8437 / 65536 * 1E-9
*/

/*
Calibration:
  C = tclocks * Kc / 65536 * 1E-12
  Kc = C * 65536 * 1E12 / tclocks
  = CALIB_CONST / tclocks
  Low range:          C = 1uF
  CALIB_CONST = C * 65536e12   = 256000000 (*256)
High range:
  CALIB_CONST = C * 65536e9    = 65536000
*/

#define CALIB_LOW 256000000 /* for 1uF reference prescale: >> 8 */
#define CALIB_HIGH 65536000 /* for 1uF reference */

/* Calibration values are stored in eeprom in the following format:
Starting from byte 1: (not 0)
'C' 'D'
<data>
*/
#define EEPROM_HEADER 1
#define EEPROM_DATA 3

```



```

unsigned short calib[4] = {21430, 9308, 19423, 8437};
//unsigned short calib[4] = {53575, 46540, 19423, 8437};
unsigned long calib_offset[4] = {0,0,0,0};

```

```

#define SIZE_OF_CALIB 8
#define SIZE_OF_CALIBOFFSET 16

```

```

/* This macro fractionally multiplies 16.16 bit with 0.16 bit both unsigned,
   shifting the result two bytes right and returning 16.16 bit.

```

```

Result is 16.16 bit unsigned */

```

```

#define MUL_LONG_SHORT_S2(x,y,result) asm volatile( \
    "clr %C0"    "\n\t" \
    "clr %B0"    "\n\t" \
    "clr %A0"    "\n\t" \
    "mul %A1, %A2" "\n\t" \
    "mov %D0, r1" "\n\t" \
    "mul %A1, %B2" "\n\t" \
    "add %D0, r0" "\n\t" \
    "adc %A0, r1" "\n\t" \
    "adc %B0, %C0" "\n\t" \
    "mul %B1, %A2" "\n\t" \
    "add %D0, r0" "\n\t" \
    "adc %A0, r1" "\n\t" \
    "adc %B0, %C0" "\n\t" \
    "mul %B1, %B2" "\n\t" \
    "add %A0, r0" "\n\t" \
    "adc %B0, r1" "\n\t" \
    "adc %C0, %C0" "\n\t" \
    "mul %C1, %A2" "\n\t" \
    "add %A0, r0" "\n\t" \
    "adc %B0, r1" "\n\t" \
    "brcc L_dl1%=" "\n\t" \
    "inc %C0"    "\n\t" \
    "L_dl1%="    "\n\t" \
    "clr %D0"    "\n\t" \
    "mul %C1, %B2" "\n\t" \
    "add %B0, r0" "\n\t" \
    "adc %C0, r1" "\n\t" \
    "brcc L_dl2%=" "\n\t" \

```

```

"inc %D0"    "\n\t" \
"L_dl2%="   "\n\t" \
"mul %D1, %A2" "\n\t" \
"add %B0, r0" "\n\t" \
"adc %C0, r1" "\n\t" \
"brcc L_dl3%=" "\n\t" \
"inc %D0"    "\n\t" \
"L_dl3%="   "\n\t" \
"mul %D1, %B2" "\n\t" \
"add %C0, r0" "\n\t" \
"adc %D0, r1" "\n\t" \
"clr r1"     "\n\t" \
    : "&r" (result)          \
    : "r" (x), "r" (y)      \
    )

```

/* Interrupt implementation */

SIGNAL(SIG_COMPARATOR)

```

{
if (measure_state == STATE_LOW_THRESH) {
    /* We just got low threshold interrupt, start timer and set high threshold */
    TIMER_START;
    ADMUX = set_admux;
    measure_state = STATE_HIGH_THRESH;
}
else if (measure_state == STATE_HIGH_THRESH) {
    /* High threshold interrupt, verify it, then stop timer */
    if (ACSR & (1<<ACO)) {
        TIMER_STOP;
        measure_state = STATE_DONE;
    }
}
}

```

SIGNAL(SIG_OVERFLOW1)

```

{
    /* Timer 1 counts the low 16 bits, this interrupt updates the high 16 bits */
    timer_highword++;
}

```

// SIGNAL(SIG_INTERRUPT0)

// {

```

// /* Hardware interrupt 0 is a buttonpush */
// measure_state = STATE_BUTTONDOWN;
// }

/*
The measure function does the cyclus of a capacitance measurement
Returned is the number of clocks measured

The function relies on flags in the global rangemode value
Input flags:
RANGE_AUTO
RANGE_HIGH
RANGE_HIGH_THRESH

Output flags:
RANGE_HIGH (if RANGE_AUTO)
RANGE_OVERFLOW
*/

void eeprom_read(void)
{
if (eeprom_read_byte((void*)EEPROM_HEADER) != 'C')
return;

if (eeprom_read_byte((void*)EEPROM_HEADER+1) != 'D')
return;

eeprom_read_block(calib_offset, (void*)EEPROM_DATA, SIZE_OF_CALIBOFFSET);
eeprom_read_block(calib, (void*)EEPROM_DATA + SIZE_OF_CALIBOFFSET,
SIZE_OF_CALIB);
}

void eeprom_write(void)
{
eeprom_write_byte((void*)EEPROM_HEADER, 'C');
eeprom_write_byte((void*)EEPROM_HEADER+1, 'D');

eeprom_write_block(calib_offset, (void*)EEPROM_DATA, SIZE_OF_CALIBOFFSET);
eeprom_write_block(calib, (void*)(EEPROM_DATA + SIZE_OF_CALIBOFFSET),
SIZE_OF_CALIB);
}

```

```

long measure(void)
{
    unsigned short i;
    measure_state = STATE_IDLE;

    /* Discharge cap until below low threshold + some extra */
    ADMUX = ADMUX_LOW;
    PULLDOWN_RANGE; /* Use range signal as pull down */

    while(1) {
        /* Enable comperator and check value */
        DISCHARGE_OFF;
        ms_spin(1);

        /* This value must be checked in every loop */
        if (BUTTON_PUSHED)
            return 0;

        if (!(ACSR & (1<<ACO)))
            break;

        /* Discharge for a while */
        DISCHARGE_ON;
        ms_spin(10);
    }

    DISCHARGE_ON;
    ms_spin(EXTRA_DISCHARGE_MS);

    /* Prepare: reset timer, low range */
    TIMER_STOP;
    TIMER_VALUE = 0;
    timer_highword = 0;
    LOW_RANGE;
    measure_state = STATE_LOW_THRESH;

    /* High or medium threshold */
    if (rangemode & RANGE_HIGH_THRESH)
        set_admux = ADMUX_HIGH;
    else
        set_admux = ADMUX_MEDIUM;
}

```

```

/* Apply step */
LED_ON;
DISCHARGE_OFF;
if (rangemode & RANGE_AUTO) {

    /* Autorange: See if low range produces something before LOW_RANGE_TIMEOUT ms */
    i = 0;
    while ((measure_state == STATE_LOW_THRESH) && (++i < LOW_RANGE_TIMEOUT)) {
        ms_spin(1);

        /* This value must be checked in every loop */
        if (BUTTON_PUSHED)
            return 0;
    }

    if (i >= LOW_RANGE_TIMEOUT) {
        /* low range timeout, go to high range (better discharge a little first) */
        DISCHARGE_ON;
        ms_spin(EXTRA_DISCHARGE_MS);
        DISCHARGE_OFF;
        HIGH_RANGE;
        rangemode |= RANGE_HIGH;
    }
    else {
        /* low range was ok, set flag accordingly */
        rangemode &= ~RANGE_HIGH;
    }
}
else if (rangemode & RANGE_HIGH) {
    HIGH_RANGE;
}

/* Wait for completion, timing out after HIGH_RANGE_TIMEOUT */
i = 0;
while ((measure_state != STATE_DONE) && (++i < HIGH_RANGE_TIMEOUT)) {
    ms_spin(1);

    /* This value must be checked in every loop */
    if (BUTTON_PUSHED)
        return 0;
}

```

```

/* Done, discharge cap now */
LOW_RANGE;
DISCHARGE_ON;
LED_OFF;

if (measure_state != STATE_DONE)
    rangemode |= RANGE_OVERFLOW;
else
    rangemode &= ~RANGE_OVERFLOW;
measure_state = STATE_IDLE;
return ((unsigned long)timer_highword << 16) + TIMER_VALUE;
}

/*
This function deals with value according to the global rangemode flag,
and shows the result on LCD.
LCD should preferably be cleared.
Routine is rather slow
*/

void calc_and_show(long value)
{
    unsigned char b;
    unsigned long l;

    if (rangemode & RANGE_AUTO)
        lcd_string("Auto ",0);
    else
        lcd_string("Force",0);

    if (rangemode & RANGE_HIGH)
        lcd_string(" high",16);
    else
        lcd_string(" low ",16);

    if (rangemode & RANGE_OVERFLOW) {
        /* Todo - this smarter */
        lcdbuffer[0] = ' ';
        lcdbuffer[1] = ' ';
        lcdbuffer[2] = ' ';
        lcdbuffer[3] = 'E';
        lcdbuffer[4] = 'r';
    }
}

```

```

lcdbuffer[5] = 'r';
lcdbuffer[6] = 'o';
lcdbuffer[7] = 'r';
lcdbuffer[8] = ' ';
lcdbuffer[9] = 0;
}
else {
    /* Select calibration value */
    b = rangemode & 3;

    if (calib_offset[b] > value) {
        lcdbuffer[0] = '-';
        value = calib_offset[b] - value;
    }
    else {
        lcdbuffer[0] = ' ';
        value = value - calib_offset[b];
    }

    MUL_LONG_SHORT_S2(value, calib[b], 1);

    b = long2ascii(lcdbuffer+1, 1);

    /* High range shifts 1E3 */
    if (rangemode & RANGE_HIGH)
        b++;

    lcdbuffer[6] = ' ';
    lcdbuffer[7] = decades[b]; /* range = 1 shifts 1E3 */
    lcdbuffer[8] = 'F';
    lcdbuffer[9] = 0;
}

/* Write high threshold in first line, low threshold in second */
if (rangemode & RANGE_HIGH_THRESH)
    b=7;
else
    b=23;

    lcd_string(lcdbuffer,b);
}

```

```

void calibrate_zero(void)
{
    char oldrange = rangemode;
    unsigned long l;
    rangemode = 0;
    l = measure();
    l = measure();
    calib_offset[rangemode] = l;
    rangemode = RANGE_HIGH_THRESH;
    l = measure();
    l = measure();
    calib_offset[rangemode] = l;
    rangemode = oldrange;
}

```

```

void calibrate(void)
{
    char oldrange = rangemode;
    unsigned long value;

    rangemode = 0;
    value = measure();
    value -= calib_offset[rangemode];
    calib[rangemode] = CALIB_LOW / (value>>8) + 1;

    rangemode = RANGE_HIGH_THRESH;
    value = measure();
    value -= calib_offset[rangemode];
    calib[rangemode] = CALIB_LOW / (value>>8) + 1;

    rangemode = RANGE_HIGH;
    value = measure();
    value -= calib_offset[rangemode];
    calib[rangemode] = CALIB_HIGH / value + 1;

    rangemode = RANGE_HIGH | RANGE_HIGH_THRESH;
    value = measure();
    value -= calib_offset[rangemode];
    calib[rangemode] = CALIB_HIGH / value + 1;
    rangemode = oldrange;
}

```



```
/* Hold-down-button menu implementation: */
```

```
char menu(void)
{
    unsigned char i;
    lcd_clear();
    for (i=0; i<MENU_ITEMS; i++) {
        lcd_string(menu_item[i],0);
        ms_spin(MENU_SPEED);
        if (!BUTTON_PUSHED)
            break;
    }

    if (i == MENU_ITEMS) {
        /* Just clear display, if user went out of menu */
        lcd_clear();

        /* Wait for release of button */
        while (BUTTON_PUSHED);
        ms_spin(10);

    }
    else {
        /* Flash selected item */
        lcd_clear();
        ms_spin(MENU_SPEED >> 2);
        lcd_string(menu_item[i],0);
        ms_spin(MENU_SPEED >> 1);
        lcd_clear();
        ms_spin(MENU_SPEED >> 2);

    }

    return i;
}

void init(void)
{
    /* Set datadirections */
    DDRD = (1<<4); /* led output, rest input */
    PORTD &= ~(1<<6); /* AIN0 port must be 0 */
}
```

```

/* Enable button pull up resistor */
PORTD |= (1<<2);

/* Setup timer1 to normal operation */
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
//TIMSK = (1<<TOIE1); //(mega8)
TIMSK1 = (1<<TOIE1); //(mega48/88/168)

/* Setup analog comperator to generate rising edge interrupt */
ACSR = (1<<ACIS0)|(1<<ACIS1)|(1<<ACIE);

/* Setup analog comperator to use ADMUX */
ADMUX = ADMUX_LOW;
//SFIOR |= (1<<ACME);
ADCSRB |= (1<<ACME);
DIDR1 |= (1<<AIN1D)|(1<<AIN0D);

}

int main(void)
{
    unsigned long l;

    init();

    lcd_init();

    eeprom_read();

    asm("sei");
    LED_OFF;
    rangemode = RANGE_AUTO;

    while (1) {
        /* Toggle high/low threshold */
        rangemode ^= RANGE_HIGH_THRESH;
        l = measure();
        if (BUTTON_PUSHED) {
            /* Stop any cap. charging */

```

```

LED_OFF;
LOW_RANGE;
DISCHARGE_ON;

/* Menu implementation */
switch(menu()) {
case 0: /* auto range */
    rangemode |= RANGE_AUTO;
    break;
case 1: /* low range */
    rangemode &= ~(RANGE_AUTO | RANGE_HIGH);
    break;
case 2: /* high range */
    rangemode &= ~RANGE_AUTO;
    rangemode |= RANGE_HIGH;
    break;
case 3:
    calibrate_zero();
    break;
case 4:
    calibrate();
    break;
case 5:
    eeprom_write();
    break;
}

}
else
    calc_and_show(l);
}
}

```

ВИСНОВОК

У даному дипломному проекті розроблено пристрій вимірювання параметрів конденсаторів – ємності та еквівалентного послідовного опору ESR.

У першому розділі роботи було проведено літературний огляд параметрів конденсаторів та методи їх вимірювання. Проведено аналіз існуючих схем та принципів вимірювання ємності конденсаторів, розглянуто математичну модель принципу вимірювання ESR конденсаторів. На основі даних, представлених в літературному огляді виконано постановку задачі проектування.

У другому розділі, розроблено алгоритм роботи, структурну, функціональну та принципову електричну схеми пристрою вимірювання параметрів конденсаторів. Пристрій побудовано на основі мікроконтролера ATtiny 2313, використана сучасна елементна база, яка має високі експлуатаційні характеристики та невисоку вартість.

У третьому розділі було розроблено програмне забезпечення для пристрою вимірювання параметрів конденсаторів.

Розроблений у дипломному проекті пристрій характеризується простотою використання, має широкий діапазон вимірюваних ємностей, доступний у виготовленні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook Electromagnetic: Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement / Edited By John G. Webster, Halit Eren - 2nd Edition. - Boca Raton, CRC Press, 2017. - 1921 p.
2. Imants Matiss / Capacitance Measurement Techniques – a New Challenge. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 224 p.
3. Kutz M. (Ed.) Handbook of Measurement in Science and Engineering. Volume 3. – John Wiley & Sons, Inc., Canada, 2016. — 818 p.
4. Ferri G., Stornelli V., Barile G. Electronic Interfaces for Differential Capacitive Sensors. - Gistrup: River Publishers, 2020. — 150 p.
5. Low Level Measurements Handbook. Precision DC Current, Voltage, and Resistance. - 7th edition. — New York: Textronix, 2014. — 244 p.
6. Pitard F.R. Theory of Sampling and Sampling Practice Boca Raton: CRC Press, 2019. — 727 p.
7. Different approaches for capacitance measurements [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.autolab-instruments.com/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_EC12.pdf
8. Capacitance measurement: Understand and use the right technique to dramatically improve results [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.planetanalog.com/capacitance-measurement-understand-and-use-the-right-technique-to-dramatically-improve-results/>
9. Измеритель емкости на AVR [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://micpic.ru/home/avr-projects/81-izmeritel-emkosti-na-avr.html>
10. ATtiny2313 - Microchip Technology [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2543-AVR-ATtiny2313_Datasheet.pdf
11. Измеритель емкости и ЭПС конденсаторов [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://radioamator.ru/izmereniya/izmeriteli-lcr/274-izmeritel-emkosti-i-eps-kondensatorov>
12. Измеритель емкости и ESR. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://cxem.net/izmer/izmer81.php>

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітка
<u>Конденсатори</u>			
C1,C2	SMD0805 – 0,1 uF± 10%	2	
C3, C4	Tantal B – 10 uF± 10% 16V	2	
C5,C6	SMD0805 – 0,1 uF± 10%	2	
C7	Tant.D – 100 uF± 10% 16V	1	
C8, C9	SMD0805 – 22 pF± 10%	2	
C10, C11	SMD0805 – 0,1 uF± 10%	2	
<u>Мікросхеми</u>			
DA1	TLC2272	1	
DA2	LD1117-3.3	1	
DA3	LM319D	1	
DD1	Attiny 2313	1	
<u>Індикатори</u>			
HL1	WH1602A	1	
<u>Резистори</u>			
R1	SMD0805 – 5,1 кОм ± 1%	1	
R2	SMD0805 – 180 Ом ± 1%	1	
R3, R4, R22	SMD0805 – 2,2 кОм ± 1%	3	
R5, R20	SMD0805 – 10 кОм ± 1%	2	
R6, R7	SMD0805 – 2 кОм ± 1%	2	
R8	SMD0805 – 10 МОм ± 1%	1	
R9	SMD0805 – 6,8 кОм ± 1%	1	
R10, R16	SMD0805 – 1 кОм ± 1%	1	
R11-R13, R17	SMD0805 – 3 кОм ± 1%	3	
R14	SMD0805 – 12 кОм ± 1%	1	
R15	SMD0805 – 11 кОм ± 1%	1	
R18, R19	SMD0805 – 1 кОм ± 1%	2	
R21	3296W – 10 кОм	1	
<u>Кнопки</u>			
S1	Мікрокнопка 6x6x7mm 2pin	1	
<u>Діоди, стабілітрони</u>			
VD1-VD3	TL431	3	
VD4	1.5KE5.0CA	1	
VD5, VD6	S250		
<u>Транзистори</u>			
VT1-VT3	MMBT4403	3	
VT4	P3055LD	1	
<u>Роз'єми</u>			
XS1	Гніздо живлення 5.5x2.5mm	1	
<u>Кварцеві резонатори</u>			
ZQ1	KX-13 20.0 MHz	1	

ЕЛІТ 6.171.00.10.389 ПЕ				
Вим.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.				
Перевір.				
Т. Контр.				
Н. Контр.	Гапич В.М.			
Затверд.	Опанасюк А.С			
Пристрій вимірювання параметрів конденсаторів			Лист.	Лист
Перелік елементів			1	1
СумДУ, гр. ЕС-71				